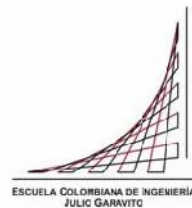


Maestría en Ingeniería Civil

Beneficios del uso de tecnologías sostenibles para el tratamiento de aguas residuales.

Diana María Beltrán Beltrán

Bogotá, D.C., 27 de Julio de 2016



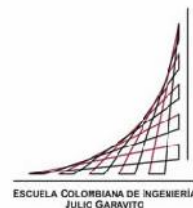
Beneficios del uso de tecnologías sostenibles para el tratamiento de aguas residuales

Tesis para optar al título de magíster en Ingeniería Civil, con énfasis en recursos hidráulicos y medio ambiente

Ingeniero Jairo Alberto Romero Rojas

Director

Bogotá, D.C., 27 de Julio de 2016



La tesis de maestría titulada Beneficios del uso de tecnologías sostenibles para el tratamiento de aguas residuales, presentada por Diana María Beltrán Beltrán, cumple con los requisitos establecidos para optar al título de Magíster en Ingeniería Civil con énfasis en Recursos Hidráulicos y Medio Ambiente.

Director de la tesis

Ingeniero Jairo Alberto Romero Rojas

Jurado

Ingeniero Héctor Matamoros

Jurado

Ingeniera Nury Forero

Bogotá, D.C., 30 de Agosto de 2016

Resumen

Las plantas de tratamiento de aguas residuales son instalaciones vitales para el funcionamiento de una ciudad, pueblo o municipio, en cuanto a la conservación del recurso agua y de la salud pública.

El auge de las tecnologías sostenibles para el tratamiento de las aguas residuales ha sido grande, éstas se han probado alrededor del mundo tanto con tecnologías apropiadas (CEPT, humedales artificiales, filtros de arena, etc.), como con tecnologías sofisticadas (paneles solares, turbinas eólicas y techos verdes, etc.); son aplicables a todo tipo de lugar, dependiendo de las características específicas del cada sitio en cuanto a calidad del agua, terreno disponible y capacidad económica.

Las tecnologías sostenibles aportan un tratamiento efectivo, así como también aprovechamiento de las aguas residuales y de los productos de su tratamiento como recurso (reúso del efluente no potable, reúso del biogás como productor de energía y calor, reúso de la biomasa para compost o para la generación de combustible).

Este trabajo está dirigido a reconocer algunas tecnologías sostenibles existentes y a caracterizar los beneficios prestados por ellas. Los objetivos propuestos se verán en el capítulo 1.

En el capítulo 2 se describen las tecnologías convencionales de tratamiento de aguas residuales. En el capítulo 3 se presentan los criterios aplicados de sostenibilidad y la definición de las tecnologías de tratamiento como apropiadas y sofisticadas. En el capítulo 4 se muestran las principales cualidades de algunas de las tecnologías sostenibles para el tratamiento de aguas residuales. En el capítulo 5 se relaciona algunos casos de tecnologías sostenibles de tratamiento de aguas residuales. Finalmente, en el capítulo 6 se hacen las conclusiones pertinentes.

INDICE GENERAL

Resumen	4
1. INTRODUCCIÓN.....	9
1.1. PROBLEMA:.....	9
1.2. OBJETIVOS:	9
2. TECNOLOGÍAS CONVENCIONALES DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES	10
3. CRITERIOS DE SOSTENIBILIDAD PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES.....	28
3.1. SOSTENIBILIDAD	28
3.2. TECNOLOGÍAS APROPIADAS Y SOFISTICADAS PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES.....	31
4. CUALIDADES DE TECNOLOGIAS SOSTENIBLES DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES.....	39
4.1. PTAR con UASB y Laguna facultativa.	39
4.2. PTAR con UASB y Filtro anaerobio	42
4.3. PTAR con CEPT y Lagunas aireadas.	45
4.4. PTAR con CEPT y Lagunas de estabilización	48
4.5. PTAR con filtro percolador y Bioreactor de membrana.	51
4.6. PTAR con Lodos activados y Bioreactor de membrana.	54
4.7. PTAR con Lagunas de estabilización.....	57
4.8. PTAR con Laguna anaerobia cubierta con geomembrana y Lagunas aireadas.	60
4.9. PTAR con sistema natural de tratamiento.....	63
5. CASOS DE TECNOLOGÍAS DE TRATAMIENTO DE AGUS RESIDUALES SOSTENIBLES.....	66
5.1. Ciudad de Santa Cruz, Bolivia (Orozco & Libhaber, 2012).....	66
5.2. Plantas de tratamiento de aguas residuales en Estados Unidos con Bioreactor de membrana.	67
5.3. San Diego, California Repurificación de agua por Biorreactor de membrana.....	69
5.4. Municipalidad de Ipatinga, Minas Gerais, Brasil (Orozco & Libhaber, 2012)	73
5.5. City Riviera Sao Lourenco, Sao Paulo, Brasil	74
5.6. Ciudad de Nueva York, Estados Unidos	76
5.7. Plantas de aguas residuales que procesan su Biomasa para generar energía.....	76

6. CONCLUSIONES	79
7. REFERENCIAS	81

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Tecnologías para tratamiento de aguas residuales.	11
Tabla 2. Unidades de operación tratamiento preliminar. (Rojas 2002)	13
Tabla 3. Forma de los Sedimentadores Primarios. (CEIM 2006)	16
Tabla 4. Descripción Unidades de operación para el tratamiento biológico anaerobio.	17
Tabla 5. Descripción unidades de operación para el tratamiento biológico aerobio.	18
Tabla 6. Modificaciones o variantes de los lodos activados (Collazos 2008).....	19
Tabla 7. Descripción de los tipos de tratamiento terciario. (Ramalho 1993)	20
Tabla 8. Descripción de las unidades para desinfección de las aguas residuales. (Ramalho 1993)	21
Tabla 9. Composición típica de los lodos. (Metcalf y Eddy 2014).....	22
Tabla 10. Métodos de manejo y procesamiento de lodos (Metcalf y Eddy 2014)	23
Tabla 11. Síntesis de la Triple Vertiente de la sostenibilidad (TBL) (Auriens Arquitectura 2011)	30
Tabla 12. Ejemplos de factores que pueden ser usados para cuantificar la sostenibilidad y la medida específica de ellos. (Leslie Grandy, y otros 2011).....	30
Tabla 13. Tecnologías de combinación de calor y potencia, tecnologías sofisticadas. (Spellman 2013)	35
Tabla 14. Dispositivos usados para recuperar energía de biogás. (Metcalf y Eddy 2014) 37	
Tabla 15. Dispositivos usados para recuperar energía de los contenidos sólidos de las aguas residuales. (Metcalf y Eddy 2014)	37
Tabla 16. Beneficios de la producción y utilización del bio-metano como combustible de transporte. (Shen, y otros 2015)	38
Tabla 17. Ventajas y desventajas de una PTAR con UASB y laguna facultativa.....	41
Tabla 18. Ventajas y desventajas de una PTAR con UASB y filtro anaerobio.....	44
Tabla 19. Ventajas y desventajas de una PTAR con CEPT y lagunas aireadas.....	47
Tabla 20. Ventajas y desventajas de una PTAR con CEPT y lagunas de estabilización. .	50
Tabla 21. Ventajas y desventajas de una PTAR con Filtro Percolador y Bioreactor de Membrana.	53
Tabla 22. Ventajas y desventajas de una PTAR con Lodos Activados y Bioreactor de Membrana.	56
Tabla 23. Ventajas y desventajas de una PTAR con Lagunas de estabilización.	59
Tabla 24. Ventajas y desventajas de una PTAR con Laguna anaerobia cubierta con geomembrana y Lagunas aireadas.....	62
Tabla 25. Ventajas y desventajas de una PTAR con Sistema natural de tratamiento.....	65
Tabla 26. Caudales de trabajo PTAR ciudad de Santa Cruz en Bolivia.	66
Tabla 27. Plantas con Bioreactor de Membrana con usos sostenibles en los Estados Unidos. (Fatta - Kassinos, Dionysiou y Kümmerer 2016)	68
Tabla 28. Autosuficiencia energética a full-escala en plantas de tratamiento de aguas residuales en Estados Unidos, Canadá y Europa. (Shen, y otros 2015)	77

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Esquema general de una PTAR típica. (Vesilind y Rooke 2003).....	10
Figura 2. Ejemplo de serie típica de unidades de operación o tecnologías para el tratamiento de aguas residuales. (Vesilind y Rooke 2003).....	12
Figura 3. Esquema PTAR con Tanque de Igualamiento. (Romero, Tratamiento de Aguas Residuales, Teoría y Diseño 2011)	15
Figura 4. Químicos para la neutralización de las aguas residuales según el tipo. (Romero, Tratamiento de Aguas Residuales, Teoría y Diseño 2011)	15
Figura 5. Esquema básico de tratamiento de lodos (Collazos 2008).....	22
Figura 6. PTAR de Lodos Activados.	24
Figura 7. PTAR con remoción de nitrógeno.	25
Figura 8. PTAR con Zanjonés de Oxidación.	26
Figura 9. PTAR con UASB, filtro percolador y filtración.....	27
Figura 10. Convenciones diagramas de flujo PTAR.....	28
Figura 11. Evaluación de la Triple Vertiente de la Sostenibilidad (TBL) (Leslie Grandy, y otros 2011)	29
Figura 12. PTAR con UASB y Laguna facultativa.	39
Figura 13. PTAR con UASB y filtro anaerobio.....	42
Figura 14. PTAR con CEPT y Lagunas Aireadas.....	45
Figura 15. PTAR con CEPT y Lagunas de Estabilización.	48
Figura 16. PTAR con Filtro percolador y Bioreactor de membrana.	51
Figura 17. PTAR con Lodos activados y Bioreactor de membrana.	54
Figura 18. PTAR con Lagunas de estabilización.....	57
Figura 19. PTAR con Laguna anaerobia cubierta con geomembrana y lagunas aireadas.	60
Figura 20. PTAR con sistema natural de tratamiento.....	63
Figura 21. Diagrama de flujo PTAR Santa Cruz, Bolivia.	66
Figura 22. Proceso cíclico del uso de agua en la ciudad de San Diego California. (San Diego City 2016)	70
Figura 23. Fase 1 Pure Water San Diego, California.....	70
Figura 24. Fase 2 Pure Water San Diego, California	71
Figura 25. Planta Point Loma (City of San Diego 2012)	71
Figura 26. Planta South Bay (City of San Diego 2012).....	72
Figura 27. Planta North city (City of San Diego 2012)	72
Figura 28. Proceso de re purificación de las aguas residuales San Diego, California.	73
Figura 29. Diagrama de flujo y esquema ubicación de las unidades de operación PTAR Ipanema, Brasil.....	74
Figura 30. Diagrama de flujo y esquema ubicación de las unidades de operación PTAR City River Sao Paulo, Brasil.	75

1. INTRODUCCIÓN

1.1. PROBLEMA:

La tecnología para el tratamiento de aguas residuales incluye procesos convencionales como: Cribado, Desarenado-Desengrasado, Sedimentación, Tratamiento biológico, Tratamiento fisicoquímico, etc.; en los cuales el uso de energía y químicos es completamente necesario para garantizar la calidad deseada del efluente. Además, estos procesos convencionales también producen gases y desechos (lodos) que contribuyen con contaminación al medio ambiente.

Con el fin de mitigar la contaminación y el desperdicio de energía, estos procesos convencionales se pueden modificar o reemplazar por otras técnicas de depuración naturales: aplicación sobre la tierra, medios acuáticos, filtros verdes, Infiltración rápida, lechos de arena, lagunas, humedales, etc.; llamadas tecnologías sostenibles para el tratamiento de aguas residuales.

Una de dichas aplicaciones radica en la utilización de los lodos de las plantas de tratamiento de aguas para el compostaje proporcionando un medio orgánico para fertilizar cultivos. En el caso de los gases, como el metano, se pueden usar como bio-combustible y así suplir las pequeñas necesidades de energía que la planta pueda llegar a tener.

Es necesario, por tanto, conocer las características de los tratamientos de aguas residuales basados en tecnologías sostenibles y su aplicabilidad, ventajas y desventajas.

1.2. OBJETIVOS:

Objetivo general:

Conocer algunas de las alternativas propuestas como tecnologías sostenibles de tratamiento de aguas residuales.

Objetivos específicos:

- Conocer diferentes tipos de sistemas de tratamiento de aguas residuales convencionales y con tecnologías sostenibles.
- Presentar las características de dichos sistemas de tratamiento de aguas residuales convencionales y con tecnologías sostenibles.
- Conocer las ventajas y desventajas de los sistemas de tratamiento de tecnologías sostenibles para determinar su factibilidad técnica.
- Conocer casos de tratamiento de aguas residuales con tecnología sostenibles que demuestren la bondad de su implementación.

2. TECNOLOGÍAS CONVENCIONALES DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

Típicamente una planta de tratamiento de aguas residuales se divide en 5 secciones de importancia (Vesilind & Rooke, 2003); el proceso para satisfacer el ideal de cada una de estas secciones puede ser realizado por variadas y diferentes tecnologías o unidades de operación.

Las 5 secciones de importancia son:

- **Tratamiento Preliminar:** generalmente es un tratamiento físico, incluye procesos simples tales como el cribado y el desarenado, el cribado se realiza usualmente con barras; el desarenado se desarrolla generalmente a través de canales con velocidad constante. Se produce la remoción de los sólidos más gruesos y de la arena para evitar daños en los procesos posteriores.
- **Tratamiento Primario:** en esta etapa del tratamiento se remueve el material sólido sedimentable, lo que puede reducir las cargas contaminantes en cantidades notables. Al finalizar este proceso se espera una remoción del 100% de los sólidos sedimentables, entre el 40 y 60% de los sólidos suspendidos totales y finalmente entre el 25 y 40% de la DBO₅.
- **Tratamiento Secundario:** se consigue con procesos biológicos que generan una mayor y más efectiva remoción de la demanda de oxígeno.
- **Tratamiento Avanzado:** es un nombre aplicado a cualquier número de procesos de pulimiento o limpieza, por ejemplo remoción de nutrientes, tal como el fósforo y el nitrógeno, en este caso los procesos pueden ser físicos (Ej.: filtros), biológicos (Ej.: tanques de oxidación), o químicos (Ej.: precipitación del fósforo); y la desinfección con procesos químicos o por radiación.
- **Tratamiento y disposición de sólidos:** consiste en la recolección, estabilización y subsecuente disposición de los desechos producidos por los procesos de las secciones anteriores.

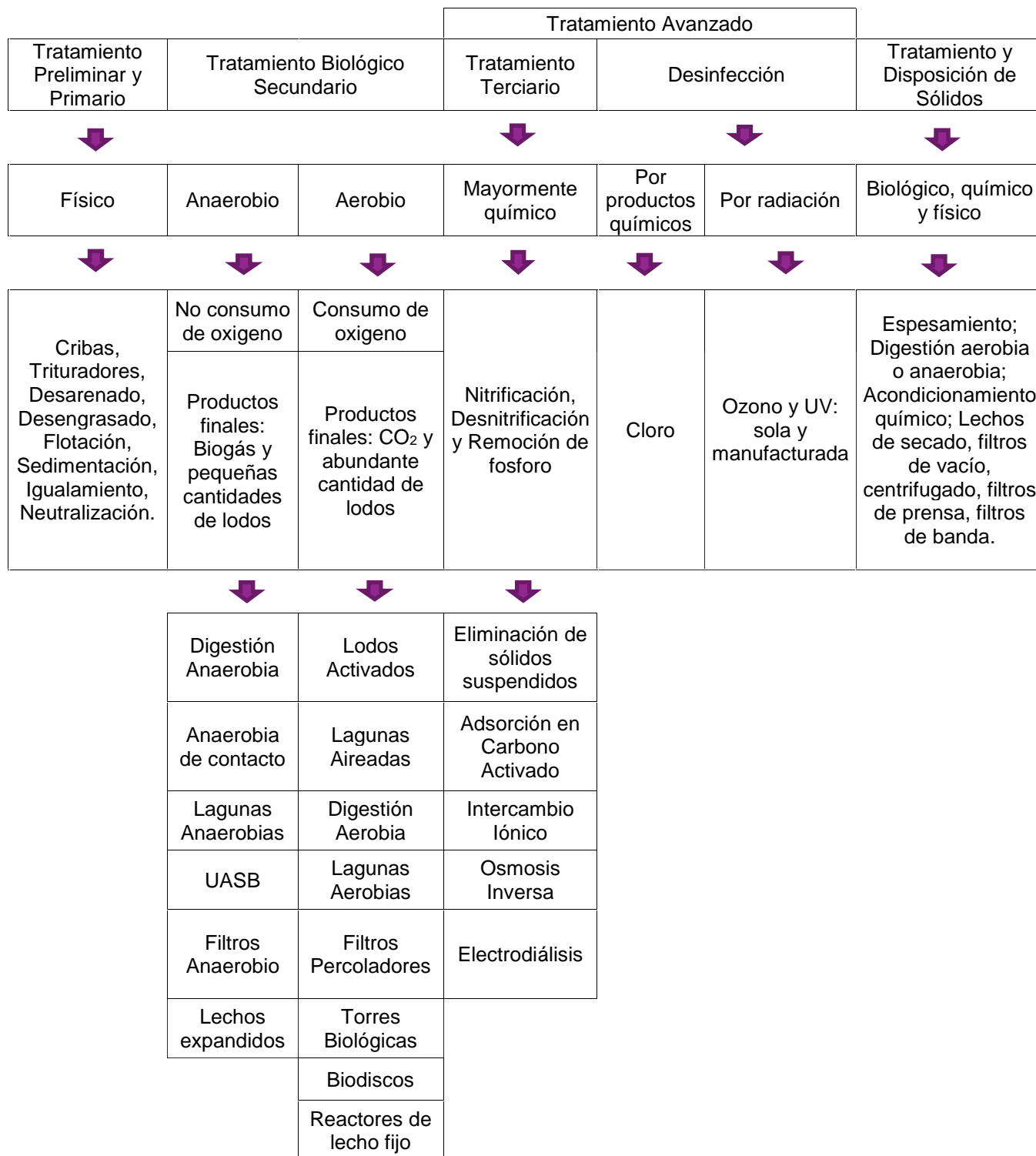
En la figura 1 se incluye el esquema general de la secuencia de tratamiento de aguas residuales.



Figura 1. Esquema general de una PTAR típica. (Vesilind & Rooke, 2003)

En la Tabla 1 se incluyen las tecnologías principales de tratamiento de aguas residuales, que pueden desempeñar las funciones de las diferentes secciones.

Tabla 1. Tecnologías para tratamiento de aguas residuales.



En la figura 2, se muestra un ejemplo de una serie de unidades de operación (tecnologías) que se pueden plantear como de una PTAR típica.



Figura 2. Ejemplo de serie típica de unidades de operación o tecnologías para el tratamiento de aguas residuales. (Vesilind & Rooke, 2003)

A continuación se presenta cada sección de importancia con sus unidades de operación.

Sección de importancia 1: Tratamiento Preliminar

La tabla 2 incluye las unidades convencionales de operación del tratamiento preliminar.

Tabla 2. Unidades de operación tratamiento preliminar. (Rojas, 2002)

PROCESO	OBJETIVO
Cribado: Rejas o tamices	Eliminación de sólidos gruesos
Trituradores	Desmenuzamiento de sólidos
Desarenadores	Eliminación de arenas y gravilla
Desengrasadores	Eliminación de aceites y grasas
Flotación	Eliminación de sólidos menos densos que el agua por ascensión

Cribado, también denominado desbaste o desbrozo, tiene como objetivo remover y retirar de las aguas residuales los sólidos suspendidos de tamaño grande y medio, como por ejemplo: madera, ramas, plástico, raíces, trapos, animales muertos, entre otros, que estas arrastran. La remoción de estas partículas se realiza a través de barras o rejillas, éstas suelen estar instaladas a la entrada del canal de la planta, en varias instalaciones se plantean una serie de rejas gruesas al inicio del canal de entrada y otra serie de rejas finas más adelante para reafirmar la remoción de estos sólidos; la separación o abertura de las rejillas depende del tamaño de los objetos que estas vayan a retener o recoger, los materiales recogidos en esta etapa del proceso se suele clasificar en finos y gruesos.

Este procedimiento se suele usar para evitar atascamiento y obstrucciones, es decir, se utilizan como elementos de protección para los equipos de tratamiento siguientes. La limpieza de estas rejillas o barras se da de manera manual o mecánica. Se suelen instalar en el canal de entrada de la planta.

Triturado, no siempre se usa este procedimiento en el tratamiento, el cual reduce los desechos sólidos de gran tamaño para mejorar tratamiento y la eficiencia de las máquinas y procesos siguientes y evitar posibles obstrucciones en los mismos.

Desarenado y desengrasado, la estructura en donde tiene lugar este proceso se conoce como desarenador en donde se da la remoción de la mayor cantidad posible, por acción exclusiva de la gravedad, de grava, arena y otros materiales arenosos que tenga velocidad de asentamiento o peso específico bastante mayor que el de los sólidos orgánicos degradables de las aguas residuales. (Anaya & Villar, 2009) La remoción de estas partículas se da como se diría de manera simple dejando que se asienten y luego retirándolas de la estructura de manera manual o mecánica como por ejemplo con bombas de succión.

Los desarenadores pueden ser estructuras de forma rectangular o circular, depende del tipo de limpieza y tipo de flujo con el que se vaya a diseñar, de flujo horizontal o helicoidal, aireadas o sin aireación. La función principal como la de todas las fases del pretratamiento es la de proteger, en este caso prevenir la abrasión de los equipos mecánicos y evitar la

sedimentación y acumulación de arenas y materiales relacionados en canales, tanques y tuberías aguas abajo de esta estructura. (Collazos, 2008)

El desengrasado normalmente se lleva a cabo en la misma estructura o unidad de operación que el desarenado, en este proceso se decantan las grasas, los aceites y demás materiales flotantes con menor densidad que el agua. Las unidades en donde se realizan los dos procesos en conjunto se denominan desarenadores – desengrasadores aireados. (Martin, y otros, 2006)

Sección de Importancia 2: Tratamiento Primario

Igualamiento, dado que las tasas de cargas hidráulicas y orgánicas son aquellas en las que se basa el criterio para definir la eficiencia de una planta de tratamiento de aguas residuales, es importante que el caudal que por esta circula sea lo más constante posible.

Dadas estas condiciones de trabajo y con la certeza de que el afluente de la PTAR nunca será constante se tiene el concepto de igualamiento, el cual permite que la planta pueda trabajar con un caudal aproximadamente constante para que se eliminen problemas operacionales causados por la variación de caudales, necesidad de neutralización para descarga, y permita regular problemas cuando hay caudales de invierno (muy altos), caudales en tiempo seco (muy bajos), caudales de alcantarillados combinados y caudales de plantas industriales.

