

# PROYECTO FINAL DE GRADUACIÓN EN INGENIERÍA AMBIENTAL

---

**“Digestión anaerobia como  
tratamiento de barros  
cloacales en la planta  
depuradora de aguas  
residuales de la ciudad de  
Mar del Plata”**

---

**Castro Ristol María Paula**

**Director:  
Ing. Mariano S. Sollazzo**

**2020**

## AGRADECIMIENTOS

Gracias resume todas las palabras que podría llegar a escribir  
después de todos estos años.

Gracias a mi familia,  
en especial a mi mamá, mi papá y Juan. Gracias.

Gracias a mis amigos.

A los de por vida. Gracias.

A los inesperados. Gracias.

Sofi, Juli, Aldi, Facu, Magui, Emi, Pivi, Pedro, Lucas. Gracias, mil gracias.

Sofi, mención especial por cada uno de esos apuntes. Gracias.

Gracias a mis compañeros facultativos.

Gracias a los profesores apasionados que no sólo dejaron datos.

Gracias a Mariano.

Gracias a Ariel y a la empresa Arcis Group.

Gracias a Obras Sanitarias,  
en especial a la Ing. Ana Paula Comino y a la Ing. Liz Peralta.

Y gracias a cada persona que en estos años apareció dejando algo.

Gracias.

# ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS.....	2
ÍNDICE DE TABLAS.....	6
ÍNDICE DE FIGURAS.....	7
ÍNDICE DE IMÁGENES.....	8
RESUMEN.....	10
INTRODUCCIÓN.....	11
CAPÍTULO I: Planteo del problema.....	13
Objetivo General.....	13
Objetivos Específicos.....	13
Antecedentes Internacionales.....	13
Antecedentes Nacionales.....	14
CAPÍTULO II: Marco Legal.....	17
Legislación Internacional.....	17
Protocolo de Kyoto.....	17
Conferencia Internacional sobre Energías Renovables de Bonn.....	17
Acuerdo de París.....	18
Legislación nacional.....	18
Reforma de la Constitución Nacional (Art. 41).....	18
Ley 25.675 - Política Ambiental Nacional.....	19
Ley 13.577 - Obras Sanitarias de la Nación.....	19
Ley 27.191 - Energía Eléctrica.....	20
Ley 26.093 - Biocombustibles.....	20
Programa GENREN.....	21
Programa RenovAR.....	22
Legislación provincial.....	22
Ley 12.257 - Código de Aguas de la Provincia de Buenos Aires.....	22
Ley 11.820 - Ley de agua y desagües cloacales en la Provincia de Buenos Aires.....	23
Ley 14.838 - Fuentes renovables destinada a la producción de energía eléctrica.....	23

CAPÍTULO III: Fundamentos Teóricos .....	24
Aguas Residuales .....	24
Componentes de aguas residuales.....	28
Planta de Tratamiento de Aguas Residuales .....	31
Recolección y conducción .....	31
Tratamiento.....	31
Evacuación .....	34
Digestión Anaerobia.....	35
Descripción del Proceso.....	35
Tipo de Sustratos .....	38
Parámetros del Proceso .....	39
Materia prima a tratar .....	40
Condiciones ambientales del proceso.....	41
Condiciones de operación del proceso .....	43
Productos finales.....	46
Biogás.....	46
Bio-abono (Biol) .....	47
Biodigestor.....	48
Componentes Principales.....	49
Clasificaciones .....	51
Tratamiento Posterior del Biogás y Bio-abono .....	54
Usos del Biogás .....	55
Producción de calor o vapor .....	56
Generación de electricidad o combinación de calor y electricidad .....	57
Combustible para vehículos.....	57
Beneficios Ambientales .....	58
Beneficios en el Subsistema Natural.....	58
Beneficios en el Subsistema Económico.....	60
Beneficios en el Subsistema Social .....	61
CAPÍTULO IV: Análisis Preliminar.....	62

Sistema de saneamiento de aguas residuales en Mar del Plata.....	62
Estación Depuradora de Aguas Residuales (EDAR).....	63
Tratamientos de Aguas Residuales en la EDAR.....	68
Línea de Aguas.....	69
Conducto de Enlace – Conducción del Efluente Crudo.....	69
Reja Gruesa.....	69
Estación Elevadora de Líquido Crudo y Rejas Finas.....	70
Desarenador e Interceptor de Grasas.....	71
Sala de Cribas.....	73
Conducto de descarga.....	74
Línea de Lodos.....	74
Compostaje.....	74
Caracterización de barros cloacales.....	75
Extracción y Tratamiento de Gases.....	76
Instalaciones para descargas por contingencias.....	77
CAPÍTULO V: Metodología.....	78
Recolección de datos.....	78
Procesamiento de datos.....	78
Software: Biodigestor-pro.....	79
Capítulo VI: Resultados.....	84
Caracterización del sustrato.....	84
Biodigestor y estructuras auxiliares.....	85
Tanque de alimentación (o cámara de carga).....	86
Cámara de digestión.....	87
Tanque de descarga.....	87
Lecho de secado de lodos.....	87
Caracterización de Productos.....	88
Planta de Biogás.....	89
CONCLUSIÓN.....	91
BIBLIOGRAFÍA.....	93

