



# Guía de Economía Circular en Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales

Agosto 2024



En este contexto, la presente guía busca aportar con conceptos técnicos, aplicados y prácticos, para facilitar las decisiones del sector público y privado para gestionar proyectos e inversiones en PTAR, así como también aportar en la transferencia de capacidades y sensibilización de los beneficios de la incorporación de la economía circular en PTAR. Especialmente está dirigido a profesionales del sector sanitario y de la ingeniería ambiental.

La presente Guía aplicada al tratamiento de aguas residuales, está estructurada en 9 Capítulos, de los cuales **el primero**, entrega información y antecedentes generales sobre la Economía Circular.

En el **segundo capítulo**, se entrega una explicación básica de los procesos típicos que constituyen una Planta de Tratamiento de aguas residuales domésticas y de sus parámetros básicos de operación. Este capítulo tiene como finalidad entregar una visión general del tema, a fin de establecer conceptos importantes para el desarrollo de los proyectos.

El **tercer capítulo** resume las oportunidades que existen en Economía Circular (EC) en PTAR indicando las distintas tecnologías existentes para las distintas etapas del proceso. En él describen brevemente las mismas y se señalan los distintos campos de aplicación de cada una.

El **cuarto capítulo** desarrolla las alternativas existentes en la línea agua, específicamente en las temáticas asociadas a eficiencia productiva, reúso de aguas y eliminación de nitrógeno. En este capítulo también se entrega información relevante respecto de las formas comunes de venta de los productos generados por este tipo de proyectos.

El **quinto capítulo** muestra los aspectos más importantes que deben considerarse para analizar las alternativas existentes en gestión de energía, específicamente en las temáticas asociadas a eficiencia energética y uso de Energía Renovable no Convencional (ERN-C).

El **séxto capítulo** muestra los aspectos más importantes que deben considerarse para analizar las alternativas existentes en la línea de lodos, específicamente en las temáticas asociadas a la estabilización de los biosólidos, a su tratamiento intermedio y a su disposición final. En este capítulo también se entrega información relevante respecto de las formas comunes de venta de los productos generados por este tipo de proyectos.

El **séptimo capítulo** busca dar a conocer los elementos a tener en cuenta al momento de analizar alternativas existentes en la línea de biogás. **El octavo** entrega una visión de otras acciones de Economía Circular que no son posibles de asociar totalmente en alguno de los capítulos precedentes.

Utilizando los conceptos presentados en los capítulos anteriores, se entrega en el **capítulo noveno** antecedentes sobre el impacto que tienen estas acciones como acciones de mitigación de Gases Efecto Invernadero (GEI).

#### **\*ESTA GUÍA NO CONSIDERA:**

- Aspectos de regulación y normativas
- Aspectos de control y monitoreo de parámetros de eficiencia operacional
- Gestión operacional, seguridad y buenas prácticas de manejo de PTAR
- Aspectos sobre tecnologías convencionales para el tratamiento de aguas residuales



El Foro Centroamericano y República Dominicana de Agua Potable y Saneamiento (FOCARD-APS) es un organismo del Sistema de la Integración Centroamericana (SICA) que aglutina a las instituciones rectoras del sector agua potable y saneamiento de la región, su máxima autoridad la constituye el Consejo Centroamericano y República Dominicana de Agua Potable y Saneamiento (CONCARD-APS), que establece las líneas estratégicas de trabajo.

#### **LAS INSTITUCIONES QUE CONFORMAN EL FOCARD-APS SON:**

- **Ministerio de Salud Pública y Asistencia Social (MSPAS) de Guatemala**
- **Administración Nacional de Acueductos y Alcantarillados (ANDA) de El Salvador**
- **Servicio Autónomo Nacional de Acueductos y Alcantarillados (SANAA) de Honduras**
- **Empresa Nicaragüense de Acueductos y Alcantarillados (ENACAL) de Nicaragua**
- **Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados (AyA) de Costa Rica**
- **Ministerio de Salud (MINS) de Panamá**
- **Instituto Nacional de Aguas Potables y Alcantarillados (INAPA) de República Dominicana**

Una de las tareas fundamentales del FOCARD-APS es destacar la importancia sanitaria del agua potable y del saneamiento, contribuir con los entes rectores, reguladores, abastecedores, financiadores y usuarios, en el desarrollo de capacidades sobre los distintos aspectos relacionados con la educación sanitaria y ambiental, el incremento de la cobertura, la protección, conservación y calidad del recurso hídrico en un marco de desarrollo sostenible y de esa manera potenciar los esfuerzos para alcanzar los Objetivos de Desarrollo Sostenibles (ODS), con énfasis al ODS 6: Garantizar la disponibilidad de agua y su gestión sostenible y el saneamiento para todos.



El Núcleo Biotecnología Curauma (NBC) de la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, es un Centro de I+D+i, integrado por académicos y profesionales de excelencia, con más de 10 años de experiencia en desarrollo tecnológico, innovación y transferencia tecnológica en el área de la ciencia y tecnología.

A través de todas sus actividades y servicios, el NBC busca hacer a las empresas más productivas, sustentables y competitivas. El centro ha generado un importante liderazgo en temas tales como: Cambio Climático, Sostenibilidad y Medio Ambiente, Bioeconomía, Gestión de la innovación, Biotecnología de Procesos y Biotecnología Ambiental, Tecnologías Limpias, Mitigación de Gases de Efecto Invernadero, Eficiencia Energética y Huella de Carbono, Innovación con Impacto Social. Economía Verde y Azul con Enfoque de Género.

Aportamos a la formación de personas y capacidades y transferencia tecnológica, disponemos de programas y redes de colaboración nacionales e internacionales para nuestros clientes.

En NBC se desarrollan tendencias innovadoras para hacer frente a los nuevos retos económicos, sociales y ambientales que permitan vivir en un mundo más sustentable.

# ÍNDICE

Capítulo I	<b>CONCEPTOS DE ECONOMÍA CIRCULAR</b>	007
Capítulo II	<b>ESQUEMA BASE PARA UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES URBANAS</b>	010
Capítulo III	<b>PRINCIPALES TRATAMIENTOS APLICADOS EN CENTROAMÉRICA</b>	014
Capítulo IV	<b>OPORTUNIDADES DE ECONOMÍA CIRCULAR EN PTAR</b>	016
Capítulo V	<b>LÍNEA DE AGUA TRATADA</b>	020
	V-I EFICIENCIA PRODUCTIVA	021
	V-II REUSO DE AGUA	022
	V-III ELIMINACIÓN DE NITRÓGENO MEDIANTE SISTEMA ANAMMOX	024
Capítulo VI	<b>SISTEMA DE GESTIÓN DE LA ENERGÍA</b>	027
	VI-I EFICIENCIA ENERGÉTICA Y GESTIÓN DE LA ENERGÍA	028
	VI-II AUTOGENERACIÓN DE ENERGÍA	030
Capítulo VII	<b>GESTIÓN DE BIOSÓLIDOS</b>	031
	VII-I ESTABILIZACIÓN DE BIOSÓLIDOS	032
	VII-I.I DIGESTIÓN ANAEROBIA	033
	VII-II TRATAMIENTO INTERMEDIO DE BIOSÓLIDOS ESTABILIZADOS	038
	VII-II.I SECADO SOLAR	
	VII-II.II BIOSECADO	039
	VII-II.III SECADO TÉRMICO	
	VII-III DISPOSICIÓN	043
	VII-III.I SUELOS AGRÍCOLAS	043
	VII-III.II PLANTACIONES FORESTALES	
Capítulo VIII	<b>BIOGÁS</b>	044
	VIII-I CARACTERIZACIÓN	045
	VIII-II ELIMINACIÓN DE HUMEDAD	046
	VIII-III REMOCIÓN DE ÁCIDO SULFÚDRICO	
	VIII-IV REMOCIÓN DE CO <sub>2</sub>	047
	VIII-V UTILIZACIÓN DEL BIOGÁS	
Capítulo IX	<b>OTRAS ALTERNATIVAS DE VALORIZACIÓN</b>	051
	IX-I ECOLADRILLOS	052
	IX-II EXTRACCIÓN DE ÁCIDOS HÚMICOS	053
	IX-III ESTRUVITA	
	IX-IV BIODIÉSEL	057
Capítulo X	<b>REDUCCIÓN DE EMISIONES DE CO<sub>2</sub></b>	061



## Conceptos de **Economía Circular**

La Economía Circular ha surgido como una respuesta innovadora y sostenible a los desafíos medioambientales y económicos que enfrenta nuestra sociedad. A diferencia del modelo lineal tradicional de “tomar, fabricar, usar y desechar”, la Economía Circular propone un enfoque holístico y regenerativo. Se basa en la premisa de optimizar el uso de recursos, reducir los residuos y fomentar la reutilización, reciclaje y renovación de productos. En este contexto, se explorarán los principios fundamentales que guían la Economía Circular, destacando su potencial para transformar la forma en que producimos, consumimos y gestionamos los recursos en un mundo cada vez más consciente de la importancia de la sostenibilidad. En este capítulo, y a lo largo de esta guía, se abordarán de manera general las oportunidades que ofrece la Economía Circular, para posteriormente enfocarnos en su aplicación en Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR).

La economía circular es un nuevo enfoque que busca desacoplar el crecimiento económico del agotamiento de recursos y el uso intensivo de energía. De esta forma se persigue que la velocidad a la que se consuman los recursos no sobrepase la velocidad de regeneración de estos, consiguiendo así un desarrollo sostenible.

Para concretar este desarrollo sostenible, las prácticas de Economía Circular se sustentan en diez principios, los que se muestran en la **Tabla 1**.

PRINCIPIO	DESCRIPCIÓN	EJEMPLO
<b>RECUPERAR</b>	Hace referencia a la recuperación de energía a partir de material descartado.	Producción de energía eléctrica a partir de la combustión de metano generado por digestión anaerobia de lodos.
<b>RECICLAR</b>	Hace alusión al procesamiento de material descartado para obtener materiales de la misma o menor calidad.	Uso de botellas de plástico PET para producir fibras textiles.
<b>REUTILIZAR</b>	Consiste en usar partes de productos descartados en la elaboración de nuevos productos, cumpliendo una función diferente a la original.	Uso de lodo estabilizado para fabricación de ecoladrillo.
<b>REMANUFACTURAR</b>	Refiere al uso de partes de productos descartados en la elaboración de nuevos productos, cumpliendo su función original.	En la industria de la electrónica, la remanufactura de dispositivos como computadoras y celulares, desarmando equipos usados/dañados y obteniendo piezas funcionales.
<b>RESTAURAR</b>	Medidas para actualizar y hacer funcionales productos antiguos.	Productos de compatibilidad entre consolas antiguas y televisores modernos.
<b>REPARAR</b>	Reparar y mantener productos defectuosos, de manera que estos puedan cumplir su función original.	Reparación y mantenimiento de equipos de cogeneración.
<b>REUSAR</b>	Trata de utilizar nuevamente un producto descartado, pero en buenas condiciones y cumpliendo su función original.	Reúso de aguas grises para riego.
<b>REDUCIR</b>	Consiste en incrementar la eficiencia de la manufactura de un producto, de manera que este consuma menos recursos naturales en su elaboración.	Bacterias Anammox para remoción de nitrógeno, reduciendo requerimientos de aireación.
<b>REPENSAR</b>	Principio que persigue que los productos se utilicen de manera mucho más intensiva.	Libros de biblioteca.
<b>RECHAZAR</b>	Hace alusión a innovaciones que vuelven a un producto redundante por vía de generar el abandono de su función o de ofrecer una alternativa para realizar la misma tarea con un producto radicalmente distinto.	Drives para guardar información en reemplazo de discos duros externos.

Tabla 1: Principios de la economía circular (Incluir ejemplo en una PTAR).



Las prácticas de la economía circular se pueden hacer presentes en ciertas etapas del tratamiento de aguas residuales, incentivando el reúso de estas, como también la obtención de energía en forma de calor, biogás y la recuperación de nutrientes. Básicamente, al implementar el enfoque de economía circular a las instalaciones de tratamiento de aguas residuales, podemos transitar desde únicamente ofrecer el **“servicio de tratamiento”** hacia una mirada integral donde se pasa a ser una **Biofactoría**, en donde **“se generan productos”**.

Por otro lado, la aplicación de la economía circular en las PTAR se alinea con el Objetivo de Desarrollo Sostenible (ODS) 6 de las Naciones Unidas, el cual reza sobre “Agua limpia y saneamiento” y con el ODS 11 sobre “Ciudades y comunidades sostenibles”. De este modo, las PTAR se integran a los esfuerzos a nivel mundial por un mayor bienestar de las personas y la salud del planeta. Las PTAR tienen el potencial de contribuir tanto a la mitigación de Gases de Efecto Invernadero (GEI) como a la adaptación a los efectos del cambio climático. Para lograr estos objetivos, es vital fomentar el uso de tecnologías y prácticas innovadoras en el ámbito del tratamiento de aguas residuales. En términos de mitigación, las PTAR pueden reducir significativamente las emisiones de gases de efecto invernadero a través de procesos eficientes ya sea evitando

la generación de metano o con sistemas para su captura y reutilización, mientras que en términos de adaptación (tal y como se verá en el capítulo 4) las PTAR pueden aportar con sistemas de tratamiento y reutilización del agua más avanzados, reduciendo la dependencia de las ciudades de fuentes de agua dulce, minimizando el impacto de las sequías.

Dentro de América Latina y el Caribe (ALC) existen muy pocas PTAR que aplican principios de economía circular en sus instalaciones, recuperando el metano, nutrientes y el agua tratada. En general, esto ocurre en megaciudades (e.g. Santiago de Chile), dado que hay flujos de materia mínimos para que los procesos sean económicamente factibles.

Tal como veremos a lo largo de esta guía, la economía circular entrega un enfoque sostenible para la gestión de recursos en las plantas de tratamiento de aguas residuales, logrando promover la eficiencia, sostenibilidad y resiliencia. A pesar de los desafíos asociados con su implementación, los beneficios económicos, ambientales y sociales aplicados en PTAR justifican su adopción, fomentando una transformación positiva y significativa en cuanto a la gestión del agua, energía y recuperación de nutrientes. En la **Tabla 2** se resumen los beneficios y desafíos de la economía circular.

BENEFICIOS	DESAFÍOS
<p><b>OPTIMIZACIÓN DE RECURSOS:</b> es posible maximizar la recuperación y reutilización de recursos como agua, nutrientes y energía, reduciendo la dependencia de recursos naturales.</p>	<p><b>INVERSIONES INICIALES:</b> se requiere de inversiones significativas en tecnologías y capacitación del personal, lo que puede ser un obstáculo financiero.</p>
<p><b>REDUCCIÓN DE RESIDUOS:</b> minimizar la generación de residuos sólidos y líquidos, contribuyendo a la reducción de la contaminación ambiental.</p>	<p><b>COMPLEJIDAD OPERATIVA:</b> introducir complejidad en la operación de las instalaciones y además puede requerir ajustes en los procedimientos existentes.</p>
<p><b>SOSTENIBILIDAD AMBIENTAL:</b> mejorar la calidad del agua, proteger ecosistemas acuáticos y reducir la huella ambiental de las instalaciones.</p>	<p><b>DESAFÍOS REGULATORIOS:</b> existen regulaciones que no están alineadas con los principios circulares, lo que puede dificultar su implementación.</p>
<p><b>VIABILIDAD ECONÓMICA:</b> se pueden generar ahorros operativos y fuentes de ingreso a largo plazo, mediante la venta y utilización de subproductos recuperados.</p>	<p><b>LIMITACIONES TECNOLÓGICAS:</b> algunas tecnologías que son necesarias aún están en desarrollo o son costosas, lo que limita su aplicabilidad a gran escala.</p>

Tabla 2: Resumen beneficios y desafíos economía circular.



## Esquema Base para una **Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Urbanas**

Una vez usada, el agua se descarga a los sistemas de recolección de agua residual comunal y se conduce para su tratamiento en plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR). El conjunto de flujos de agua residual que se unifican a la entrada de la PTAR es denominado afluente de la PTAR, y presenta una composición fisicoquímica y microbiológica que, de no ser tratada antes de descargarse en cuerpos de agua o masa terrestre, afectará severamente la integridad del cuerpo receptor con su respectivo impacto ambiental.

## Capítulo II

Esquema base para una Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Urbanas

El tratamiento del agua residual en las PTAR inicia con la operación de desbaste, en donde el agua transita a través de una serie de mallas que permiten separar los sólidos de mayor tamaño. A continuación, en la **Figura 1** se ilustra la operación de desbaste.

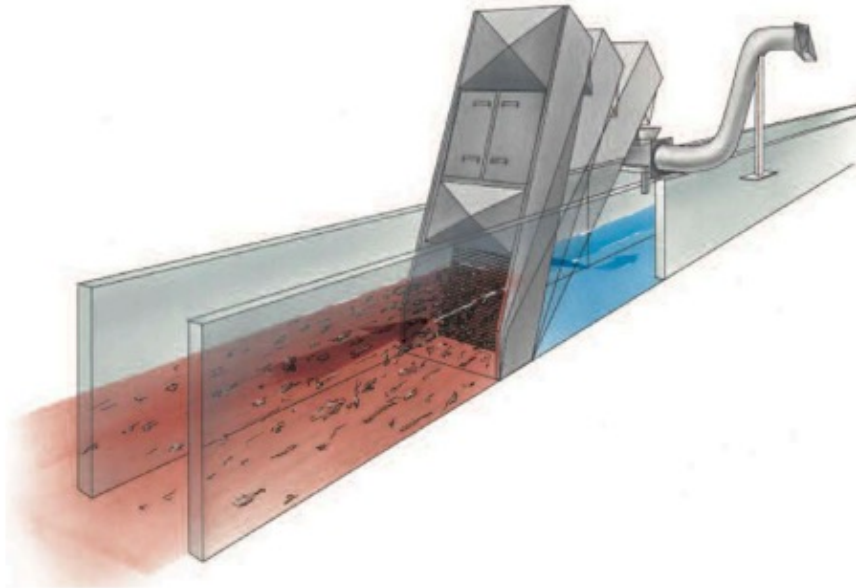


Figura 1. Sistema de desbaste que permite retirar los sólidos gruesos desde el afluente.

Posteriormente, el agua es dirigida a una etapa de **desarenado**, en donde se elimina arena y otros sólidos fijos por fondo, mientras que por tope se pueden eliminar sólidos flotantes como aceites y grasas.

A continuación, el agua es transportada al **tratamiento primario**, proceso en donde se utiliza un sedimentador que ayudará a remover parte de los sólidos suspendidos presentes en el agua. Los sólidos removidos pueden ser fijos o volátiles. En el tratamiento primario se pueden utilizar agentes que favorecen la sedimentación de los sólidos suspendidos, como floculantes y coagulantes para promover la formación de flóculos que posteriormente sedimentarán y serán separados por el fondo del sedimentador. A este residuo se le conoce como **lodo primario**. En tratamiento de aguas residuales industriales, es importante la adición de agentes floculantes/coagulantes dado que los sólidos en suspensión suelen tener carga eléctrica que impide la aglomeración y dificultan la sedimentación.

A continuación, se presenta la **Figura 2**, donde se observa la acción de los agentes coagulantes y floculantes sobre los sólidos suspendidos.

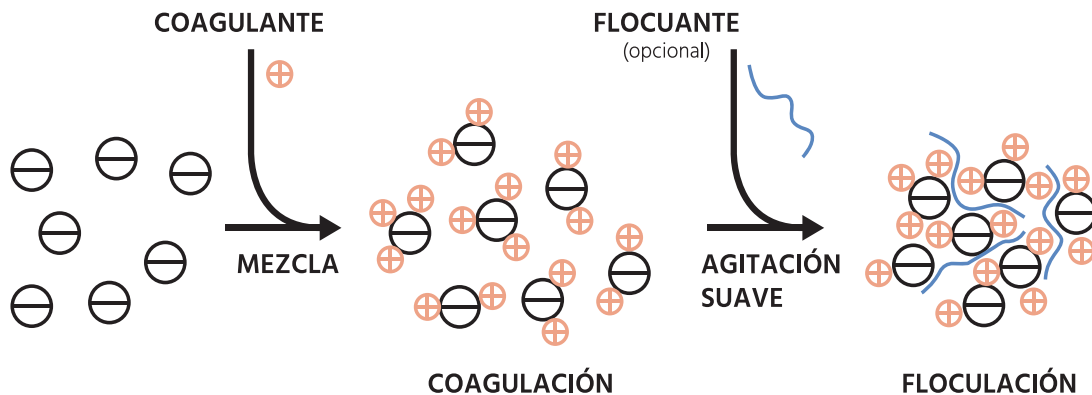


Figura 2. Acción de agentes coagulantes y floculantes sobre Sólidos Suspendidos.