Ventajas del Igualamiento

- Mejora tratabilidad de las aguas residuales.
- Minimiza las cargas de choque sobre el tratamiento biológico.
- Diluye sustancias inhibitoras.
- Estabiliza pH.
- Mejorará la eficiencia, por tanto, la calidad del efluente.
- Mejorar el espesamiento de los lodos.
- Reduce requerimiento de área y las cargas de tratamiento posterior.
- Hace más fácil la dosificación de los reactivos

El igualamiento se da por medio de tanques, estos se deben ubicar preferiblemente dentro de la planta, la ubicación que se les debe dar depende de: tipo de alcantarillado que se maneje, características de las aguas residuales, características físicas del sistema de conducción, tipo de tratamiento. En algunos casos estos tanques se ubican después del tratamiento preliminar, si este es el caso, el tanque debe tener mezcla y aireación para evitar que las partículas sólidas se sedimenten y malos olores. (Romero Rojas, 2011)

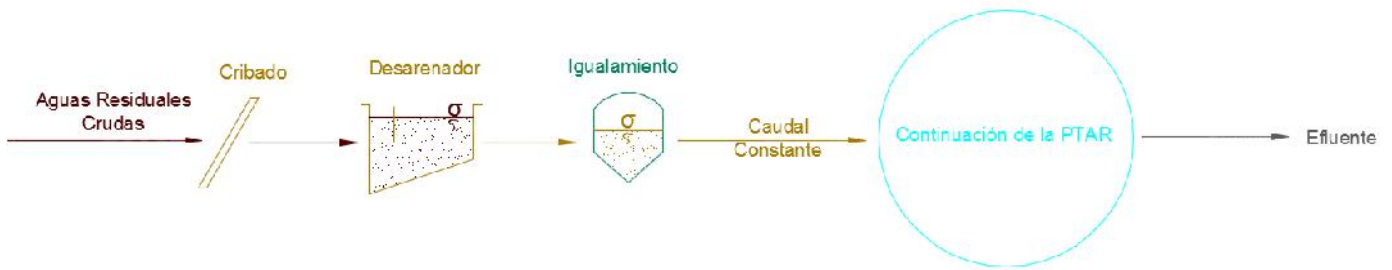


Figura 3. Esquema PTAR con Tanque de Igualamiento. (Romero Rojas, 2011)

La neutralización de las aguas residuales es la unidad de operación donde se da el proceso de ajuste de pH. Generalmente se exige en las normas de descarga un pH cercano a 7, entre 5 y 9, ya sea para preservar la flora y fauna o para evitar efectos multiplicadores en algunas sustancias tóxicas que pueda contener el agua. El proceso de ajuste de pH se hace con la adición de un álcali o de un ácido según sea el caso. Cuando se realiza el proceso de evaluación del químico que se usará para la neutralización se debe hacer un análisis cuidadoso ya que con la adición de éstos se puede generar taponamiento por la producción excesiva de lodos. (Romero Rojas, 2011)

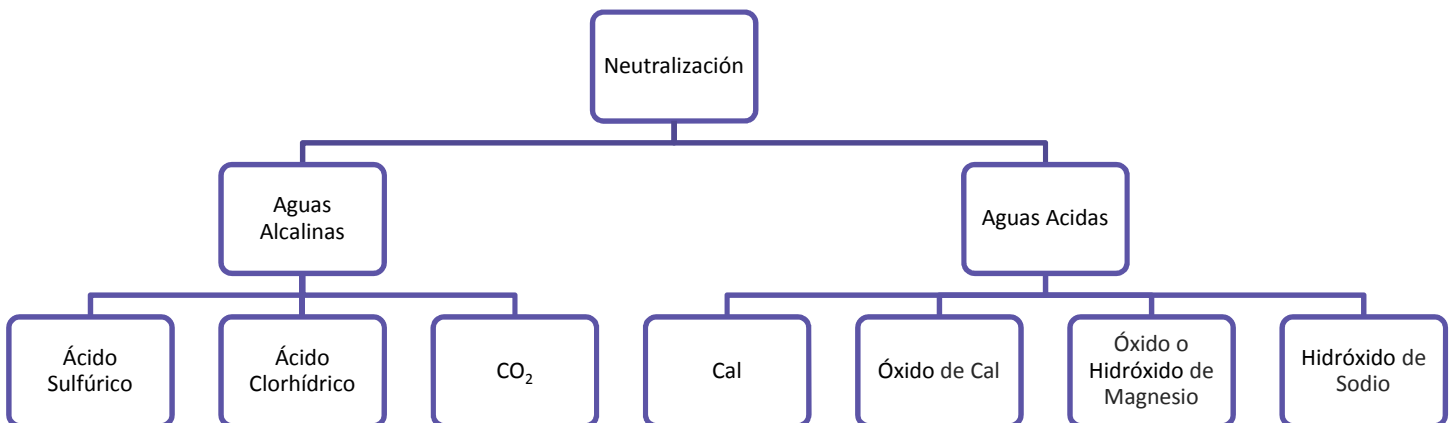


Figura 4. Químicos para la neutralización de las aguas residuales según el tipo. (Romero Rojas, 2011)

Flotación, el objetivo de esta unidad de proceso es promover condiciones de reposo, para que los sólidos cuya densidad es menor que la del agua asciendan a la superficie de la unidad de donde son retirados por desnatado. Para mejorar la eficiencia del proceso, se emplean agentes de flotación. Mediante este proceso se remueven especialmente grasas, aceites, turbiedad y color. Los agentes de flotación empleados son sustancias espumantes y micro burbujas de aire. (Semillero, 2014)

La sedimentación primaria “se conoce como una operación física en la que se aprovecha la fuerza de gravedad que hace que una partícula más densa que el agua tenga una trayectoria descendente, depositándose en el fondo del sedimentador. Esta operación será más eficaz cuanto mayor sea el tamaño y la densidad de las partículas a separar del agua, es decir, cuanto mayor sea su velocidad sedimentación.” (Rodríguez, y otros, 2006)

“Las aguas residuales efluentes del pretratamiento alimentan el tanque de sedimentación primaria, el que puede estar dividido en una a tres cámaras de diferentes tamaños que operan en serie y cuyo tiempo de retención total es de 16 a 24 horas. En éstas se remueve del 50 al 75% de los sólidos suspendidos y del 20 al 40% de la materia orgánica representada por la DBO.” (Comisión Nacional de Agua, 2013)

“En este proceso es importante realizar un control adecuado del lodo sedimentado que se acumula en el fondo, ya que una buena operación de este permite la obtención de lodos digeridos o estabilizados. En caso de baja eficiencia de remoción u otros problemas, será conveniente tomar medidas adecuadas para evitar que la capacidad de tratamiento disminuya. Inusualmente este proceso demanda la instalación de un sistema de difusión que se instala en cada uno de los tanques para permitir la suspensión de los sólidos o del lodo durante el proceso de extracción.” (Comisión Nacional de Agua, 2013)

Tabla 3. Forma de los Sedimentadores Primarios. (CEIM, 2006)

FORMA DE LOS SEDIMENTADORES PRIMARIOS		
Rectangulares	Circulares	Lamelares
<p>La velocidad del desplazamiento horizontal del agua es constante y se suelen utilizar para separar partículas densas y grandes (arenas).</p> <p>Este tipo de sedimentación se denomina discreta, dado que las partículas no varían sus propiedades físicas a lo largo del desplazamiento hacia el fondo del sedimentador.</p> <p>Suelen ser equipos poco profundos.</p>	<p>Son más habituales. En ellos el flujo de agua suele ser radial desde el centro hacia el exterior, por lo que la velocidad de desplazamiento del agua disminuye al alejarse del centro del sedimentador.</p> <p>Esta forma de operar es adecuada cuando la sedimentación va acompañada de una floculación de las partículas, en las que el tamaño de floculo aumenta al descender las partículas, y por lo tanto aumenta su velocidad de sedimentación.</p>	<p>Han surgido como alternativa a los sedimentadores poco profundos, al conseguirse una mayor área de sedimentación en el mismo espacio.</p> <p>Consisten en tanques de poca profundidad que contienen paquetes de placas (lamelas) o tubos inclinados respecto a la base, y por cuyo interior se hace fluir el agua de manera ascendente.</p> <p>En la superficie inferior se van acumulando las partículas, desplazándose de forma descendente y recogándose en el fondo del sedimentador.</p>

Sección de Importancia 3: Tratamiento Biológico Secundario

En las tablas 4 y 5 se describen las unidades de operación tanto anaerobias como aerobias para el tratamiento secundario.

Tabla 4. Descripción Unidades de operación para el tratamiento biológico anaerobio.

TRATAMIENTO BIOLÓGICO SECUNDARIO ANAEROBIO				
Anaerobia de contacto	Lagunas Anaerobias	UASB	Filtros Anaerobio	Lechos expandidos
<p>Es un reactor de mezcla completa con biomasa anaeróbica suspendida, seguido de una cámara degasificadora de mezcla-floculación, separación de sólidos y líquidos y reciclaje de sólidos, lo que hace que el tiempo de retención de sólidos sea mayor al tiempo de retención hidráulica, este fenómeno también significa que el volumen del reactor anaerobio puede ser reducido; se diseña para cargas orgánicas de 2 a 5 Kg DQO/m³.d y tiempos de retención de sólidos de 15 a 30 días. La separación de los sólidos se da mayormente por gravedad y los lodos tienen un período de espesamiento antes de que se dé su reciclaje, se debe tener en cuenta que el éxito, la efectividad y la eficiencia de la unidad de operación es dependiente de las propiedades de sedimentación de los sólidos. En algunos casos se emplean procesos para eliminar las burbujas de gas generadas en el proceso anaeróbico y posiblemente también en la separación, esto con el fin de evitar que sea un proceso impredecible e ineficiente; algunos de esos son: corrientes de gas por agitación o degasificación al vacío, placas separadoras inclinadas y el uso de coagulantes químicos. (Metcalf & Eddy, 2014)</p>	<p>Generalmente es un reactor sin mezcla, emplea una biomasa anaeróbica de floculación suspendida y sedimentación de sólidos anaeróbicos, en muchas ocasiones además de tener un revestimiento con geomembrana también es cubierta con este material para la recolección de gas, puede manejar grandes rangos de desecho tanto de sólidos como aguas residuales solubles, diseñado para tiempos de retención hidráulicos de 20 a 50 días, tiempos de retención de sólidos de 50 a 100 días y cargas orgánicas menores 2 kg DQO/m³.d. (Metcalf & Eddy, 2014)</p>	<p>Es un reactor biológico anaerobio de tasa alta, también conocido como RAFA o PAMLA en español, esta unidad de operación se basa en una tecnología de lodo granular; las aguas residuales crudas entran por el fondo del reactor, pasan hacia arriba a través de una cama de lodo anaeróbico donde están las bacterias anaeróbicas, el contacto con estos microorganismos crea gránulos de 0.5 a 2 mm de diámetro que tiene alta velocidad de sedimentación incluso con cargas hidráulicas altas. El movimiento de burbujas de gas hacia la parte de arriba dentro del reactor asegura la mezcla en el reactor por medio de una turbulencia hidráulica, en la parte superior esta la fase de separación de gas-líquido-sólido, donde se presenta la generación de biogás y este es recolectado. Diseñado para cargas orgánicas 5 a 20 kg DQO/m³.d, tiempo de retención de sólidos 30 días aproximadamente, tiempo de retención hidráulico de 4 a 8 horas y velocidades de flujo ascensional de 1 a 6 m/h; puede llegar a tener de 5 a 20 metros de altura, una sección transversal circular o rectangular y remociones de DBO₅ de entre 60 y 75% y de SST de entre el 60 y 80%. (Metcalf & Eddy, 2014) (Orozco & Libhaber, 2012)</p>	<p>Es un reactor sin mezcla de flujo ascendente o descendente que emplea una película fija de biomasa anaeróbica que se adhiere al medio de soporte, con este sistema se pueden mantener tanto grandes cantidades de biomasa como más prolongados tiempos de retención de sólidos para un tratamiento de tiempos de retención hidráulicos de 1 a 3 días, estos son diseñados para cargas orgánicas de 5 a 20 kg DQO/m³.d. (Metcalf & Eddy, 2014)</p>	<p>Es un sistema de Bioreactor de flujo ascensional con velocidades ascensionales altas las cuales fluidizan el crecimiento adherido de la biomasa sobre las partículas de soporte (arena con diámetros de 0,2 a 0,5 mm o carbón activado), la adherencia de las partículas biológicas a medios estáticos permite acumular masas microbiales de volúmenes mayores que las acumuladas en sistemas biológicos de crecimiento suspendido. Para evitar taponamientos se debe usar un medio de soporte de crecimiento de gran área superficial por unidad de volumen y se aplica el afluente en sentido ascensional, la velocidad en estas unidades de operación es suficiente para expandir entre 10 y 20% el lecho, de tal manera que las biopartículas son soportadas parcialmente por el fluido y parcialmente por el contacto entre biopartículas adyacentes, existiendo una tendencia permanente a permanecer en la misma posición relativa dentro del lecho. Este proceso ha sido exitoso para el tratamiento de aguas residuales domésticas a 20°C, con tiempos de retención de 30 minutos y carga orgánica de 4 kg DQO/m³.d. (Romero Rojas, 2011)</p>

Tabla 5. Descripción unidades de operación para el tratamiento biológico aerobio.

TRATAMIENTO BIOLÓGICO SECUNDARIO AEROBIO				
Lodos Activados	Lagunas Aireadas	Lagunas Aerobias	Filtros Percoladores	Biodiscos
<p>Reactor biológico con mezcla y aireación, proceso que mantiene en suspensión la biomasa aerobia la cual transforma la materia orgánica y los otros componentes contaminantes de las aguas residuales en gases o tejidos celulares. Las partículas floculadas (lodo activado) son separadas del efluente por un clarificador, sedimentador o membrana, que se encuentra después del reactor de lodos activados, luego parte del lodo es retornado al reactor y otra parte es dirigido al tratamiento de lodos de la planta (si se cuenta con esta sección de importancia).</p> <p>Existen una variedad de modificaciones de esta unidad de operación que más adelante se mencionaran; para la convencional los tiempos de retención de sólidos son de 3 a 15 días y las cargas orgánicas para las que se diseñan van de 0,3 a 0,7 Kg DBO/m³.d y finalmente la eficiencia de remoción de esta unidad de operación con respecto a la DBO es de 85 a 95%. El diseño de las plantas de lodos activados se basa en el consumo de la DBO soluble. (Metcalf & Eddy, 2014) (Vesilind & Rooke, 2003)</p>	<p>Son balsas con profundidades de 1 a 4 m en la que la oxigenación de las aguas residuales se realiza mediante unidades de aireación bien sean superficiales, turbinas o difusores. La diferencia fundamental entre lagunas aireadas y el sistema de lodos activados es que en este se lleva a cabo la recirculación de lodo como forma de controlar la cantidad de lodo biológico en el reactor de aireación. Las lagunas aireadas son sistemas de reciclado de lodos. La concentración de sólidos en las lagunas es función de las características del agua residual y del tiempo de residencia. Dicha concentración está comprendida entre 80 y 200 mg/l, esto es, mucho menor que la que se utiliza en las unidades de lodos activados convencionales (2000 – 3000 mg/L). (Ramalho, 1993)</p>	<p>También llamadas lagunas de oxidación, se presenta oxígeno en toda la laguna, usualmente se diseñan con los mismos criterios de las lagunas de estabilización, proporcionan tratamiento biológico por medio de descomposición aeróbica, estas reciben efluente de las lagunas de estabilización o de los tanques de sedimentación primaria; a parte de tratamiento secundario también suministran sedimentación y algo de remoción en los niveles de Coliformes fecales. (Drinan, 2011)</p>	<p>Reactor biológico que contiene una capa fija de material, rocas o plástico, que se conoce como medio filtrante para el crecimiento de una película de biomasa aerobia, sobre el cual las aguas residuales se distribuyen para ser tratadas. (Si esta unidad de operación se usa antes de cualquier otra unidad de operación de tratamiento biológico, ej. Lodos activados, se obtiene un efluente de mejor calidad). Procesa el efluente proveniente de los tanques de sedimentación primaria, puede producir efluentes con una DBO₅ y SST de 30 a 45 mg/L; con el diseño apropiado puede alcanzar niveles de DBO₅ y SST de 10 mg/L en el efluente (comparable con el obtenido por la unidad de operación de lodos activados) y llegar a alcanzar la nitrificación. (Metcalf & Eddy, 2014) (Vesilind & Rooke, 2003)</p>	<p>En el caso de los Biodiscos, la biomasa se presenta simultáneamente en la forma de crecimiento adherido (como en el caso de la unidad de operación de los filtros percoladores) y de crecimiento en suspensión (como en el caso de las unidades de operación de lodos activados). Cada etapa está formada por una serie de discos no muy separados, normalmente fabricados de poliestireno o polietileno con diámetros comprendidos entre 3-4 m. Estos discos se mantienen en paralelo entre si y unidos a un eje horizontal que pasa a través de sus centros. Los ejes tienen longitudes de 7,5 m aproximadamente. La alimentación de agua residual pasa a través de estos tanques es serie de forma tal que los ejes se mantienen ligeramente por encima de la superficie del líquido. Esto significa que la superficie de los discos esta aproximadamente el 40% sumergido todo el tiempo. Los ejes giran continuamente a una velocidad comprendida entre 1 y 2 rpm. Se forma gradualmente un limo biológico de 1 a 3 mm de espesor que comienza a depositarse en las superficies de los discos. (Ramalho, 1993)</p>

En la tabla 6, se muestran las diferentes variantes de la unidad de operación de lodos activados, y el tipo de aplicación que se le podría dar.

Tabla 6. Modificaciones o variantes de los lodos activados (Collazos, 2008)

VARIANTES DEL PROCESO DE LODOS ACTIVADOS	
Modalidad	Aplicación
Convencional	Aguas residuales domésticas de baja o media concentración, admite cargas de choque, aunque con algunas restricciones
Mezcla Completa	Aplicación general, resistencia de cargas de choque
Aireación por Pasos	Aplicación general para un amplio rango de desechos
Estabilización por contacto	Ampliación de sistemas existentes, plantas compactas, flexible
Aireación Extendida	Pequeñas comunidades, plantas compactas, flexible, aireadores superficiales
Proceso Kraus	Bajo en nitrógeno, residuos de elevada concentración

La sedimentación secundaria es la fase que sigue a cualquier tipo o unidad de operación de tratamiento biológico, esta se debe realizar antes de cualquier proceso de desinfección (antes de descargar el efluente en un cuerpo receptor de agua), o de tratamiento avanzado o terciario. Tiene un tiempo de retención de aproximadamente 6 horas y el trabajo de sedimentación se da a través de la fuerza de gravedad, el objetivo principal es el de remover la biomasa acumulada que queda después del tratamiento secundario. Si el proceso se hace cuidadosamente y de manera eficiente puede llegar a tener remociones de 90% o más de la DBO y los SST de las aguas residuales crudas. (Drinan, 2011)

Sección de Importancia 4: Tratamiento Avanzado

Esta sección está compuesta por el tratamiento terciario y la desinfección, en las tablas 7 y 8 se muestra la descripción de las diferentes unidades de operación que se pueden emplear para llevar a cabo el tratamiento terciario.

Tabla 7. Descripción de los tipos de tratamiento terciario. (Ramalho, 1993)

TIPOS DE TRATAMIENTO TERCIARIO.				
Eliminación de sólidos en suspensión	Adsorción en carbón activado	Intercambio iónico	Ósmosis inversa	Electrodialisis
<p>Los sólidos en suspensión que no han sido eliminados en las unidades de operación convencionales de tratamiento primario y secundario pueden constituir una parte importante de la DBO de los efluentes de las plantas de tratamiento de aguas residuales. Se dispone de los siguientes procesos: microtamizado, filtración, coagulación. Con el microtamizado se consigue eliminaciones del 70-90% de los sólidos en suspensión. Se utiliza normalmente la filtración para conseguir rendimiento en la eliminación de sólidos en suspensión de hasta el 99%. Los materiales de relleno de los filtros más empleados son arenas, antracita y tierra de diatomeas. La coagulación se lleva a cabo utilizando sulfato de aluminio, polielectrolitos, cal y otros reactivos químicos</p>	<p>Adsorción es la concentración de un soluto en la superficie de un sólido. Este fenómeno no tiene lugar cuando se coloca dicha superficie en contacto con una solución. Una capa de moléculas de soluto se acumula en la superficie del sólido debido al desequilibrio de las fuerzas superficiales. En el interior del sólido, las moléculas están rodeadas totalmente por moléculas similares y por lo tanto sujetas a fuerzas equilibradas. Las moléculas en la superficie están sometidas a fuerzas no equilibradas. Debido a que estas fuerzas residuales son suficientemente elevadas, pueden atrapar moléculas de un soluto que se halle en contacto con el sólido. Este fenómeno se denomina adsorción física. El sólido se denomina adsorbente y el soluto a adsorber se denomina adsorbido. La capacidad de adsorción es función de la superficie total del adsorbente, ya que cuanto mayor sea esta superficie se dispone de mayor número de fuerzas residuales no equilibradas para la adsorción.</p>	<p>El intercambio iónico es un proceso en que los iones que se mantienen unidos a grupos funcionales sobre la superficie de un sólido por fuerzas electrostáticas se intercambian por iones de una especie diferente en disolución. Este procedimiento ha llegado a ser notablemente importante en el campo del tratamiento de las aguas residuales. Ya que la desmineralización completa puede alcanzarse mediante intercambio iónico, es posible utilizar procesos de tratamiento de corriente partida, en los que parte del agua residual afluente se desmineraliza y se combina después con parte del afluente que ha sido desviado del tratamiento para producir un efluente de calidad específica (ejemplo, una determinada dureza).</p>	<p>El reactor está conformado por membranas permeables al disolvente (agua) pero impermeables al soluto. Estas membranas se conocen como semipermeables. Las primeras membranas semipermeables utilizadas en ósmosis fueron procedentes de tejidos animales. Más tarde se desarrollaron membranas sintéticas siendo actualmente las más empleadas las de acetato de celulosa. La ósmosis se define como el paso espontáneo de un disolvente desde una solución diluida a otra más concentrada a través de una membrana semipermeable.</p>	<p>Se desarrolló para la desalación del agua del mar. Es un método prometedor de eliminación de nutrientes inorgánicos (fosforo y nitrógeno) de las aguas residuales y, por ello, una posible etapa final en los procesos de tratamiento de aguas residuales. Los componentes básicos de la celda son una serie de membranas hechas en resina de intercambio iónico. Existen dos tipos de membranas utilizadas en las celdas de electrodiálisis: membranas catiónicas, que poseen una carga fija negativa, permitiendo a los cationes (iones positivos) pasar a través de ellas pero repeliendo a los aniones (cargas negativas) y membranas aniónicas, que poseen una carga positiva fija, permitiendo el paso de los aniones a través de ellas pero repeliendo a los cationes. El cátodo y el ánodo se colocan en los dos extremos de la celda de forma tal que la membrana más próxima al cátodo sea permeable a los cationes y la más próxima al ánodo sea permeable a los aniones. El agua residual cruda se alimenta continuamente es los compartimentos de concentración y el agua residual tratada se extrae continuamente de los compartimentos de dilución. Para un funcionamiento adecuado de la celda electrodiálisis, la materia en suspensión, los iones orgánicos de gran tamaño y la materia coloidal deben separarse antes del proceso.</p>