ANEXOS .....	97
--------------	----

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Listado de plantas de tratamiento de efluentes relevadas en el Programa para el manejo Sustentable de Barros (ProBarros). Fuente de elaboración: Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sustentable (2016).....	16
Tabla 2: Principales contaminantes de aguas residuales, su fuente, proporción y efectos (XXX = Alta proporción, XX = Proporción Intermedia, X = Baja Proporción). Fuente de elaboración: Secretaría de Energía de México (2017) .....	28
Tabla 3: Reacción de las bacterias hidrolíticas, acidogénicas y metanogénicas a diferentes parámetros (Tchobanoglous et al., 1994). .....	37
Tabla 4: Esquema de objetivos de la digestión anaeróbica según la materia prima utilizada (Amaya y Sanchez, 2017). .....	39
Tabla 5: Principales componentes y concentraciones promedio del biogás. Fuente de elaboración: Amaya y Sánchez (2017) .....	46
Tabla 6: Principales características del biogás. Fuente de elaboración: Amaya y Sánchez (2017) .....	47
Tabla 7: Clasificación de biodigestores según criterios de operación. Fuente de elaboración: Dinamarca, 2010.....	51
Tabla 8: Potencial de Calentamiento Global (PCG) de los principales Gases de Efecto Invernadero (GEI). Fuente de elaboración: (IPCC, 2007).....	59
Tabla 9: Caudal máximo horario y población servida durante la etapa no estival (marzo a diciembre). Fuente de elaboración: OSSE y UTN (2017) .....	64
Tabla 10: Caudal máximo horario y población servida durante la etapa estival (enero y febrero). Fuente de elaboración: OSSE y UTN (2017) .....	64
Tabla 11: Datos hidrológicos del agua residual ingresada en la EDAR. Fuente de elaboración: OSSE y UTN (2017).....	64
Tabla 12: Material filtrado por sector y cantidad de contenedores. Fuente de elaboración: OSSE y UTN (2017).....	66
Tabla 13: Energía total mensual de cada sector. Fuente de elaboración: OSSE y UTN (2017) .....	67
Tabla 14: Etapas de tratamiento de la EDAR con sus respectivas entradas y salidas .....	68
Tabla 15: Parámetros de los lodos generados en la etapa de cribado brindados por OSSE, 2019. Fuente de elaboración: OSSE (2019). .....	76

Tabla 16: Parámetros de diseño como elementos de entrada del software Biodigestor-pro. Fuente de elaboración: OSSE (2019) .....	80
Tabla 17: Datos hidráulicos del biodigestor. ....	81
Tabla 18: Cantidades y características de los componentes del sustrato (*considerando la densidad de la biomasa de 1 t/m <sup>3</sup> ) .....	84
Tabla 19: Dimensiones del tanque de alimentación (Ver Anexo 2 y Anexo 3) .....	86
Tabla 20: Dimensiones de las cámaras de digestión (Ver Anexo 1 y Anexo 4) .....	87
Tabla 21: Dimensiones de tanque de descarga (Ver Anexo 2 y Anexo 3) .....	87
Tabla 22: Dimensiones de lecho de secado (Ver Anexo 7) .....	88
Tabla 23: Equivalencia CO <sub>2</sub> .....	88
Tabla 24: Cantidad de fertilizante orgánico producto de la digestión anaeróbica.....	89
Tabla 25: Etapas de tratamiento de la EDAR con sus respectivas entradas y salidas. ....	89
Tabla 26: Datos del biogás vinculados la generación de energía obtenidos a partir del Biodigestor-pro .....	90

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Gráfico de la variación horaria del caudal de agua residual doméstica. Fuente de elaboración: Metcalf y Eddy (1998) .....	27
Figura 2: Esquema de procesos de tratamiento y evacuación de aguas residuales. Fuente de elaboración: Mantilla Morales (2016) .....	35
Figura 3: Esquema de etapas del proceso de digestión anaerobia. ....	36
Figura 4: Mapa conceptual de etapas del proceso de digestión anaerobia. Fuente de elaboración: Secretaría de Energía de México (2017) .....	37
Figura 5: Gráfico de la velocidad de producción de biogás para distintos porcentajes de inóculo Fuente de Elaboración: Dinamarca (2010) .....	45
Figura 6: Gráfico del efecto de la temperatura sobre el Tiempo de Retención Hidráulica (TRH) Fuente de elaboración: Dinamarca (2010).....	46
Figura 7: Esquema de los componentes principales del proceso de generación de biogás (1: Cámara de carga, 2: Conducto de carga, 3: Cámara de digestión, 4: Conducto de descarga, 5: Filtro de gases corrosivos, 6: Cámara de descarga y 7: Salida de biogás). Fuente de elaboración: Pizano (2018) .....	51
Figura 8: Esquema de distintos usos del biogás. Fuente de elaboración: Secretaría de Energía de México (2017) .....	56