Tras separar el lodo primario, este es conducido a un **estanque de mezcla** donde se juntará con el **lodo secundario** (del cual se profundizará más adelante).

Posterior al tratamiento primario, el efluente es conducido al **tratamiento secundario** (típicamente lodos activos). En esta etapa del proceso de tratamiento se suministra aire para oxidar la materia orgánica y los compuestos nitrogenados presentes en el líquido, esto sucede gracias a la presencia de **bacterias aerobias**. En esta operación hay un gasto energético importante, ya que se requiere impulsar una gran cantidad de aire dada la baja eficiencia de transferencia de oxígeno. A continuación, en la **Figura 3**, se presentan fotos de un sistema de lodos activados, donde también se muestran los difusores de aire para la oxidación de la materia orgánica.



○  
*Figura 3. Fotografías de un sistema de lodos activados con sus respectivos difusores de aire.*

Posteriormente, el líquido es pasado a través de un **sedimentador secundario** o bien a un equipo de flotación donde se separan los lodos. Una fracción del efluente es recirculada a la entrada del estanque de oxidación para mantener una concentración de materia orgánica oxidante constante, el resto es purgada hacia un tanque de mezcla, a esta materia descartada se le conoce como **lodo secundario**.

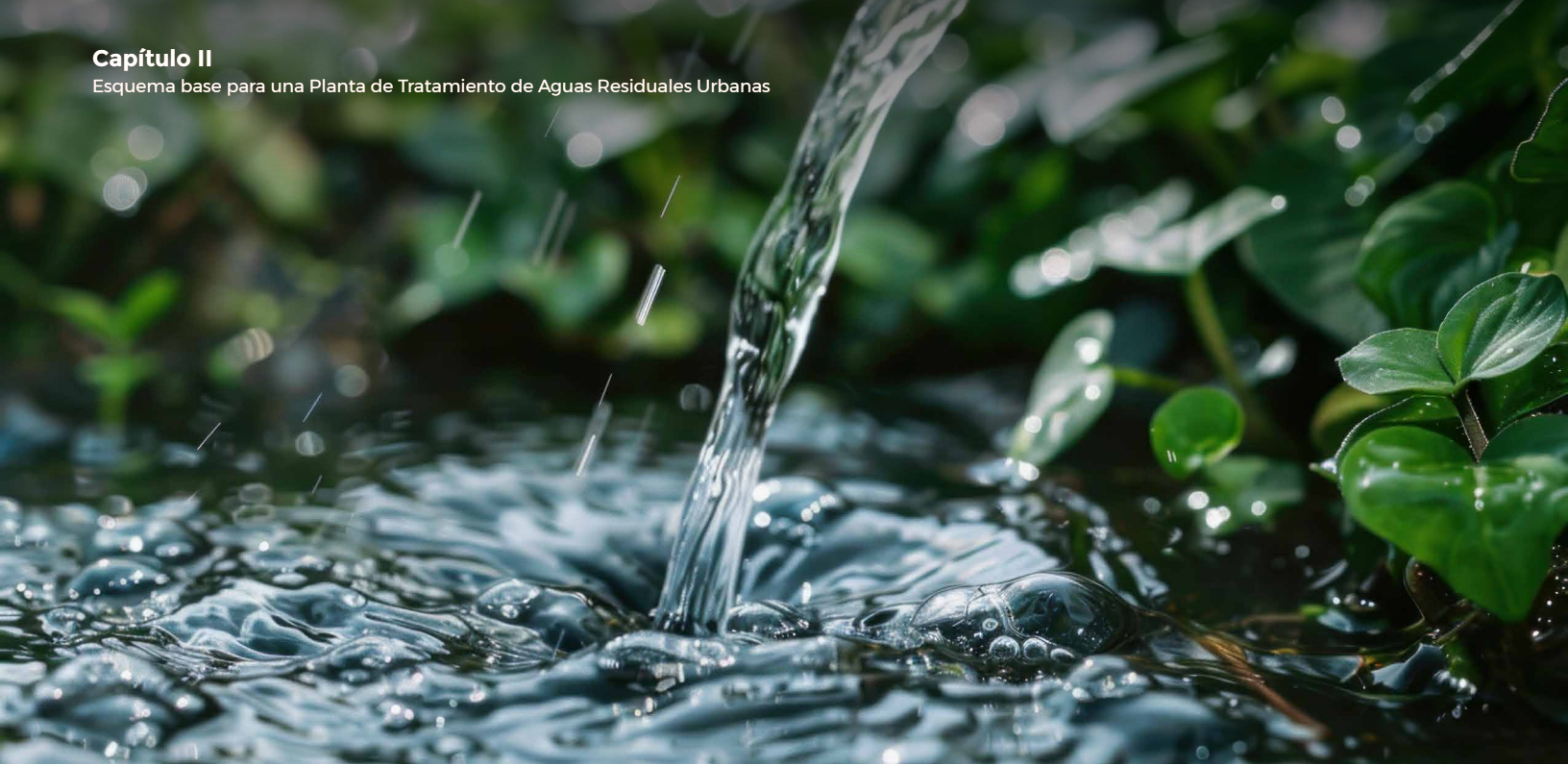
La corriente de líquido clarificado posterior al proceso de sedimentación o flotación, es conducida hacia un proceso de **desinfección**, donde se le incorpora típicamente **cloro gaseoso para eliminar los microorganismos** que puedan permanecer en esta. Finalmente, la corriente líquida es descargada comúnmente a un cuerpo de agua fluvial o continental. A esta salida, se le denomina **efluente**.

Por otro lado, los lodos resultantes son mezclados y se obtiene un **lodo mixto** en el tanque de mezcla, donde se le adicionan polímeros para aumentar su sequedad. Este lodo mixto debe ser estabilizado para posteriormente disponerse en un lugar autorizado. Dependiendo de las capacidades de la planta, la gestión del lodo será diferente, identificándose variados procesos dentro de los cuales está espesamiento, deshidratación, adición de cal, incineración y digestión anaerobia, entre otras. A continuación, se describirá el funcionamiento de la línea de manejo de lodos, asumiendo que la estrategia de gestión de este contiene un proceso de digestión anaerobia.

En la digestión anaerobia de lodos, fundamentalmente se realiza una degradación biológica controlada en ambiente cerrado, al mismo tiempo que se generan gases de alto contenido energético, los cuales se conducen y tratan, existiendo eventualmente un aprovechamiento energético de los mismos.

## Capítulo II

Esquema base para una Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Urbanas



Al terminar el proceso de digestión anaerobia, se obtiene un efluente denominado **digestato**. Normalmente, el digestato posee condiciones fisicoquímicas estables, esto quiere decir que no se descompondrá si se dispone en la tierra ni atraerá vectores, sin embargo, la humedad del digestato debe ser retirada por lo que es sometido a procesos de separación sólido/líquido, normalmente por el uso de **filtros de prensa**. De esto resultan dos productos: un **digestato líquido**, que es transportado a la entrada del tanque de oxidación y un **digestato sólido**, que puede ser dispuesto como mejorador de suelos por su alto contenido de nutrientes.

Finalmente, en la **Figura 5**, se presenta un diagrama global de una PTAR.

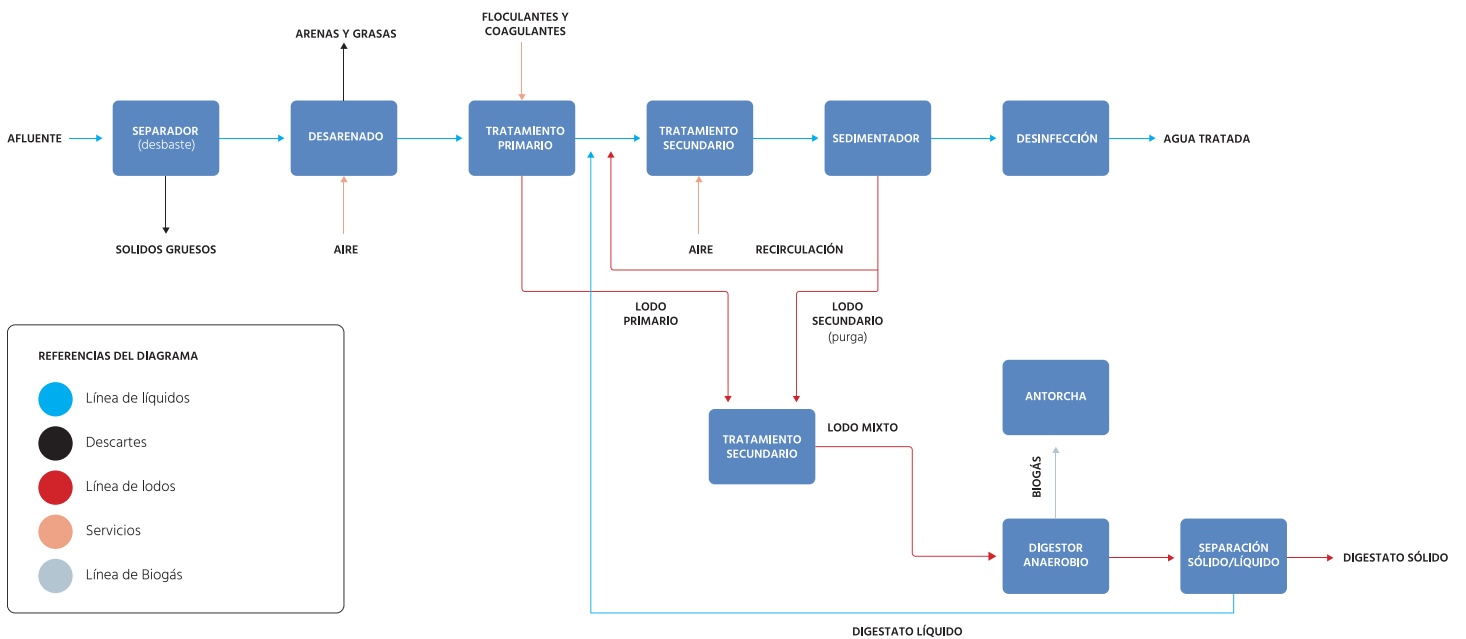


Figura 5. Diagrama de flujos de una planta de tratamiento de aguas residuales.



## Principales Tratamientos Aplicados en Centroamérica

El tratamiento de aguas residuales en Centroamérica es una de las grandes deudas del subsector, según datos del FOCARD-APS, en 2018 se estimaba que en la región el 81% de las aguas residuales generales eran descargadas sin tratamiento, una actualización de Observatorio Latinoamericano del Agua (OLAS), establece que el tratamiento de aguas residuales en los países que integran el SICA son los siguientes:

COSTA RICA

**23%**

EL SALVADOR

**6%**

GUATEMALA

**5%**

HONDURAS

**27,3%**

NICARAGUA

**32%**

PANAMÁ

**57,2%**

R. DOMINICANA

**11%**

El Informe Logros y Desafíos del FOCARD-APS (2018) establece que dadas las inversiones que los sistemas de tratamiento requieren y las inversiones planificadas para el sector, se estima que, de no cambiar las condiciones de inversión, algunos países de la región quedarán muy lejos de esta meta al 2030, también establecía la necesidad de buscar la sostenibilidad de los sistemas a través de la recuperación de costos y el reúso de agua tratada y otros subproductos.

Aunque existen diferentes tipos de plantas de tratamiento de aguas residuales en la región SICA, los sistemas más comunes se enlistan a continuación.

NIVEL DE TRATAMIENTO	TIPO DE ELEMENTO
TRATAMIENTO PRELIMINAR	Rejas con limpieza manual Rejas con limpieza automática Canales desarenadores
MEDICIÓN DE CAUDALES	Canales tipo Parshall Vertederos rectangulares
TRATAMIENTO PRELIMINAR	Sedimentadores o decantadores cónicos Sedimentadores o decantadores rectangulares Reactores Anaerobios de Flujo Ascendentes Sistemas lagunares Humedales artificiales
TRATAMIENTO SECUNDARIO	Percoladores biológicos Sistemas de lodos activados Filtros Anaeróbicos de Flujo Ascendente Sistemas lagunares
TRATAMIENTO DE LODOS	Digestores de lodos Espesadores de lodos Patios de secado Compostaje de lodos



## Oportunidades de **Economía Circular en PTAR**

La economía circular presenta importantes oportunidades para ser adoptadas en el tratamiento de las aguas residuales municipales. Este enfoque permite valorizar los residuos contenidos en las aguas residuales y convertirlos en recursos, generando beneficios ambientales, económicos y sociales.

Uno de los principios centrales de la economía circular es la reducción del uso de recursos limitados. En el caso del tratamiento de aguas residuales, esto se traduce en la reutilización del agua tratada en lugar de continuar extrayendo nuevas fuentes de abastecimiento.



El agua residual municipal consta de un 99,8% de agua, que una vez tratada puede reutilizarse y usarse para distintos propósitos. Sumado a esto, existen estudios que estiman que la producción de aguas residuales municipales a nivel global será de 470 billones m<sup>3</sup> para el 2030 y solo en América Latina y el Caribe se espera que sea alrededor de 39 billones m<sup>3</sup> para ese mismo año, tal como se muestra en la **Figura 6**, valor que incentiva a promover prácticas de economía circular y sostenibilidad en los procesos de tratamiento.

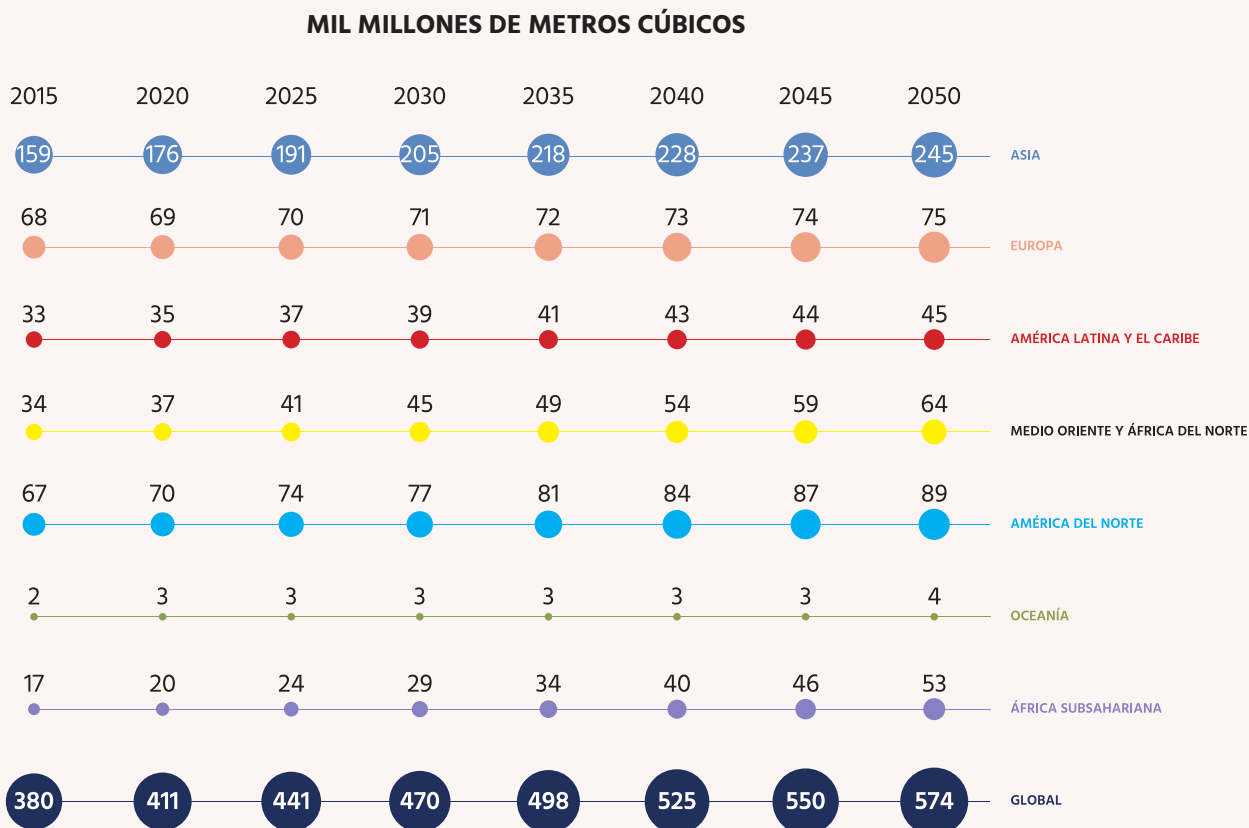


Figura 6: Predicción de la producción de aguas residuales municipales entre regiones desde el 2015 al 2050. (Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, 2023).

Entre los usos más comunes del agua residual tratada se encuentra el riego de jardines, campos de golf y parques, en procesos industriales que no requieran agua potable y la recarga de acuíferos. En ciudades con escasez hídrica, como en Honolulu (Hawái), se ha logrado vender exitosamente agua tratada al sector industrial y para riego. En 2012 se comercializaron 11.5 millones de m<sup>3</sup> generando beneficios económicos e incrementando la resiliencia hídrica de la ciudad.

Además del reúso del agua, otro principio de la economía circular es la valorización de los residuos mediante su reintroducción en el ciclo productivo. En el caso de las plantas de tratamiento, esto se aplica mediante el aprovechamiento del biogás y los nutrientes contenidos en las aguas residuales.

El biogás generado en los digestores anaerobios durante el tratamiento del agua o lodos residuales está compuesto mayoritariamente por metano, el cual puede ser purificado y utilizado directamente como biocombustible para usos industriales, vehiculares o residenciales. Un ejemplo exitoso es la planta La Farfana en Santiago de Chile, donde se tratan aproximadamente 661,500 m<sup>3</sup> de aguas residuales, parte del biogás producido lo utilizan dentro de su proceso de tratamiento y otra parte se vende a una empresa de gas, generando ingresos anuales de hasta \$1 millón de dólares y a su vez ha evitado la emisión anual de 19,788 toneladas de CO<sub>2</sub>.

Otra alternativa es la cogeneración de energía eléctrica y térmica a partir del biogás. Esto requiere una alta inversión inicial, pero permite abastecer parte de los requerimientos energéticos de la propia planta de tratamiento. Sin embargo, la factibilidad económica del aprovechamiento del biogás depende de la escala de la planta. Según el estudio de la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (2022), las PTAR que tratan caudales menores a los 500 L/s (equivalente a una población menor a 300.000 habitantes), no alcanzan a recuperar la inversión inicial y menos percibir utilidades de la instalación de equipos de digestión anaerobia y aprovechamiento de biogás, pese a los ahorros energéticos percibidos durante la etapa de operación.

A continuación, la **Figura 7** representa un diagrama de bloques de una PTAR clásica, donde se indican sus líneas de procesos y oportunidades de economía circular señaladas de color rosado.