Tabla 8. Descripción de las unidades para desinfección de las aguas residuales. (Ramalho, 1993)

TIPOS DE DESINFECCIÓN		
Cloración	Radiación ultravioleta	Ozonización
<p>La desinfección con cloro tiene ventajas de costo, fiabilidad, previsibilidad de funcionamiento. El cloro es una sustancia de reacción rápida con otras sustancias, incluyendo varios químicos, materia orgánica y amoníaco. Estas reacciones químicas reducen el cloro, usándolo antes de que este pueda cumplir su tarea de desinfección. La cantidad de cloro tomado por la materia orgánica y el amoníaco en la desinfección de aguas residuales es conocida como demanda de cloro. Los valores residuales, tiempo de contacto y calidad del efluente afectan la desinfección. La eficiencia del cloro decrece cuando el pH crece y la temperatura desciende, también es afectada por el amoníaco y el nitrógeno orgánico. Mantener los valores residuales deseados para el tiempo de contacto requerido es esencial. La falla del sistema resulta en baja eficiencia y aumento de la probabilidad de organismos patógenos en la descarga.</p>	<p>Cuando la radiación UV es usada en el tratamiento de aguas residuales, el efluente de estas es expuesto a luz ultravioleta en condiciones específicas de intensidad, longitud de onda y período de contacto. La efectividad del proceso depende de la intensidad de la luz UV, el tiempo de contacto y los niveles de turbidez del flujo residual. La efectividad de la radiación UV en el tratamiento de aguas residuales depende de la turbiedad; los rayos ultravioleta no pueden penetrar los sólidos, lo cual puede permitir que la vida microbiana sobreviva a la desinfección. Este tipo de desinfección se lleva a cabo en tanques de contacto, diseñados con bancos de luces UV en posición horizontal (paralelos o perpendiculares al flujo del efluente), o con bancos de luces colocados en posición vertical (perpendiculares al flujo del efluente), el tanque de contacto debe proveer como mínimo 10 segundos de tiempo de exposición.</p>	<p>Provee muchas ventajas sobre la desinfección con cloro. El ozono, es un fuerte gas oxidante, que reacciona con la mayoría de moléculas orgánicas y algunas inorgánicas. Se produce cuando las moléculas de oxígeno se separan y chocan con otros átomos de oxígeno, las moléculas de ozono son formadas por tres átomos de oxígeno. Este es un desinfectante excelente para efluentes de alta calidad, pero no tan bueno para aguas residuales turbias. El equipo del proceso de ozonización incluye un generador de oxígeno así como un generador de ozono. Los requerimientos del tanque de contacto incluyen 10 minutos de tiempo de contacto para un flujo diario promedio, y un monitor de gases para el control del proceso.</p>

Sección de Importancia 5: Tratamiento y disposición de sólidos

“Los lodos son un subproducto del tratamiento de las aguas residuales. Puede ser primario, secundario o digerido. Las características de los lodos varían con la composición del agua residual y con el tipo de tratamiento.” (Collazos, 2008)

Tabla 9. Composición típica de los lodos. (Metcalf & Eddy, 2014)

PARAMETRO	LODO PRIMARIO SIN TRATAR		LODO PRIMARIA DIGERIDO		LODO ACTIVADO SIN TRATAR
	Rango	Típico	Rango	Típico	Rango
ST, % (materia seca)	(5 - 9)	6	(2 - 5)	4	(0,8 - 1,2)
STV, % de ST	(60 - 80)	65	(30 - 60)	40	(59 - 88)
Nitrógeno, % de ST	(1,5 - 4,0)	2,5	(1,6 - 3,0)	3	(2,4 - 5,0)
Fósforo, % ST (P ₂ O ₅)	(0,8 - 2,8)	1,6	(1,5 - 4,0)	2,5	(2,8 - 11)
Alcalinidad (mg/L CaCO ₃)	(500 - 1500)	600	(2500 - 3500)	3000	(580 - 1100)

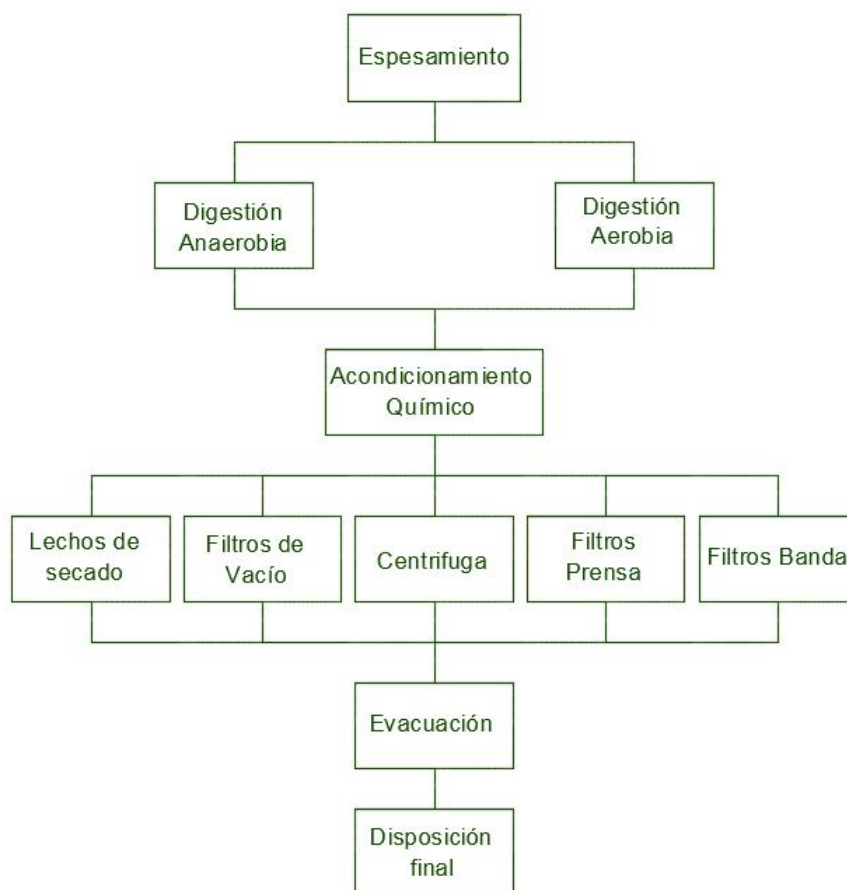


Figura 5. Esquema básico de tratamiento de lodos (Collazos, 2008)

Tabla 10. Métodos de manejo y procesamiento de lodos (Metcalf & Eddy, 2014)

MÉTODOS DE MANEJO Y PROCESAMIENTO	FUNCIÓN
Bombeo:	Transporta el lodo o los biosólidos
Operación preliminar: Molienda Cribado Desarenado Mezcla Almacenamiento	Reducción de tamaño de partículas Remoción de material fibroso Remoción de arena Homogenización del lodo Igualamiento del flujo
Espesamiento: Espesamiento por gravedad Espesamiento por flotación Centrifugación Espesamiento por cinturón de gravedad Espesamiento por tambor rotatorio	Reducción de volumen
Estabilización: Estabilización Alcalina Digestión Anaeróbica Digestión Aeróbica Compostaje Secado por calor	Estabilización Estabilización, reducción de masa, recuperación de recursos Estabilización, reducción de masa Estabilización, recuperación del producto Estabilización, reducción de volumen, recuperación del recurso
Acondicionamiento:	Deshidratación mejorada
Deshidratación: Centrífuga Cinturón de filtro prensa Prensa rotativa Prensa de tornillo Filtro prensa Deshidratación avanzada Lechos de secado Cañaverales Lagunas	Reducción de volumen Reducción de volumen Reducción de volumen Reducción de volumen Reducción de volumen Reducción de volumen y estabilización Reducción de volumen Almacenamiento y reducción de volumen Almacenamiento y reducción de volumen
Oxidación térmica avanzada:	Reducción de masa y volumen, recuperación del recurso
Aplicación de lodo en tierra:	Usos beneficiosos y disposición
Transporte y almacenamiento:	Almacenamiento y transporte de los lodos y biosólidos

En las figuras 6 a 9 se incluyen los diagramas de flujo de las plantas de tratamiento de aguas residuales convencionales, en las cuales se muestran opciones de tratamiento con diferentes unidades de operación (tecnologías) en las 5 secciones de tratamiento. Las tecnologías referidas dependen de las necesidades específicas de cada lugar, de las reglamentaciones que sea necesario satisfacer y de las condiciones y características de las aguas residuales crudas y tratadas.

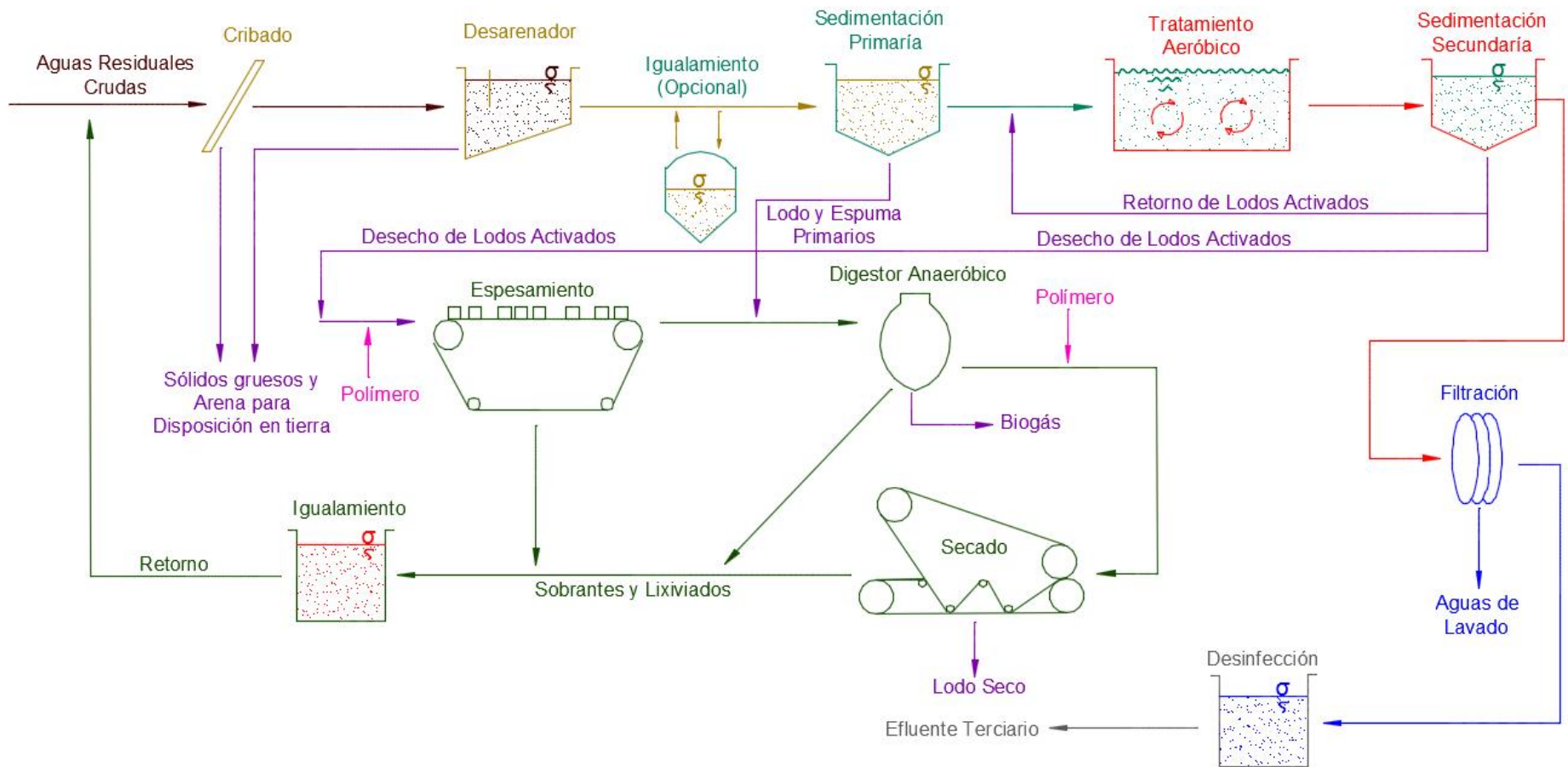


Figura 6. PTAR de Lodos Activados.

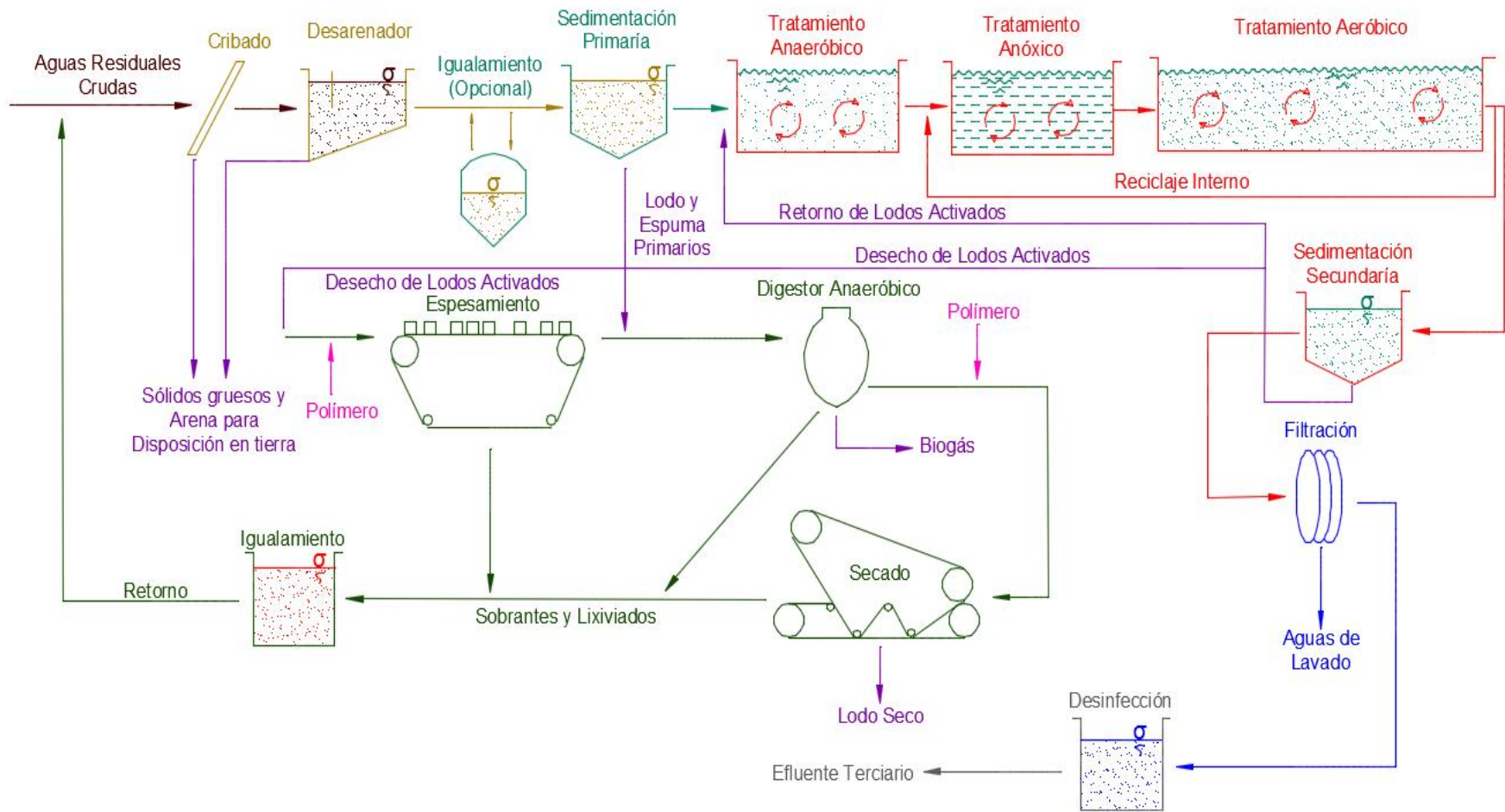


Figura 7. PTAR con remoción de nitrógeno.

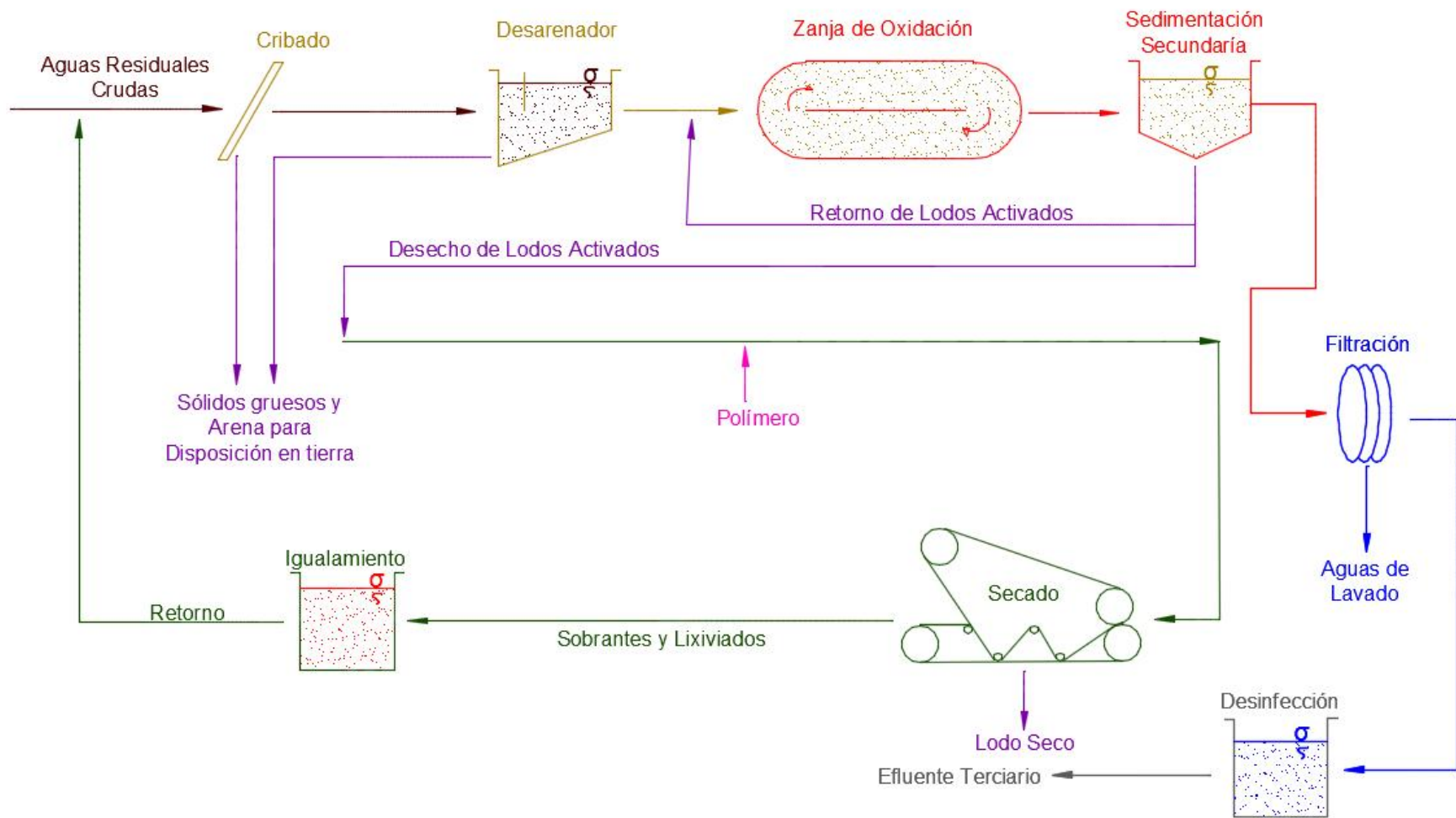


Figura 8. PTAR con Zanjonos de Oxidación.

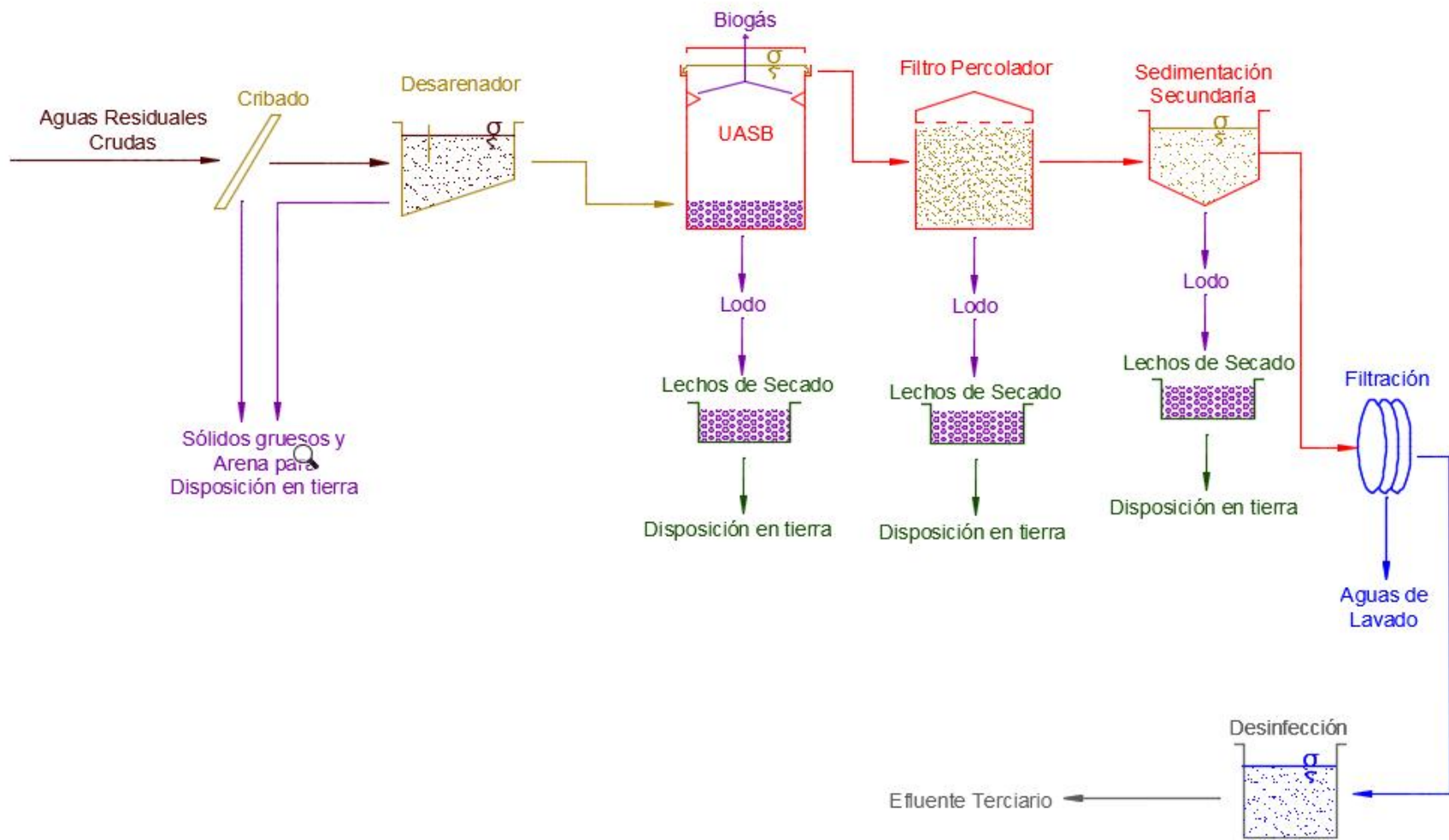


Figura 9. PTAR con UASB, filtro percolador y filtración



Figura 10. Convenciones diagramas de flujo PTAR.