Figura 9: Esquema de interrelación entre subsistemas (social, económico y natural) en el ambiente.....	58
Figura 10: Fórmula de toneladas equivalentes de CO <sub>2</sub> . Fuente de elaboración: Panesso, Cadena, Mora Flórez y Ordoñez, 2011.....	59
Figura 11: Esquema de instalación remanente en Planta "Ingeniero Baltar" y Estación Depuradora de Aguas Residuales (EDAR), Mar del Plata. Fuente de elaboración: OSSE y UTN (2017) .....	63
Figura 12: Mapa de la ubicación de la EDAR, el Emisario Submarino y la Planta de Tratamiento "Ingeniero Baltar".....	63
Figura 13: Mapa de la Estación Depuradora de Aguas Residuales (EDAR), Mar del Plata. Fuente de elaboración: COARCO S.A. (2017).....	65
Figura 14: Gráfico del material filtrado por sector. ....	67
Figura 15: Gráfico de la energía porcentual por sector. ....	68
Figura 16: Plano estación elevadora de líquido crudo. Fuente de elaboración COARCO, 2017 .....	70
Figura 17: Plantilla del Biodigestor-pro de datos del proyecto y fuentes de biomasa.....	79
Figura 18: Plantilla del Biodigestor-pro de resultados con características y cantidades de biomasa.....	80
Figura 19: Plantilla del Biodigestor-pro con resultados de dimensionamiento del biodigestor.....	81
Figura 20: Plantilla del Biodigestor-pro de geometría, diseño e implantación de biodigestores.....	82
Figura 21: Plantilla de propuesta de implantación biodigestor y estructuras auxiliares. ....	83
Figura 23: Modelo de la planta de biogás (Ver Anexo 1).....	86
Figura 22: Mapa de la EDAR con la ubicación de la planta de biogás propuesta. ....	89

## ÍNDICE DE IMÁGENES

Imagen 1: Edificio central, EDAR. ....	66
Imagen 2: Estación Depuradora de Aguas Residuales. ....	66
Imagen 3: Estación Elevadora, EDAR.....	70
Imagen 4: Sistema de rejillas finas, EDAR.....	71
Imagen 5: Sistema de rejillas finas, EDAR.....	71
Imagen 6: Desarenador, EDAR.....	72



Imagen 7: Desarenador, EDAR.....	72
Imagen 8: Sala de cribas, EDAR.....	74
Imagen 9: Lodos extraídos del proceso de cribado, EDAR.....	75
Imagen 10: Piletas de filtrado biológico, EDAR.....	77

## RESUMEN

En la actualidad, la Estación Depuradora de Aguas Residuales (EDAR) forma parte del sistema de saneamiento de los efluentes residuales de la ciudad de Mar del Plata. El objetivo de la planta de pretratamiento es separar y extraer sólidos, arenas, grasas y aceites con el fin de mejorar la calidad recreativa de las playas y minimizar el impacto negativo de los efluentes cloacales en el ambiente.

Las aguas residuales que ingresan a la EDAR atraviesan cuatro etapas de pretratamiento previo a ser descargadas a través del emisario submarino en el mar. Y, aunque existen diversos procesos que permiten extraer recursos de las aguas residuales, la planta sólo cuenta con un tratamiento de compostaje que acondiciona los lodos extraídos de la etapa de cribado para poder reutilizarlos como abono.

En este Proyecto, se propone fundamentar los argumentos de la utilización de la digestión anaerobia como alternativa para la gestión de los residuos sólidos de la EDAR. La implementación de este tipo de procesos evitaría el desperdicio del potencial energético de los barros cloacales, generando beneficios ambientales (económicos, sociales y naturales).

A través de análisis de datos y un estudio de pre-factibilidad técnica, se pudo concluir que, instalando tres unidades de biodigestores bajo tierra con geomembranas, se podría llevar a cabo un proceso de digestión anaerobia a partir de los residuos sólidos generados en la etapa de cribado y de manera complementaria al programa de compostaje ya existente, lo cual permitiría generar biogás y abono de calidad.