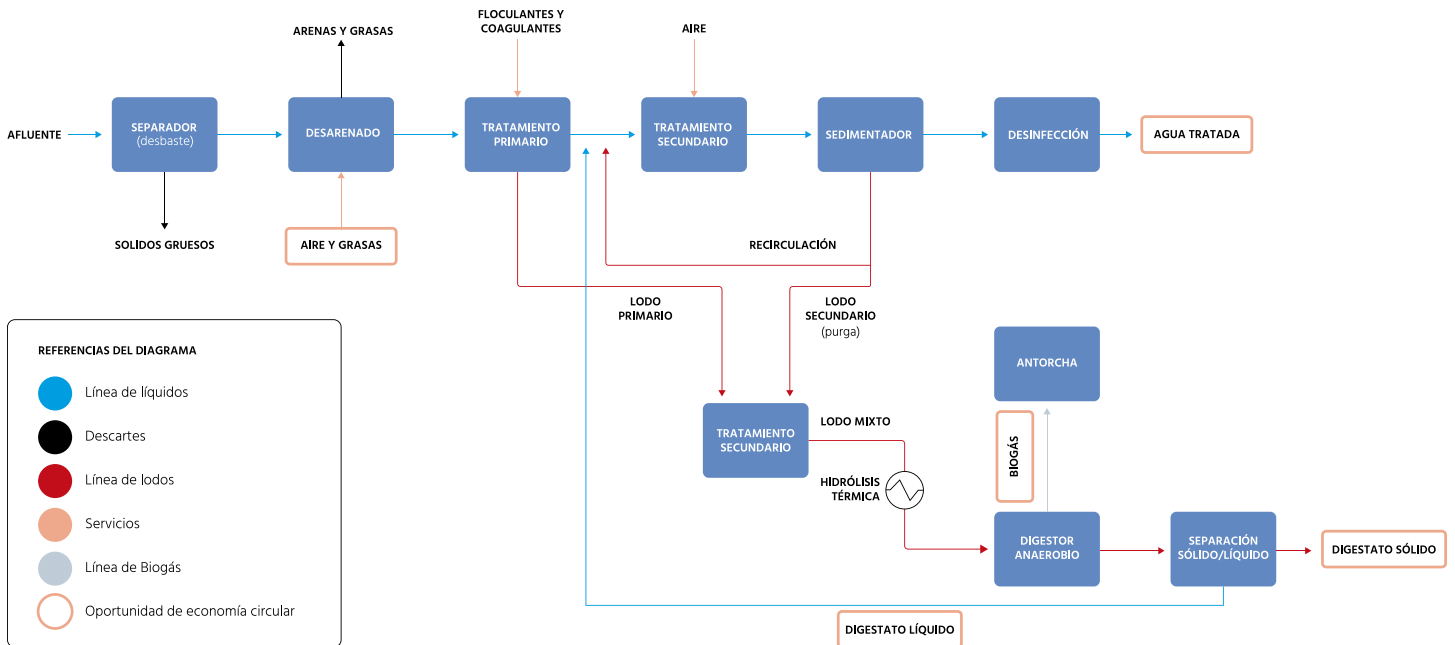


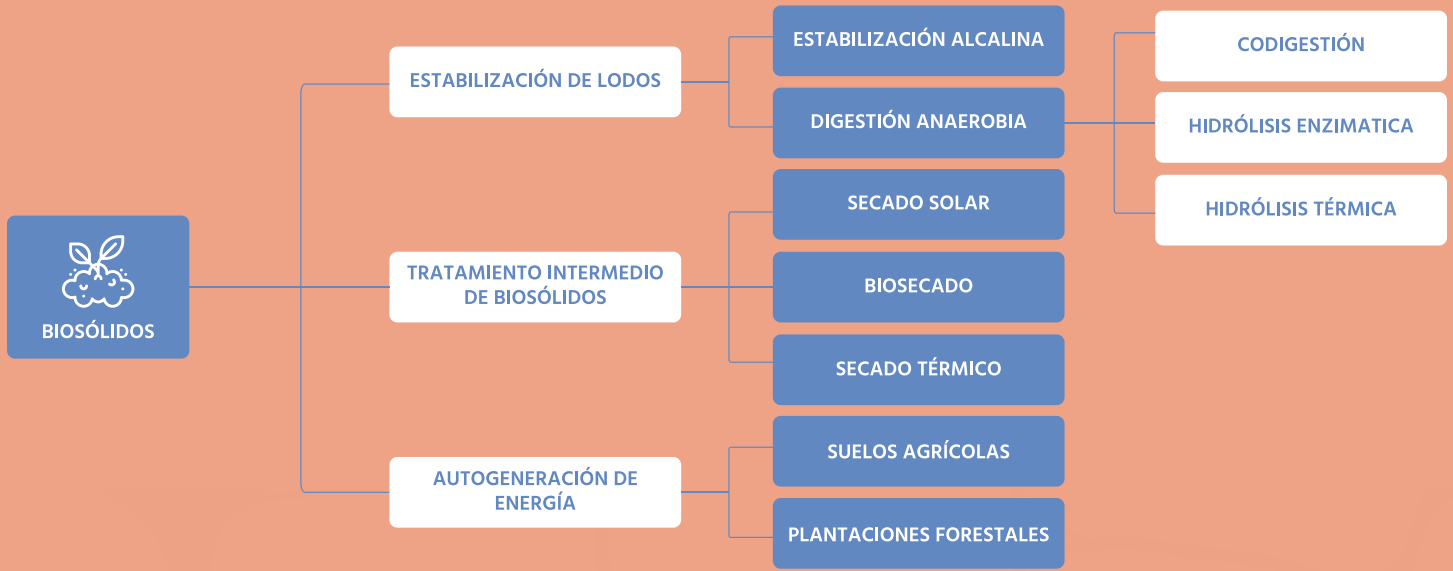
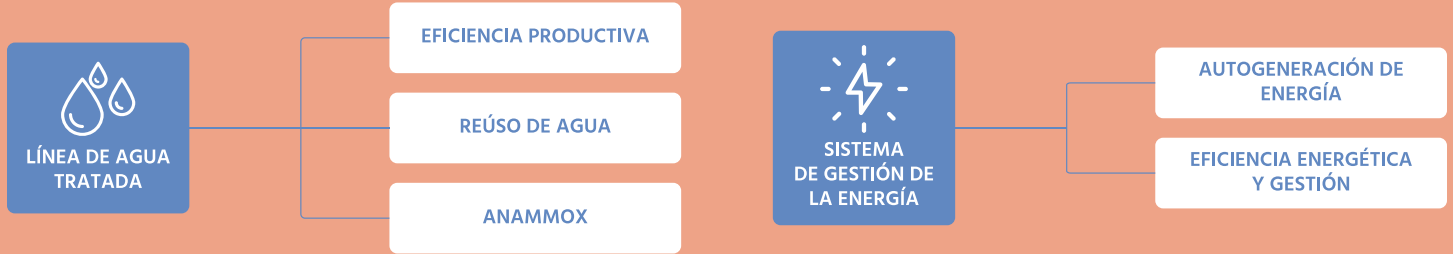
Figura 7: Planta de tratamiento de aguas residuales que práctica la economía circular.

Adicionalmente, se presenta un diagrama en la **Figura 8**, identificando las oportunidades de mejora por tipología de proyectos de EC en PTAR, sobre las cuales se estructura esta guía.

Con esta información, es posible afirmar que la adopción de tecnologías de economía circular en las plantas de tratamiento de aguas residuales municipales presenta múltiples oportunidades, y, beneficios ambientales, sociales y económicos. Permitiendo reutilizar el agua, generar energía, recuperar nutrientes y fertilizantes, reducir emisiones, conservar recursos naturales y fomentar el desarrollo local sostenible. Si bien se requiere inversiones iniciales importantes, los beneficios permiten recuperar estas inversiones en un plazo que puede ser estimado, por lo que es una alternativa estratégica que los gobiernos de la región deben considerar seriamente. Se trata de una solución que aporta significantes beneficios que contribuyen a múltiples Objetivos del Desarrollo Sostenible (ODS).

# Capítulo IV

Oportunidades de Economía Circular en PTAR





## LÍNEA DE AGUA TRATADA

La línea de tratamiento de agua de una PTAR constituye su eje central y la razón original de su implementación. Por este motivo, se ha escogido que sean las oportunidades de economía circular presentes en esta línea las protagonistas del primer capítulo de esta guía que aborda de lleno las oportunidades y tecnologías disponibles.

El funcionamiento tradicional de una PTAR se describió en el capítulo 2 de esta guía, por lo que en este capítulo se aborda en primer lugar la importancia de la eficiencia productiva y el buen manejo del sistema de lodos activados, entendiéndose que un correcto funcionamiento de la planta se traduce en una reducción del consumo de recursos tanto energéticos como materiales; en segundo lugar, se abordará en detalle el potencial del reúso del agua tratada por una PTAR para finalmente exponer como la tecnología basada en bacterias Anammox se está imponiendo como una alternativa eficaz para reducir el consumo energético y la generación de lodos en líneas con un alto contenido de nitrógeno.

## V-I EFICIENCIA PRODUCTIVA

La eficiencia productiva en el contexto de las PTAR tiene como objetivo maximizar el rendimiento del proceso de tratamiento mientras se minimizan los recursos necesarios y se reduce el desperdicio. A continuación, en la **Tabla 3** se presenta un compilado de medidas propuestas para cumplir con este propósito:

ESTRATEGIA	MEDIDAS	DESCRIPCIÓN
<b>AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL DE PROCESOS</b>	Sistemas de Control Supervisado y Adquisición de Datos (SCADA)	El uso de sistemas SCADA proporciona la ventaja de poder monitorear y controlar los procesos en tiempo real. Automatizar bombeo, mezcla y aireación pueden tener un impacto significativo en el consumo de recursos. Por otro lado, la adquisición de sensores de flujo, temperatura, pH y oxígeno disuelto permiten tener registros históricos y determinar causalidades entre variables, lo que facilita la prevención y respuesta.
	Sensores y Monitoreo Continuo	
<b>MEJORAS EN LA AERACIÓN</b>	Uso de Sistemas de Aeración de Alta Eficiencia	La aireación requerida en el proceso de lodos activos para la remoción de DQO es uno de los requerimientos más intensivos en las PTAR. Actualmente, existen en el mercado difusores de burbuja fina que aumentan la eficiencia de transferencia de oxígeno en comparación a difusores de burbuja gruesa. Por otro lado, ajustar la cantidad de aireación según las necesidades específicas del proceso y la carga orgánica puede reducir el consumo de energía sin comprometer la eficiencia del tratamiento.
	Optimización de la Tasa de Aeración	
<b>RECIRCULACIÓN Y REDISTRIBUCIÓN DE FLUJO</b>	Recirculación de Flujos	La recirculación de flujos es una alternativa interesante en los casos donde se requiera eliminar compuestos específicos sin necesidad de invertir en nueva infraestructura. El ejemplo más clásico es la recirculación de un flujo rico en nitrato a una zona anóxica del lodo activo, donde habrá DQO biodegradable para realizar la desnitrificación. Por otro lado, algunos procesos de tratamiento pueden beneficiarse de la redistribución de flujos para evitar sobrecargas o puntos de estrangulamiento. La distribución uniforme ayuda a mantener la eficiencia y estabilidad del proceso.
	Redistribución de Flujos	
<b>FORMACIÓN Y CAPACITACIÓN DEL PERSONAL</b>	Capacitación en Operaciones Eficientes	Asegurarse de que el personal esté adecuadamente capacitado en las mejores prácticas para optimizar procesos puede mejorar significativamente la eficiencia productiva. Asimismo, implementar un programa de mantenimiento preventivo para garantizar que los equipos funcionen de manera óptima (evitando fallas y tiempo de inactividad) puede resultar en ahorros significativos. El ejemplo más clásico de esto es la pérdida de eficiencia de los difusores de aire por ensuciamiento.
	Mantenimiento Preventivo	

Tabla 3: Estrategias para mejorar la eficiencia productiva en PTAR.

## V-II REUSO DE AGUA

Más de la mitad de la población a nivel mundial vive en zonas geográficas donde la demanda de agua supera a la oferta. La oferta tradicional del agua proviene fundamentalmente del derretimiento de la nieve, la lluvia y reservas subterráneas. La disponibilidad de todas estas fuentes se está viendo comprometida dado a las consecuencias del cambio climático, así como también a la contaminación de napas subterráneas. Sumado a lo anterior, el aumento sostenido de la población a nivel mundial impone como prioritario la búsqueda de alternativas innovadoras para conseguir dar abasto del recurso vital a todas las vidas humanas. En este contexto, una vez extraída el agua de las fuentes oferentes, es imperativo maximizar su aprovechamiento en las actividades de la economía humana, para lo cual el reúso de agua proveniente de plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) toma un lugar protagónico.

En una PTAR convencional, el agua residual que ingresa es sometida a diferentes operaciones unitarias con el objeto de reducir drásticamente su contenido de contaminantes, de modo que su descarga a un cuerpo de agua receptor no deteriore alguno de sus aspectos ambientales. Tomando esto como punto de partida, es evidente que el reúso del agua tratada por una PTAR reviste desafíos importantes, tanto desde el punto de vista de una remoción más pormenorizada de contaminantes, así como también del aseguramiento de la calidad del agua tratada.

Dependiendo de la infraestructura y capacidad de inversión, así como del tratamiento necesario y normativas aplicables en cada país, el agua tratada puede ser reusada para aplicaciones industriales, riego en agricultura, riego de áreas verdes municipales, recarga de acuíferos e incluso para uso como agua potable.

En términos de consumo de agua, la agricultura representa alrededor del 70% del consumo del recurso vital a nivel mundial. Esto impone en zonas de escasez hídrica tensión entre los requerimientos de agua de este sector económico con la necesidad de agua de los habitantes de la zona. En este sentido, el reúso del agua tratada por PTAR con fines de riego agrícola es una alternativa no solo sostenible desde el punto de vista ambiental, sino que también social, compatibilizando desarrollo económico y bienestar social.

En general, el agua reusada para agricultura debe cumplir con tener concentraciones adecuadas de nitrógeno y fósforo, lo que se consigue con un tratamiento eficaz de eliminación de estos nutrientes en la PTAR. Es muy relevante, además de eliminar el exceso de nitrógeno y fósforo desde el origen, controlar la carga hidráulica añadida a las plantaciones, de modo de evitar cualquier tipo de lixiviación.

Otro sector llamativo para el reúso de agua son las aplicaciones industriales. Globalmente, se estima que la industria es responsable del consumo del 5% del agua potable. Para múltiples operaciones llevadas a cabo en procesos industriales no es necesario utilizar agua con calidad de potable, como lo son el agua de refrigeración, agua de calentamiento, ciertos tipos de lavado y algunas mezclas. Por citar algunos ejemplos, en la industria papelera el agua tratada de PTAR puede ser reusada en la fabricación de pulpa y papel y en el lavado de equipos y maquinaria; en la industria textil el agua de PTAR puede ser reusada en procesos de teñido, lavado de tejidos, enjuague de equipos y sistemas de refrigeración.



○  
Figura 9. A la izquierda vista Aérea de las dependencias de producción de agua regenerada en Chandler. A la derecha riego con agua regenerada donde se indica que no es potable (Fuente: [www.chandleraz.gov](http://www.chandleraz.gov)).

Un ejemplo notable de producción de agua regenerada no potable es el llevado a cabo en la ciudad de Chandler en el estado de Arizona de Estados Unidos (Ver **Figura 9**). El sistema de producción de agua regenerada utiliza como materia prima el efluente de la PTAR local y fue posible gracias a un esfuerzo colaborativo público-privado donde participaron diversas empresas. El agua residual tratada se somete a procesos de filtración y desinfección avanzados que garantiza que el agua pueda ser reusada en aplicaciones no potables. El agua así tratada se reusa para riego de parques, campos deportivos, áreas públicas, así como sistemas de refrigeración industrial y procesos industriales.

Adicional a lo anterior, existe la posibilidad de reúso del agua tratada en las PTAR para la recarga de acuíferos. La recarga de acuíferos con agua tratada tiene como objetivo principal aumentar la disponibilidad de agua subterránea, que es una fuente importante de abastecimiento de agua dulce para muchas regiones. Esto es especialmente importante en áreas donde los acuíferos están sobreexplotados o enfrentan amenazas de agotamiento debido al crecimiento de la población, la urbanización y el cambio climático.

El proceso de recarga de acuíferos generalmente implica la infiltración controlada de agua tratada en el suelo, donde se filtra a través de las capas permeables y recarga el acuífero subyacente. Antes de utilizar agua tratada para la recarga de acuíferos, es necesario someterla a un tratamiento avanzado para garantizar que cumpla con los estándares de calidad requeridos y que no represente un riesgo para la salud humana o el medio ambiente.

Como una alternativa de aún más valor agregado, se encuentra la producción de agua potable a partir de agua tratada por una PTAR. Si bien esta es la opción con más prejuicios por parte de la población, ya hay experiencias exitosas en el mundo que demuestran la viabilidad y seguridad con que se puede realizar esta opción. El mejor ejemplo es el caso de Singapur, la que es una suerte de ciudad-estado del sudeste asiático con más de 5 millones de habitantes y limitados recursos acuíferos, la que por mucho tiempo dependió fuertemente del suministro de agua potable por parte de Malasia. Dada su situación, Singapur tenía los incentivos suficientes para hacer grandes inversiones en búsqueda del reúso del recurso hídrico. Desde 2002, Singapur es capaz de autoabastecer un 40% de su propia demanda de agua. El proceso utilizado consiste inicialmente en conducir el agua tratada a equipos de micro y ultrafiltración y luego por un equipo de osmosis inversa, generando agua de muy alta calidad. Finalmente, el agua pasa a través de un equipo de desinfección ultravioleta donde se elimina cualquier resabio de virus y bacterias. Luego de esto, el agua está en condiciones para ser conducida e integrada a sistemas de agua potable.

## V-III ELIMINACION DE NITRÓGENO MEDIANTE SISTEMA ANAMMOX

Dentro de los tratamientos terciarios realizados en las plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR), aquellos destinados a la remoción de nitrógeno son quizás los más importantes. La eliminación del nitrógeno (y el fósforo) en el agua tratada permite proteger al cuerpo de agua receptor de fenómenos como la eutrofización y por extensión, a la fauna y flora del ecosistema. Tradicionalmente, la eliminación del nitrógeno se realiza en dos etapas: primero una etapa de nitrificación seguida de una denitrificación (N/DN). Así, el nitrógeno contaminante es transformado a nitrógeno gaseoso y eliminado de la fase líquida, devolviéndose a la atmósfera.

El tratamiento por N/DN, si bien efectivo, implica costos asociados al suministro de oxígeno, adición de materia orgánica exógena (típicamente metanol) y disposición de biomasa (lodo) generada. En la **Figura 10** se presenta un diagrama de bloques con los requerimientos de cada etapa involucrada<sup>1</sup> en la remoción de nitrógeno por N/DN, utilizando una base de cálculo de 100 kg de nitrógeno amoniacal.

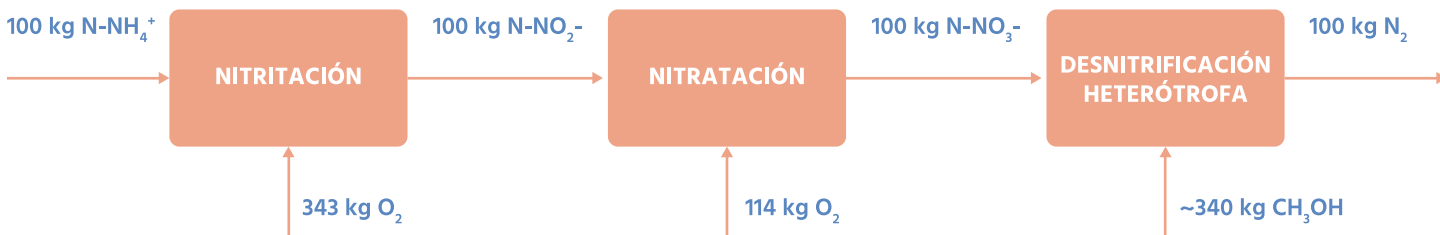


Figura 10: Requerimientos de oxígeno y materia orgánica en un sistema tradicional de nitrificación/denitrificación.

Como alternativa al proceso convencional de N/DN surge la remoción autotrófica de nitrógeno, el cual tiene como protagonistas a bacterias que pueden oxidar el amonio de manera anaeróbica. Las bacterias ANAMMOX (ANAerobic AMMonium OXidation) son capaces de convertir directamente el amonio a nitrógeno gaseoso utilizando nitrito como aceptor de electrones. Dado que las ANAMMOX requieren de nitrito para realizar la eliminación del amonio, los procesos basados en el uso de estas bacterias deben incorporar una etapa previa de nitrificación parcial.

El proceso ANAMMOX se divide en dos etapas: nitrificación parcial (alrededor de la mitad del amonio es oxidado a nitrito) y luego el amonio es oxidado en presencia de nitrito para obtener nitrógeno gaseoso y una pequeña fracción de nitrato. Esta combinación es conocida como nitrificación parcial y ANAMMOX (NP/A). En la **Figura 11** se presenta un diagrama de bloques con los requerimientos de cada etapa del proceso NP/A. Como se puede observar, los requerimientos de oxígeno en comparación al sistema N/DN son sustantivamente inferiores (aproximadamente un 60% menos), lo que hace al proceso NP/A de atractivo no solo desde el punto de vista ambiental por ahorro de recursos, sino que también económico.