3. CRITERIOS DE SOSTENIBILIDAD PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

“En el caso de las instalaciones tradicionales de tratamiento de agua municipales, imaginémosnos una PTAR que genere la energía; capture nutrientes a partir de la recuperación del recurso; vender su agua para el reúso; genere la mitad del volumen de biosólidos, emita sustancialmente menos gases del efecto invernadero; use infraestructura verde y natural para manejar las aguas lluvias, mitigar los impactos del clima y generar beneficios estéticos de paisajismo en la ciudad.” (EPA, 2014)

3.1. SOSTENIBILIDAD

En general, la definición de sostenibilidad más usada y divulgada alrededor del mundo es la que se encuentra en el Informe Brundtland de la ONU, “Está en manos de la humanidad hacer que el desarrollo sea sostenible, duradero, o sea, asegurar que satisfaga las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de las futuras generaciones para satisfacer las propias” (Brundtland, 1987), es decir, “en términos operacionales, promover el progreso económico y social respetando los ecosistemas naturales y la calidad del medio ambiente.” (Alvares Trillos, 2005)

La anterior definición de sostenibilidad se puede denominar como sostenibilidad absoluta, la cual “se enfoca en el desarrollo de sistemas de reciclaje, resultando en una reserva constante y sostenible de todos los materiales necesarios para la vida humana” (Leslie Grandy, Daigger, Love, & Filipe, 2011), ésta tiene la concepción de que en la tierra no se generara desecho alguno; visión que aparte de tener muchas falencias, crea objetivos difíciles o imposibles de alcanzar.

Dado esto se genera el concepto de sostenibilidad relativa, “la cual compara opciones y busca implementar la que es más sostenible” (Leslie Grandy, Daigger, Love, & Filipe, 2011). Esta comparación se hace a partir de ciertas medidas que evalúan las contribuciones y los impactos relativos de las diferentes opciones; la evaluación se hace a partir del concepto de la Triple vertiente de la sostenibilidad o “the Triple Bottom Line”, “que consiste en impactos sociales, ambientales y económicos.”

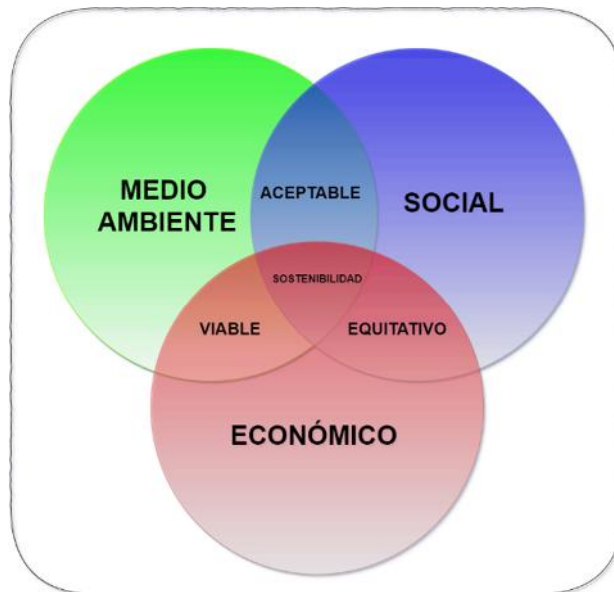


Figura 11. Evaluación de la Triple Vertiente de la Sostenibilidad (TBL) (Leslie Grandy, Daigger, Love, & Filipe, 2011)

“La sostenibilidad relativa es un concepto más útil sobre el cual se desarrollan herramientas de medida porque esto puede ser más fácilmente aplicado y puede resultar en la selección de opciones que mejoren la sostenibilidad” (Leslie Grandy, Daigger, Love, & Filipe, 2011)

En la Tabla 11 se muestra una síntesis de la Triple Vertiente de la sostenibilidad.

Tabla 11. Síntesis de la Triple Vertiente de la sostenibilidad (TBL) (Auriens Arquitectura, 2011)

SOSTENIBILIDAD		
Es la capacidad de permanecer. Cualidad por la que un elemento, sistema o proceso, se mantiene activo en el transcurso del tiempo. Capacidad por la que un elemento resiste, aguanta, permanece.		
Sostenibilidad económica	Sostenibilidad social	Sostenibilidad ambiental
Se da cuando la actividad que se mueve hacia la sostenibilidad ambiental y social es financieramente posible y rentable.	Basada en el mantenimiento de la cohesión social y de su habilidad para trabajar en conseguir objetivos comunes.	Compatibilidad entre la actividad considerada y la preservación de la biodiversidad y de los ecosistemas, evitando la degradación de las funciones fuente y sumidero.

Como se mencionó anteriormente se evaluarán “sistemas y no tecnologías individuales”, porque los sistemas son los que finalmente producen o no resultados sostenibles, para entender mejor la anterior definición se puede definir como un sistema al “conjunto de cosas que relacionadas entre sí ordenadamente contribuyen a determinado objeto.” según la RAE. La evaluación se hace de los impactos (positivos y negativos) de cada una de las tecnologías del sistema para llegar a la conclusión general. Por ejemplo, un sistema “que produce un efluente de alta calidad puede no alcanzar resultados sostenibles si transfiere los contaminantes al aire o al suelo.” (Leslie Grandy, Daigger, Love, & Filipe, 2011)

En la Tabla 12 se ilustran algunas de las medidas con las que se pueden evaluar los sistemas de tratamiento de aguas residuales, siguiendo el concepto de la TBL.

Tabla 12. Ejemplos de factores que pueden ser usados para cuantificar la sostenibilidad y la medida específica de ellos. (Leslie Grandy, Daigger, Love, & Filipe, 2011)

IMPACTO	FACTORES	MÉTODO DE CUANTIFICACIÓN
Social	<ul style="list-style-type: none"> - Protección de la salud pública - Creación de recursos públicos - Creación de trabajos 	<ul style="list-style-type: none"> - Grado de exposición a riesgo de salud pública - Número de visitas o valor monetario de los recursos creados - Número de trabajos locales creados
Económico	<ul style="list-style-type: none"> - Capacidad de Pago - Suministro de agua creada - Desarrollo económico 	<ul style="list-style-type: none"> - Promedio de costo comparado con salario mínimo - Volumen o Valor económico - Valor en pesos
Ambiental	<ul style="list-style-type: none"> - Huella de carbón - Agua dejada en el medio ambiente - Protección de los recursos 	<ul style="list-style-type: none"> - Equivalentes de CO₂ - Volumen y algunas medidas de valor en términos de mejoramiento del hábitat - Cantidad de recursos protegidos.

En conclusión, se llama sostenibilidad a lo que se describió como sostenibilidad relativa y se tendrán en cuenta como criterios de mayor importancia en la calificación para atribuir sostenibilidad a las tecnologías usadas para el tratamiento de las aguas residuales, los siguientes:

- Ahorro de energía: reducción parcial o total de energía debido a las unidades de operación usadas en el proceso y a los productos generados en la planta y usados para cubrir su demanda energética.
- Reducción de emisiones (gases y contaminación del aire): recolección y procesamiento, en algunos casos de biogás (compuesto por gases que producen efecto invernadero).
- Costo mínimo inversión, operación y manejo: procesos centralizados, descentralizados e híbridos que protegen la salud pública, reducen costos de transporte y facilitan el reúso. (Daigger, 2005).
- Reducción de nutrientes: según sea el caso, es decir, depende del uso que se le quiera dar al efluente y la normatividad a seguir; si el reúso es irrigación no es necesaria la remoción o reducción de los nutrientes.
- Calidad y reúso del efluente: apropiados para su reutilización directa y no para descarga, valor económico del agua recuperada como fuente de agua e incremento en la disponibilidad del recurso.
- Tratamiento y disposición de lodos: eliminación o minimización del tratamiento de lodos, reúso o procesamiento para compost o para generación de biogás, como material mejorado de suelos o como fuente energética.

“Buena ingeniería envuelve el proporcionamiento de la solución más efectiva y confiable al problema de proteger el curso del agua y la salud pública de manera que la comunidad pueda afrontar su costo.” (Vesilind & Rooke, 2003)

3.2. TECNOLOGÍAS APROPIADAS Y SOFISTICADAS PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

Existen dos tipos de tecnologías para el tratamiento de aguas residuales: tecnologías apropiadas y tecnologías sofisticadas.

Las tecnologías apropiadas son aquellas que ya han sido probadas, que son simples de manejar y sobre todo que tienen bajo costo en cuanto a su inversión, su operación y mantenimiento. Estas tecnologías no requieren de operarios calificados, no comprenden

equipos sofisticados, en algunos casos no requiere equipamiento en absoluto, por lo general sólo materiales locales. (Orozco & Libhaber, 2012)

Para escoger una tecnología apropiada para el tratamiento de aguas residuales se deben tener en cuenta 3 factores importantes: facilidad de operación, calidad del efluente y costo mínimo de operación y mantenimiento.

Algunas de las tecnologías o unidades de operación apropiadas que se pueden emplear para el tratamiento de las aguas residuales son las siguientes:

- Pantallas micro giratorias: reemplaza el cribado, llega a alcanzar remociones del 30% de DBO y de SST, remueve parcialmente los Coliformes fecales; tiene costos bajos de inversión y poca ocupación; además ahorra energía ya que las pantallas giran cuando el tambor se obstruye y usa un chorro de efluente para su limpieza; es simple de operar y se adapta a condiciones particulares de flujo hidráulico.
- Desarenador Vortex: el afluente entra axialmente al tambor y el efluente sale por la parte superior, la arena se sedimenta por gravedad y la materia orgánica sale con el efluente, es más compacto, más económico y fácil de operar que una estructura de desarenado convencional.
- Lagunas Anaerobias: es básicamente un hueco en la tierra, consta de dos estructuras hidráulicas, bocatoma y salida, produce cantidades mínimas de lodo que deben ser removidas entre 5 a 10 años, tiempos de retención de 2 a 6 días, aunque trabaja mejor en lugares con temperaturas mayores de 10°C, puede tener buenos resultados a bajas temperaturas si estas no fluctúan en un periodo de varios meses. Aunque genera gran cantidad de malos olores esto se puede solucionar cubriendo las lagunas con geomembranas.
- UASB: tiene bajo costo de inversión y de manejo, fácil de operar, deja una pequeña huella debido a la recolección del biogás producido y además éste puede ser utilizado para la operación de la planta. Tiene remociones de 60 a 75% de DBO y de 65 a 80% de SST y puede ser utilizado para cualquier tamaño de ciudad.
- Filtros Anaerobios: reactor biológico anaerobio de lecho fijo, equivalente a los filtro percoladores, tiempo de retención de sólidos de 20 días, tiene mejor remoción de materia orgánica que los UASB y las lagunas anaerobias. Tratamiento secundario para medianas y pequeñas ciudades, y pulido para todo tipo de ciudad, remociones de 70 a 80% de DBO₅.
- Reservorios de estabilización: su operación y manejo no requieren grandes habilidades, soporta cargas orgánicas de acuerdo con las condiciones locales.

- Humedales Artificiales: su uso se ha aumentado dramáticamente en las últimas décadas; requiere materiales y mano de obra locales, pueden ser fácilmente implementados en países en vías de desarrollo. Una de sus más grande ventajas es que opera sin consumo de energía y se integra bien con áreas rurales. Remueven materia orgánica entre 80 y 90%.
- CEPT: Tratamiento primario mejorado químicamente, tiene remociones de 70 a 75% de DBO total y 80 a 90% SST, son unidades compactas en relación con el tratamiento primario convencional. Este procedimiento usa sales como el cloruro férrico y el alumbre para mejorar la remoción de materia orgánica, con este proceso se puede mejorar la calidad del efluente de una planta convencional.
- Filtros rápidos de arena: es uno de los procedimientos fisicoquímicos más usados para la eliminación de turbidez y SS en aguas naturales y residuales. Los medios más comúnmente usados para la filtración son arena, antracita, resina o granate y en algunos casos carbón activado, con estos materiales se pueden encontrar filtros singulares (un solo medio), filtros duales (dos medios) y filtros múltiples (varios medios). Proceso simple de bajo consumo de energía, económico en mantenimiento y operación. Requiere químicos para la floculación y lavado.
- Flotación de aire disuelto: sistema o procedimiento fisicoquímicos que trabaja por la inyección de aire a una corriente clarificada que se mezclara con el afluente para retirar los SS efectivamente, trabaja tanto en aguas crudas como en aguas residuales que hayan sufrido alguna clase de pretratamiento o tratamiento primario, remoción de DBO, DQO, aceites y grasas del efluente tratado, Tiempo de retención hidráulico 20 – 60 minutos. Proceso simple, económico en mantenimiento y operación.
- Escorrentía superficial: sistema de aplicación en tierra del efluente, en la parte superior de una terraza plantada con una mezcla de pastos; la escorrentía del flujo hacia una serie de zanjas o tuberías que recolectan el efluente, se dan procesos físicos, químicos y biológicos a lo largo de este procedimiento, se usa también como método de disposición.
- Infiltración – Percolación: (se da cuando el efluente aplicado en tierra alcanza las aguas subterráneas), se considera un método de tratamiento y disposición; es una tecnología de tratamiento en tierra para reutilización indirecta de las aguas residuales, se requieren suelos permeables arenosos o arcillosos para que el efluente sea capaz de llevar a cabo la infiltración. A lo largo del tratamiento se dan procesos físicos, químicos y biológicos.
- Tanques Sépticos: realizan funciones como: sedimentación, remoción de material flotante, también actúan como digestores decantadores (digestor anaerobio sin mezcla

y sin calor); puede ser usado como un sistema de pretratamiento para una planta de una pequeña comunidad. Fácil de operar y simple de construir. Tiempo de retención hidráulica de 1-3 días, para temperaturas mayores a 20°C se da una remoción de 50% de la DBO, remoción de 50 a 70% de SST y de aceites y grasas de 70 a 80%.

- Emisarios submarinos y grandes ríos: si se cuenta con buenos emisarios se puede hacer un pretratamiento de las aguas residuales crudas y disponerlas según la capacidad de autopurificación de la fuente receptora.
- La desinfección por cloro gaseoso, hipocloración líquida y radiación UV se pueden considerar tecnologías apropiadas dado su bajo costo, relativamente simples de aplicar y con unidades de operación conocidas.

Las tecnologías sofisticadas, son aquellas con características complejas o novedosas, tecnologías que requieren bastante equipamiento y operarios profesionales o tecnólogos con la capacidad de manejar y mantener los diferentes equipos.

Algunas de las tecnologías o unidades de operación sofisticadas usadas en tratamiento de aguas residuales se enlistan en seguida:

- Para el ahorro de energía:
Las plantas de tratamiento son adecuadas de dos maneras diferentes, la primera con elementos para la conservación de energía y la segunda con procesos de energías renovables.
 - o Procesos de conservación de energía: estos son usados para manejar de manera eficiente la corriente eléctrica que llega a la planta con el fin de ahorrar la mayor cantidad de dinero y energía posibles con la utilización de equipos o procesos.
 - Equipos: es de conocimiento popular que alrededor del 60% de la energía eléctrica que llega a una planta es usada por un motor eléctrico (la energía eléctrica se transforma en energía mecánica para realizar los procesos propios de tratamiento), por esta razón se pueden emplear equipos o unidades de apoyo para la reducción de este consumo o el consumo más eficiente. (Spellman, 2013)
 - Unidades de frecuencia variable: son controladores electrónicos que regulan la energía que entra a los motores, sincronizando la velocidad de estos con la demanda de energía requerida por cada proceso, suministran un control continuo.
 - Mejoramiento de calefacción, ventilación y aire acondicionado: todas las instalaciones de aguas residuales pueden actualizar sus sistemas de calentamiento, enfriamiento y ventilación con el fin de mejorar la conservación de energía y así tener un ahorro

de dinero, cuando se tiene equipos obsoletos se tiende a tener un mayor consumo de energía.

- Suministro eléctrico inteligente de iluminación: se han desarrollado avances recientes en lámparas, luminarias, controladores y diferentes tipos de iluminación, los cuales suministran diferentes ventajas sobre los sistemas originalmente instalados en muchas de las estructuras.
- Tecnologías de combinación de calor y potencia (CCP). En la Tabla 13 se presenta un cuadro de las ventajas y desventajas del uso de ellas.

Tabla 13. Tecnologías de combinación de calor y potencia, tecnologías sofisticadas. (Spellman, 2013)

SISTEMAS DE CCP	VENTAJAS	DESVENTAJAS
Turbinas de gas	Alta confiabilidad, emisiones bajas, disponibilidad de calor de alta calidad, no necesita enfriamiento.	Requiere gas a alta presión o un compresor de gases del efecto invernadero, baja eficiencia para cargas bajas, los resultados decaen a medida que la temperatura se eleva.
Micro turbinas	Baja cantidad de partes móviles, compacta y liviana, emisiones bajas, no se requiere enfriamiento.	Altos costos, relativamente baja eficiencia mecánica, limitada para aplicaciones de cogeneración de baja temperatura.
Motores Alternativos	Flexibilidad en la operación, alta eficiencia con bajas cargas, fácil de poner en marcha, relativamente bajo costo de inversión.	Altos costos de mantenimiento, limitada para aplicaciones de cogeneración de baja temperatura, relativamente altas emisiones, deben ser enfriados incluso cuando el calor recobrado no es usado, altos niveles de ruidos de baja frecuencia.
Turbinas de vapor	Alta eficiencia en general, puede ser usada con cualquier tipo de combustible, capacidad para cumplir con el grado de calor requerido en más de un sitio, larga vida útil y alta confiabilidad, capacidad de variar la relación de calor a energía.	Puesta en marcha lenta, baja relación de potencia a calor.
Celdas de combustible	Bajas emisiones y ruidos, alta eficiencia sobre todos los rangos de carga, diseño modular.	Altos costos, baja durabilidad, los combustibles requieren procesamiento incluso si se usa hidrógeno puro.

- Uso de energías renovables para la producción de la energía necesaria para la operación de los equipos y máquinas empleadas en el tratamiento de aguas residuales. Estas energías reemplazarían la energía eléctrica.
 - Micro y macro energía hidráulica:

- Hidro-potencial: embalse, desviación y acumulación por bombeo.
 - Depósito de energía almacenada.
 - Hidro-turbinas: turbina de impulsión y reacción.
 - Energía solar:
 - Concentradores de línea
 - Sistemas disco/motor
 - Sistema de torre de poder
 - Almacenamiento termal de energía.
 - Sistema directo de dos tanques
 - Sistema indirecto de dos tanques
 - Sistema de tanque individual de Termoclina
 - Energía fotovoltaica
 - Energía eólica
 - Aire en movimiento
 - Turbina eólica
 - Recuperación y utilización de la energía química (Metcalf & Eddy, 2014): Transformación de los componentes de las aguas residuales que contienen combustibles químico y uso de estos combustibles beneficiosamente, algunos combustibles necesitan un pretratamiento; el principal combustible obtenido de las unidades de operación de una PTAR es el biogás (gas del digestor) este gas sale de los lodos digeridos anaeróbicamente, este ha sido usado para calentar y para otros sistemas de combustión. Biogás: (típicamente contiene: 55-70% de metano, 30-40% de CO₂, y pequeñas cantidades de N₂, H₂, H₂S, vapor de agua y otros gases) digestión anaerobia, también proveniente de la biomasa producida en las PTAR.
- Procesamiento del biogás para la generación de energía y calor (ej. Gas natural)

En las tablas 14 y 15 se incluyen los dispositivos usados para recuperar energía en una PTAR.

Tabla 14. Dispositivos usados para recuperar energía de biogás. (Metcalf & Eddy, 2014)

Dispositivos	Eficiencia típica, %	Eficiencia típica con ccp, %	Requerimiento de limpieza del gas	Generación típica, kw	Conversión de energía
Motor Alternativo	25-50	70-80	Siloxano	20-6000	Electricidad, energía mecánica y calor
Turbina de gas (ciclo simple)	25-40	70-80	Siloxano y H ₂ S	1000-250000	Electricidad, energía mecánica y calor
Turbina de gas (ciclo combinado)	40-60	70-80	Siloxano y H ₂ S	1000-250000	Electricidad, energía mecánica y calor residual para producir vapor para más generación de energía
Micro Turbina	25-35	70-85	Siloxano y H ₂ S	30-250	Electricidad, energía mecánica y calor
Motor Stirling	± 30	± 80	No se requiere		Electricidad, energía mecánica y calor
Celda de combustible	40-60	70-85	Siloxano, H ₂ S y H ₂ O	200-300	Electricidad y calor
Caldera o hervidor	80-90+		No se requiere típicamente		Vapor y agua caliente

Tabla 15. Dispositivos usados para recuperar energía de los contenidos sólidos de las aguas residuales. (Metcalf & Eddy, 2014)

DISPOSITIVO	RESULTADO	OBSERVACIONES
Incinerador de lecho fluidizado	Calor	*Usado ampliamente para la incineración de lodos secos *Típicamente 20-35% de contenido de sólidos
Incinerado de calor múltiple	Calor	*Usado ampliamente para la incineración de lodos secos *Típicamente 20-35% de contenido de sólidos

En la tabla 16 se muestran los beneficios de la producción y utilización del biogás.