*Palabras claves: EDAR, aguas residuales, barros cloacales, digestión anaerobia*

## INTRODUCCIÓN

La generación de aguas residuales es una consecuencia inevitable de las actividades humanas. El crecimiento exponencial de la población mundial en las últimas décadas trajo aparejado el aumento de efluentes en forma directamente proporcional. A su vez, la deficiente gestión de los procesos de recolección, tratamiento y disposición final de los efluentes líquidos residuales generan la saturación de la capacidad asimiladora de la naturaleza. Estas perturbaciones no solo impactan negativamente en el equilibrio ecológico, sino que producen problemas en la salud de la población.

En Argentina, el servicio de agua y saneamiento tiene un atraso significativo en la cobertura de gestión de aguas residuales, y no cuenta con estadísticas confiables respecto a la cantidad de plantas depuradoras y el nivel de tratamiento de las aguas residuales en el país (Dirección Nacional de Agua Potable y Saneamiento, 2017).

En el 2018, se inauguró en Mar del Plata la Estación Depuradora de Aguas Residuales (EDAR) para complementar el funcionamiento del emisario submarino, como reemplazo de la planta de pretratamiento Ing. Baltar. La EDAR cuenta con procesos de pretratamiento a través de los cuales se extraen sólidos, arenas, grasas y aceites; y cuyo objetivo principal es mejorar el tratamiento de los efluentes cloacales del Partido de General Pueyrredón y revertir la problemática ambiental del sector costero norte de la ciudad, vinculado con emanación de olores y la afectación de la calidad de las aguas costeras por el vuelco de líquidos cloacales próximos a la línea de costa.

Aunque, en la actualidad, existen diversos tratamientos que permiten extraer recursos de aguas residuales directamente (nutrientes, materia orgánica y metales) o a través de procesos de transformación (biogás); la EDAR sólo cuenta con un tratamiento de compostaje que acondiciona la materia orgánica para poder reutilizarla.

La selección del tema para este Proyecto Final se basó en la necesidad de proponer una alternativa para la gestión integral de los barros cloacales generados en el proceso de separación de líquidos y sólidos en la EDAR, tomando como objetivo la valorización de los mismos, entendiendo por ello a todos aquellos procesos de reutilización y tratamiento en su forma química, física, biológica, mecánica y energética.

Dentro de estos nuevos tratamientos, se encuentra la digestión anaerobia, un proceso de transformación de la materia orgánica y estabilización de lodos, que permite la recuperación y aprovechamiento del gas metano, componente combustible del biogás obtenido a través de la degradación biológica de compuestos orgánicos. La implementación de este tipo de procesos es una tecnología sólida aplicable a una gran variedad de efluentes residuales, que evita el desperdicio del potencial energético de los barros cloacales, generando beneficios ambientales (económicos, sociales y naturales).

Para poder garantizar la producción de biogás, dentro de los análisis que se deben realizar, los estudios de pre-factibilidad técnica son una herramienta de cálculo fundamental para el

diseño y la construcción de una planta de biogás. Estos estudios permiten estimar la eficiencia del tratamiento, así como el volumen y la concentración de biogás que se puede llegar a generar.

La incorporación de nuevos tratamientos, como la digestión anaerobia, a través de los cuales se pueda aprovechar los componentes del efluente, como la energía, los nutrientes y la misma agua susceptible de reutilización, permitiría adoptar, en la EDAR, un modelo sostenible con principios de reutilización, recuperación y reciclaje, fomentando maximizar el potencial del agua residual como fuente de recursos.

## CAPÍTULO I: Planteo del problema

### Objetivo General

Fundamentar los argumentos de la utilización de la digestión anaerobia como alternativa para la gestión de los residuos sólidos de una planta de tratamiento de efluentes cloacales en la ciudad de Mar del Plata.

### Objetivos Específicos

- Identificar y caracterizar los procesos que tienen lugar en la planta de tratamiento de efluentes cloacales en la ciudad de Mar del Plata.
- Caracterizar los barros cloacales provenientes de la planta de tratamiento de efluentes cloacales en la ciudad de Mar del Plata y determinar si son aptos para la generación de biogás que pueda ser utilizado para la producción de energía.
- Evaluar la pre-factibilidad técnica de la incorporación de un biodigestor al proceso de tratamientos de aguas residuales en la ciudad de Mar del Plata.
- Determinar los beneficios ambientales de la producción de biogás a partir de residuos orgánicos provenientes de la planta de tratamiento de efluentes cloacales en la ciudad de Mar del Plata.

### Antecedentes Internacionales

La captación y drenaje de aguas pluviales datan de tiempos muy antiguos. Sin embargo, la acumulación y el tratamiento sistemático de aguas residuales no aparece hasta principios del siglo XIX. Hasta ese momento, no se había profundizado en la relación que había entre la contaminación y las enfermedades que padecía la población. Fueron el médico alemán, Robert Koch, y el químico francés, Louis Pasteur, los que desarrollaron la teoría del germen, la cual marcó el inicio de una nueva era en el campo del saneamiento.