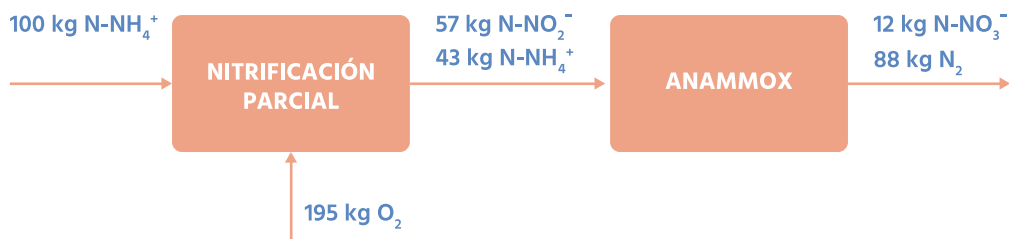


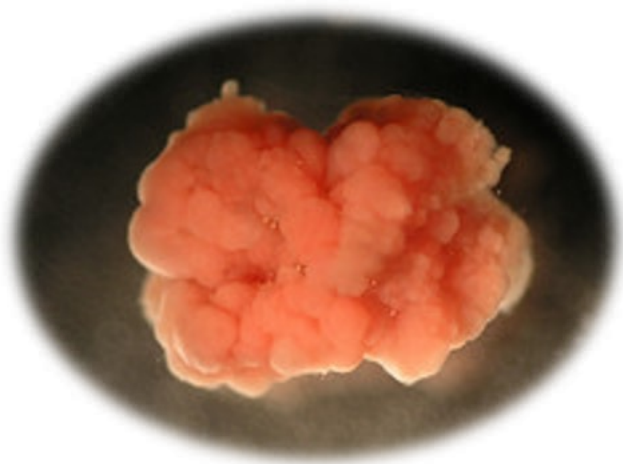
Figura 11: Requerimientos nitrificación parcial y ANAMMOX

1. Se subdividió el proceso de nitrificación en sus dos componentes: nitrificación y nitratación.



Aparejado a todo el potencial de los procesos basados en tecnología ANAMMOX, existen desafíos que deben ser subsanados para expandir su uso. Por ejemplo, el desempeño de las bacterias ANAMMOX se ve afectado por la concentración de sólidos suspendidos en el afluente, así como también por la carga de DQO del mismo. Por esto, en caso de ser necesario, se deben incorporar operaciones que reduzcan los niveles de estos parámetros hasta valores compatibles con el correcto funcionamiento de las ANAMMOX.

En configuraciones de operación donde se llevan a cabo la nitrificación parcial y la etapa ANAMMOX en un mismo reactor, es usual que la biomasa se organice en gránulos de color rojo-anarajando (ver **Figura 12**). En la capa externa del gránulo se alojarán bacterias amonio oxidantes y en el interior las ANAMMOX, lo que permite que estas últimas estén más protegidas de potenciales condiciones inhibitorias en el seno del licor mezcla. En general, mientras más rojo es el gránulo más actividad ANAMMOX presentará.



○  
*Figura 12: Aspecto de un gránulo Anammox*

Dado que las bacterias ANAMMOX tienen bajas tasas de crecimiento y rendimiento de lodos, el proceso ANAMMOX se ha limitado al tratamiento de aguas residuales a temperaturas mayores de 30° C y con altas concentraciones de amonio (entre 500 y 1500 mg N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup>/L). El agua residual que cumple estas condiciones en una PTAR corresponde a la contenida en la línea de retorno proveniente de la centrifugación de los lodos digeridos. Esta corriente líquida contiene típicamente una relación DQO/N < 5, lo que favorece la estabilidad del proceso.

En una PTAR que carece de proceso ANAMMOX para el tratamiento del retorno proveniente de la centrífuga, se deberá incurrir en un gasto adicional para la eliminación de nitrógeno por medio de N/DN. Pese a que esta línea usualmente aporta menos del 1% del caudal tratado por la PTAR, contribuye alrededor del 15-20% de la carga de nitrógeno que ingresa a la cabecera de esta. Es más, la carga de nitrógeno de esta línea puede aumentar hasta en un 50% si hay incorporado una hidrólisis térmica anterior a la digestión anaerobia de los lodos. Considerando lo anterior, los ahorros percibidos por la implementación de un sistema NP/A pueden llegar a ser muy significativos.

En atención a su potencial, en las últimas décadas se han desarrollado diversas tecnologías que utilizan el proceso ANAMMOX, algunas de las cuales han sido implementadas exitosamente a escala industrial, como son, reactores por lotes secuenciales (SBR), reactores granulares y de lecho fluidizado.

La primera planta donde se instaló un sistema ANAMMOX fue en Rotterdam (Holanda) en el año 2002. A la fecha, el reactor se encuentra todavía en operación alcanzando en promedio un 92% de remoción de nitrógeno, con cargas volumétricas sobre 10 kgN/(m<sup>3</sup>\*d).

En la actualidad, existen más de 65 instalaciones<sup>2</sup> industriales que utilizan este proceso para el tratamiento de aguas residuales de distintas procedencias, y su número va en aumento. La mayoría de estas plantas están en Europa, seguido de China y Norte América. A abril de 2024, existen a nivel de Latinoamérica, dos plantas de aguas residuales domiciliarias que tienen tecnología Anammox, La Farfana y Mapocho-Trebal, ambas en la ciudad de Santiago de Chile.

Finalmente, en la **Tabla 4** se presenta una lista de las principales características de los procesos de remoción de nitrógeno abordados.

SISTEMA	NITRIFICACIÓN PARCIAL/ANAMMOX	NITRIFICACIÓN/DESNITRIFICACIÓN
<b>NÚMERO DE REACTORES</b>	1-2	1-2
<b>DESCARGA</b>	N <sub>2</sub> , NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	N <sub>2</sub>
<b>GRUPOS BACTERIANOS INVOLUCRADOS</b>	Amonio oxidantes (AOB) / Anammox	Amonio oxidantes y Nitrito oxidantes (NOB) / Desnitrificantes heterótrofas
<b>REQUERIMIENTO DE OXÍGENO</b>	1,95 kg O <sub>2</sub> /kg N	4,57 kg O <sub>2</sub> /kg N
<b>RETENCIÓN DE BIOMASA</b>	Si	No
<b>REQUERIMIENTO DQO EXTERNO</b>	No	Si
<b>PRODUCCIÓN DE LODO</b>	Muy baja	Alta
<b>REQUERIMIENTO DE ALCALINIDAD</b>	No	Si
<b>CONCENTRACIÓN NH<sub>4</sub><sup>+</sup> AFLUENTE</b>	>1000 mg/L	15-50 mg/L

Tabla 4: Principales características NP/A y N/DN.

2. Según el estudio realizado por Driessen & Hendrickx en 2021



## Sistema de **Gestión de la Energía**

Todos los procesos productivos presentan flujos de materia y flujos de energía. La factibilidad para llevar a cabo un determinado proyecto estará definida en buena parte por la disponibilidad de materia prima a bajo costo, así como también de los costos asociados al suministro o autogeneración de energía aprovechable para mantener en operación equipos o satisfacer demandas de calor. En atención a lo antes mencionado, un sistema productivo que incorpore medidas de economía circular en sus flujos de materia y energía puede en algunos casos llegar a aumentar las utilidades, así como también mejorar la imagen corporativa de la empresa, lo que muchas veces tiene un valor incalculable.

En este capítulo, se abordará el concepto de eficiencia energética y gestión de la energía y las posibilidades de autogeneración de energía aplicable a una PTAR. En capítulos posteriores se profundizará respecto a los flujos de materia y sobre el uso energético del biogás.

## VI-I EFICIENCIA ENERGÉTICA Y GESTIÓN DE LA ENERGÍA

La eficiencia energética es la optimización del recurso energético sin sacrificar la calidad del servicio entregado mientras que un sistema de gestión de la energía (SGE) son un conjunto de elementos en una empresa que están interrelacionados entre sí para poder mejorar continuamente el desempeño energético.

Todas aquellas empresas que quieran mejorar la eficiencia energética de sus procesos, aprovechar la energía renovable o excedentes de energía propia, pueden implementar iniciativas para establecer un SGE. Para esto se deben seguir ciertos pasos claves que permitirán desarrollar un SGE.

En primer lugar, se deben establecer políticas claras que den coherencia y guíen las acciones que la empresa tomará respecto a sus flujos de energía.

Luego se debe planificar, desarrollando una línea base del consumo energético de la empresa durante sus procesos y establecer **indicadores de desempeño** que servirán para evaluar si las medidas de reducción son adecuadas o no.

Posteriormente, se deben implementar las medidas propuestas para la reducción de consumo energético, para luego verificar mediante monitoreo, el consumo energético de los procesos para finalmente evaluar los resultados y decidir qué acciones son las que se deben tomar.

El éxito del SGE depende en gran medida del compromiso de todo el personal. En este sentido, capacitar al personal sobre la importancia de la eficiencia energética y su papel en la implementación del SGE es crucial. Asimismo, la concienciación genera un sentido de pertenencia y motivación para participar en el proceso.

Si el lector está interesado en profundizar más en la temática, los autores de este manual recomiendan fuertemente leer la norma ISO 50001 sobre Sistemas de Gestión de la Energía, donde se trata de manera pormenorizada cada uno de los componentes que se observan en la **Figura 13**.



Algunas de las acciones de Eficiencia Energética que son posible de implementar en una PTAR son las siguientes:

Uso de motores de múltiples velocidades o variadores de frecuencias para equipos de carga variable tales como bombas, ventiladores, sopladores, compresores, entre otros.

Utilización de motores y bombas de alta eficiencia.

Evitar sobredimensionamiento en motores, compresores, sopladores y bombas, si existen reemplazarlos.

Implementar banco de condensadores para reducir el factor de potencia.

Realizar programas de mantención preventiva y predictiva de motores y equipos en general.

Utilizar lubricantes avanzados de larga duración.

Instalación de partidores suaves especialmente en sopladores.

Minimizar el uso del aire a través de un adecuado control automático.

Cambiar los sistemas de iluminación.

Mejoras de Eficiencia Energética por gestión de datos y reportes.

Integración de criterios de Eficiencia Energética en Proyectos de Inversión y compras.

Definir indicadores para control y seguimiento de los consumos energéticos.

## VI-II AUTOGENERACIÓN DE ENERGÍA

La autogeneración de energía en plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) es un componente clave para la sostenibilidad y la economía circular. El objetivo es aprovechar los recursos disponibles en el proceso de tratamiento para producir energía, reduciendo la dependencia de fuentes externas y minimizando el impacto ambiental.

Una de las opciones más integrales corresponde a la digestión anaerobia de los lodos en exceso generados en la línea principal de la PTAR con producción de gas combustible. Dado que se abordará en detalle en el capítulo 6, este apartado se remitirá a concebir a la digestión anaerobia como un proceso biológico en donde a partir de materia orgánica biodegradable se puede producir biogás, el cual luego de un acondicionamiento puede ser quemado en equipos de cogeneración para producir energía eléctrica y energía térmica. La energía eléctrica así producida puede ser utilizada para satisfacer los requerimientos de energía para aireación en lodos activos, mientras que la energía térmica para secado de lodos y la mantención de la temperatura en los digestores, entre otros.

El uso de energía solar y fotovoltaica es otra forma de autogeneración en PTAR, proporcionando una fuente de energía limpia y renovable. Las PTAR pueden instalar paneles solares en sus terrenos o estructuras para generar electricidad. Esta energía puede ser utilizada para operar bombas, sistemas de control, iluminación, entre otros. Si la generación de energía supera la demanda, se puede pensar en la venta del exceso de energía a la red eléctrica, generando ingresos adicionales.

Si la PTAR tiene un flujo significativo de agua, puede instalar turbinas hidráulicas para generar electricidad. Esto es especialmente útil cuando el tratamiento involucra el movimiento de grandes volúmenes de agua a través de desniveles. Esto se puede realizar a través de la instalación de microturbinas en plantas y en red o plantas de generación en caídas de efluentes o afluentes, en embalse, en recintos de la compañía.

Las PTAR ubicadas en áreas con buen viento pueden beneficiarse de la energía eólica. La instalación de turbinas eólicas puede complementar otras fuentes de energía para la autogeneración. La energía generada puede alimentar las operaciones de la PTAR y, al igual que con la energía solar, el excedente puede venderse a la red eléctrica.



# GESTIÓN DE BIOSÓLIDOS

En el proceso de tratamiento de las aguas residuales, tanto urbanas como industriales, se generan dos corrientes principales: el efluente líquido de la planta de tratamiento y los lodos o suspensiones de sólidos obtenidos como subproductos. Con respecto a estos últimos, debido a su origen, consistencia acuosa, volumen y carga orgánica, la mayor parte de ellos requiere de algún proceso de tratamiento antes de ser dispuestos en el medio ambiente, con el fin de disminuir su volumen por eliminación de agua y descomponer la materia orgánica degradable en compuestos simples orgánicos e inorgánicos relativamente estables o inertes.

La naturaleza de los sólidos presentes va a depender del proceso de tratamiento del que se originan, de tal modo que los lodos pueden ser:

PRIMARIOS	contienen arena, sólidos inorgánicos finos y sólidos orgánicos.
SECUNDARIO	proviene de los tratamientos biológicos aerobios como son los lodos activados, filtros percoladores y contactores biológicos rotatorios.
MIXTOS	lodos resultantes de la mezcla de lodos primarios y secundarios.
QUÍMICOS	son los que se generan por adición de cal y sales de aluminio y hierro, para mejorar la remoción de sólidos suspendidos y la precipitación de fósforo.

El primer tratamiento que se le realiza a estos sólidos es el de espesamiento, donde se reduce el volumen de los lodos al disminuir su humedad. Esto permite ahorrar costos y recursos necesarios para el transporte, almacenamiento y tratamiento posterior. Luego de esta primera etapa, lo siguiente es someter a los lodos a un proceso de estabilización, como es la adición de cal o una digestión anaerobia. Posteriormente, se realiza un tratamiento intermedio de los biosólidos estabilizados para finalmente disponerlos.

En este capítulo, el objetivo es exponer las principales alternativas disponibles para llevar a cabo una gestión de biosólidos alineada con las premisas de la economía circular y la eficiencia energética.

## VII-I ESTABILIZACIÓN DE BIOSÓLIDOS

Una de las formas tradicionales y asequibles para la estabilización de biosólidos es la estabilización alcalina, la cual consiste en llevar y mantener los lodos a un pH 12 mediante la adición de cal. Manteniendo este pH un tiempo suficiente, se asegura la inhibición de la degradación de la materia orgánica presente en el lodo, se evitan los malos olores de descomposición y se controla la existencia de patógenos. Las principales ventajas de este tratamiento son su bajo costo de inversión, operación y mantenimiento, además de bajos requerimientos de área en las plantas de tratamiento. Por otro lado, la adición de compuestos adicionales para la estabilización perjudica la premisa de minimizar el volumen de biosólidos. Es más, en algunos casos la adición de compuestos alcalinos a los biosólidos puede provocar la emanación de gas amoníaco, dependiendo de la composición y pH del lodo.

La competencia más atractiva a la estabilización alcalina es la estabilización del biosólido mediante digestión anaerobia, la que se alinea perfectamente con los principios de economía circular al permitir **reducir** la cantidad de lodo a disponer, **recuperar** energía desde el biosólido mediante una transformación biológica e incluso (como se verá en capítulos posteriores) facilita la posterior recuperación de fósforo y nitrógeno.

A continuación, se tratará con mayor detalle lo referido a la digestión anaerobia incluyendo un acápite especial para la hidrólisis térmica del lodo anterior a ser ingresado al proceso de digestión, lo que como se verá más adelante, puede aumentar notoriamente el rendimiento de biogás y por extensión la generación de energía.



## VII-I.I DIGESTIÓN ANAEROBIA

El agua residual contiene alrededor de 5 veces la cantidad de energía que se requiere para su propio tratamiento. El afluente que ingresa a una PTAR es rico en materia orgánica, la que a su vez es un "carrier" de energía química que puede ser aprovechada por digestión anaerobia para la producción de biogás.

Para que el tratamiento de un determinado flujo por digestión anaerobia sea viable, este debe contener una concentración mínima de DQO (superior a 1000 mg/L), condición que no se cumple en las aguas servidas municipales, salvo que la temperatura ambiente supere los 35°C. Sin embargo, en el proceso de depuración de aguas hay dos operaciones en donde se concentra materia orgánica, presentando altos valores de DQO biodegradable: sedimentación primaria y sedimentación secundaria.

Tanto en el tratamiento primario como en el secundario hay eliminación de sólidos presentes en el afluente. En el tratamiento primario hay una remoción de sólidos suspendidos de naturaleza tanto orgánica como inorgánica, los que se retiran en un decantador. Aquí se generan los **lodos primarios**. Por su parte, en el tratamiento secundario hay una transformación de materia orgánica soluble, mediada por bacterias aerobias, a nuevo material celular y CO<sub>2</sub>. Para evitar la acumulación de biomasa (expresada como SSV) se elimina una cantidad periódicamente en general a través de un decantador secundario. Aquí se generan los **lodos secundarios**.

Tal y como se ha expuesto con anterioridad, los lodos primarios y secundarios, una vez retirados de la línea principal de la PTAR, deben ser estabilizados y dispuestos de manera segura. La digestión anaerobia es una alternativa para estabilizar los lodos, así como también para recuperar energía. En la **Figura 14**, se presenta un esquema que ilustra el potencial de la digestión anaerobia como mecanismo para recuperar la energía disponible en la materia orgánica presente en el lodo mixto. Si tomamos como base de cálculo un lodo mixto con 100 kg de DQO biodegradable, alrededor de 80 kg de DQO pueden ser eliminados de la fase líquida y transformados a DQO gaseoso en forma de metano. El metano, componente mayoritario del biogás, puede ser combustionado en equipos de cogeneración, distribuyendo típicamente alrededor de un 34% de su energía química para producir energía eléctrica y el resto como energía térmica.

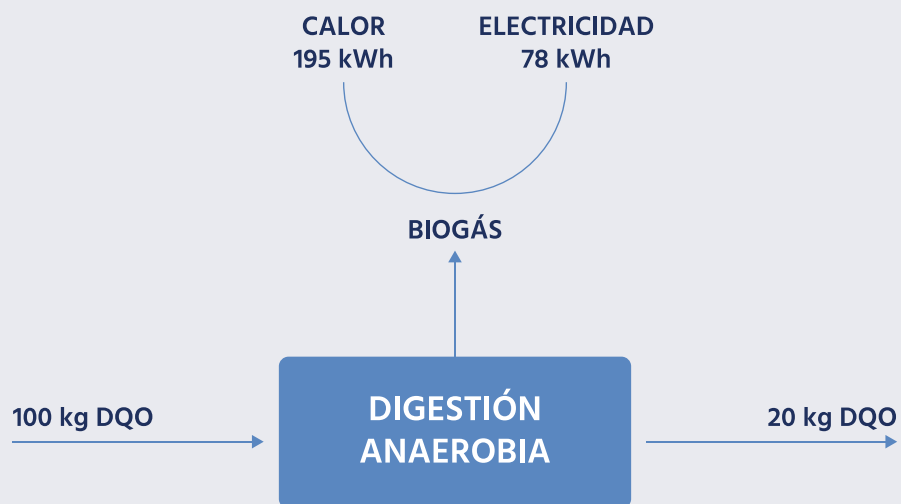


Figura 14: Balance energético y de materia digestión anaerobia.

Siendo ya realidad para múltiples PTAR a lo largo del mundo, la energía eléctrica generada a raíz del aprovechamiento del metano en equipos de cogeneración permite satisfacer parte importante de los requerimientos de electricidad por parte de la planta. De esta forma, el tratamiento anaerobio de los lodos primarios y secundarios financian la operación aerobia por lodos activos realizada en la línea principal de la planta.

En cuanto a la energía térmica, esta puede tener diferentes usos dentro de la misma planta. En primer lugar, parte de la energía térmica generada deberá aprovecharse para mantener la temperatura del digester anaerobio (35 °C), compensando las pérdidas de calor hacia los alrededores. En segundo lugar, la energía térmica puede aprovecharse para generar aire caliente que sea usado en la etapa de secado de los lodos digeridos. En tercer lugar, se puede utilizar para aumentar la temperatura de otros reactores biológicos presentes en la planta. A propósito de esto último, a modo de ejemplo, los procesos de remoción de nitrógeno basados en bacterias Anammox pueden llegar a aumentar hasta en un 30% su actividad desnitrificante autótrofa al aumentar la temperatura de 30 a 35 °C.

Adicional a lo mencionado anteriormente, dependiendo de la localización de la PTAR, es posible inyectar el calor del proceso generado a la red de calefacción local o venderlo como insumo a empresas aledañas que lo requieran. De esta manera se puede fortalecer la relación con las comunidades colindantes, mejorando la imagen de la PTAR.

Además de la recuperación de energía de los lodos en forma de metano, la digestión anaerobia reporta otros beneficios, los cuales se resumen en la **Figura 15**.



- REDUCCIÓN DE SÓLIDOS VOLÁTILES DEL LODO
- MEJOR DESHIDRATACIÓN DEL LODO
- ELIMINACIÓN DE PATÓGENOS
- REDUCCIÓN DE VOLUMEN DE LODO A DISPONER
- ELEVADO GRADO DE ESTABILIZACIÓN
- PRODUCCIÓN DE BIOGÁS
- LIBERACIÓN DE NITRÓGENO Y FÓSFORO, FACILITANDO SU RECUPERACIÓN



Figura 16. PTAR de Hamburgo, Alemania

El efluente del digestor, reducido en materia orgánica y más estabilizado, puede ser visto como una fuente de nutrientes para la agricultura. En el digestor anaerobio, además de la eliminación de la DQO como metano, ocurre la liberación cuantiosa de nitrógeno y fósforo en forma soluble. Este hecho facilita la recuperación de estos nutrientes desde la PTAR, pudiéndose generar procesos secundarios (como la producción de estruvita) que enmarquen a la PTAR en el concepto de Biofactoría.