Tabla 16. Beneficios de la producción y utilización del bio-metano como combustible de transporte. (Shen, Linville, Urgun-Demirtas, Mintz, & Snyder, 2015)

ECONÓMICOS	ENERGÉTICOS	AMBIENTALES
*Transforma los desechos pasivos en nuevos centros de lucro	*Fondos netos de producción de energía	*Reduce emisiones de gases de efecto invernadero, amoníaco y partículas
*Añade valor a la materia prima de valor negativo	*Genera combustibles renovables de buena calidad	*Captura nutrientes para el reúso y reduce el uso de fertilizantes inorgánicos
*Reduce costos de operación/energía	*Produce exceso de energía como electricidad y calor en las PTAR	*Promueve la captura del carbón
*Reduce consumo del agua	*Reduce dependencia de las importaciones de energía	*Aumenta los beneficios del reciclaje y el reúso del agua
*Reduce la dependencia de las importaciones de energía		*Reduce la potencial contaminación de las aguas superficiales y subterráneas
*Creación de trabajos verdes		*Reduce el volumen de los desechos y el peso de los desechos sólidos dispuestos en tierra.
*Ingresos potenciales de la energía verde y los bonos de carbón		
*Ingresos potenciales de la venta de lodos digeridos (líquido y sólido)		

- Purificación de las aguas residuales para su reúso directo como agua potable: bioreactores de membrana, micro filtración, ultra filtración, ósmosis inversa, filtros percoladores entre otros. Windhoek, Namibia; Water Factory 21, Orange County Water District; NEWater, Singapore; West Basin, California; y Oostduinkerke, Bélgica son ejemplos de reúso directo e indirecto potable de las aguas residuales tratadas por procesos de lodos activados seguidos de micro filtración, ultrafiltración u ósmosis inversa (Tratamientos avanzados) (Diamantis, Melidis, Aivasidis, Vestræete, & Vlaeminck, 2011)

4. CUALIDADES DE TECNOLOGÍAS SOSTENIBLES DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

En las figuras 12 a 20 se muestran los diagramas de flujo de las tecnologías propuestas como sostenibles y en las tablas 17 a 25 sus correspondientes ventajas y desventajas.

4.1. PTAR con UASB y Laguna facultativa.

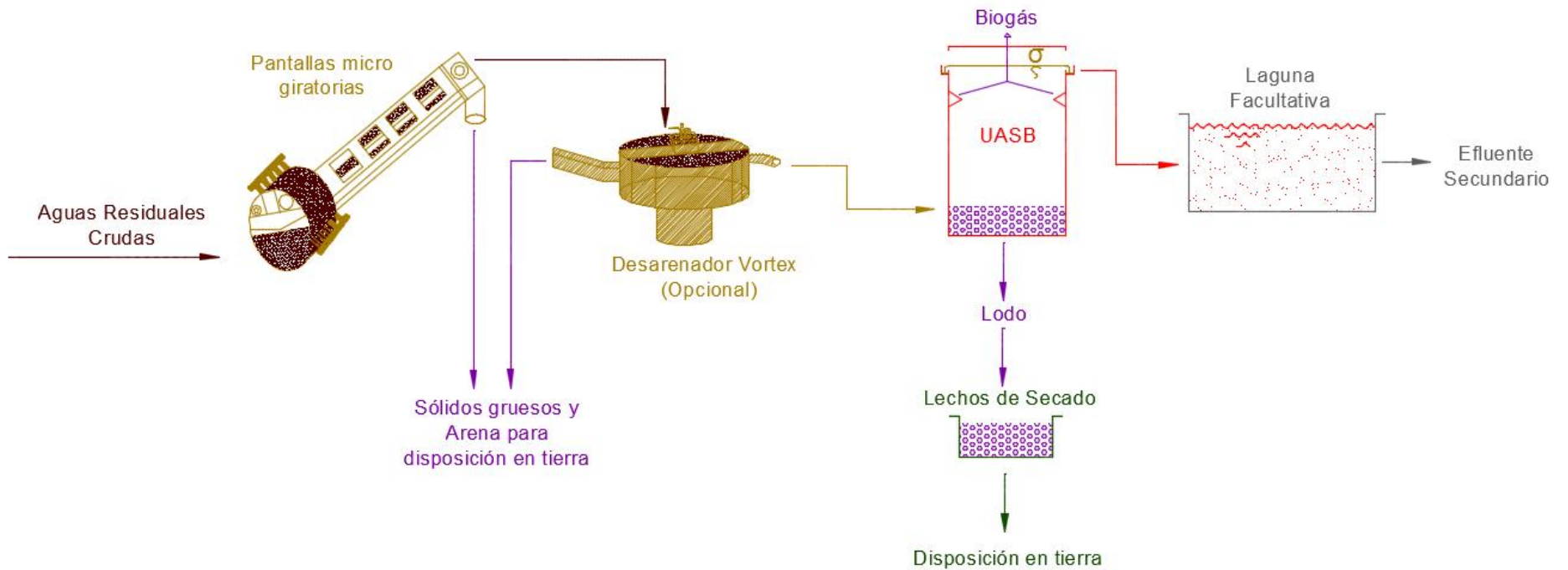


Figura 12. PTAR con UASB y Laguna facultativa.

La PTAR con UASB y laguna facultativa es un proceso de tecnologías apropiadas (Orozco & Libhaber, 2012); que incluye:

Pretratamiento:

- Pantallas micro giratorias
- Desarenador vortex (si es necesario según el afluente)
- Se dispone el residuo en tierra.

Tratamiento secundario:

- Reactor UASB: se da la remoción de la mayor parte de la materia orgánica

Tratamiento avanzado:

- Laguna facultativa: permiten remoción patogénica de manera natural sin necesidad de desinfección, si se da un tiempo de retención apropiado.

Tratamiento y disposición de lodos:

- Se tiene un sistema de lechos de secado, normalmente sin ningún equipo mecánico.
- Se dispone el lodo seco en tierra.

Tabla 17. Ventajas y desventajas de una PTAR con UASB y laguna facultativa.

PTAR Sostenible	Criterio de importancia	Ahorro de energía	Reducción de emisiones (gases y contaminación del aire)	Calidad y reúso del efluente	Tratamiento y disposición de lodos	Costo mínimo inversión, operación y manejo	Reducción de nutrientes
PTAR con UASB y laguna facultativa.	Ventajas	las pantallas micro giratorias sólo usan energía cuando el tambor está obstruido y el desarenador vortex no usa energía constante para la aireación	El UASB tiene recolección de biogás lo cual lo hace amigable con el vecindario y se puede usar en poblaciones densas.	Aceleración de la muerte de patógenos debido al incremento en la fotosíntesis en las lagunas que incrementa el pH debido al consumo de CO ₂ .	Elimina el tratamiento y la disposición continuos de lodos secundarios	Las pantallas micro giratorias no requieren mantenimiento y limpieza constante debido a que la maquinaria se desobstruye sola. El biogás recolectado se puede usar para aliviar el consumo de energía eléctrica.*	Reduce nutrientes. Nitrógeno por la evaporación de amonio gaseoso disuelto y fósforo por la precipitación del fosfato.
	Desventajas			Si el proceso de desinfección con las lagunas facultativas no es efectivo se deben implementar más tecnologías apropiadas con el fin de no terminar con la sostenibilidad del sistema	Se tiene un sistema de disposición de lodos en lechos normalmente sin ningún equipo mecánico.	El sistema de lagunas facultativas, si el área es escasa, se usan lagunas más profundas con sistemas de mezclado, se puede usar una unidad de ultrasonido para bajar el contenido de algas en el efluente final.	

*Se ha usado en ciudades de Brasil y Colombia, pero con pretratamiento convencional. Los costos aproximados de las instalaciones existentes para estos proyectos fueron de 15 US\$/cápita y los de operación de 0,79 US\$/año. Cápita (Orozco & Libhaber, 2012).

4.2. PTAR con UASB y Filtro anaerobio

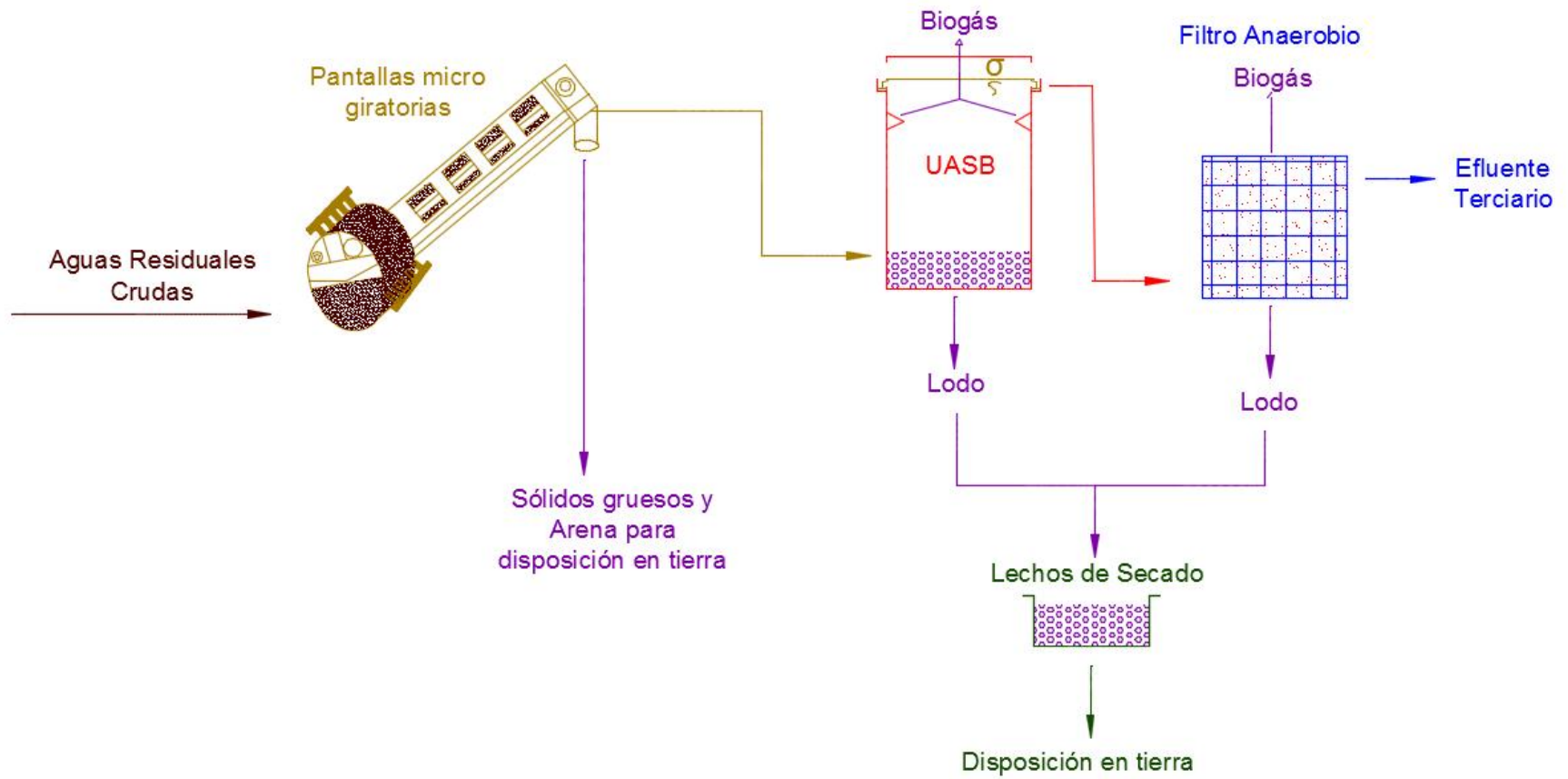


Figura 13. PTAR con UASB y filtro anaerobio.

La PTAR con UASB y filtro anaerobio es un proceso de tecnologías apropiadas (Orozco & Libhaber, 2012); incluye:

Pretratamiento:

- Pantallas micro giratorias
- Residuos se disponen en tierra

Tratamiento secundario:

- Reactor UASB: se da la remoción de la mayor parte de la materia orgánica

Tratamiento avanzado:

- Filtros Anaerobios: se da una parte razonable de la remoción patogénica, además contribuye con el pulido del efluente. (se debe tener en cuenta que según sea el caso particular donde se aplique el método se debe hacer desinfección).

Tratamiento y disposición de lodos:

- Se tiene un sistema de lechos de secado de lodos normalmente sin ningún equipo mecánico.

Tabla 18. Ventajas y desventajas de una PTAR con UASB y filtro anaerobio.

PTAR Sostenible	Criterio de importancia	Ahorro de energía	Reducción de emisiones (gases y contaminación del aire)	Calidad y reúso del efluente	Tratamiento y disposición de lodos	Costo mínimo inversión, operación y manejo	Reducción de nutrientes
PTAR con UASB y filtro anaerobio	Ventajas	Las pantallas micro giratorias solo usan energía cuando el tambor esta obstruido.	El UASB y el filtro anaerobio tienen recolección de biogás lo cual lo hace amigable con el vecindario y se puede usar en poblaciones densas	Alta calidad del efluente después de ser pulido por los filtros anaerobios.	Se reduce la producción de lodo secundario.	Debido a su poca ocupación de tierra, y su potencial de Biogás. *	
	Desventajas			Si la remoción de patógenos del efluente no es suficiente se deben implementar un sistema convencional de desinfección.	Se tiene un sistema de disposición de lodos en lechos normalmente sin ningún equipo mecánico.		No se evidencia mayor reducción de nutrientes.

*Este sistema ha sido implementado en la ciudad de Paraná en Brasil y con un costo de inversión de 5 a 30 US\$/Cápita (Orozco & Libhaber, 2012).

4.3. PTAR con CEPT y Lagunas aireadas.

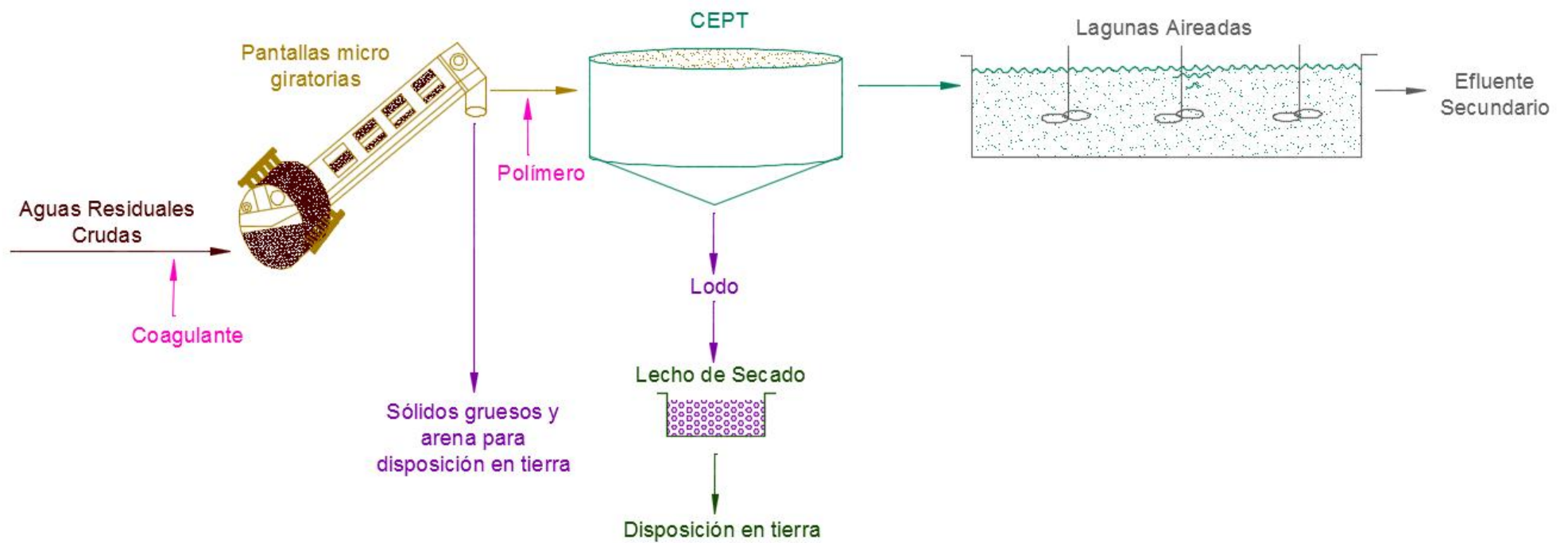


Figura 14. PTAR con CEPT y Lagunas Aireadas.

La PTAR con CEPT y lagunas aireadas es un proceso de tecnologías apropiadas (Orozco & Libhaber, 2012); que incluye:

Pretratamiento:

- Pantallas micro giratorias
- Se dispone el material removido en tierra.

Tratamiento primario:

- Unidad CEPT: se da la remoción de la mayor parte de la materia orgánica

Tratamiento avanzado:

- Lagunas aireadas: se pule el efluente proveniente de la unidad de CEPT removiendo residuales disueltos y materia orgánica suspendida como sólidos suspendidos.

Tratamiento y disposición de lodos:

- Producción alta de lodos, se tiene un sistema de lechos de secado de lodos normalmente sin ningún equipo mecánico.
- Se hace disposición de lodos secos en tierra.

Tabla 19. Ventajas y desventajas de una PTAR con CEPT y lagunas aireadas.

PTAR Sostenible	Criterio de importancia	Ahorro de energía	Reducción de emisiones (gases y contaminación del aire)	Calidad y reúso del efluente	Tratamiento y disposición de lodos	Costo mínimo inversión, operación y manejo	Reducción de nutrientes
PTAR con CEPT y lagunas aireadas.	Ventajas	Las pantallas micro giratorias solo usan energía cuando el tambor esta obstruido.	Emisión mínima de CO ₂ .	Llega a tener un efluente de calidad secundaria y trabaja efectivamente en cualquier rango de temperatura, Remoción de DQO soluble a través de la adsorción por los lodos. Remoción de metales pesados	Elimina el tratamiento y disposición continua de lodos secundarios.	Debido a su forma compacta y su poca ocupación de tierra, y además, al mantenimiento a largo plazo que se les debe dar tanto a los equipos como a los reactores. *	Remoción de nitrógeno en el efluente primario y total de fósforo según el coagulante escogido.
	Desventajas	Contiene varios procesos mecánicos: equipos de dosificación y floculación para la unidad de CEPT y los sistemas de aireación para las lagunas.		Si la remoción de patógenos del efluente no es suficiente se deben implementar un sistema convencional de desinfección.	Se tiene un sistema de disposición de lodos en lechos normalmente sin ningún equipo mecánico.	Tiene cierta dificultad en la operación de la unidad de CEPT, dada la dosificación de coagulante y polímero, además de los costos de estos.	

*Este sistema tiene costos de inversión en el rango de 40-50 US\$/Cápita y los costos de operación y manejo en el rango de 1.5–2 US\$/año/cápita (Orozco & Libhaber, 2012).

4.4. PTAR con CEPT y Lagunas de estabilización

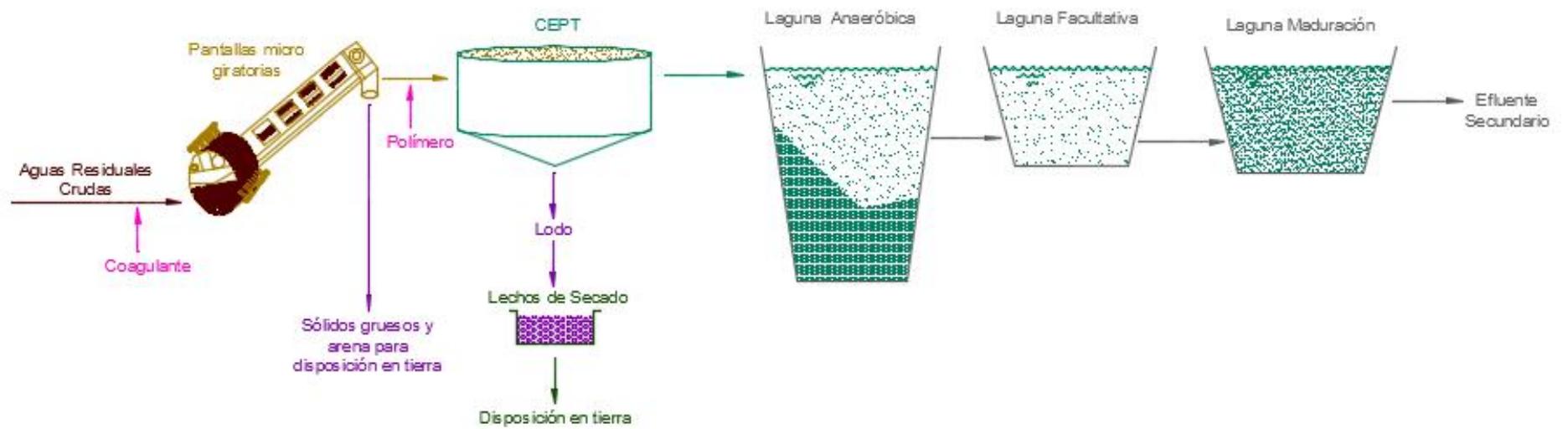


Figura 15. PTAR con CEPT y Lagunas de Estabilización.

La PTAR con CEPT y lagunas de estabilización es un proceso de tecnologías apropiadas (Orozco & Libhaber, 2012); incluye:

Pretratamiento:

- Pantallas micro giratorias
- Residuos se disponen en tierra.

Tratamiento primario:

- Unidad CEPT: se da la remoción de la mayor parte de la materia orgánica

Tratamiento secundario y avanzado:

- Lagunas de estabilización: se pule el efluente proveniente de la unidad de CEPT.

Tratamiento y disposición de lodos:

- Producción alta de lodos, se tiene un sistema de lechos de secado de lodos normalmente sin ningún equipo mecánico.
- Disposición de lodos secos en tierra.

Tabla 20. Ventajas y desventajas de una PTAR con CEPT y lagunas de estabilización.

PTAR Sostenible	Criterio de importancia	Ahorro de energía	Reducción de emisiones (gases y contaminación del aire)	Calidad y reúso del efluente	Tratamiento y disposición de lodos	Costo mínimo inversión, operación y manejo	Reducción de nutrientes
PTAR con CEPT y lagunas de estabilización	Ventajas	Las pantallas micro giratorias solo usan energía cuando el tambor esta obstruido.	Emisión mínima de CO ₂ .	Llega a tener un efluente de buena calidad. Remoción de organismos patógenos en la laguna de maduración. Remoción de DQO soluble a través de la adsorción por los lodos. Remoción de metales pesados	Elimina el tratamiento y disposición continuos de lodos secundarios.	Debido a su forma compacta, y además, al mantenimiento a largo plazo que se debe dar tanto a los equipos como a los reactores, fácil operación. Las lagunas no necesitan energía para su operación ni operarios expertos. *	Remoción de nitrógeno en el efluente primario y total de fósforo según el coagulante escogido.
	Desventajas	Contiene varios procesos mecánicos: equipos de dosificación y floculación para la unidad de CEPT.	No tiene recolección de biogás.		Gran producción de lodos (CEPT); se tiene un sistema de disposición de lodos en lechos normalmente sin ningún equipo mecánico.	Ocupación de grandes áreas debido a las lagunas.	