La utilización de la digestión anaerobia como medio para el tratamiento de residuos comenzó a finales del siglo XIX. En 1869, el ingeniero francés Louis H. Mouras diseñó la primera unidad de tratamiento de residuos sólidos, la cual consistía en una cámara cerrada con sello hidráulico; y en 1890, Donald Cameron, ingeniero inglés, diseñó una fosa séptica para tratar los residuos líquidos generados en la ciudad de Exeter (Gran Bretaña), utilizando el gas generado para iluminar parte de la ciudad.

El desarrollo de las tecnologías de digestión anaerobia estuvo vinculado inicialmente a la escasez de combustibles. En Europa, la digestión anaerobia alcanzó una especial importancia como medio para obtener energía a partir de la Segunda Guerra Mundial, mientras que en China e India su aplicación alcanza un auge en las comunidades rurales, donde se empezaron a producir grandes cantidades de combustible y fertilizantes a partir de los residuos agroganaderos y domésticos. A partir de los años setenta, el rápido incremento en los precios de combustibles redujo el atractivo de los procesos aerobios de las estaciones de depuración de aguas residuales,

lo cual forzó al desarrollo de alternativas energéticamente eficientes, como el tratamiento anaerobio (Vicent et al., 2018). Hasta la crisis del petróleo en 1973, el proceso anaerobio sólo era considerado por países industrializados como un tratamiento para reducir altas cargas orgánicas en algunos residuos.

En la actualidad, el interés por estas tecnologías en los países industrializados es producto de los problemas medioambientales derivados de la acumulación de las aguas residuales urbanas e industriales. En Estados Unidos, debido a que la evacuación de aguas no tratadas se realizaba en grandes extensiones de terreno y los daños causados por sus vertidos no eran graves, el tratamiento y eliminación de las aguas residuales no formaban parte del sistema de captación y drenaje hasta finales del siglo XIX. Sin embargo, a principios de este siglo, los daños causados y las condiciones sanitarias impulsaron una creciente demanda de mayor eficiencia en el tratamiento y gestión de las aguas residuales.

Por otro lado, en las últimas dos décadas, los países latinoamericanos han prestado mayor atención a los servicios de abastecimiento de agua y saneamiento, instalando plantas de tratamiento de aguas residuales y desarrollando marcos normativos y proyectos vinculados al saneamiento para optimizar los procesos. Sin embargo, en la actualidad sólo el 80% de la población urbana tiene acceso a servicios de recolección de aguas residuales y se calcula que solo el 5% de las viviendas están conectadas a sistemas de tratamientos (Reynolds, 2002). Estos porcentajes tienen una gran variación entre países debido a la diversidad económica, social y ambiental de las regiones.

Las distintas regiones latinoamericanas han implementado proyectos puntuales de tratamiento como respuesta a determinados problemas sociales o medioambientales locales, en lugar de programas integrales y duraderos que abarquen todo el territorio nacional. Las principales tecnologías utilizadas (cerca del 80% tanto en términos de cantidad de instalaciones como en volumen de agua tratada) son los estanques de estabilización, lodos activados y reactores anaeróbicos de flujo ascendente y manto de lodos (Organización de las Naciones Unidas (ONU), 2017).

Dentro de los programas realizados en Latinoamérica, el Programa Nacional Hídrico se destaca en la región. Fue llevado a cabo por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) en México, entre el 2014 y el 2018; y busca impulsar el uso y manejo de fuentes de energía alternativa para el autoconsumo en los procesos de tratamiento de aguas residuales. Principalmente, se promovía la generación de energía eléctrica a partir del biogás generado en las plantas de tratamiento municipales.

### Antecedentes Nacionales

En la actualidad, según la Dirección Nacional de Agua Potable, 39,8 millones de personas residen en áreas urbanas en Argentina, de las cuales el 87% tienen acceso a agua por red pública y el 58% a cloacas (Dirección nacional de agua potable y saneamiento, 2017) . En las primeras décadas del siglo XX, comenzaron las obras para extender los servicios de agua potable y

saneamiento con el fin de mejorar la salud pública, pero, debido a los problemas fiscales del Estado, la Nación se vio obligada a reducir su injerencia en la prestación del servicio de las provincias. En algunos casos la provincia quedó a cargo del servicio, en otros se municipalizaron y en algunos sectores se crearon cooperativas para la gestión del servicio. Estos cambios provocaron una heterogeneidad del servicio de agua potable y saneamiento a lo largo del país.