Finalmente, existen múltiples casos emblemáticos de la integración de la digestión anaerobia y el aprovechamiento del biogás generado en PTAR. Uno de los más destacados se localiza en la planta de tratamiento de aguas residuales de Hamburgo, Alemania (Ver **Figura 16**). Esta planta es una de las más grandes de Europa, tratando el equivalente a 2,5 millones de personas. Actualmente, la planta produce más energía de la que requiere para su funcionamiento, inyectando el excedente a la red pública como electricidad y biometano. Además, el excedente de calor se inyecta para su uso en calefacción urbana. En 2020, la planta fue capaz de entregar 23,5 GWh de energía eléctrica renovable y 34,6 GWh de energía térmica a la red pública.

Para optimizar los resultados de la digestión anaerobia existen diferentes alternativas tecnológicas que buscan mejorar la velocidad de hidrólisis de los sustratos y/o maximizar la producción de biogás. En este contexto, a continuación, se presentan tres alternativas tecnológicas para mejorar la operación de los biodigestores: codigestión, hidrólisis enzimática e hidrólisis térmica.

## VII-I.I.I CODIGESTIÓN

La codigestión anaerobia es un proceso en el que se combinan dos o más sustratos con características que se complementan para su tratamiento conjunto. El objetivo es mejorar la producción de biogás mediante el uso de diferentes tipos de materiales orgánicos. A diferencia de la monodigestión, en la que se utiliza un solo tipo de sustrato, la codigestión anaerobia ofrece varias ventajas. Por ejemplo, al mezclar diferentes sustratos, se puede obtener un equilibrio más adecuado de nutrientes, especialmente en términos de la relación carbono/nitrógeno. Además, este proceso puede reducir el impacto de sustancias tóxicas al diluirlas y mejorar la cinética de producción de metano, resultando en una mayor generación de biogás.

En la mayoría de los casos, la producción de biogás a partir de sustratos mixtos es superior a la suma de la producción de biogás a partir de los sustratos digeridos por separado. Esto sumado a que muchas empresas generan riles con alta carga orgánica, la codigestión en instalaciones de digestión anaerobia en PTAR es una oportunidad para ingresos adicionales, así como también de integración con la comunidad.

## VII-I.I.II HIDRÓLISIS TÉRMICA

La digestión anaerobia es un proceso de tres fases que consisten en: hidrólisis de los sustratos complejos para formar monómeros simples; acidificación de los monómeros para formar ácidos orgánicos; formación de metano y dióxido de carbono para finalmente ser liberados por los microorganismos anaerobios. En un digestor simple de una etapa, la velocidad del proceso es limitada por la velocidad de la hidrólisis, de tal modo, la hidrólisis no es más que un paso limitante para el digestor y puede ser optimizada, lo cual permitiría un proceso de digestión más rápido y estable.

El lodo generado en el tratamiento secundario de la línea principal de la PTAR corresponde fundamentalmente a material celular, y considerando que las células se encuentran protegidas por una pared celular, de estructura compacta y de difícil acceso para enzimas, podemos concluir que hace de barrera física que limita la liberación de los sustratos desde el interior de las células presentes en el lodo. Por lo anterior, es que resulta atractivo la incorporación de una operación de hidrólisis previa al proceso de digestión anaerobia de lodos, ya que la ruptura de las paredes celulares favorece la velocidad de los procesos bioquímicos que acontecen en los digestores.

Entre los métodos de hidrólisis, el tratamiento térmico destaca por sus buenos resultados. De manera resumida, la hidrólisis térmica consiste en someter al lodo a una alta temperatura y presión, para luego someterlo a una explosión de vapor por diferencia de presión. Esto se realiza con el objetivo de romper las estructuras orgánicas complejas, solubilizándose muchos compuestos desde las células, los cuales pueden ser rápidamente fermentados. La hidrólisis del lodo produce una disminución en la viscosidad y permite operaciones con altas concentraciones de sólidos disminuyéndose los volúmenes de operación. Adicionalmente, por efecto de la temperatura, los lodos son esterilizados.

Existen actualmente en el mercado diferentes configuraciones y equipos para llevar a cabo la hidrólisis térmica de los lodos. En esta guía abordaremos, a modo de ejemplo, el tratamiento térmico desarrollado por la empresa CAMBI.

En primer lugar, tanto el lodo primario como el secundario son conducidos a una operación de deshidratación. Esto es crucial porque el tratamiento térmico está diseñado para un porcentaje de masa seca del 16%. Si la deshidratación entrega un lodo con un porcentaje de sólidos mayor, se puede hacer una mezcla entre lodo fresco y deshidratado para llegar al 16% requerido. Luego el lodo es bombeado a un precalentador o "pulper", en donde es sometido a un precalentamiento mediante inyección de vapor reciclado desde los reactores de hidrólisis y el tanque flash. El precalentador entrega la capacidad necesaria para recuperar energía desde los reactores de hidrólisis y el tanque flash. El lodo es mezclado por bombas de recirculación.

Una vez precalentado, el lodo es transportado por bombas hasta el reactor de hidrólisis. Aquí se le inyecta vapor a presión al estanque de modo que en este se alcanza una presión de 6 bar y una temperatura de 165°C; estas condiciones se mantienen por 30 minutos. Posteriormente, se libera vapor a presión hacia el sistema de precalentamiento hasta reducir la presión a 3 bar, posterior a lo cual el lodo es transferido hacia el estanque flash donde la presión es significativamente más baja, produciendo que el agua caliente y presurizada presente en el lodo cambie de fase violentamente, liberándose vapor desde el interior del material celular, lo que genera rupturas en las paredes celulares permitiendo al contenido interno de las células salir.

Finalmente, el lodo es conducido hacia un intercambiador de calor donde se disminuye su temperatura hasta la temperatura ideal para el proceso de digestión anaerobia, posteriormente, es transportado hacia el digestor anaerobio para el respectivo proceso.

En la **Figura 17** se presenta un diagrama de bloques donde se puede observar las operaciones de la línea principal donde se generan los lodos que son conducidos al tratamiento térmico anterior a la digestión anaerobia.

Este proceso mejora diversos aspectos en el proceso de digestión anaerobia, en primer lugar, la cantidad de biogás producido es mayor respecto al proceso sin hidrólisis térmica. Relacionado con lo anterior, la remoción de sólidos volátiles aumenta y por extensión, se reduce el contenido de sólidos en el digestato.

### VII-I.I.III HIDRÓLISIS ENZIMÁTICA

Otra alternativa para favorecer la velocidad de hidrólisis, es la incorporación de una hidrólisis enzimática de la materia orgánica. Las enzimas, en términos generales, corresponden a moléculas de origen biológico que son capaces de catalizar reacciones químicas, que de otro modo, demorarían mucho más tiempo en ocurrir.

Las enzimas de mayor interés corresponden a aquellas con actividad peptidasa, carbohidrasa y lipasa, las que catalizan la hidrólisis de proteínas, carbohidratos y lípidos, respectivamente. Dependiendo de la composición de los sólidos a tratar por digestión anaerobia, podría ser deseable incorporar también enzimas hidrolíticas de lignina y hemicelulosa.

Si bien efectivas, la aplicación de enzimas a escala industrial tiene como cuello de botella su alto costo de producción, fundamentalmente por la serie de maniobras que involucra su purificación.

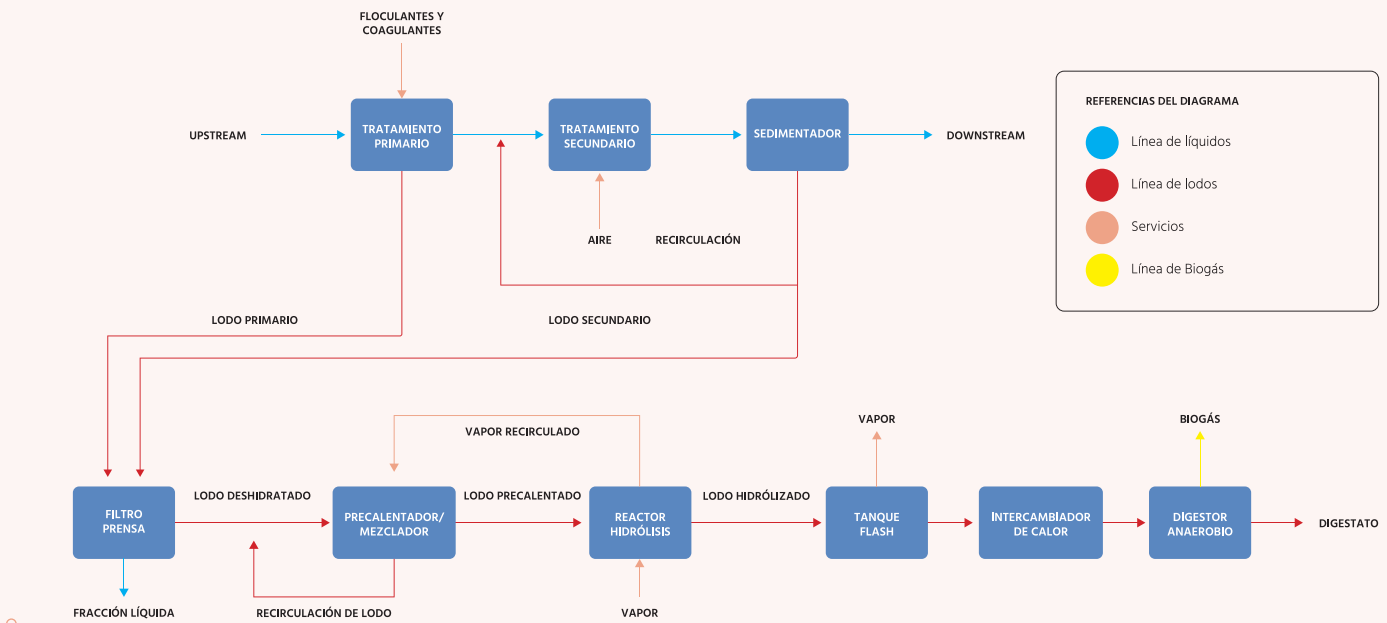


Figura 17: Diagrama del proceso CAMBI utilizado en la planta de tratamiento de aguas residuales de Chertsey, Inglaterra.

## VII-II TRATAMIENTO INTERMEDIO DE BIOSÓLIDOS ESTABILIZADOS

El tratamiento intermedio de biosólidos estabilizados es parte crucial de su gestión, en el entendido que guarda directa relación con el destino final que se le dará a los biosólidos. Por ejemplo, si el biosólido se revalorizará como fertilizante es fundamental deshidratarlo al máximo para reducir costos de transporte, o si se plantea la posibilidad de utilizar el biosólido como insumo para ecoladrillos no tiene sentido realizar un compostaje anterior, etc.

Los métodos o procesos que se emplean comúnmente para el tratamiento de los lodos, hasta su disposición final son:

<b>ESPEAMIENTO</b>	consiste en concentrar los lodos.
<b>SECADO EN LECHOS DE ARENA</b>	consiste en la evaporación de una cantidad de agua tal que el lodo digerido pueda ser manejado como material sólido. Esto se lleva a cabo en lechos al aire libre diseñados para tal efecto.
<b>SEPARACIÓN</b>	proceso anterior a la eliminación de agua en lechos de secado se puede incorporar una separación sólido/líquido en prensa, centrífuga o decantador
<b>FILTRACIÓN</b>	consiste en la eliminación de agua de los lodos ya sea por filtro prensa o filtro de bandas.
<b>SECADO TÉRMICO</b>	consiste en la eliminación de agua por calor hasta un contenido de humedad del 10%.

A continuación, se presentarán tres técnicas más utilizadas para reducir la humedad de los biosólidos estabilizados, posterior a su deshidratación mecánica en filtros, prensa o centrífugas.

### VII-II.I SECADO SOLAR

El acondicionamiento en canchas de secado es un método utilizado para la deshidratación de lodos digeridos utilizando la energía solar para ello. Una vez seco, el lodo se puede disponer en vertederos controlados o ser utilizado como biofertilizante. Las principales ventajas de la aplicación de este método son: su bajo costo, ya que no requiere de energía adicional; escaso mantenimiento necesario; bajo o nulo requerimiento de aditivos químicos; y una alta concentración de sólidos obtenida en el producto final ya que la misma exposición a los rayos luminosos afecta la estructura del biosólido, generando grietas y roturas que facilitan la deshidratación.

Este método tiene dos principales inconvenientes: en primer lugar se generan olores molestos producto de la evaporación del agua junto con compuestos orgánicos volátiles, lo que puede traducirse en problemas con la comunidad aledaña; en segundo lugar, dependiendo de las condiciones climáticas de la zona, el secado solar puede ser viable como alternativa única en los meses donde las precipitaciones sean mínimas.

## VII-II.II BIOSECADO

La tecnología de biosecado (biodrying) se trata de un proceso de compostaje incompleto dirigido, cuyo fin no es necesariamente la obtención de un biofertilizante apto para uso en suelo, sino que su objetivo es la deshidratación térmica de los lodos aprovechando el calor que se desprende de las reacciones de descomposición de la materia orgánica para evaporar la humedad contenida. Es por esto por lo que se emplea el término biosecado para su diferenciación. Generalmente, los lodos deben mezclarse con material estructurante para aumentar la porosidad del material a secar y favorecer la aireación. El problema más crítico de este proceso es la generación de olores por la emisión de compuestos orgánicos volátiles a la atmósfera, compuestos azufrados y nitrógeno amoniacal. Esto se puede controlar con la aplicación previa de un proceso de eliminación o recuperación de nutrientes (nitrificación-desnitrificación; stripping-absorción; etc.) y de degradación de la materia orgánica (digestión aerobia o anaerobia). No obstante, el hecho de que el proceso tenga un mayor rendimiento cuando se realiza al aire libre implica un alto riesgo ambiental si no se opera correctamente.

## VII-II.I SECADO TÉRMICO

Este proceso permite deshidratar los lodos mediante la aplicación de calor externo para evaporar la humedad contenida. La modalidad de secado puede ser directa o indirecta. En el secado directo, los lodos entran en contacto con el medio que transfiere el calor (por ejemplo: aire, vapor), mientras que en el secado indirecto, los lodos están en contacto con una barrera física que transporta una fuente de calor (básicamente un intercambiador de calor). En el secado térmico se puede utilizar como fuente de calor los gases de combustión provenientes de los equipos de cogeneración, aumentando así la eficiencia energética de la planta.

## VII-III DISPOSICIÓN

El biosólido estabilizado y deshidratado puede ser revalorizado como fertilizante en suelos agrícolas o plantas forestales dado su estructura y contenido en P, N y K. A continuación, se comentarán algunas características que tener en cuenta para cada caso:

### FERTILIZANTE O ACONDICIONADOR DE SUELO

se basa en las cualidades físicas y químicas del lodo obtenido luego de su estabilización por métodos anaerobio. En este contexto, los elementos esenciales para el crecimiento de las plantas se pueden dividir en tres grupos:

Hidrógeno, oxígeno y carbono, asegurados libremente a partir del aire y agua.

Nitrógeno, fósforo, potasio, calcio, magnesio, azufre, y hierro, obtenidos en cantidades substanciales a partir del suelo.

Boro, manganeso, zinc, cobre y otros elementos disueltos en pequeñas cantidades en el suelo y que son conocidos como elementos trazas.

Los principales nutrientes fertilizantes son el nitrógeno, fósforo y potasio, y la cantidad que se requiere de cada uno de ellos dependerá del tipo de suelo, de las condiciones climatológicas y del cultivo.

El lodo estabilizado anaeróbicamente contiene cantidades importantes de los nutrientes mencionados. El humus del lodo, además de proporcionar alimento a los vegetales, beneficia el suelo, aumentando su capacidad de retención de agua y mejorando su calidad para el cultivo. También disminuye el fenómeno de erosión. En el caso de tratarse desechos industriales, debe cuidarse que los contenidos de elementos trazas no se encuentran en cantidades demasiado elevadas, dado que altas concentraciones de ellos pueden ser perjudiciales para el ecosistema.

### MATERIAL DE RELLENO

se limita casi exclusivamente a los lodos digeridos, los que pueden ser dispuestos en el medio ambiente sin generar olores ofensivos. Los lodos pueden estar mojados o parcialmente deshidratados para ser utilizados como relleno para terrenos bajos.

Cuando se utilizan lodos mojados, la zona empleada se convierte en una laguna, lo que ha sido objeto de estudio como método de tratamiento. Por lo tanto, dependiendo del uso que se les dé a estas lagunas, este será un método de tratamiento o de disposición. Resulta económico utilizar lagunas como método de disposición final de lodos digeridos puesto que elimina el proceso de deshidratación. Sin embargo, este método sólo es utilizable en lugares donde existen zonas bajas desocupadas y disponibles en el lugar de la planta o a distancias razonables adonde puedan llegar los lodos por sistemas de tuberías. Este método se utiliza frecuentemente como sistema complementario cuando son inadecuados los lechos de secado. Las cenizas resultantes de la incineración de lodos también se utilizan como relleno, al igual que los lodos provenientes de los lechos secadores y de los filtros a vacío.



En caso de utilizar los lodos como mejorador de suelos, sea a través de su disposición en campos propios o a través de su venta, deben considerarse las normativas relativas al uso de lodos en suelos.

En general los lodos provenientes del tratamiento de residuos de acuerdo con su proveniencia se dividen en lodos **tipo A** y **tipo B**. Los lodos **Clase A** son aptos para cualquier uso agrícola (cultivos hortícolas, frutícolas, forraje, fibras, árboles frutales, praderas para pastoreo, jardines, parques, áreas verdes, cementerios, etc.), no así los lodos **tipo B** que dependiendo del cultivo podrán ser aplicados con restricciones.

**Lodos Clase A** deberán cumplir copulativamente los siguientes requisitos:

Tener una densidad de coliformes fecales menor a 1.000 Número Más Probable (NMP) por gramo de lodos, base seca
Tener una densidad de salmonella sp. menor a 3 NMP en 4 gramos de lodos, base seca
El contenido de huevos de helmintos debe ser menor a 1 en 4 gramos de lodos, base seca
Tener una densidad máxima de virus MS-2 menor a 1 Unidad de Formación de Placas (UFP) en 4 gramos de lodos, base seca

De acuerdo con la norma, queda prohibida la aplicación de lodos en suelos de uso agrícola, forestal o en jardines, cuando los análisis indiquen que los contenidos totales de metales pesados sobrepasan cualquiera de las concentraciones máximas señaladas en la **Tabla 5**.

METAL PESADO	CONCENTRACIÓN MÁXIMA EN MG/KG DE LODO (BASE SECA) <sup>3</sup>
ARSÉNICO	40
CADMIO	40
COBRE	1.500
MERCURIO	20
NÍQUEL	420
PLOMO	300
SELENIO	100
ZINC	2.800

**Tabla 5:** Concentraciones máximas de metales pesados en lodos de uso agrícola.

3. Concentraciones expresadas como contenidos totales.

Para la aplicación de lodos se considerarán los siguientes tipos de uso de suelo:

Suelos de uso agrícola y/o forestal, incluyendo suelos erosionados con potencial de uso agrícola inmediato.

---

Suelos dedicados a áreas verdes, recreacionales, parques, jardines, cementerios.

---

Suelos degradados sin potencial de uso agrícola inmediato.

En general, las normas **prohíben la aplicación** de lodos en:

Suelos de uso agrícola, forestal o jardines, cuyo pH sea inferior o igual a 5.

---

Suelos de textura arenosa, esto es, suelos cuyo porcentaje de partículas con diámetros entre 0,050 y 2 mm sea igual o superior a 30 y el porcentaje de arcilla o partículas menores a 0,002 mm de diámetro sea inferior a 10.

---

Suelos saturados con agua durante algún período del año, a manera de ejemplo: vegas, bofedales, ñadis.

---

Suelos cuyo nivel freático se encuentre a menos de 1 metro de profundidad y en aquellos suelos en los cuales se genere un efecto de napa colgante.

---

Zonas de protección de fuentes de captación de agua potable, esto es, 300 metros aguas arriba para el caso de aguas superficiales y en un radio de 300 metros tratándose de fuentes de aguas subterráneas.

---

Franjas de protección de ríos y lagos, esto es, a menos de 15 metros de sus riberas.

---

Suelos con riesgo de inundación.

---

Suelos con pendientes superiores a 15 %. Para pendientes mayores del 2%, se exigirá un acanalado paralelo al contorno de la pendiente para evitar la erosión.