*Este sistema puede usarse en ciudades medianas, los costos de inversión está en el rango de 40-80 US\$/Cápita y los costos de operación y manejo en el rango de 1.5–2 US\$/año/cápita (Orozco & Libhaber, 2012)

4.5. PTAR con filtro percolador y Bioreactor de membrana.

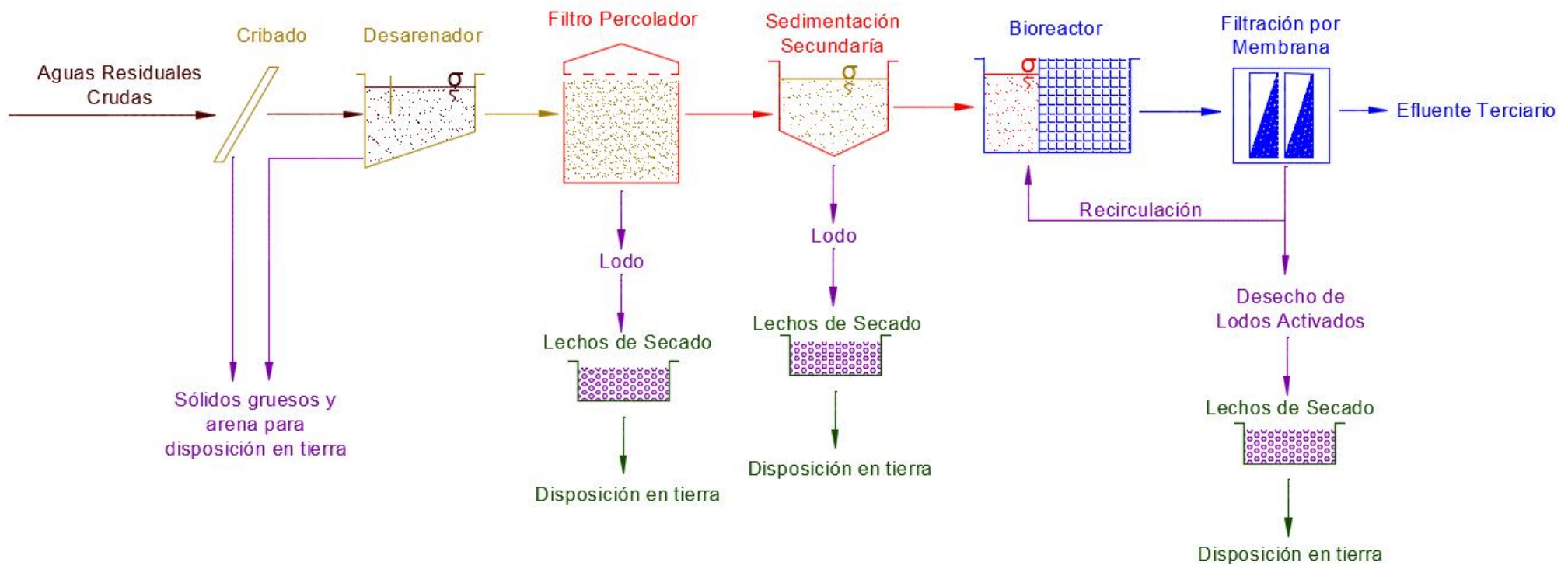


Figura 16. PTAR con Filtro percolador y Bioreactor de membrana.

La PTAR con Filtro percolador y Bioreactor de membrana es un proceso de tecnologías sofisticadas (Metcalf & Eddy, 2014) (Vesilind & Rooke, 2003); incluye:

Pretratamiento:

- Rejillas de cribado
- Tanque desarenador
- Residuos se disponen en tierra

Tratamiento secundario:

- Filtros percoladores: remoción del altas cargas de DBO (sobre todo cargas de choque) y pueden ser diseñados para alcanzar la nitrificación.
- Sedimentador secundario

Tratamiento avanzado:

- Bioreactor de membrana: remoción eficaz de SS y SD, además se da la remoción de bacterias y virus, estos materiales son retenidos en la membrana.

Tratamiento y disposición de lodos:

- Se tiene un sistema de disposición lechos de secado de lodo normalmente sin ningún equipo mecánico.
- Disposición de lodos secos en tierra.

Tabla 21. Ventajas y desventajas de una PTAR con Filtro Percolador y Bioreactor de Membrana.

PTAR Sostenible	Criterio de importancia	Ahorro de energía	Reducción de emisiones (gases y contaminación del aire)	Calidad y reúso del efluente	Tratamiento y disposición de lodos	Costo mínimo inversión, operación y manejo	Reducción de nutrientes
PTAR con Filtros Percoladores y Bioreactor de membrana	Ventajas			Efluente de gran calidad para emplear de forma adecuada en varios usos (incluso uso potable indirecto), esto debido a la remoción de SS y SD eficiente del Bioreactor de membrana, este además elimina patógenos y virus.		Ocupación de espacio media dada las características de los procesos biológicos (F.P. y B.M.); no son necesarios los procesos de desinfección.	
	Desventajas	Contiene varios procesos mecánicos: equipos de aireación que proporcionan oxígeno en procesos de desarenado y en el tratamiento biológico.	No tiene recolección de biogás.		Producción de lodos primarios y secundarios; se tiene un sistema de disposición de lodos en lechos normalmente sin ningún equipo mecánico.	Presenta costos elevados de inversión, operación y mantenimiento; debido a la complejidad de procesos se necesita personal capacitado para su operación.	

4.6. PTAR con Lodos activados y Bioreactor de membrana.

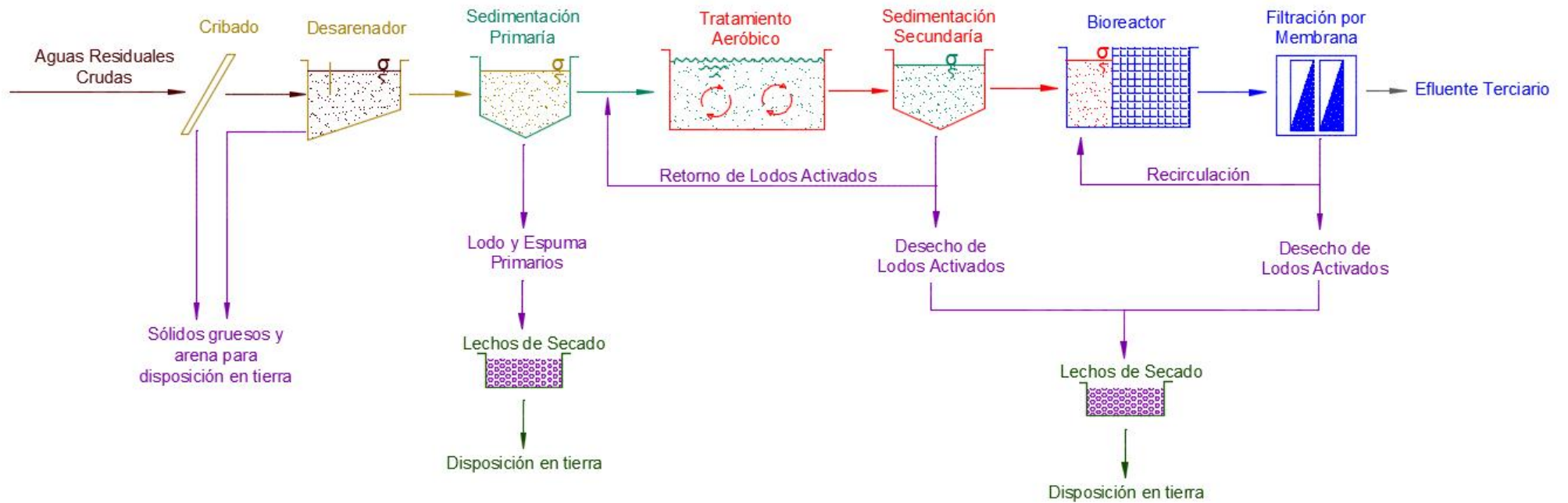


Figura 17. PTAR con Lodos activados y Bioreactor de membrana.

La PTAR con Lodos activados y Bioreactor de membrana es un proceso de tecnología sofisticada (Metcalf & Eddy, 2014) (Vesilind & Rooke, 2003); incluye:

Pretratamiento:

- Rejillas de cribado
- Tanque desarenador
- Residuos se disponen en tierra

Tratamiento primario:

- Sedimentación primaria.

Tratamiento secundario:

- Tanque de lodos activados: remoción de materia orgánica.
- Sedimentador secundario

Tratamiento avanzado:

- Bioreactor de membrana: remoción eficaz de SS y SD, además se da la remoción de bacterias y virus, estos materiales retenidos en la membrana.

Tratamiento y disposición de lodos:

- Se tiene un sistema de lechos de secado de lodos normalmente sin ningún equipo mecánico.
- Disposición de lodos secos en tierra.

Tabla 22. Ventajas y desventajas de una PTAR con Lodos Activados y Bioreactor de Membrana.

PTAR Sostenible	Criterio de importancia	Ahorro de energía	Reducción de emisiones (gases y contaminación del aire)	Calidad y reúso del efluente	Tratamiento y disposición de lodos	Costo mínimo inversión, operación y manejo	Reducción de nutrientes
PTAR con Lodos Activados y Bioreactor de membrana	Ventajas			Efluente de gran calidad para emplear de forma adecuada en varios usos (incluso uso potable indirecto) por la remoción eficiente de materia orgánica, patógenos y virus.		Ocupación de espacio media dada las características de los procesos biológicos (L.A. y B.M.); no son necesarios los procesos de desinfección. *	Se evidencia remoción de nutrientes a lo largo de tratamiento.
	Desventajas	Requiere de equipos mecánicos tanto para la fase de desarenado como para el tratamiento biológico y el bioreactor.	No tiene recolección de biogás.		Producción media de lodos primarios y gran producción de lodos secundarios. Se tiene un sistema de disposición de lodos en lechos normalmente sin ningún equipo mecánico.	Presenta costos elevados de inversión, operación y mantenimiento; debido a la complejidad de procesos se necesita personal capacitado para su operación.	

*Los costos de inversión aproximados para el sistema de lodos activados es un valor de 100 US\$/Cápita en adelante, sin embargo el uso de BM permite que esta unidad de operación reduzca su tamaño, sin embargo los costos de esta PTAR son elevados (Orozco & Libhaber, 2012).

4.7. PTAR con Lagunas de estabilización

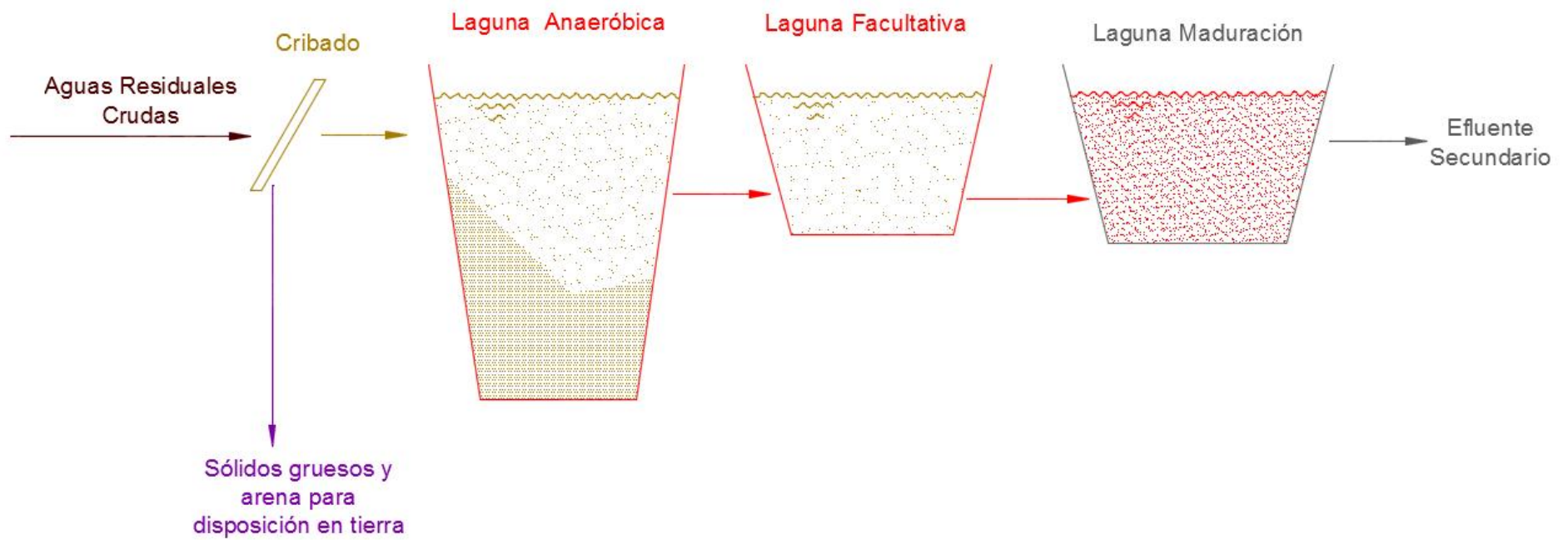


Figura 18. PTAR con Lagunas de estabilización.

La PTAR con Lagunas de estabilización es un proceso de tecnologías apropiadas (Orozco & Libhaber, 2012); que incluye:

Pretratamiento:

- Rejillas de cribado
- Tanque desarenador
- Residuos se disponen en tierra

Tratamiento secundario:

- Laguna Anaerobia: primer paso en un sistema de lagunas, remoción de materia orgánica (parcialmente la materia orgánica disuelta).
- Laguna Facultativa: remoción de materia orgánica por procesos facultativos.

Tratamiento avanzado:

- Laguna de Maduración: estanque de pulido del efluente proveniente de los procesos anteriores, remoción de organismos patógenos.

Tratamiento y disposición de lodos:

- No se tiene un sistema de tratamiento de lodos. Eventualmente, se puede requerir desenlode de las lagunas, pero después de periodos prolongados de operación.

Tabla 23. Ventajas y desventajas de una PTAR con Lagunas de estabilización.

PTAR Sostenible	Criterio de importancia	Ahorro de energía	Reducción de emisiones (gases y contaminación del aire)	Calidad y reúso del efluente	Tratamiento y disposición de lodos	Costo mínimo inversión, operación y manejo	Reducción de nutrientes
PTAR con Lagunas de estabilización	Ventajas	No hace uso de energía, lo cual quiere decir que hay un ahorro de energía total.		Llega a tener un efluente de muy buena calidad con remociones del 80 al 90% de DBO, DQO y SST (con un buen diseño). Remoción de Coliformes fecales y E-coli en la laguna facultativa, además de organismos patógenos en la laguna de maduración	Elimina el tratamiento y disposición continuos de lodos secundarios.	Costos de inversión, operación y mantenimiento bajos, fácil operación. Las lagunas no necesitan energía para su operación ni operarios expertos. *	Alta remoción de fosforo y nitrógeno (con el tiempo de retención suficiente en el sistema).
	Desventajas		No tiene recolección de biogás.			Ocupación de grandes áreas debido a las lagunas facultativas y de maduración.	

*Este sistema puede usarse en ciudades medianas, los costos de inversión está en el rango de 10-40 US\$/Cápita y los costos de operación y manejo en el rango de 0.2–0.4 US\$/año/cápita (Orozco & Libhaber, 2012).

4.8. PTAR con Laguna anaerobia cubierta con geomembrana y Lagunas aireadas.

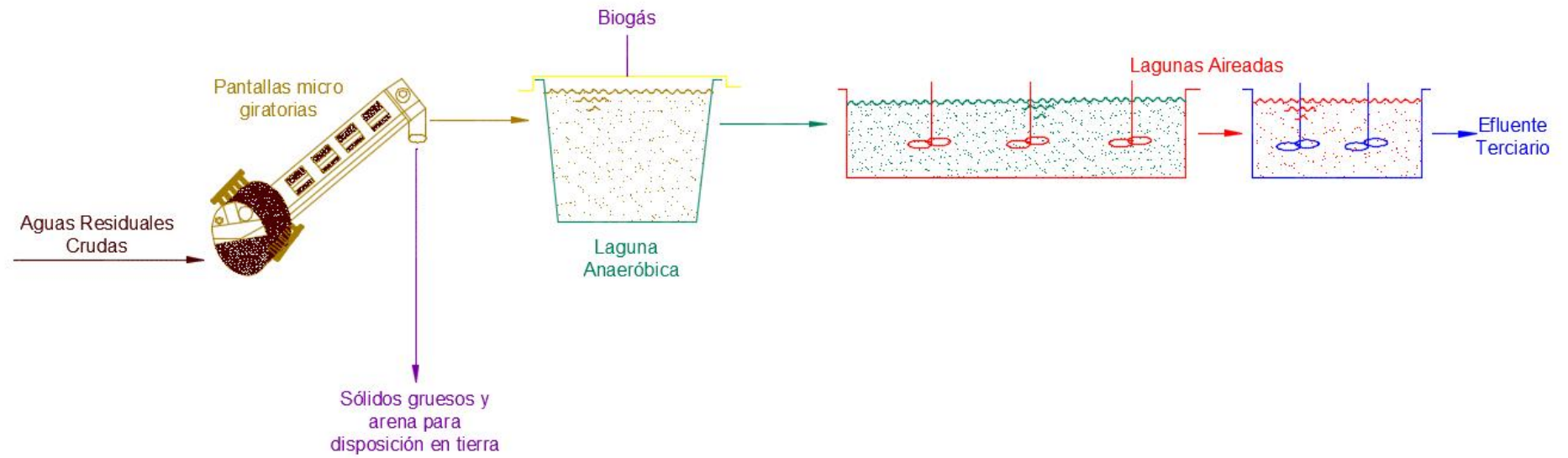


Figura 19. PTAR con Laguna anaerobia cubierta con geomembrana y lagunas aireadas.

La PTAR con Laguna anaerobia y Lagunas aireadas es un proceso de tecnologías apropiadas (Orozco & Libhaber, 2012); que incluye:

Pretratamiento:

- Pantallas micro giratorias
- Residuos se disponen en tierra

Tratamiento primario:

- Laguna anaerobia recubierta con geomembrana: remoción de la materia orgánica de las aguas residuales (parcialmente la materia orgánica disuelta) y recolección de biogás.

Tratamiento secundario y avanzado:

- Lagunas aireadas: se pule el efluente proveniente de la laguna anaerobia removiendo materia orgánica residual (se debe tener en cuenta que según sea el caso particular donde se aplique el método se debe hacer desinfección).

Tratamiento y disposición de lodos:

- No se tiene un sistema de tratamiento de lodos. Eventualmente, se puede hacer desenlode de la última laguna.

Tabla 24. Ventajas y desventajas de una PTAR con Laguna anaerobia cubierta con geomembrana y Lagunas aireadas.

PTAR Sostenible	Criterio de importancia	Ahorro de energía	Reducción de emisiones (gases y contaminación del aire)	Calidad y reúso del efluente	Tratamiento y disposición de lodos	Costo mínimo inversión, operación y manejo	Reducción de nutrientes
PTAR con Laguna anaerobia cubierta con geomembrana y Lagunas Aireadas	Ventajas	Las pantallas micro giratorias solo usan energía cuando el tambor esta obstruido. Aunque el gasto de energía para las PMG como para los aireadores lo puede suplir el biogás producido.	Recolección de biogás, ausencia de malos olores.	Llega a tener un efluente de buena calidad. Remoción de materia orgánica eficiente.	Producción mínima eventual de lodos.	Ocupación media de espacio. Mantenimiento y operación sencillos. *	
	Desventajas	Contiene varios procesos mecánicos: equipos de aireación		De ser necesario se debe aplicar alguna unidad de desinfección.		Se hace necesario procesar el biogás para la generación de energía, además de personal especializado para el manejo de las lagunas.	No se evidencia mayor reducción de nutrientes.

*Los costos de inversión aproximados están en el rango de 60-80 US\$/Cápita y los costos de operación y manejo haciendo un cálculo aproximado en el rango de 4–10 US\$/año/cápita (Orozco & Libhaber, 2012) (Chouk - Allah & Hamdy, 2005).

4.9. PTAR con sistema natural de tratamiento.

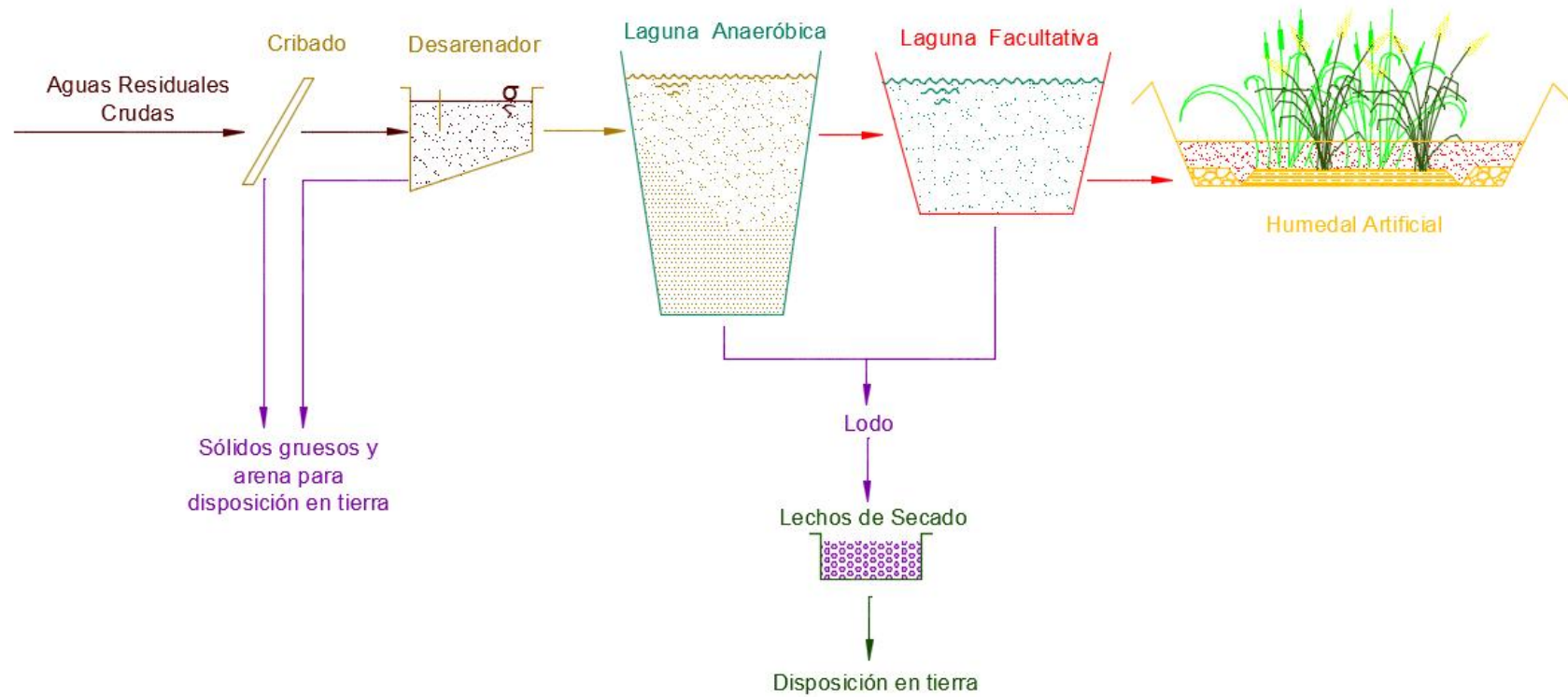


Figura 20. PTAR con sistema natural de tratamiento.