El objetivo principal de los últimos años de este sector fue extender la provisión del servicio de agua potable, pero se ha designado poca importancia al tratamiento de las aguas residuales urbanas. No hay estadísticas confiables respecto del nivel de tratamiento de aguas residuales, sin embargo, la Dirección Nacional de Agua Potable y Saneamiento establece que se encuentra entre el 15 y el 20% de las aguas recolectadas.

Muchas ciudades del país poseen plantas de tratamiento de efluentes cloacales, pero la mayoría no están operativas o cuenta con un deficiente estado de mantenimiento (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sustentable, 2016). A su vez, las plantas instaladas tratan sólo desechos provenientes de la red de alcantarillado y, en algunos casos, si no son vertidos en drenajes o cursos de agua, los desechos que se originan al vaciar pozos o fosas sépticas (Dirección Nacional de Agua Potable y Saneamiento, 2017).

Por los motivos previamente planteados, existen dificultades metodológicas y técnicas para evaluar la calidad de agua en Argentina, y el estado de las aguas superficiales en particular. El Estado nacional no lleva un registro sistemático de la calidad de los cursos y cuerpos de agua, por lo que la información disponible surge de iniciativas aisladas, discontinuadas en el tiempo y limitadas a ciertos sitios. Además, hay una falta de unificación de criterios y metodologías de registro y análisis, y no existe un consenso a nivel nacional en cuanto a estándares o umbrales de referencia de los parámetros básicos (físicos, químicos y bacteriológicos).

Con respecto a la gestión de lodos cloacales, en el 2018, el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación implementó el Programa para el Manejo Sustentable de Barros (ProBarros) que tenía por objetivo realizar un relevamiento a nivel nacional de plantas de tratamiento de efluentes del país. Se relevaron 120 plantas correspondientes a 10 provincias (Buenos Aires, Corrientes, Santa Fe, Salta, Chaco, Córdoba, Jujuy, Santiago del Estero, Tucumán y Río Negro).

El relevamiento realizado siguió dos ejes:

- Línea líquidos (consideran variables como: porcentajes de cobertura, cantidad de habitantes servidos tipo de efluentes, caudales, demanda biológica de oxígeno de entrada y salida, tipo de pretratamiento, tipo de tratamiento y cloración)
- Línea de barros (consideran variables como: tipo de deshidratación, tipo de tratamiento, proceso utilizado, porcentaje de materia seca, cantidad de barros generados, tipo de matriz previa a disposición y lugar de disposición)

Tabla 1: Listado de plantas de tratamiento de efluentes relevadas en el Programa para el manejo Sustentable de Barros (ProBarros). Fuente de elaboración: Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sustentable (2016)

Provincia	Cantidad de plantas	Población servida	Caudal (m <sup>3</sup> /h)
Buenos Aires	50	1.110.620	10.172
Corrientes	12	609.916	43.993
Santa Fe	8	84.300	996
Salta	23	411.931	4.650
Chaco	12	184.484	1.020
Córdoba	5	s/i	2.594
Tucumán	1	600.000	5.700
Jujuy	7	345.000	5.903
Santiago del Estero	1	60.000	500
Río Negro	1	10.000	1.000

Dentro de la línea de barros, el país tampoco ha incursionado demasiado en materia de biogás y su producción como método de tratamiento de lodos. Argentina, en los últimos años, ha experimentado un elevado desarrollo en cuanto a la producción de biodiesel y bioetanol, no así en materia de biogás. A pesar de esto, según estudios de la CADER (Cámara Argentina de Energías Renovables) realizados en el año 2015, ya existían entre 60 y 80 plantas biogás en funcionamiento (considerando también mini – biodigestores o mini – lagunas cubiertas de consumo domiciliarios). De ellas, sólo 20 corresponden a grandes instalaciones. Según esta institución, se podrían establecer plantas de entre 1 y 2 MW de potencia, capaces de generar energía eléctrica e inyectarla a la red, contribuyendo a satisfacer la demanda energética del país (Cámara Argentina de Energías Renovables (CADER), 2019).



## CAPÍTULO II: Marco Normativo

### Marco Normativo Internacional

#### Protocolo de Kyoto

El Protocolo de Kyoto sobre el cambio climático surge de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC). Es un acuerdo internacional que tiene como objetivo reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), como el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), gas metano (CH<sub>4</sub>), óxido nitroso (N<sub>2</sub>O), hidrofluorocarbonos (HFC) y hexafluoruro de azufre (SFG). A todos ellos se les asignó un potencial de generación de efecto invernadero que permite referenciar a cada uno al CO<sub>2</sub>, y así poder utilizar como unidad de referencia global el CO<sub>2</sub> equivalente.