Los **lodos clase B** se aplicarán según tipos de cultivo de acuerdo con lo siguiente:

En suelos destinados a cultivos hortícolas o frutícolas menores, que estén en contacto directo con el suelo y que se consuman normalmente sin proceso de cocción, los lodos deberán aplicarse con a lo menos 12 meses de antelación a la siembra

---

No se podrá aplicar lodos en cultivos hortícolas ni frutícolas menores durante el período de crecimiento

---

En praderas y cultivos forrajeros, podrá procederse al pastoreo o a la cosecha sólo transcurrido 30 días desde la última aplicación

---

En suelos de uso forestal, la aplicación de lodos podrá efectuarse solo si se cuenta con un control de acceso durante los 30 días posteriores de la aplicación

### VII-III.I SUELOS AGRÍCOLAS

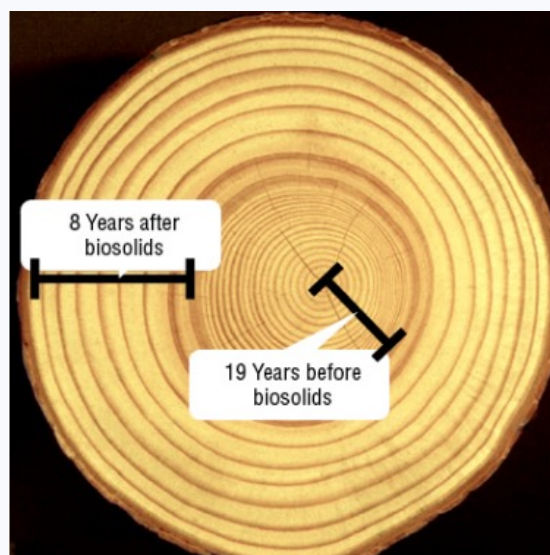
La aplicación de biosólidos al suelo de uso agrícola permite prevenir el empobrecimiento del suelo en cuanto a contenido de materia orgánica. Como fertilizante, el nitrógeno como sustrato orgánico es liberado de forma lenta, primero por hidrólisis generando amonio y luego bajo biocatálisis microbiana transformado a nitrato, forma preferida por las plantas.

En miras de prevenir cualquier lixiviación a la napa subterránea y contaminarla, es necesario determinar las cantidades de nutrientes que el abono orgánico posee, y calcular cual es la demanda de nutrientes por los vegetales plantados, de tal manera de que estos no se acumulen y puedan alterar el medio ambiente por su permanencia en el suelo. Misma precaución se debe tener con la presencia de metales pesados.

### VII-III.II PLANTACIONES FORESTALES

La disposición de biosólidos en plantaciones forestales es otra alternativa sostenible para su revalorización. A diferencia de los suelos agrícolas, las plantaciones forestales muchas veces no tienen como fin producir alimento por lo que se evitan aprensiones o desconfianzas respecto al uso del biosólido. Hay plantaciones forestales que expresamente se realizan para capturar carbono de la atmósfera y así reducir la huella de carbono de las empresas; a propósito de esto el uso de biosólidos puede contribuir a un mayor crecimiento forestal, incrementando la capacidad de estas plantaciones para secuestrar carbono. En la Figura 18 se presenta una imagen que ilustra el efecto de la adición de biosólidos en plantaciones forestales.

Un ejemplo famoso de un proyecto de reforestación que utiliza biosólidos se encuentra en la región de Washington, Estados Unidos, conocido como el proyecto Mount Rainier Biosolids Forest Reclamation. El proyecto ha utilizado biosólidos provenientes de PTAR de la región de Seattle y alrededores para mejorar el crecimiento de árboles y acelerar la recuperación de áreas degradadas.



Fuente: [www.biocycle.net](http://www.biocycle.net)

o

Figura 18. Aumento diámetro del árbol antes y después de adición periódica de biosólidos



## Biogás

El biogás es el nombre con que se le conoce al conjunto de gases generados durante la digestión anaerobia de residuos orgánicos. Los principales componentes del biogás son el metano ( $\text{CH}_4$ ), el dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), el ácido sulfhídrico ( $\text{H}_2\text{S}$ ) y el hidrógeno molecular ( $\text{H}_2$ ), junto a otros gases como  $\text{N}_2$  y  $\text{NH}_3$  que se encuentran en cantidades inferiores. Dado que el biogás, previo tratamiento, puede ser utilizado como combustible, favoreciendo enormemente la independencia energética de la PTAR, se ha decidido desarrollar un capítulo entero a su caracterización y a la descripción de los procesos involucrados para su aprovechamiento.

## VIII-I CARACTERIZACIÓN

Tal y como se mencionó anteriormente, el biogás es una mezcla de gases, los que en su mayoría corresponden a productos finales del metabolismo microbiano de las bacterias presentes en los digestores anaerobios. Los componentes más mayoritarios son el metano (40-70%) y el dióxido de carbono, y cuya proporción en el gas varía dependiendo de la actividad de bacterias metanogénicas, así como también del grado de oxidación que tengan los sustratos alimentados al digestor. A propósito de esto último, por ejemplo, es esperable que un reactor alimentado con una proporción alta de lípidos tenga un mayor contenido de metano en la fase gas que uno alimentado fundamentalmente con carbohidratos. A mayor proporción de metano, mayor poder calorífico tendrá el biogás.

Además del metano y el dióxido de carbono, el biogás presenta ácido sulfhídrico el cual es un producto indeseado, pero prácticamente inevitable. La fuente del ácido sulfhídrico son las bacterias sulfato reductoras, las cuales utilizan como sustrato DQO soluble y como aceptor final de electrones sulfato. En el entendido de que las bacterias sulfato reductoras tienen una cinética de consumo de DQO soluble más rápida que las bacterias metanogénicas y que muchas veces el agua a tratar lleva consigo sulfatos, se cumplen las condiciones para que las bacterias sulfato reductoras sean competitivas y desvíen parte de la DQO que podría ser convertida a metano hacia la producción de  $H_2S$ , gas sumamente corrosivo. Como se verá más adelante, existen diversas técnicas para reducir el contenido de  $H_2S$  en el biogás y así proteger los equipos de la línea de biogás.

Otros gases pueden encontrarse en menor proporción en el biogás como es el caso del amoníaco, el cual proviene fundamentalmente del amonio liberado producto de la hidrólisis de proteínas y que por medio de equilibrio químico al pH de operación, parte se convierte a amoníaco, escapando de la fase líquida y sumándose al contenido del biogás.

Respecto al almacenamiento del biogás, este se realiza típicamente en estructuras llamadas gasómetros (Ver **Figura 19**), los cuales se pueden localizar en la parte superior del digestor o como estructuras independientes.

En los siguientes ítems se abordarán los diferentes procesos para el tratamiento del biogás, lo que posibilita su aprovechamiento energético.



Figura 19. Gasómetros

## VIII-II ELIMINACIÓN DE HUMEDAD

El biogás presente en el digester anaerobio se encuentra con una humedad relativa del 100% (completamente saturado), ya que al tratarse de un espacio hermético, el equilibrio líquido-vapor del agua se alcanza sin mayores perturbaciones. Este contenido de humedad puede resultar perjudicial para el manejo del biogás una vez que es conducido por la línea de tratamiento, ya que la humedad puede condensarse obstruyendo tuberías y válvulas, aumentando el riesgo de fallos del sistema. Por otro lado, algunos equipos utilizados para procesar o usar biogás, como generadores eléctricos, tienen especificaciones estrictas en cuanto a la humedad permitida. El exceso de humedad puede causar daños o interferir con el funcionamiento adecuado de estos equipos. Algunos métodos para reducir el contenido de biogás se presentan en la **Tabla 6**.

MÉTODO	DESCRIPCIÓN
<b>ENFRIAMIENTO Y CONDENSACIÓN</b>	Al enfriar el biogás, se permite que el agua se condense, facilitando su eliminación mediante separadores de humedad o trampas de condensado.
<b>ABSORCIÓN</b>	Se trata de un proceso físico donde el biogás fluye en una torre absorbente a contracorriente de una solución de glicol. El glicol seco se puede regenerar calentando el glicol húmedo a 200 °C.
<b>ADSORCIÓN</b>	Se utilizan adsorbentes dispuestos en equipos de lecho fijo, los que son capaces de alcanzar una alta eficiencia de secado. Los materiales de adsorción pueden ser regenerados. El más conocido es el gel de sílice.

Tabla 6: Breve descripción de métodos de reducción de humedad del biogás.

## VIII-III REMOCIÓN DE ÁCIDO SULFHÍDRICO

La remoción de sulfuro de hidrógeno del biogás es una necesidad toda vez que se desea su aprovechamiento energético, dado que presenta concentraciones que son perjudiciales para la salud, el ambiente y los equipos. En general, los métodos utilizados para reducir la cantidad de H<sub>2</sub>S en el biogás se pueden clasificar en aquellos que se aplican al interior del mismo digester y aquellos que tratan por separado el biogás. En la **Tabla 7** se presentan algunos de los métodos utilizados.

MÉTODO	DESCRIPCIÓN
<b>MICROAIREACIÓN</b>	La microaireación es un método de aplicación directa en el digester y que consiste en la dosificación controlada de aire para promover la actividad de bacterias sulfuro oxidantes, las que transforman el H <sub>2</sub> S a sulfato, retirando así el azufre de la fase gas.
<b>DESULFURACIÓN POR DOSIFICACIÓN DE HIERRO</b>	El ácido sulfhídrico tiene comportamiento ácido-base y en las condiciones de pH del digester anaerobio una fracción relevante se encontrará en forma de HS <sup>-</sup> , el cual puede reaccionar con el hierro para formar compuestos que precipitan. Al bajar la concentración de las especies de sulfuro en la fase líquida se producirá un desplazamiento del equilibrio químico disminuyendo el H <sub>2</sub> S en la fase gas.
<b>DESULFURACIÓN POR ADSORCIÓN CON CARBÓN ACTIVADO</b>	Se hace pasar la corriente de biogás por un filtro de carbón activo en donde el H <sub>2</sub> S queda adsorbido. Este tipo de método solo debe utilizarse como pulimento luego de un tratamiento precedente pues es comercialmente factible hasta una concentración de 500 ppmv de H <sub>2</sub> S

Tabla 7: Breve descripción de algunos métodos disponibles en el mercado para reducir el contenido de H<sub>2</sub>S en el biogás.

## VIII-IV REMOCIÓN DE CO<sub>2</sub>

La remoción de CO<sub>2</sub> del biogás solo es necesaria si se desea refinar este para ser usado como biometano, el cual puede ser sustituto del gas natural o inyectado a la red. En el caso de plantas donde se quiera utilizar el biogás como combustible para equipos de cogeneración o calderas, basta con la eliminación de la humedad y la reducción del contenido de H<sub>2</sub>S.

Los principales métodos para la remoción de CO<sub>2</sub> son la adsorción, la absorción, las separaciones por membrana y separaciones por criogenia.

## VIII-V UTILIZACIÓN DEL BIOGÁS

La utilización energética del biogás producido ha sido el factor más importante en el desarrollo de esta tecnología en Europa. A través de la combustión de la fracción de metano contenida en el biogás se puede tanto generar energía térmica, como energía eléctrica, utilizando equipos de generación termoeléctricos.

La alternativa más simple es la generación de calor a través de la combustión directa del biogás. En este caso, el calor generado puede utilizarse para fines productivos o para calefacción. El contenido energético del biogás varía de acuerdo con la fracción de metano contenida en él. A modo de comparación, en la **Tabla 8** se incluyen los valores del poder calorífico de distintos combustibles, incluyendo el biogás.

COMBUSTIBLE	MJ/M <sup>3</sup>	MJ/KG
<b>BIOGÁS<sup>4</sup></b>	16,4 – 24,5	
<b>GAS NATURAL</b>	32 – 42	
<b>METANO</b>	32,7	
<b>PROPANO</b>	83,2	
<b>CARBÓN</b>		27,0 – 32,7
<b>MADERA (SECA)</b>		14,4 – 15,8
<b>PETRÓLEO DIESEL</b>		35,6

Tabla 8: Poder calorífico de diversos combustibles.

4. Para el biogás se supone una fracción de Metano entre un 50% y un 75%

En general, los equipos de co-generación más utilizados corresponden a los motores de combustión con grupo electrógeno y calderas de recuperación de calor incorporados. En la actualidad, estos equipos se venden en forma modular en distintos tamaños y capacidades, como containers integrados instalables en cualquier planta de biogás y son fabricados por proveedores europeos y norteamericanos. En dichos módulos se encuentran tanto el motor de combustión interna como el generador eléctrico y todos los demás equipos periféricos, como compresor de gas, calderas de recuperación de calor, distribuidores de calor para calefacción y un tercer usuario, mueble de control, protecciones, etc.

Existen otras alternativas para la generación eléctrica a partir del biogás, como la utilización de microturbinas de gas o celdas de combustible, que hasta ahora no han tenido un desarrollo comercial mayor, principalmente debido a altos costos de inversión, menores eficiencias eléctricas y falta de madurez de las tecnologías. Por esta razón, se entrega en esta guía información relevante sólo respecto a grupos electrógenos operados con motores de combustión.

Fundamentalmente son dos las variantes más utilizadas para la generación de energía termoeléctrica, las cuales se diferencian sólo en el tipo de motor empleado: motores a gas de combustión en ciclo Otto y motores con encendido diésel. En el caso de los motores a gas, la combustión se origina en la chispa producida por bujías eléctricas. En el caso de los motores con encendido diésel, se agrega en la cámara de combustión una pequeña parte de diésel (generalmente un 10%), que es el que, al comprimirse, origina la combustión de la mezcla.

En ambos casos, el motor acciona un generador eléctrico y entrega energía térmica a través de intercambiadores de calor en los circuitos de refrigeración del motor y de emisión de gases.

Las características de ambos tipos de motores pueden observarse en la **Tabla 9** y **Tabla 10**.

<b>CARACTERÍSTICAS</b>	Encendido mediante la adición de Diesel en la mezcla (hasta 10%).
	Sistemas con potencias eléctricas de hasta 250 kW.
	Vida útil de alrededor de 35.000 horas de operación.
	Eficiencias eléctricas desde 35 a 3% (para potencias pequeñas cercanas a 30%).
	Eficiencia térmica de 40 a 45%.
<b>ÁREAS DE APLICACIÓN</b>	Todo tipo de biogás, especialmente rentables en plantas pequeñas
<b>VENTAJAS</b>	Uso con bajos costos de inversión de motores standard (diésel).
	Alta eficiencia eléctrica en bajas escalas de potencia (75-150 kW).
<b>CARACTERÍSTICAS</b>	Eficiencia global menor que en motores de Gas en ciclo Otto.
	Uso de combustible fósil (diésel) reduce grado de renovabilidad de la energía.
	Mayores emisiones asociadas (NOx, SOx y material particulado).
	Mayor necesidad de mantención por calcinamiento de inyectores.

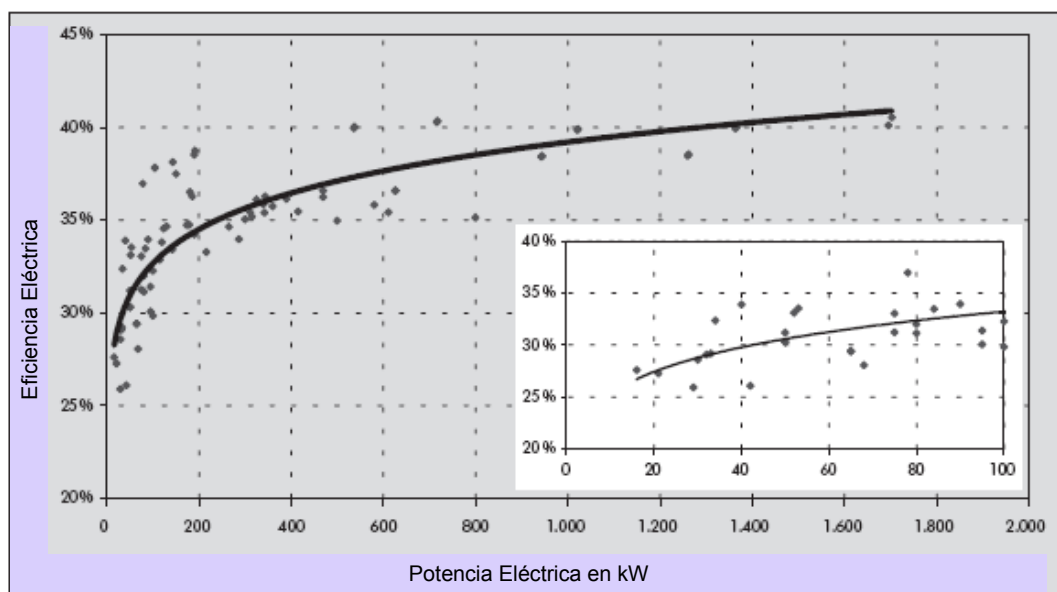
Tabla 9: Características de los motores para biogás con encendido diésel.



<b>CARACTERÍSTICAS</b>	Operación en cuatro tiempos con encendido mediante bujías.
	Sistemas con potencias eléctricas desde 200 kW hasta varios MW.
	Vida útil de alrededor de 60.000 horas de operación.
	Eficiencias eléctricas desde 30 a más de 42% (para potencias pequeñas cercanas a 30%).
	Eficiencia térmica de 40 a 45%.
<b>ÁREAS DE APLICACIÓN</b>	Todo tipo de biogás, especialmente rentables en plantas de mayor escala.
<b>VENTAJAS</b>	Diseño especial para combustión de gases.
	Menores emisiones que los motores con encendido diésel.
	Menor necesidad de mantención y mayor vida útil.
	Eficiencia global mayor que lo motores con encendido diésel.
<b>CARACTERÍSTICAS</b>	Costos levemente mayores que los motores con encendido diésel.
	En rangos bajos de potencia presentan eficiencias menores que los motores de encendido diésel.

Tabla 10: características de los motores para biogás en Ciclo Otto.

Tal y como puede observarse en la **Figura 20**, las eficiencias eléctricas, en general, van desde 35% para potencias eléctricas bajas (entre 75 y 100 kW), hasta 42% para potencias eléctricas desde los 500 kW. Las eficiencias térmicas de este tipo de sistemas varían también en rangos similares, siendo las eficiencias globales de alrededor de 75% a 85%. En la **Figura 21** se pueden ver algunos ejemplos de generadores.



○  
Figura 20: Eficiencia eléctrica de Grupos Generadores en base a Biogás

Para aquellas ocasiones en que los equipos de generación estén fuera de funcionamiento, se dispone de una antorcha de seguridad para la quema controlada del biogás. El arranque de la línea de gas alternativa hacia la antorcha debe localizarse entre el compresor y el motor, a fin de asegurar el flujo del biogás hasta la antorcha. En general, es conveniente diseñar tanto la antorcha como el compresor de biogás de manera que ambos puedan funcionar simultáneamente. Esto debido a que, en determinadas ocasiones, puede darse el caso de que, aun operando el motor a plena carga, se obtenga un aumento del biogás almacenado, producto de un alza en la producción de biogás (debido a, por ejemplo, un aumento inesperado de la calidad de la biomasa alimentado, o una mejora del proceso biológico no esperada). En tales casos es ineficiente desactivar el motor para quemar el excedente en la antorcha, sumado a que cada detención y puesta en marcha del motor conlleva deterioros progresivos, por lo que debiera asegurarse el funcionamiento simultáneo de ambos componentes para casos eventuales.



Figura 21: Ejemplos de Grupos Generadores

**GRUPO MODULAR EN CONTAINER**

**GRUPO ELECTRÓGENO EN CASA DE MÁQUINAS**



## OTRAS

# ALTERNATIVAS DE VALORIZACIÓN

En los capítulos precedentes de este manual se han abordado las oportunidades de economía circular en lo referido a línea de agua y el reúso del agua tratada; la eficiencia energética y gestión de biosólidos, sin embargo, hay un conjunto de potenciales alternativas que no caen en ninguna de estas categorías, pero merecen ser incluidas en esta guía dado su potencial y el creciente interés que despiertan en parte de la comunidad académica y empresarial. Las alternativas de valorización que aquí se expondrán son las que en gran medida respaldan la idea de transformar las PTAR en Biofactorías, en otras palabras, pasar de ofrecer un servicio de tratamiento de agua a ofertar productos demandados por el mercado utilizando como materia prima y fuente de energía el agua residual.

En este capítulo se abordará brevemente alternativas como la fabricación de ecoladrillos en base a biosólidos y la extracción de ácidos húmicos en PTAR. Posteriormente, se expondrá sobre las posibilidades de producción de estruvita, un fertilizante rico en N, P y Mg, a partir de flujos críticos en las PTAR; para luego hablar de la factibilidad de producción de biodiesel utilizando los aceites y grasas separados en las fases iniciales del tratamiento del agua residual.