La PTAR con sistema natural de tratamiento es un proceso de tecnologías apropiadas (Daigger, 2005); que incluye:

Pretratamiento:

- Rejillas de cribado
- Tanque desarenador
- Residuos se disponen en tierra

Tratamiento primario:

- Laguna anaerobia: remoción de la materia orgánica de las aguas residuales (parcialmente la materia orgánica disuelta).

Tratamiento secundario:

- Laguna facultativa: tratamiento biológico, sedimentación y algo de remoción de Coliformes fecales.

Tratamiento avanzado:

- Humedales artificiales: contribuyen con el pulido del efluente y con remoción de nutrientes. Se debe tener en cuenta que según sea el caso particular donde se aplique, se debe hacer desinfección.

Tratamiento y disposición de lodos:

- Se tiene un sistema de secado para reúso o disposición de lodos normalmente sin ningún equipo mecánico.

Tabla 25. Ventajas y desventajas de una PTAR con Sistema natural de tratamiento.

PTAR Sostenible	Criterio de importancia	Ahorro de energía	Reducción de emisiones (gases y contaminación del aire)	Calidad y reúso del efluente	Tratamiento y disposición de lodos	Costo mínimo inversión, operación y manejo	Reducción de nutrientes
PTAR con Sistema natural de tratamiento	Ventajas	Las lagunas y el humedal artificial no necesitan energía para su operación		Efluente de buena calidad remoción de 70 a 90% de DBO y SST. Se presenta reducción en los Coliformes fecales dado el proceso biológico de las lagunas.	Elimina el tratamiento y disposición continuos de lodos secundarios.	Buena integración con áreas rurales, generación de biomasa vegetal, sencilla de operar. Además, los costos de operación y mantenimiento son reducidos, no se necesita personal experto. *	Se evidencia buena remoción de fosforo por adsorción en la cama media y precipitación; y remoción parcial de nitrógeno (se presenta la nitrificación y Desnitrificación).
	Desventajas		No tiene recolección de biogás, posible generación de olores por emisión de H ₂ S.	De ser necesario se debe aplicar alguna unidad de desinfección.		Ocupación de grandes áreas debido a las lagunas y el humedal artificial.	

*Los costos de inversión aproximados están en el rango de 30-60 US\$/Cápita y los costos de operación y manejo aproximados en el rango de 2–4 US\$/año/cápita (Orozco & Libhaber, 2012).

5. CASOS DE TECNOLOGÍAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES SOSTENIBLES.

5.1. Ciudad de Santa Cruz, Bolivia (Orozco & Libhaber, 2012)

La ciudad de Santa Cruz en Bolivia cuenta con 4 plantas de tratamiento de aguas residuales, tres de ellas tratan aguas residuales municipales y la restante trata aguas residuales industriales, las 4 PTAR cuentan con el mismo sistema de tratamiento.

Descripción de las plantas:

- Pantallas micro giratorias (consumo bajo de energía)
- Laguna anaerobia cubierta
- Laguna Facultativa (Equipada con mezcladores, consumo bajo de energía): 2
- Laguna de Maduración

La figura 21 muestra el diagrama de flujo de proceso de tratamiento de las aguas residuales en las 4 plantas de la ciudad de Santa Cruz en Bolivia.

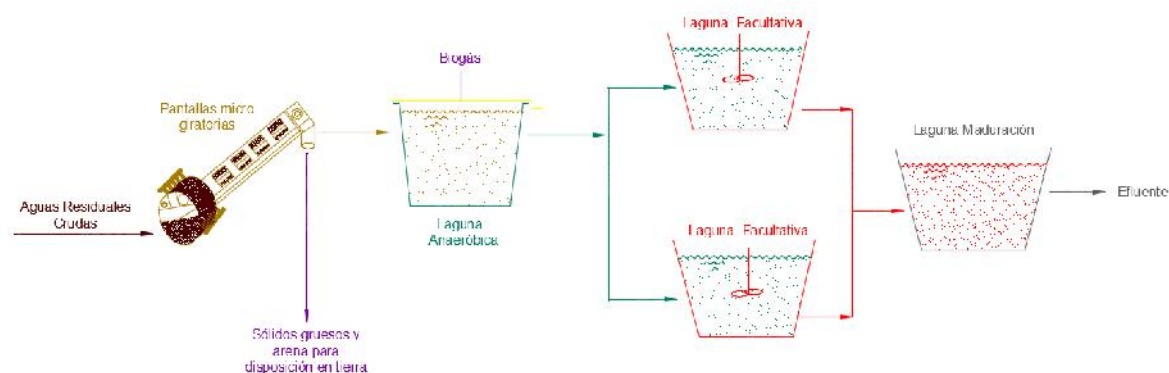


Figura 21. Diagrama de flujo PTAR Santa Cruz, Bolivia.

Los caudales de cada planta se incluyen en la Tabla 26.

Tabla 26. Caudales de trabajo PTAR ciudad de Santa Cruz en Bolivia.

Planta	Q (m ³ /d)	Q (m ³ /s)
N1	14000	0,16
N2	42000	0,49
E	32000	0,37
PI	8000	0,09
Total	96000	1,11

Consumo de energía:

Los mezcladores de las lagunas facultativas consumen mínima energía ya que la mayoría del tiempo trabaja por acción de la energía eólica.

Producción de energía:

El biogás recolectado en cada una de las plantas es mucho mayor que la demanda de energía de los pocos equipos que se manejan.

Se realizó un estudio para ver la factibilidad de procesar el biogás (contiene 65% metano) y sacar provecho económico de este y resultaron 3 alternativas:

- Generación de electricidad en cada una de las PTAR
 - o Total de inversión: 1,73 millones de dólares
 - o Ahorro anual de energía: 1,25 millones de dólares
 - o Costos de O&M: 245600 US\$/año
 - o Tasa interna de retorno: 78%
 - o Costo de generación de electricidad: 0,0294 US\$/kWh

- Generación de electricidad en estaciones de bombeo:
 - o Total de inversión: 2,31 millones de dólares
 - o Ahorro anual de energía: 0,795 millones de dólares
 - o Costos de O&M: 219500 US\$/año
 - o Tasa interna de retorno: 24%

- Generación de gas natural (Vehicular): no viable debido a los altos costos.

Reducción de emisiones:

La ciudad de Santa Cruz firmó un contrato de venta de la reducción de emisiones (uso del biogás) a los fondos de carbono de desarrollo comunitario, por una cantidad esperada de 2.080.000 dólares durante el periodo de 2007-2015.

5.2. Plantas de tratamiento de aguas residuales en Estados Unidos con Bioreactor de membrana.

En los últimos años se ha venido haciendo más frecuente el uso de los Bioreactores de membrana dada su efectividad para el tratamiento de aguas residuales. En la Tabla 27 se enlistan algunas de las plantas en Estados Unidos que usan los Bioreactores de membrana para tratar las aguas residuales y dar reúso del efluente resultante.

Tabla 27. Plantas con Bioreactor de Membrana con usos sostenibles en los Estados Unidos. (Fatta - Kassinos, Dionysiou, & Kümmerer, 2016)

Nombre	Localización	Año de inicio de actividades	Q pico (m ³ /day)	Q pico (m ³ /s)	Tipo de Reusó
PTAR Carnation	King Country, WA	2008	1817	0,02	Irrigación
PTAR Brightwater	King Country, WA	2011	117348	1,36	Irrigación y reuso industrial
PRA Cauley Creek	Fulton country, GA	2004	18927	0,22	Irrigación, riego de céspedes y descarga.
PRA Fowler	Forsyth Country, GA	2004	9464	0,11	Irrigación
PRA Spokane Country	Spokane Country, WA	2011	30283	0,35	Industrial, irrigación urbana, restauración de humedales, recarga de acuíferos.
PRA Yellow River	Gwinnett Country, GA	2012	69273	0,80	Propósitos no potables o descarga al río
PRA James Creek	Forsyth Country, GA	2006	3785	0,04	Irrigación
Campus Ambiental John Creek	Fulton country, GA	2009	56781	0,66	Irrigación, agua de retrete, protección anti-incendios
PTAR Pooler	Chatham Country, GA	2004	9464	0,11	Irrigación de campos de golf
PTAR Upper Sweetwater	Palding Country, GA	2009	3785	0,04	Irrigación de campos de golf
PTAR Yakama NLC	Yakima Country, WA	2008	1363	0,02	riego de céspedes y descarga
PTAR Shelton	Mason Country, WA	2012	15142	0,18	Recarga de las aguas subterráneas
PTAR Red Hawk C	CA	2008	2650	0,03	Agua de retrete, protección anti-incendios y riego de paisajes
PTAR American Cayon	Napa Country, CA	2002	14195	0,16	Irrigación de campos de golf y viñedos, descarga
PTAR Corona	Riverside Country, CA	2001	3785	0,04	Riego de paisajes y descarga
PTAR Marco Island	Collier Country, FL	2007	11356	0,13	Irrigación
PTAR Ironhouse Sanitary District	Contra Costa Country, CA	2011	32555	0,38	Irrigación y descarga
PTAR Faillingwater Conservancy	Fayette Country, PA	2003	3331	0,04	Irrigación de jardines, agua de descarga o de lavado
PTAR Redlands	San Bernardino Country, CA	2004	24984	0,29	Reuso industrial

Tabla 28. Plantas con Bioreactor de Membrana con usos sostenibles en los Estados Unidos. (Fatta - Kassinos, Dionysiou, & Kümmerer, 2016) (Continuación)

Nombre	Localización	Año de inicio de actividades	Q pico (m ³ /day)	Q pico (m ³ /s)	Tipo de Reusó
PRA The Hamptons	Forsyth Country, GA	2003	1041	0,01	Irrigación
PTAR Santa Paula	Ventura Country, CA	2010	27255	0,32	Irrigación
PTAR Upper Wallkill	Sussex Country, NJ	2010	1003	0,01	Descarga por infiltración

5.3. San Diego, California Repurificación de agua por Biorreactor de membrana

En California existe regulación para las aguas residuales desde el año 1918, siempre se han mantenido a la vanguardia de conocimiento y tecnologías para enfrentar las falencias del recurso (agua). Su problema consiste en que tiene una gran variabilidad en cuanto a la disponibilidad del recurso de norte a sur. El norte de California cuenta con gran cantidad de recurso y con poca población mientras que el sur está altamente poblado y cuenta con recurso de agua limitado, la primera acción que se ejerció para equilibrar la falta de agua fue transportarla de norte a sur (a los Ángeles y San Diego más específicamente), mediante bombeo.

Los estudios realizados demostraron que el costo del el tratamiento de las aguas para su reúso en el sur de California era sólo 3 veces mayor al tratamiento en el norte, en cambio el costo del transporte del recurso al sur era 60 veces mayor que el costo del tratamiento en el norte. (Angelakis & Gikas, 2014)

Para el año 2000 en San Diego se pagaron 400 dólares por la compra de agua potable, en el año 2016 se han pagado 1200 dólares por la compra de este recurso y se presume que esta cifra crecerá en las décadas venideras. Dadas estas condiciones se decide iniciar con el proyecto de la repurificación del agua (Pure Water) en San Diego (Figura 22).

“Con el sistema de agua existente en San Diego sólo el 8% de las aguas residuales de los hogares y negocios se recicla; el resto se trata y se descarga en el océano. El Programa de Pure Water transforma el sistema de agua de la ciudad en un ciclo integral del agua que maximiza el uso del recurso más precioso del mundo – el agua.” (San Diego City, 2016)

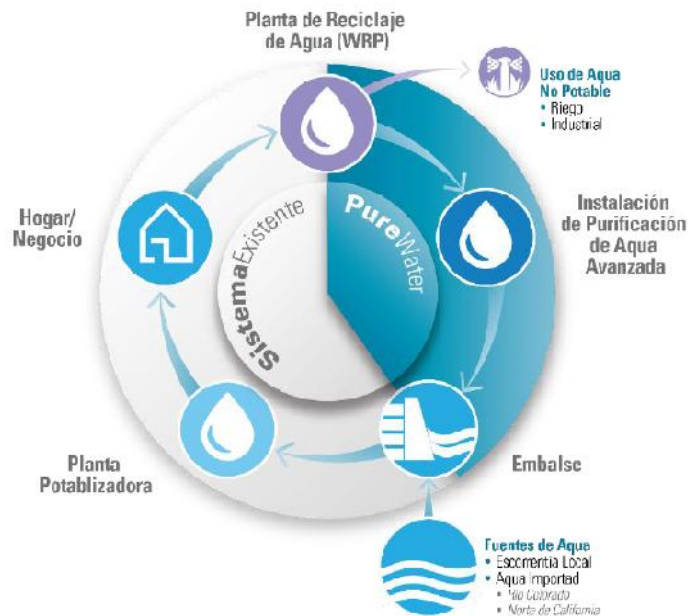


Figura 22. Proceso cíclico del uso de agua en la ciudad de San Diego California. (San Diego City, 2016)

El proyecto se empezará a construir a partir de 2019, y tendrá dos fases como se muestra a continuación:

FASE 1 North City

- Terminación: 2021
- Producción de Pure Water: 113.562 m³/d
- Reducción adicional de descargas oceánicas en Point Loma: ~170.343 m³/d
- Pure Water entregada a los Reservorios de San Vicente o Miramar



Figura 23. Fase 1 Pure Water San Diego, California

Fase 1: Norte de la ciudad, se completará en 2021 donde se producirán 113562 m³/d con lo que se reducirán 170343 m³/d de descargas a l océano y finalmente este recurso será acumulado en los reservorios de San Vicente o Miramar.

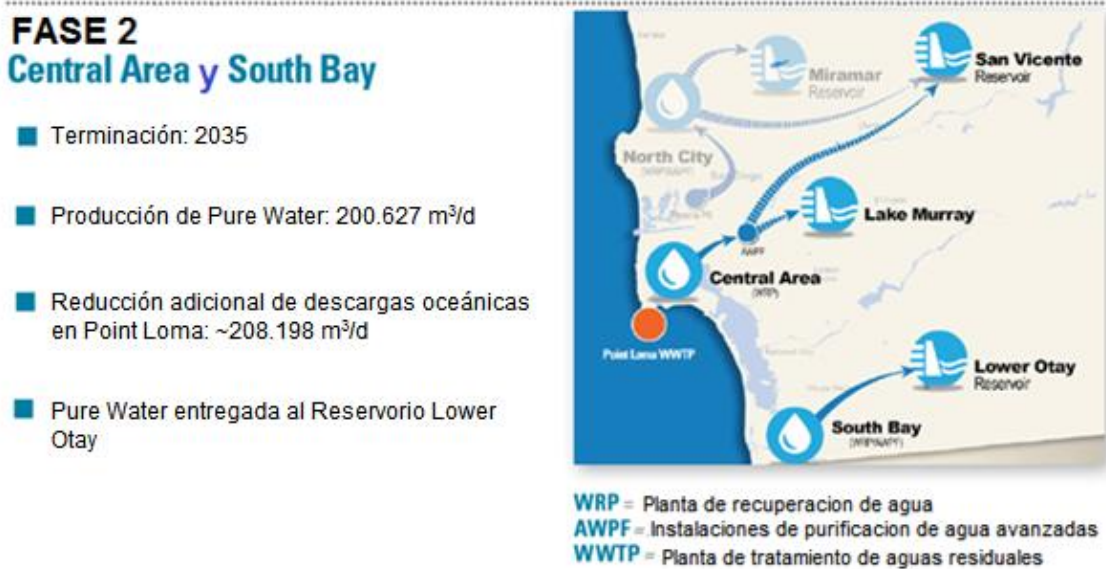


Figura 24. Fase 2 Pure Water San Diego, California

Fase 2: Centro y sur de la ciudad, se completara en 2035 donde se producirán 200627 m³/d con lo que se reducirán 206198 m³/d de descargas al océano y finalmente este recurso será acumulado en el reservorio de Lower Ontario.

Actualmente las plantas existentes se encuentran conformadas por los procesos que muestra los diagramas de flujo en las figuras 25, 26 y 27.

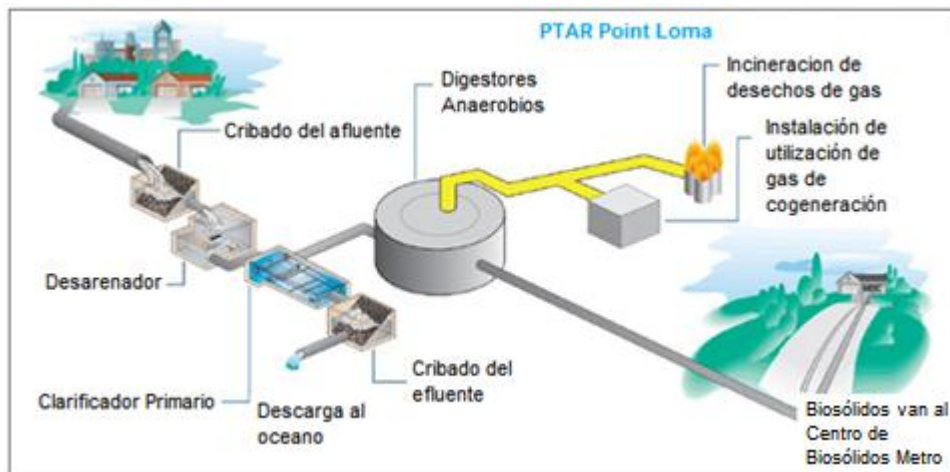


Figura 25. Planta Point Loma (City of San Diego, 2012)



Figura 26. Planta South Bay (City of San Diego, 2012)

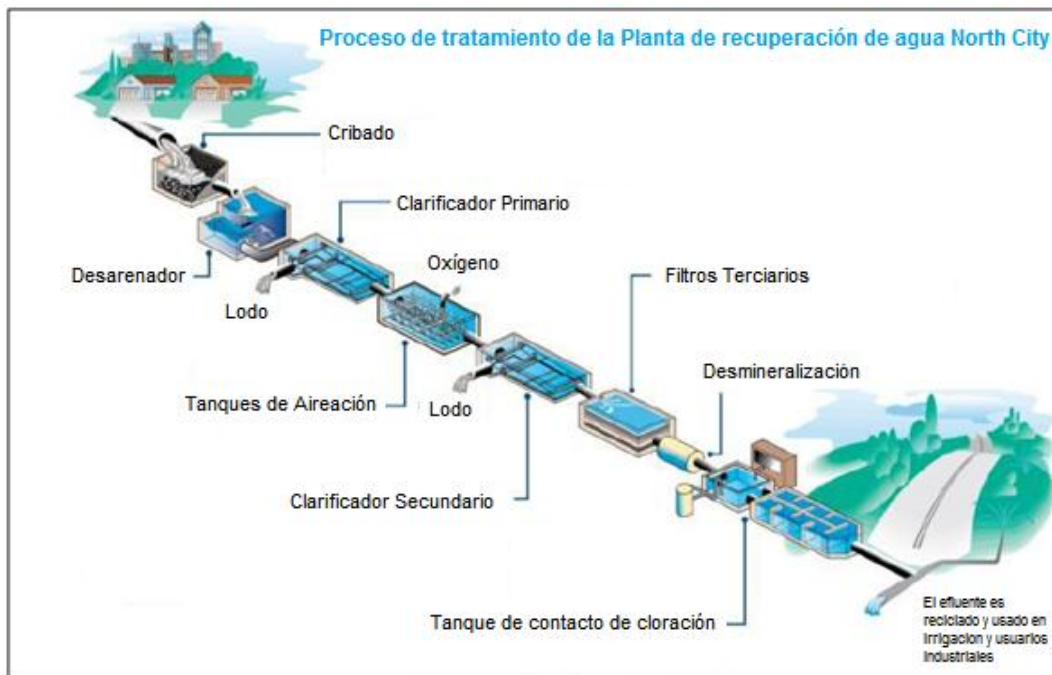


Figura 27. Planta North city (City of San Diego, 2012)

El programa Pure Water incluirá el esquema de la figura 28 para finalizar la purificación del agua y reservarla para su reúso.

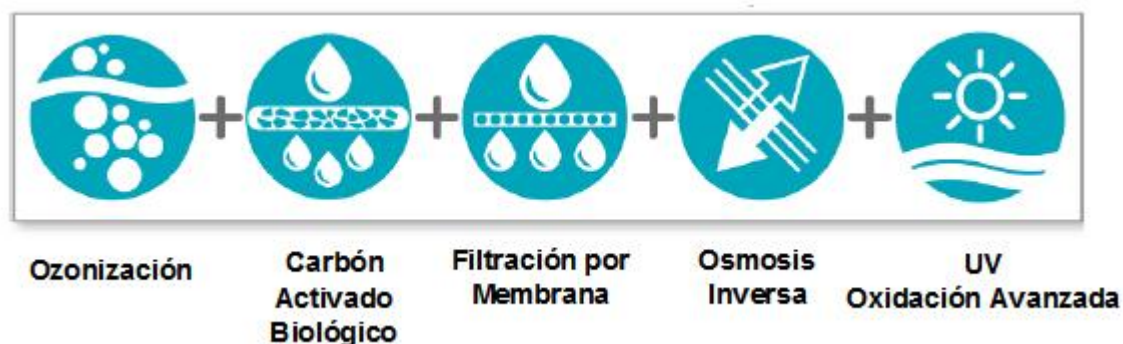


Figura 28. Proceso de re purificación de las aguas residuales San Diego, California.

Desde junio 2011, la ciudad ha producido 3785 m³/d de agua purificada todo los días en su instalación de demostración de Purificación de Agua Avanzada.