El protocolo fue inicialmente adoptado el 11 de diciembre de 1997 en Kyoto, Japón. Sin embargo, se estableció que el compromiso sería de obligatorio cumplimiento cuando lo ratificasen los países industrializados responsables de, al menos, un 55% de las emisiones de CO<sub>2</sub>. Con la ratificación de Rusia en noviembre de 2004, después de conseguir que la Unión Europea (UE) pague la reconversión industrial, así como la modernización de sus instalaciones, el protocolo entró en vigor. Para el año 2012, 192 países habían firmado el protocolo, aunque algunos (como Estados Unidos) se retiraron del tratado en estos últimos años.

Dentro de lo establecido en el protocolo, se exige la reducción de las emisiones de actividades como el refinamiento de hidrocarburos, la calcinación de minerales metálicos, la fabricación de cemento, la generación de electricidad, la producción de acero, la fabricación de papel y carbón, etc. Países pertenecientes a la UE, además de reducir sus emisiones de GEI, promueven un desarrollo sustentable a través de medidas como la implementación de energías alternativas.

Argentina, como país en desarrollo y con aproximadamente el 0,6% del total de las emisiones mundiales, no estaba obligada a cumplir las metas cuantitativas fijadas por el Protocolo de Kyoto. Pese a ello ratificó el acuerdo, previa aprobación del Congreso Nacional el 13 de julio de 2001, a través de la Ley Nacional 25.438. En consecuencia, su condición de país adherente hace que deba comprometerse con la reducción de emisiones o, al menos, con su no incremento.

#### Conferencia Internacional sobre Energías Renovables de Bonn

La Conferencia Internacional sobre Energías Renovables de Bonn inició en el año 2004 en Bonn, Alemania. Consiste en una serie de conferencias para promover el desarrollo de las energías renovables a nivel mundial. En el primer encuentro, los delegados adoptaron tres resultados: recomendaciones normativas, un programa de acción internacional y una declaración política. La declaración solicitó el establecimiento de una red política mundial, que conllevó a la creación de la Red de Políticas de Energías Renovables para el Siglo XXI (REN21), la cual busca cumplir con los objetivos a través del intercambio de conocimiento y desarrollo de políticas.

La conferencia se realiza cada dos años y es organizada por los gobiernos de diferentes países en conjunto con la Red de Políticas de Energías Renovables para el siglo XXI (REN21). Varios países de América Latina, como Brasil y México, asumieron el desafío de lograr una mayor participación de fuentes renovables en sus matrices energéticas. Por otra parte, Argentina presentó un compromiso no vinculante.

## Acuerdo de París

El Acuerdo de París tuvo lugar el 12 de diciembre de 2015 en París, fue firmado por 195 naciones con el objetivo de combatir el cambio climático e impulsar medidas e inversiones para un futuro bajo en emisiones de carbono y sustentable. El Acuerdo de París reunió por primera vez a todas las naciones en una causa común en base a sus responsabilidades históricas, presentes y futuras.

El objetivo principal del acuerdo universal es mantener el aumento de la temperatura en este siglo por debajo de los 2°C e impulsar los esfuerzos para limitar el aumento de la temperatura por debajo de 1,5°C sobre los niveles preindustriales.

Además, el acuerdo busca aumentar la capacidad de los países para hacer frente a los efectos del cambio climático y lograr que las corrientes de financiación sean coherentes con un nivel bajo de emisiones de gases de efecto invernadero. Entre otros compromisos, los países se vieron obligados a establecer un marco tecnológico nuevo y proporcionar recursos financieros necesarios para apoyar la reconversión energética de los países en vías de desarrollo hacia una matriz energética más limpia.

## Legislación nacional

### Reforma de la Constitución Nacional (Art. 41)

El artículo 41 de la Constitución Nacional establece que “todos los habitantes gozan del derecho a un ambiente sano, equilibrado, apto para el desarrollo humano y para que las actividades productivas satisfagan las necesidades presentes sin comprometer las de las generaciones futuras; y tienen el deber de preservarlo. El daño ambiental generará prioritariamente la obligación de recomponer, según lo establezca la ley.

Las autoridades proveerán a la protección de este derecho, a la utilización racional de los recursos naturales, a la preservación del patrimonio natural y cultural y de la diversidad biológica, y a la información y educación ambiental.

Corresponde a la Nación dictar las normas que contengan los presupuestos mínimos de protección, y a las provincias, las necesarias para complementarlas, sin que aquellas alteren las jurisdicciones locales”.

## Ley 25.675 - Política Ambiental Nacional

La Ley 25.675 fue promulgada el 27 de noviembre de 2002 y establece presupuestos mínimos para el logro de una gestión sustentable y adecuada del ambiente, la preservación y protección de la diversidad biológica y la implementación del desarrollo sustentable.