## IX-I ECOLADRILLOS

Los ecoladrillos (Ver **Figura 22**) son unidades de construcción fabricadas utilizando lodos residuales provenientes de la digestión anaerobia. La fabricación de ecoladrillos implica mezclar los lodos residuales con otros materiales tales como el cemento, arena y posibles aditivos. Esta mezcla se compacta en moldes para formar los ladrillos, que luego se secan y curan para obtener un material de construcción resistente y duradero.

La inclusión de los ecoladrillos en la industria de la construcción es una idea atractiva, ya que la producción de ladrillos tradicionales conlleva emisiones significativas de carbono y contaminación tóxica del aire.

Si bien esta es una idea incipiente, hay estudios que avalan que los ladrillos fabricados incluyendo biosólidos requieren de aproximadamente la mitad de la energía necesaria para producir ladrillos convencionales, generando reducciones significativas en las emisiones de carbono. Además, estos ladrillos, tienen propiedades físicas deseables como resistencia a la compresión y capacidad aislante, lo que los hace competitivos en términos de calidad y funcionalidad.

Según investigaciones, la producción a gran escala de ladrillos fabricados con lodos provenientes de aguas residuales requiere de una validación adicional debido a las posibles variaciones en la composición y características químicas de los residuos en distintas regiones geográficas.



○

Figura 22. Ecoladrillo a base de biosólidos estabilizados de PTAR

## IX-II EXTRACCIÓN DE ÁCIDOS HÚMICOS

Como se ha descrito en el capítulo 6 de este manual, los biosólidos generados en las PTAR pueden ser revalorizados como fertilizante para agricultura y plantaciones forestales, no obstante, dependiendo de la variedad de aguas residuales que en suma constituyen el afluente de la PTAR es posible que los biosólidos presenten concentraciones indeseadas de metales pesados y otros contaminantes. Por lo anterior, la aplicación directa de biosólidos a la tierra puede generar en algunos casos acumulación en el suelo e incluso en las plantas.

En casos como el descrito en el párrafo anterior, una posibilidad es la extracción de ácidos húmicos presentes en los lodos estabilizados, los cuales pueden ser aplicados a los cultivos generando múltiples beneficios sin el peligro de la acumulación de metales pesados. De manera simplificada, los ácidos húmicos corresponden a materia orgánica recalcitrante formada a partir de la descomposición de materia orgánica lábil, la cual reacciona para dar cadenas largas y estructuras anilladas. Los ácidos húmicos pueden integrarse en el suelo y formar complejos con minerales y otras partículas del suelo. Esto les permite estabilizarse y contribuir a la estructura y fertilidad del suelo a largo plazo.

Los ácidos húmicos son solubles en medios alcalinos; esta propiedad se puede explotar para su extracción desde biosólidos anaerobios estabilizados, tal y como se presenta en la **Figura 23**.

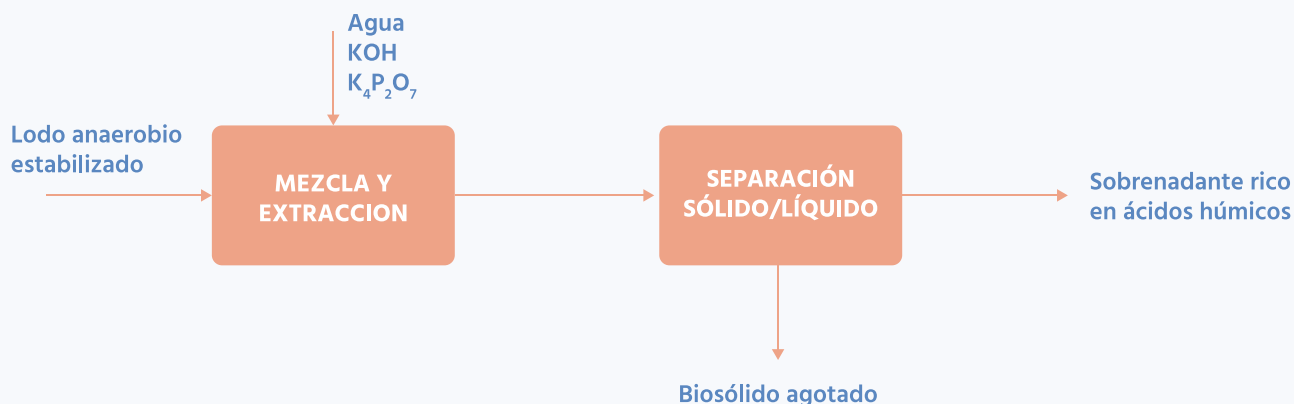


Figura 23. Proceso para extracción de ácidos húmicos

## IX-III ESTRUVITA

A diferencia del nitrógeno, el fósforo contenido en las aguas residuales debe ser transformado en un sólido para ser removido. Tradicionalmente, la remoción de fósforo trabaja fijando el fósforo en el lodo de dos maneras: química y biológicamente.

La eliminación química consiste en la adición de sales que reaccionan con el fosfato presente en el agua residual, formando compuestos que precipitan. Los más típicos son el sulfato de hierro y el sulfato de aluminio. Este método encarece el tratamiento al tener que desembolsar recursos en la compra de los agentes precipitantes. Es más, las sales de aluminio y hierro con fosfato no pueden ser reusadas para agricultura dado que el fósforo no está disponible bajo las condiciones normales de pH. Por su parte, la eliminación biológica consiste a grandes rasgos en un reactor anaeróbico y otro aerobio/anóxico, donde microorganismos especializados liberan fosfatos durante la etapa anaeróbica y acumulan polifosfatos en su interior durante la etapa aerobia/anóxica. La acumulación es mayor a la liberación, de manera que al retirar biomasa en la etapa aerobia/anóxica, se consigue extraer el fósforo del sistema.

Los métodos planteados presentan un buen rendimiento en el sentido de eliminar el fósforo desde la fase líquida, pero adolecen de generar un problema nuevo: un aumento significativo en la cantidad de lodo, con bajo valor agregado y reducida biodisponibilidad del fósforo. Desde una óptica de economía circular, la recuperación del fósforo que ingresa a una PTAR es atractiva, toda vez que la fuente principal de este elemento es la roca fosfórica, recurso que en la práctica no es renovable dado que el ciclo del fósforo obedece a escalas de tiempo geológicas (millones de años). En este sentido, la producción de estruvita a partir de flujos críticos de las PTAR aparece como una alternativa para recuperar el fósforo e incrementar su permanencia en el flujo de materiales propios de las actividades humanas.

La estruvita es un mineral de fórmula química  $MgNH_4PO_4 \cdot 6H_2O$  que se forma cuando hay presente en solución ion amonio ( $NH_4^+$ ), magnesio ( $Mg^{+2}$ ) y fosfato ( $PO_4^{-3}$ ) bajo condiciones de sobresaturación. Dada su composición, es un compuesto rico en nutrientes (Mg, N y P), lo que lo convierte en un excelente fertilizante.

La estruvita puede ser utilizada en agricultura para mejorar la calidad del suelo y aumentar la productividad de los cultivos. Dado que la estruvita presenta una reducida solubilidad en agua, se constituye como un fertilizante de liberación lenta, por lo que es una fuente sostenible y estable de nutrientes para las plantas a lo largo del tiempo. Es recurrente que en las PTAR ocurra precipitación no controlada de estruvita en tuberías, fittings y bombas por donde circulan flujos ricos en fosfato y amonio. En la **Figura 24** se pueden ver fotografías de cañerías obstruidas por precipitación indeseada de estruvita en la línea de lodos digeridos.



Figura 24: Precipitación de estruvita en sistemas de cañería

Dado el potencial de la producción de estruvita en PTAR, se han desarrollado diferentes tecnologías que persiguen domesticar la reacción de generación de estruvita, dentro de las cuales la más extendida corresponde a la producción en reactores de lecho fluidizado. En la **Figura 25** se presenta un esquema general de la infraestructura implicada en el proceso basado en lecho fluidizado.

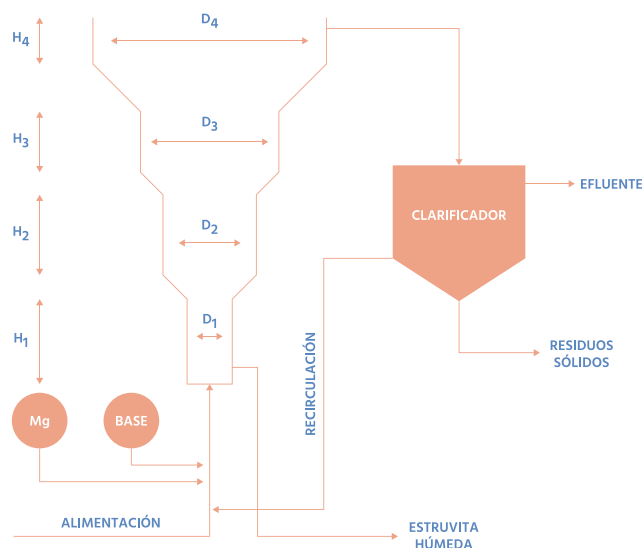


Figura 25: Reactor de lecho fluidizado y equipos accesorios

A grandes rasgos, el sistema se alimenta con una corriente de líquido rica en amonio y fosfato y reducida en sólidos suspendidos totales. En una PTAR convencional la línea que satisface estos requerimientos es el retorno de líquido proveniente de la centrífuga posterior a la digestión de lodos, con concentraciones de  $\text{NH}_4^+$  sobre 1000 mg/L y  $\text{PO}_4^{-3}$  sobre 150 mg/L. Dado que el contenido de magnesio en la corriente de alimentación principal no es suficiente para reaccionar estequiométricamente con el fosfato y amonio, se debe suplementar la alimentación con una fuente de magnesio externa como  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  o  $\text{MgCl}_2$ . Por otro lado, la reacción de producción de estruvita consume alcalinidad del medio por lo que en algunos casos se debe suministrar una base (típicamente NaOH) para mantener el pH dentro del reactor entre 8-9, ya que a valores inferiores la solubilidad de la estruvita aumenta dificultando su recuperación.

Más en detalle, el reactor cuenta con diferentes compartimentos (4 en el caso particular de la **Figura 24**) en donde se desarrolla la producción de estruvita. Progresivamente, conforme aumenta la altura, el área transversal del reactor aumenta, lo que se traduce en un decremento de la velocidad superficial del líquido y por tanto, de su capacidad para arrastrar los sólidos suspendidos, dentro de los cuales se encuentran los cristales de estruvita en formación. Esto trae como consecuencia que a lo alto se genere una distribución de partículas de estruvita según su tamaño, localizándose las de mayor peso (y diámetro) en la zona inferior del reactor y las de menor peso en la parte superior. Cuando la cantidad de estruvita sólida acumulada en el compartimento inferior del reactor supera un cierto valor definido, esta se extrae. Idealmente, el reactor debiera funcionar como un sistema continuo para el líquido y como un lote para la estruvita, no obstante, existen cristales de estruvita de muy pequeño tamaño que no son posibles retener en el reactor. Para solventar parcialmente este problema, se suele incluir un estanque de decantación en donde los cristales de estruvita son, en su mayoría, recuperados y recirculados al reactor para servir como soportes de crecimiento del cristal, lo que favorece el proceso.

Como se mencionó anteriormente, existen diferentes tecnologías desarrolladas en el marco de la producción de estruvita desde PTAR. En la **Tabla 11** se presenta información disponible sobre algunas de ellas y en las **Figuras 26 y 27** se pueden observar instalaciones reales productoras de estruvita.

PROCESO ESCALA INDUSTRIAL	MODALIDAD OPERACIÓN	CONCENTRACIÓN DE P AFLUENTE [MG/L]	PRODUCCIÓN [TON ESTRUVITA/ DÍA]	EFICIENCIA REMOCIÓN P [%]	PAÍS DE APLICACIÓN
PHOSNIX	LECHO FLUIDIZADO	100-110	0,5-0,55	90	JAPÓN (2)
OSTARA PEARL	LECHO FLUIDIZADO	100-900	0,5-4	85	ESTADOS UNIDOS (4)
ANPHOS	MEZCLA COMPLETA (LOTE)	NO DISPONIBLE	0,45-2	80-90	HOLANDA (4)

**Tabla 11:** Descripción general de diferentes tecnologías para producción de estruvita a partir de agua residual (Adaptado de Desmidt et al.,2015). Combustibles.

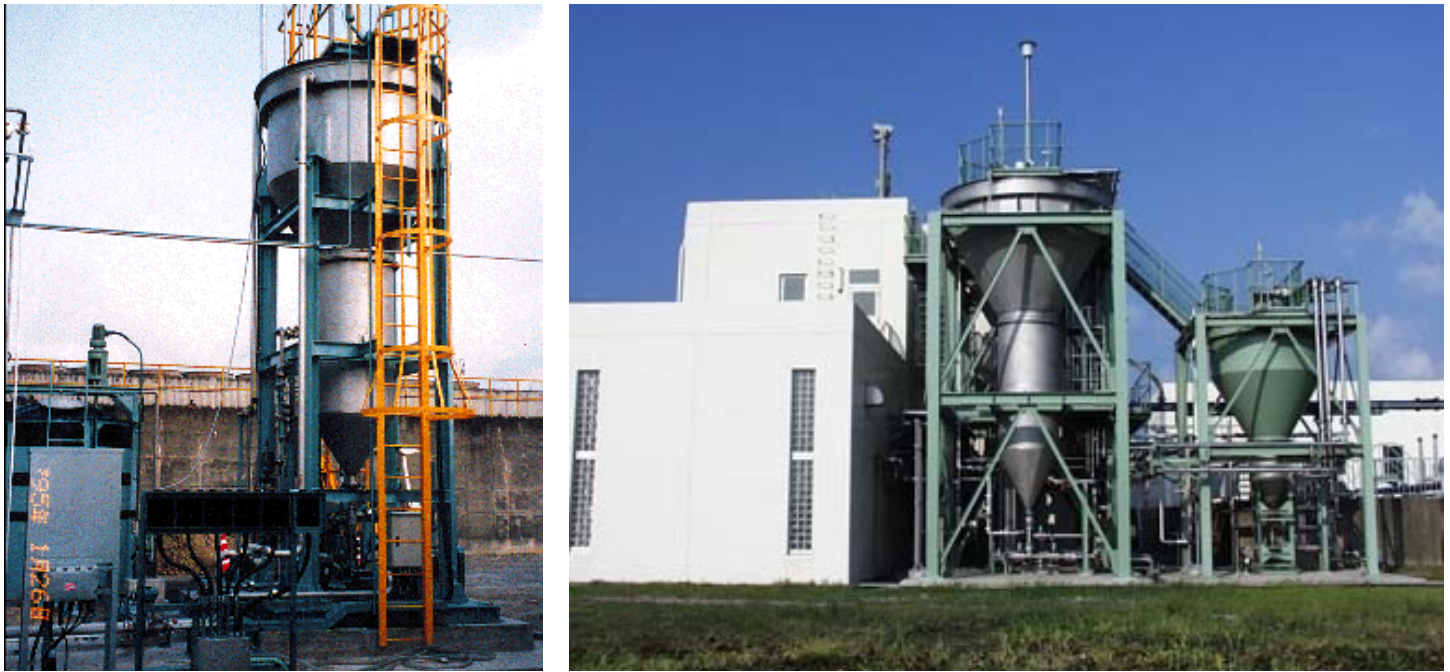


Figura 26: Instalaciones producción de estruvita. A la izquierda Ube Industries de la Planta Sakai de Japón. A la derecha Planta del Centro de Clarificación Shimane, Japón



Figura 27: Producción de estruvita incorporando unidad de stripping de CO2

La producción de estruvita por los procesos expuestos presenta las características necesarias para ser comercializada como un fertilizante de liberación lenta de fósforo y nitrógeno. Para la mayoría de los casos, el producto se vende como un suplemento de los fertilizantes tradicionales. Los cristales de estruvita ofertados presentan un diámetro que varía entre <0,2 hasta >4,5 mm y un alto grado de pureza, lo que se consigue reduciendo la ocurrencia de reacciones paralelas en el reactor (por ejemplo, formación de hidroxapatita).



## IX-IV BIODIÉSEL

El biodiesel es todo combustible líquido compuesto por una mezcla de ésteres alquílicos obtenidos a partir de aceites vegetales, grasa animal o aceite comestible usado. La producción de biodiesel se realiza por medio de una transesterificación de triglicéridos (ver **Figura 28**), donde estos reaccionan con un alcohol para formar ésteres y glicerol en presencia de un catalizador.

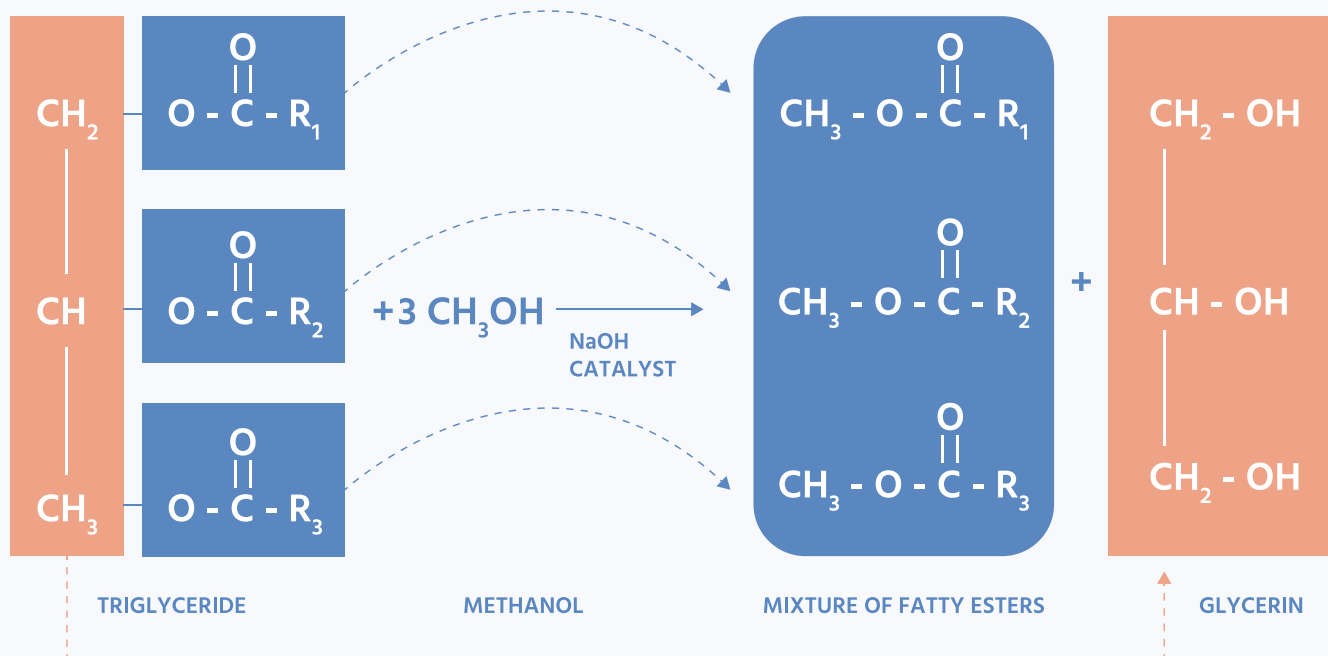


Figura 28: Proceso de transesterificación para producción de biodiesel

La producción de biodiésel de primera generación (aquella que utiliza como materia prima alimentos) es cuestionable dada la escasez de alimentos para consumo humano. Es por esto por lo que la producción de biodiésel de segunda generación, es decir, a partir de residuos de procesos vigentes en la actividad económica humana, es una alternativa que ha tomado fuerza.

En una planta de tratamiento de aguas servidas convencional, las etapas en donde se retiran aceites y grasas son el pretratamiento y la sedimentación primaria (ver **Figura 29**). La remoción se realiza por tope, separando material flotante inmiscible. Para una planta con un afluente de 5 m<sup>3</sup>/s, la generación de biosólidos ricos en lípidos (30% base húmeda) alcanza aproximadamente las 55 toneladas mensuales.

Considerando que los costos de transporte y disposición de biosólidos ricos en grasas son más onerosos que el de otros biosólidos, y que los lípidos presentes en estos pueden servir como materia prima para la producción de biodiésel, es atractivo la incorporación de un proceso productivo donde se recuperen triglicéridos a partir de los biosólidos espesados altos en grasas generados en PTAR.

Para el caso particular de La Farfana (Santiago de Chile), biofactoría que trata 8,8 m<sup>3</sup>/s de agua residual, se estima que se llega a gastar solamente por motivo de traslado y disposición de biosólidos altos en grasas un total de **\$US 100.000 al año**. Por otro lado, al utilizar las 27 toneladas de grasas disponibles en sus biosólidos, se podrían llegar a producir **20,5 toneladas de biodiésel por mes**.