Más de 28,000 pruebas de calidad de agua han confirmado que el agua es segura y cumple con todas las normas federales y estatales de agua potable. (San Diego City, 2016)

5.4. Municipalidad de Ipatinga, Minas Gerais, Brasil (Orozco & Libhaber, 2012)

Las plantas de Arenal, Bela Vista, Horto e Ipanema en la municipalidad de Ipatinga poseen un sistema de tratamiento de aguas residuales compuesto por UASB y filtros anaerobios.

La planta de Ipanema la cual fue evaluada durante un periodo de 1 año (2005 – 2006) presentó las siguientes remociones: 84% de DBO, un promedio de 87% de DQO y un promedio de 80% de SST.

Descripción de la planta:

- Reactores UASB:10
- Filtros anaerobios: 2
- Lechos de secado de lodos

En la figura 29 se presenta el diagrama de flujo de la PTAR de Ipanema y un esquema de la ubicación de las unidades de operación usadas en la planta para llevar a cabo el proceso del tratamiento de las aguas residuales.

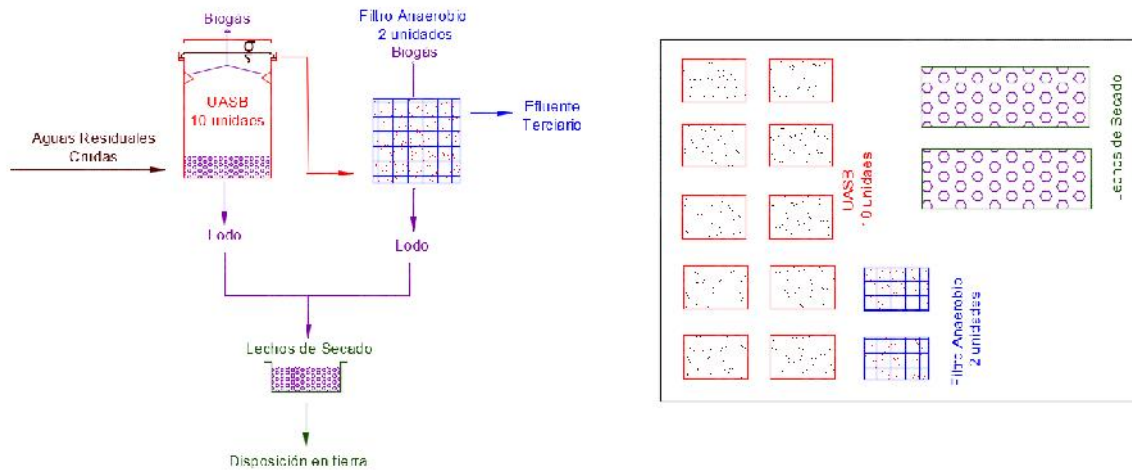


Figura 29. Diagrama de flujo y esquema ubicación de las unidades de operación PTAR Ipanema, Brasil.

El caudal de la planta 180 L/s sirviendo a una población de 200000 habitantes.

5.5. City Riviera Sao Lourenco, Sao Paulo, Brasil (Orozco & Libhaber, 2012)

Riviera Sao Lourenco es un lugar vacacional ubicado en la costa atlántica del estado de Sao Paulo en Brasil, inicialmente se daba el tratamiento de las aguas residuales con un sistema de lagunas, este no era suficiente en la temporada de verano dado el incremento de las aguas residuales por el aumento de turistas en esta época.

Descripción de la planta actualizada:

- Pretratamiento
- Unidades de CEPT: 2 (180 m² C/U)
- Laguna anaerobia (7200 m²)
- Lagunas Facultativas en paralelo: 3 (12.000 m², 17.000 m², 18.000 m²)
- Sistema de Cloración

A la planta se le agregaron 2 unidades de CEPT y el pretratamiento lo cual significó un incremento del 250% del rendimiento en la época de verano, las unidades de CEPT solo se usan en época de verano y cuando se registran cargas de choque.

Se registraron remociones de 80-95% de SST, 50-60% de DBO y 82-87% de P en temporada de verano para 65000 habitantes.

La figura 30 muestra el diagrama de flujo y un esquema de la ubicación de las unidades de operación de la PTAR.

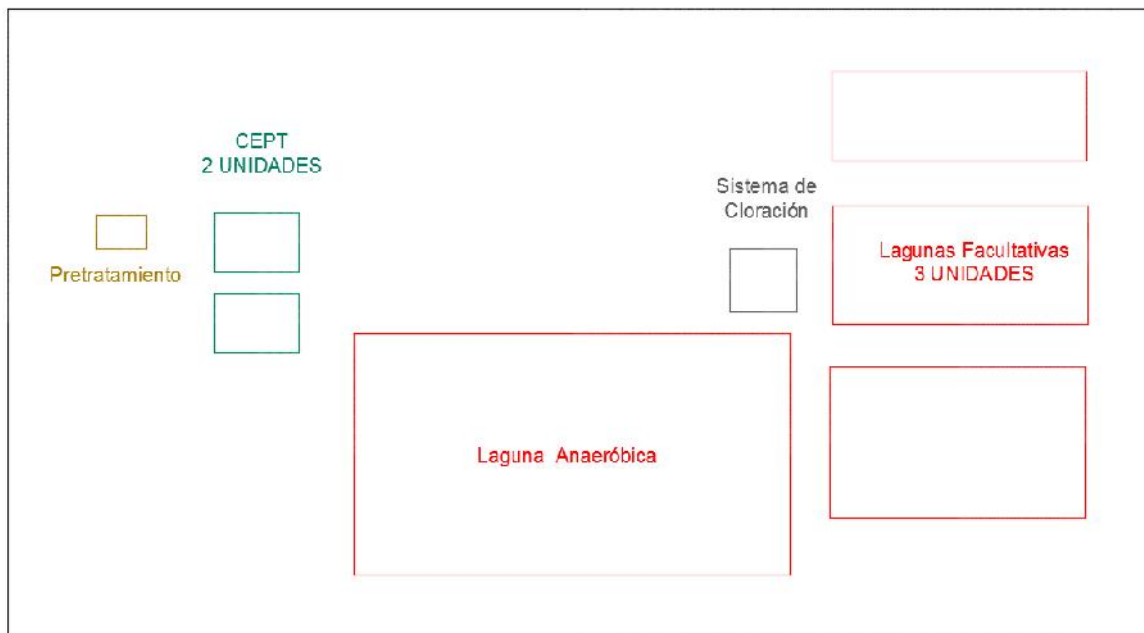
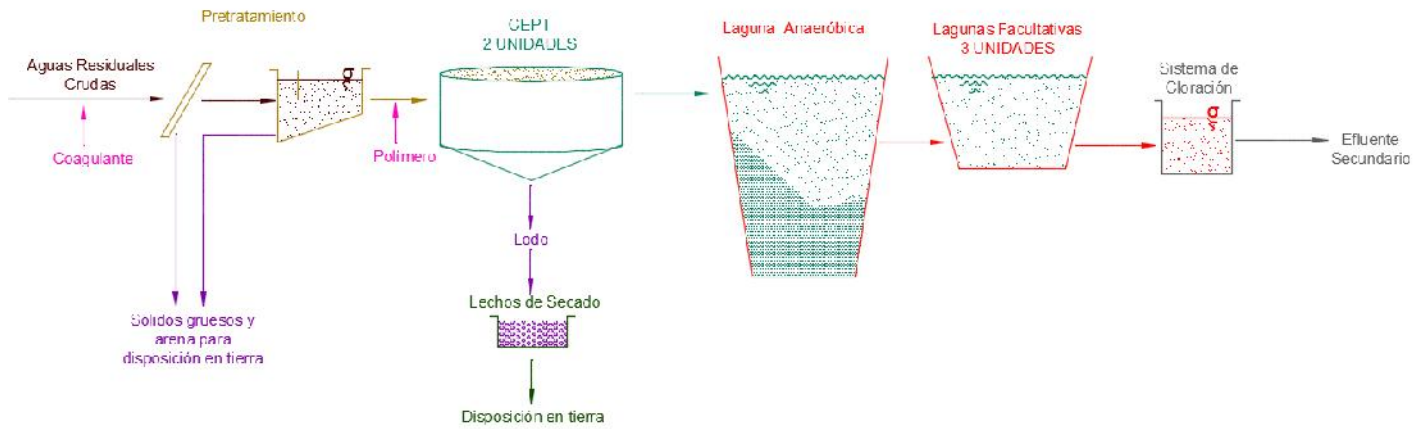


Figura 30. Diagrama de flujo y esquema ubicación de las unidades de operación PTAR City River Sao Paulo, Brasil.

5.6. Ciudad de Nueva York, Estados Unidos (City of New York,, 2015)

La ciudad de Nueva York obtuvo el pasado 2015 el premio ISI Envision® Sustainable Infrastructure Silver Award por la reciente actualización que se llevó a cabo en la planta de tratamiento de aguas residuales 26th Ward ubicada en Brookling, esta actualización tuvo un valor de 150 millones de dólares y constituye séptimo proyecto que recibe este premio.

La actualización consistió en:

- Adición de un quinto tanque de tratamiento preliminar
- Inclusión de sopladores de aire e iluminación LED para el ahorro de energía
- Instalación de energía eficiente para el manejo del bombeo
- Techo verde
- Grandes ventiladores en el interior para reducir la contaminación acústica
- Reúso de material

El trabajo se lleva a cabo de conformidad con un acuerdo entre el Departamento de Estado de Nueva York de Conservación Ambiental (DEC) y la ciudad de Nueva York.

"26th Ward WWTP del DEP alcanzó el premio Envision no solo por sus contribuciones a la sostenibilidad, como el desarrollo de las capacidades locales, y la minimización de ruidos, vibraciones y la contaminación lumínica, sino también por su compromiso con los principios de la sostenibilidad a través de su plan estratégico, así como el establecimiento de un Sistema de Gestión de la Sostenibilidad para definir claramente las funciones, responsabilidades y procedimientos ". (City of New York,, 2015)

Esta planta de tratamiento de AR está situada en el sureste de Brooklyn con un área de 57,3 acres (0,22 km²) y da servicio a aproximadamente 283.000 residentes en el este de Nueva York, Canarsie Brownsville. Tiene la capacidad de recibir, limpiar y desinfectar hasta 170 millones de galones al día (643.520 m³/d) proveniente del alcantarillado sanitario así como del pluvial.

5.7. Plantas de aguas residuales que procesan su Biomasa para generar energía.

En la Tabla 28 se exponen algunos de los casos de plantas residuales que tratan su biomasa para generación de energía, en algunos casos como el de la PTAR Point Loma en San Diego, CA, US se da un 100% de autosuficiencia energética.

Tabla 29. Autosuficiencia energética a full-escala en plantas de tratamiento de aguas residuales en Estados Unidos, Canada y Europa. (Shen, Linville, Urgun-Demirtas, Mintz, & Snyder, 2015)

Planta	Localización	MGD	Q (m ³ /d)	Materia prima	Producción anual de biogás	Autosuficiencia energética (%)
PTAR Essex Junction	VT, US	2	7571	Lodos+Grasa y aceites+ residuos de alta resistencia	1,7 GW h	38
PTAR Grevesmuhlen	Alemania	4	15142	Lodos primarios+Grasa del lodo desnatado	1,95 GW h	100 y vende el 20
PTAR Wolfgangsee-Ischl	Austria	5	18927	Mezcla de lodos primarios+ Desechos lodos activados	3,0 GW h	100 y vende 10
PTAR Strass im Zillertal	Austria	6	22712	Mezcla de desechos de lodos activados + grasas+ glicerol crudo+desechos de comida de los lodos activados +grasas y aceites	10 GW h	100 y vende el 20
PTAR Gloversville-Johnstow Joint	NY, US	11	41640	Lodo+Residuos de alta resistencia	28 GW h	100
PTAR Sheboygan Regional	WI, US	11	41640	Lodo+Grasas y aceites+ Residuos de alta resistencia	32 GW h	100
PTAR Gresham	OR, US	13	49210	Lodo+Grasas y aceites	17,2 GW h	100
PTAR Douglas L. simith Middle Basin	KS, US	15	56781	Lodo+Grasas y aceites	35 GW h	50
PTAR F. Wayne Hill WRC	GA, US	33	124919	Lodo+Grasas y aceites+ Residuos de alta resistencia	46,2 GW h	50
IRA South Columbus	GA, US	35	132489	Lodo+Grasas y aceites	40 GW h	40
PTAR Prague Central	Republica Checa	42	158987	Mezcla de lodos primarios+Desechos lodos activados	115 GW h	94

Tabla 30. Autosuficiencia energética a full-escala en plantas de tratamiento de aguas residuales en Estados Unidos, Canada y Europa. (Shen, Linville, Urgun-Demirtas, Mintz, & Snyder, 2015) (Continuación)

Planta	Localización	MGD	Q (m ³ /d)	Materia prima	Producción anual de biogás	Autosuficiencia energética (%)
PTAR Des Moines MWRA	IA, US	59	223339	Lodos+Grasa y aceites+ residuos de alta resistencia	90 GW h	75
PTAR Zürich Werdhölzli	Suiza	67	253623	Lodo+Grasas y aceites	41,4 GW h	100
PTAR East Bay Municipal Utility Districtic	CA,US	70	264979	Lodo+Grasas y aceites/ Desechos de comida/Residuos de alta resistencia	90 GW h	100
PTAR Csepel	Hungria	93	352043	Mezcla de lodos primarios+ Desechos lodos activados	95 GW h	65
IRA Village Creek	TX,US	110	416395	Lodo+Grasas y aceites+ Residuos de alta resistencia	62 GW h	75
PTAR Annacis Island	Canada	130	492104	Lodo+Grasas y aceites	132 GW h	50
PTAR Point Loma	CA, US	175	662447	Mezcla de lodos primarios+ Desechos lodos activados	193 GW h	100
TTAR Davyhulme	Inglaterra	200	757082	Mezcla de lodos primarios+ Desechos lodos activados	238 GW h	96
PCCA Joint Carson	CA, US	300	1135624	Lodos+ Desechos de comida	484 GW h	97
PTARA Blue Plains	DC,US	375	1419530	Mezcla de lodos primarios+ Desechos lodos activados	360 GW h	33

6. CONCLUSIONES

La sostenibilidad absoluta es difícil de alcanzar debido a que no tiene en cuenta la generación de desechos, es decir, considera que todo puede ser reutilizado y no se genera desecho alguno.

La sostenibilidad es relativa, compara opciones y busca la que es más sostenible, permite seleccionar la opción más sostenible de una PTAR con base en sus impactos sociales, ambientales y económicos.

Las tecnologías apropiadas (unidades de operación ya probadas, simples de manejar y de bajo costo) y las sofisticadas (unidades de operación con características complejas y novedosas, que requieren ser operadas por profesionales y la mayoría de costo elevado) aportan a la sostenibilidad de diferentes formas: ahorro de energía, producción de energía, uso de energía natural, reducción de emisiones; costos mínimos de inversión, operación y manejo; remoción de nutrientes, calidad y reúso directo e indirecto del efluente, reúso de los lodos.

Los países en vías de desarrollo son los que más aplican las tecnologías apropiadas para el tratamiento de aguas residuales. Dadas las condiciones económicas y sociales de estos lugares, las tecnologías apropiadas aportan positivamente a los tres ámbitos de la sostenibilidad.

Los reactores y unidades de operación de tratamiento biológico anaerobio son considerados superiores a los aerobios debido a: la posibilidad de recolectar y usar el biogás como fuente de energía y la poca generación de desechos.

Las características de cada lugar tales como clima, condiciones económicas, calidad de afluente, terreno disponible, normas de vertimiento, opciones de reúso, entre otras son condiciones necesarias para definir la mejor opción de sostenibilidad.

Las unidades de operación que menos ocupación de espacio presentan son: pantallas micro giratorias, desarenador vortex, CEPT, Tanques Sépticos, UASB y lagunas anaerobias.

La combinación de tecnologías apropiadas que menos ocupación de espacio presentan son: PTAR con UASB y filtros anaerobios y PTAR con CEPT y lagunas aireadas.

Una de las soluciones sostenibles es la infiltración – percolación, también conocida como tratamiento y disposición en tierra de las aguas residuales, sistema de grandes beneficios, y recarga de acuíferos; sin embargo, las normas en muchos casos no permiten este tipo de disposición.

Para la remoción de nutrientes, que en ocasiones no es necesaria dada la posible reutilización de lodos como fertilizantes, los sistemas que contienen lagunas son los que

mejor desempeñan esta función, las unidades de CEPT tienen buena remoción de fósforo por precipitación.

Varias plantas alrededor del mundo presentan la autosuficiencia energética parcial o total, gracias al procesamiento de sus desechos y posterior transformación (con tecnologías sofisticadas) como fuente de energía.

La repurificación del agua, usando tecnologías sostenibles sofisticadas como los procesos de membrana, constituye una opción evidente para ciudades y establecimientos con condiciones de escasez de fuentes de agua.

7. REFERENCIAS

- Alvares Trillos, J. A. (2005). Gestión ambiental con tecnología de información. *RETHOS*, 49.
- Anaya, N. R., & Villar, R. X. (2009). *Diseño de la planta de aguas residuales para el municipio de Málaga*. Bucaramanga: UIS.
- Angelakis, A. N., & Gikas, P. (2014). Water Reuse: Overview of current practices and trends in the world with emphasis on EU States. *Water Utility Journal*.
- Aravinthan, V. (2005). *Reclaimed Wastewater as a Resource for Sustainable Water Managment*. Toowoomba: University of Southern Queensland.
- Auriens Arquitectura. (03 de 2011). *Sostenible, perdona ¿ a qué te refieres?* Recuperado el 13 de 02 de 2016, de <http://sostenibleperdona.blogspot.com.co/p/que-es-sostenibilidad.html>
- Brundtland, G. H. (04 de 08 de 1987). *Naciones Unidas*. Recuperado el 13 de 04 de 2016, de <http://www.un.org/es/comun/docs/?symbol=A/42/427>
- CEIM. (2006). *Tratamientos avanzados de aguas residuales industriales*. Madrid.
- Chouk - Allah, R., & Hamdy, A. (2005). Wastewater treatment and reuse as a potential water resource for irrigation.
- City of New York,. (25 de Agosto de 2015). *The Official Website of the City of New York*. Recuperado el 2 de Mayo de 2016, de http://www.nyc.gov/html/dep/html/press_releases/15-075pr.shtml#.V4Wc5_nhDIU
- City of San Diego. (2012). *Recycled Water Study*. San Diego: City of San Diego.
- Collazos, C. (2008). *Tratamiento de las aguas residuales domesticas e industriales* catedra internacional. Bogotá, Colombia.
- Comisión Nacional de Agua. (2013). *Manual de sistemas de tratamiento de aguas residuales utilizados en Japón*. Manual, México D.F.
- Daigger, G. T. (2005). Wastewater treatment plant of the future - Decision analysis approach for increased sustainability. *2nd IWA Leading-Edge conference on water an wastewater treatment technology*. Praga.
- Diamantis, V., Melidis, P., Aivasidis, A., Vestraete, W., & Vlaeminck, S. E. (2011). *Efficiency and Sustainability of Urban Wastewater Treatment with Maximun Separation of the Soil and Liquid Fraction*. Elsevier.

- Drinan, J. E. (2011). *Water & wastewater treatment - A guide for the nonengineering professional*. CRC PRESS.
- EAB. (2015). *Empresa de Acueducto de Bogotá*. Obtenido de http://www.acueducto.com.co/wpsv61/wps/html/resources/PTAR/guia_concPTARS_alitre.pdf
- Ecointeligencia*. (01 de 02 de 2013). Recuperado el 04 de 02 de 2016
- EPA. (2014). *Promoting Technology Innovation for Clean and Safe Water*. EPA.
- Fatta - Kassinos, D., Dionysiou, D. D., & Kümmerer, K. (2016). *Advanced Treatment Technologies for Urban Wastewater Reuse*. Springer.
- Leslie Grandy, C. P., Daigger, G. T., Love, N. G., & Filipe, C. D. (2011). *Biological Wastewater Treatment*. Boca Raton: CRC Press.
- Martin, I., Betancourt, J. R., Salas, J. J., Peñate, B., Pidre, J. R., & Sandron, N. (2006). *Guía sobre el tratamiento de aguas residuales urbanas para pequeños núcleos de población*. Canarias: ICREW.
- Mercado, A. (Agosto de 2013). *Lagunas de Estabilización - Centro de estudio de aguas y saneamiento ambiental UMSS*. Recuperado el 20 de Mayo de 2016, de Fundación Chile: http://www.fch.cl/wp-content/uploads/2013/09/Lagunas_de_estabilizaci_n_ralcea.pdf
- Metcalf, & Eddy. (2014). *Wastewater engineering treatment and resource recovery*. Nueva York: Mc Graw Hil.
- Orozco, Á., & Libhaber, M. (2012). *Sustainable treatment and reuse of municipal wastewater*. Londres: IWA Publishing.
- Ramalho, R. S. (1993). *Tratamiento de aguas residuales*. Quebec: Editorial Reverté.
- Rodríguez, A., Letón, P., Rosal, R., Dorado, M., Villar, S., & Sanz, J. M. (2006). *Tratamientos avanzados de aguas residuales industriales*. Madrid: CEIM.
- Rojas, R. (2002). Conferencia sistemas de Tratamiento de Aguas Residuales. *Gestión integral de Tratamiento de Aguas Residuales*, (pág. 19).
- Romero Rojas, J. A. (2011). *Tratamiento de Aguas Residuales, Teoría y Diseño*. Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.
- Romero, J. (2011). *Tratamiento de Aguas Residuales, Teoría y Diseño*. Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

- Ronald Crites, J. M. (2006). *Natural Wastewater Treatment Systems*. Taylor & Francis Group .
- San Diego City. (2016). *City of San Diego Official Website*. Recuperado el 01 de 06 de 2016, de Water - Pure water San Diego:
<https://www.sandiego.gov/water/purewater/purewatersd>
- Semillero, M. D. (2014). *Sistemas de Tratamiento de Agua*. Recuperado el 2 de Mayo de 2016, de Universidad de Manizales, Centro de investigacion en medio ambiente y desarrollo: http://datateca.unad.edu.co/contenidos/358002/AVA_II-SEM-2014/Unidad_2/s.f._Sistemas_tratamiento_de_aguas.pdf
- Shen, Y., Linville, J. L., Urgan-Demirtas, M., Mintz, M. M., & Snyder, S. W. (2015). An overview of biogas production and utilization at full-scale wastewater treatment plants (WWTPs) in the United States: Challenges and opportunities towards energy-neutral WWTPs. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 347-360.
- Spellman, F. (2013). *Water & Wastewater Infrastructure: Energy Efficiency and Sustainability*. Boca Raton: Taylor & Francis Group.
- Vesilind, A., & Rooke, R. (2003). *Wastewater Treatment Plant Desing*. Pennsylvania: IWA Publishing & Water Environment Federation.