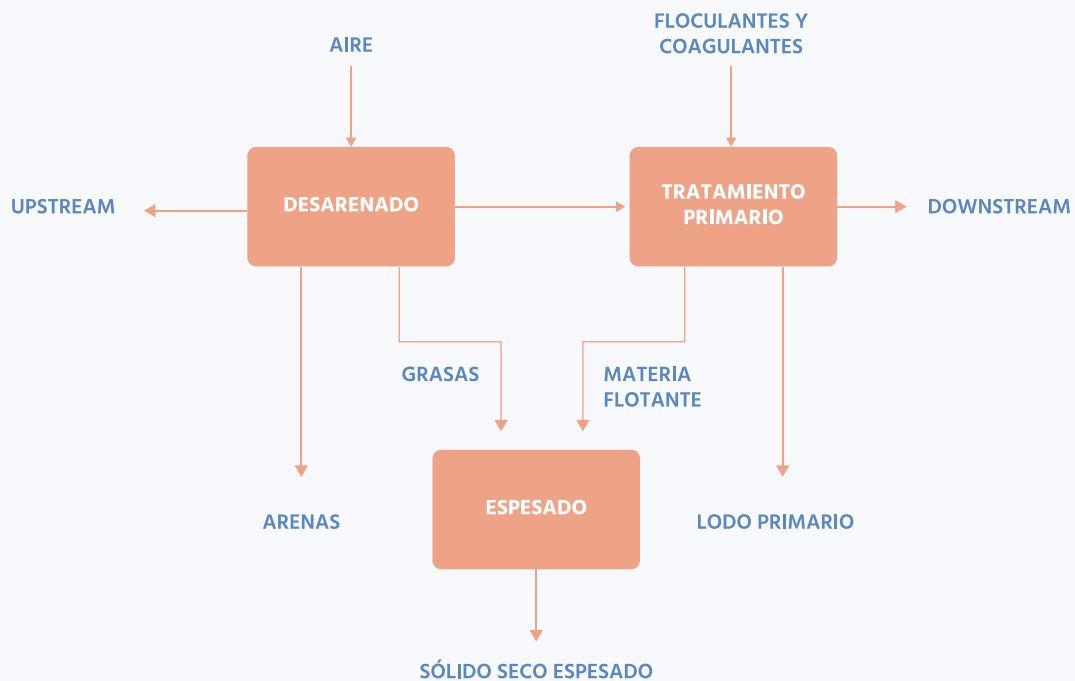


Figura 29: Operaciones de una PTAR convencional donde se eliminan grasas y materia flotante

Tomando como materia prima el sólido seco espesado alto en grasas, se puede desarrollar un proceso en el cual se extraen los triglicéridos presentes y se añaden reactivos específicos que permiten producir biodiésel de segunda generación. Un esquema simplificado se presenta en la **Figura 30**.



Figura 30: Biodiésel impuro obtenido tras el proceso de extracción-reacción.

A la fecha se han propuesto dos alternativas para la producción de biodiésel a partir de las grasas retiradas en PTAR, las que fueron gestadas a escala de laboratorio y posteriormente escaladas y validadas a nivel piloto. Ambas alternativas contemplan la **extracción** de grasas, **producción** de biodiésel y **purificación**.

La primera alternativa (ver **Figura 31**), consiste en un único proceso donde se extraen y reaccionan los lípidos disponibles en el residuo previamente secado. Para la extracción se utiliza hexano ( $C_6H_{14}$ ), y para llevar a cabo la reacción se utiliza como alcohol metanol ( $CH_3OH$ ) y como catalizador ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ). Finalmente, se obtiene biodiésel y como subproducto glicerina ( $C_3H_8O_3$ ); la reacción tiene un rendimiento de 0,75 g biodiésel/g lípido.

La segunda alternativa (ver **Figura 32**), consta de una etapa de extracción donde también se utiliza hexano para extraer las grasas en la materia prima. Luego, se retira el hexano con las grasas disueltas y se ingresan a un reactor donde se añade metanol y ácido sulfúrico, obteniéndose como producto biodiésel y glicerina. El rendimiento de la reacción es de 0,78 g biodiésel/g lípido. A diferencia de la alternativa anterior, se puede recuperar el hexano utilizado, recirculándolo.

A continuación, en la **Tabla 12** y la **Tabla 13**. Las cuales presentan las condiciones de operación para cada alternativa, respectivamente.

PARÁMETROS DEL PROCESO DE EXTRACCIÓN/REACCIÓN	
TEMPERATURA DE REACCIÓN [°C]	60
VELOCIDAD DE AGITACIÓN [RPM]	300
TIEMPO DE REACCIÓN [H]	6

Tabla 12: Parámetros de producción de biodiesel para la primera alternativa.

PARÁMETROS DEL PROCESO DE EXTRACCIÓN	
TEMPERATURA DE EXTRACCIÓN [°C]	60
VELOCIDAD DE AGITACIÓN [RPM]	300
TIEMPO DE REACCIÓN [H]	4
PARÁMETROS DEL PROCESO DE REACCIÓN	
TEMPERATURA DE REACCIÓN [°C]	60
VELOCIDAD DE AGITACIÓN [RPM]	300
TIEMPO DE REACCIÓN [H]	6

Tabla 13: Parámetros de producción de biodiesel para la segunda alternativa.

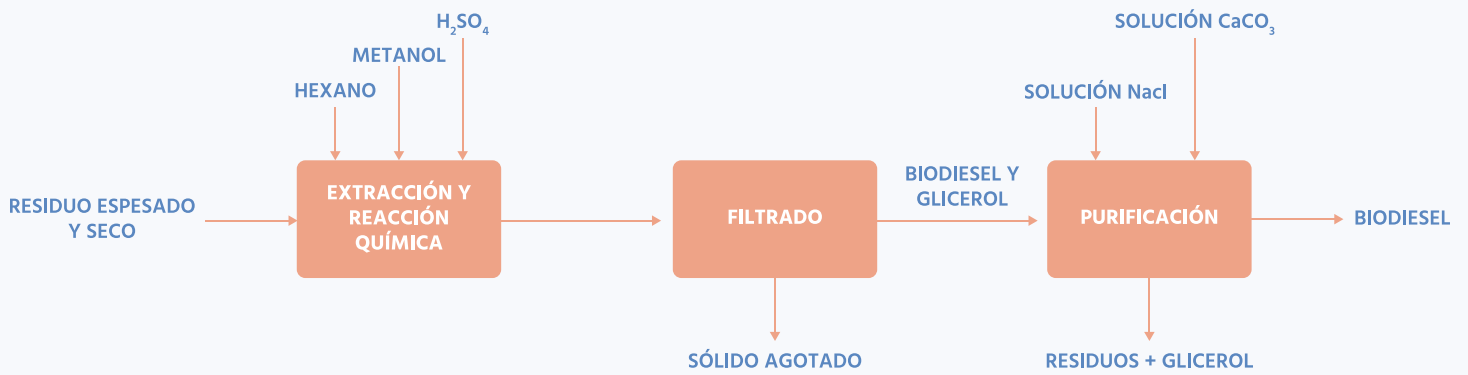


Figura 31: Primera alternativa de producción de biodiesel a partir de residuos de PTAR.

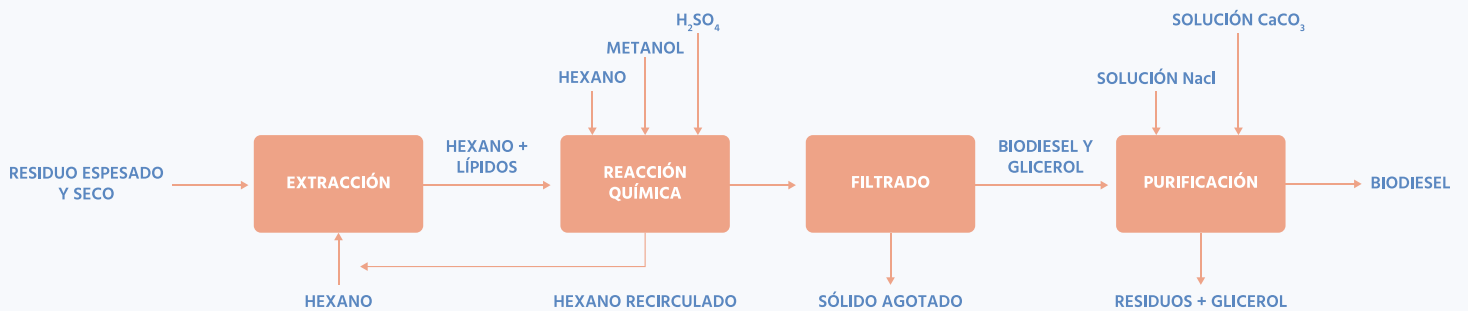


Figura 32: Segunda alternativa de producción de biodiesel a partir de residuos de PTAR.

En conclusión, la implementación de procesos de producción de biodiésel a partir de biosólidos ricos en grasas provenientes de plantas de tratamiento de aguas residuales convencionales presenta una oportunidad económicamente atractiva. Los altos costos asociados con el transporte y la disposición de estos biosólidos contrastan con la posibilidad de obtener beneficios significativos mediante la producción de biodiésel a partir de los lípidos presentes en ellos. Se han propuesto dos alternativas viables a nivel técnico, ambas escalables desde pruebas de laboratorio hasta niveles piloto. La recuperación del hexano utilizado en uno de los métodos agrega un componente de sostenibilidad. Además, estos procesos no se limitan solo a plantas de tratamiento de aguas residuales, sino que pueden extenderse a plantas industriales con efluentes ricos en lípidos. El glicerol generado como subproducto se puede aprovechar en procesos de co-digestión, permitiendo recuperar su contenido energético. Así las cosas, la implementación de estos procesos no solo implica beneficios económicos directos, sino también la posibilidad de integrar prácticas sostenibles y aprovechar subproductos para aplicaciones adicionales.



## REDUCCIÓN DE **EMISIONES DE CO<sub>2</sub>**

Las PTAR requieren, para su funcionamiento, de inputs de energía para diferentes funciones. Un ejemplo clásico es la aireación de los sistemas aerobios por medio de sopladores (los que consumen energía eléctrica). Otro ejemplo es el traslado de biosólidos a sitios de disposición por medio de camiones (los que consumen combustible), entre muchos otros. Si la fuente de energía utilizada proviene de combustibles fósiles o fuentes no renovables emisoras de CO<sub>2</sub> (como las centrales termoeléctricas), el uso de esta energía contribuye a la emisión neta de CO<sub>2</sub> que va asociado a la actividad de la PTAR. Por otro lado, si la PTAR se autoabastece con fuentes de energía eléctrica renovable, tales como la energía eólica o solar, no emitirá CO<sub>2</sub> por consumo eléctrico.

Además de las emisiones directas de CO<sub>2</sub>, las PTAR pueden emitir cantidades importantes de CO<sub>2</sub> equivalentes (CO<sub>2</sub> eq) dependiendo de la calidad del tratamiento que realicen sobre el afluente, así como también de la correcta gestión de los biosólidos generados durante el proceso. Por ejemplo, para casos donde la naturaleza del agua a tratar requiere de un tratamiento de nitrificación-desnitrificación, es necesario agregar una fuente de alcalinidad al reactor donde se lleva a cabo la remoción biológica de nitrógeno pues la actividad de los microorganismos involucrados puede llegar a bajar el pH hasta generar inhibición. La fuente de alcalinidad en este caso podría ser hidróxido de sodio (NaOH), el que tiene asociado una emisión de CO<sub>2</sub> por el transporte del insumo desde el lugar donde se produce hasta las dependencias de la PTAR, así como también por la energía y materia prima utilizada para su elaboración.

Un tipo de emisión de CO<sub>2</sub> eq involuntario por parte de las PTAR guarda relación con el correcto funcionamiento de los sistemas de lodos activos. El proceso de oxidación de la materia orgánica mediado por lodos activos está diseñado para oxidar con bacterias heterótrofas aerobias la carga de DQO presente en el agua residual, generando como productos del proceso nueva biomasa (consecuencia del crecimiento y división de las bacterias) y CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>O (consecuencia del uso de la materia orgánica para generar energía por parte de las bacterias). Si se toma en consideración que la materia orgánica que las bacterias utilizan como alimento proviene de una larga cadena trófica, en donde al inicio seres vivos autótrofos fijan CO<sub>2</sub> de la atmósfera para sintetizar nueva estructura celular, se puede concluir que el CO<sub>2</sub> liberado a la atmósfera por parte de las bacterias heterótrofas solamente viene a "cerrar" un ciclo en donde el CO<sub>2</sub> ingresó a la materia viva para luego volver a la materia inerte. En otras palabras, si la totalidad del carbono presente en la materia orgánica es procesado y llevado a CO<sub>2</sub> entonces la emisión neta de CO<sub>2</sub> es cero. Ahora bien, si el sistema de lodos activos (en verdad, cualquier proceso de depuración aerobio) presenta una aireación y/o mezcla deficiente, pueden aparecer zonas anaeróbicas en donde proliferen microorganismos que producen metano. De este modo, si parte de la materia orgánica es descompuesta anaeróbicamente, el balance de CO<sub>2</sub> deja de ser cero ya que se estaría liberando a la atmósfera metano en vez de CO<sub>2</sub>, el que en términos de CO<sub>2</sub> eq corresponde a 25 veces el efecto invernadero generado por el dióxido de carbono.

Otro punto interesante de análisis corresponde a la digestión anaerobia de lodos en las PTAR. En este proceso de apostas se transforma parte de la materia orgánica presente en los lodos a metano. Si este metano fuera liberado a la atmósfera, aportaría a las emisiones de CO<sub>2</sub> eq de la PTAR, sin embargo, esto no es lo que pasa, ya que tal como se ha comentado en capítulos anteriores el metano puede ser combustionado en equipos de cogeneración para producir energía eléctrica y energía térmica, así como también CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>O como productos de la combustión. La energía producida de esta manera puede ser aprovechada por la PTAR y así reducir su consumo de energía externa, la que sí se genera a partir de combustibles fósiles aumenta la huella de CO<sub>2</sub> de la planta. Lo que se quiere ilustrar con esto es que la generación de metano no es negativo per se, sino que depende de si el proceso está domesticado, es decir, en un ambiente cerrado y conducido de manera controlada.

Sin desmedro de lo anterior, es importante recordar que en la digestión anaerobia el metano se produce en la fase líquida (las bacterias metanogénicas se encuentran ahí) y aunque la mayoría del metano se transfiere a la fase gas dado su baja solubilidad en agua (22 mg/L), una fracción del metano abandona el digestor en el efluente líquido liberándose eventualmente a la atmósfera. Por otro lado, también es importante destacar que la combustión del metano en la antorcha, caldera o equipos de cogeneración no tiene una eficiencia perfecta, por lo que una fracción de metano no combustionado puede escapar a la atmósfera por esta vía. En la literatura normalmente se considera que un 95% del metano alimentado es efectivamente combustionado.

Según diferentes publicaciones, emisiones significativas de metano no conducido pueden generarse a partir de un mal manejo de la línea de lodos de la planta. Tiempos de acumulación prolongados en sedimentadores primarios y espesadores de lodos favorecen la liberación de metano al tratarse de lodos no estabilizados.

En conclusión, las PTAR tienen la posibilidad de reducir su impacto ambiental mediante la correcta gestión del metano y la eficiencia energética. El uso de metano como fuente de energía puede ser beneficioso, pero se deben tomar medidas para evitar la fuga de metano y minimizar la emisión de gases de efecto invernadero, asegurando la eficiencia en la combustión y la correcta gestión de los lodos.

Una PTAR que reduce GEI a través de prácticas de Economía Circular puede optar a créditos verdes, que corresponden a instrumentos financieros que apoyan la implementación de proyectos que representan la reducción, eliminación o captura de emisiones de gases de efecto invernadero. La reducción se verifica a través de las toneladas de CO<sub>2e</sub>. 1 tonelada de CH<sub>4</sub> reducida equivale a 28 toneladas de CO<sub>2e</sub>.

Los créditos verdes se originan a partir de proyectos que reducen o capturan emisiones de GEI. Estos proyectos pueden incluir una variedad de actividades, como la reforestación, la energía renovable, la captura de metano, la eficiencia energética, entre otras. El acceso a créditos verdes puede proporcionar un ingreso adicional a las PTAR, lo que puede ayudar a financiar proyectos de sostenibilidad y reducción de emisiones.

Las PTAR pueden generar créditos verdes a través de varias estrategias relacionadas con la reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> y otros GEI. Estas estrategias se presentan en la **Tabla 14**.

ESTRATEGIA	DESCRIPCIÓN
<p><b>CAPTURA Y USO DE BIOGÁS</b></p>	<p>Si una PTAR utiliza la digestión anaerobia para generar biogás y este biogás se captura y utiliza para producir energía, puede generar créditos de carbono. Este proceso reduce las emisiones de metano a la atmósfera y evita el uso de fuentes de energía basadas en combustibles fósiles.</p>
<p><b>USO DE ENERGÍAS RENOVABLES</b></p>	<p>Una PTAR que utiliza energía solar, eólica u otras fuentes renovables para reducir su dependencia de la energía convencional puede generar créditos verdes al reducir las emisiones asociadas con el uso de electricidad de fuentes fósiles.</p>
<p><b>REFORESTACIÓN Y SECUESTRO DE CARBONO</b></p>	<p>Si la PTAR participa en proyectos de reforestación o utiliza biosólidos para restaurar áreas degradadas, puede generar créditos verdes al secuestrar carbono y mejorar el entorno.</p>
<p><b>REDUCCIÓN DE EMISIONES A TRAVÉS DE EFICIENCIA ENERGÉTICA</b></p>	<p>Si una PTAR reduce su consumo de energía mediante tecnologías eficientes, también puede generar créditos de carbono al disminuir la huella de carbono asociada con la producción de energía.</p>

Tabla 14: Estrategias para generación de créditos verdes en una PTAR.

A continuación se indican algunos valores asociados a la reducción de gases de efecto invernadero por prácticas de economía circular en PTAR:

ACCIÓN	REDUCCIÓN ESTIMADA
<b>DIGESTIÓN ANAEROBIA DE LODOS</b>	647 kgCO <sub>2e</sub> / tonelada de lodo
<b>COMPOSTAJE DE LODOS</b>	550 kgCO <sub>2e</sub> / tonelada de lodo
<b>PTAR (REDUCCIÓN AL TRATAR AGUAS SERVIDAS)</b>	
• <b>LODO ACTIVO</b>	0,36 ton CO <sub>2e</sub> /m <sup>3</sup>
• <b>LAGUNA ANAEROBIA</b>	3 ,08 ton CO <sub>2e</sub> /m <sup>3</sup>
<b>PRÁCTICAS DE EFICIENCIA ENERGÉTICA</b>	242 kg CO <sub>2e</sub> /Mwh reducida (depende del FE)
<b>ERNC</b>	242 kg CO <sub>2e</sub> /Mwh (depende del FE)
<b>USO DE LODOS TRATADOS COMO FERTILIZANTES</b>	4.8 kg kgCO <sub>2e</sub> / kg nitrógeno reemplazado

A través de una acción gubernamental, los proyectos con potencial de generación de reducción de GEI pueden participar en las Acciones Nacionalmente Apropriadas de Mitigación (NAMAs por su sigla en inglés), las que fundamentalmente son políticas, regulaciones, programas u otro tipo de acciones que reducen las emisiones de gases efecto invernadero de sus niveles tendenciales, y que a su vez, contribuyen a alcanzar los objetivos de desarrollo sostenible de los países que las implementan, que son principalmente países en desarrollo. Una NAMA puede incluir proyectos que aborden la gestión sostenible del agua y las aguas residuales, como parte de una estrategia nacional de mitigación del cambio climático. En este contexto, las PTAR que adopten prácticas sostenibles y reduzcan sus emisiones de gases de efecto invernadero pueden ser parte de los proyectos incluidos en la NAMA.

La reducción de emisiones se certifican a través de los CERs que son Reducciones Certificadas de Emisiones de Gases Efecto Invernadero (Certified Emission Reductions) que se generan mediante un proyecto de reducción. Los CERs se generan en la etapa de ejecución de un proyecto de reducción y se extienden una vez acreditada dicha reducción.

Otro punto muy importante que se debe tener en cuenta es la necesidad de control y monitoreo de las emisiones capturadas una vez que el proyecto esté en marcha. Un ente independiente va a verificar las emisiones reducidas anualmente. Por ello, es necesario implementar un sistema de monitoreo para supervisar la cantidad de emisiones reducidas, que incluye datos exactos sobre la cantidad de metano generado y quemado. Además, un mantenimiento permanente del equipo instalado tiene que ser garantizado, para cumplir con los requerimientos de la metodología aplicada.