La política ambiental nacional debe cumplir con los siguientes objetivos:

- Asegurar la preservación, conservación, recuperación y mejoramiento de la calidad de los recursos ambientales, tanto naturales como culturales, en la realización de diferentes actividades antrópicas.
- Promover el mejoramiento de la calidad de vida de las generaciones presentes y futuras, en forma prioritaria.
- Fomentar la participación social en los procesos de toma de decisión.
- Promover el uso racional y sustentable de los recursos naturales.
- Mantener el equilibrio y dinámica de los sistemas ecológicos.
- Asegurar la conservación de la diversidad biológica.
- Prevenir los efectos nocivos o peligrosos que las actividades antrópicas generan sobre el ambiente para posibilitar la sustentabilidad ecológica, económica y social del desarrollo.
- Promover cambios en los valores y conductas sociales que posibiliten el desarrollo sustentable, a través de una educación ambiental, tanto en el sistema formal como en el no formal.
- Organizar e integrar la información ambiental y asegurar el libre acceso de la población a la misma.
- Establecer un sistema federal de coordinación interjurisdiccional, para la implementación de políticas ambientales de escala nacional y regional.
- Establecer procedimientos y mecanismos adecuados para la minimización de riesgos ambientales, para la prevención y mitigación de emergencias ambientales y para la recomposición de los daños causados por la contaminación ambiental.

## Ley 13.577 - Obras Sanitarias de la Nación

La Ley 13.577 fue sancionada en 1949 y establece como objetivos:

- Conseguir y mantener un adecuado nivel de calidad de las aguas subterráneas y superficiales, de modo tal que se preserven sus procesos ecológicos esenciales.
- Impedir la acumulación de compuestos tóxicos y peligrosos capaces de contaminar las aguas subterráneas y superficiales.
- Evitar cualquier acción que pudiera ser causa directa o indirecta de degradación de los recursos hídricos.
- Favorecer el uso correcto y la adecuada explotación de los recursos hídricos y subterráneos.

- Proteger la integridad y buen funcionamiento de las instalaciones de la Empresa Obras Sanitarias de la Nación (en este caso Obras Sanitarias Sociedad de Estado Mar del Plata).

Respondiendo a los objetivos planteados por la Ley 13.577 y la Ley 25.675, el 16 de julio del 2018 se sancionó la Resolución 410, la cual establece la norma técnica para el manejo sustentable de barros y biosólidos generados en plantas depuradoras de efluentes líquidos cloacales y mixtos cloacales industriales. El objetivo de la resolución es regular el manejo, tratamiento, utilización y disposición final de los barros resultantes de las diferentes operaciones unitarias que realicen las plantas de tratamiento de efluentes cloacales.

La Resolución 410 determina el muestreo, caracterización, formas de uso y disposición final de los barros, land farming y relleno sanitario. A su vez, establece los requisitos para el uso y transporte de los mismos; deberes y obligaciones del operador, transportista y generador de los mismos, así como también del procedimiento para el control de su gestión; el cumplimiento al control de calidad de los barros y a su registro; y proporciona tablas con los parámetros que corresponden a residuos peligrosos, nivel de patógenos, etc.

### Ley 27.191 - Energía Eléctrica

La Ley 27.191 fue promulgada el 15 de octubre de 2015 y establece el régimen de fomento nacional para el uso de fuentes renovables de energía destinada a la producción de energía eléctrica.

El objetivo de la ley es que a fines del 2017 el país cuente con el 8% de su generación eléctrica a partir de la utilización de fuentes renovables y que para el 2020 ese porcentaje suba al 20%.

La ley define fuentes renovables de energía como “aquellas fuentes no fósiles idóneas para ser aprovechadas de forma sustentable en el corto, mediano y largo plazo: energía eólica, solar térmica, solar fotovoltaica, geotérmica, mareomotriz, undimotriz, de las corrientes marinas, hidráulicas, biomasa, gases de vertedero, gases de plantas de depuración, biogás y biocombustibles; y establece un límite de potencia para los proyectos de centrales hidroeléctricas de hasta 50 MW”.

Otro de los puntos destacados de la ley es la conformación de un fondo fiduciario (FODER) para respaldar el financiamiento de proyectos de inversión, para el que se destinaría el 50% del ahorro en combustibles líquidos generado por la sustitución con energías renovables y cargos específicos a la demanda.

### Ley 26.093 - Biocombustibles

La Ley promulgada el 12 de mayo de 2006 establece el régimen de regulación y promoción para la producción y uso sustentable de biocombustibles, exigiendo proporciones de mezcla mínima con combustibles fósiles y definiendo su régimen de promoción y de fomento nacional.

Entiende por biocombustible al: "bioetanol, biodiesel y biogás que se producen a partir de materias primas de origen agropecuario, agroindustrial o desechos orgánicos, que cumplan con los requisitos de calidad que establezca la autoridad de aplicación".

La norma no declara cuál será la autoridad de aplicación, pero sí lo hace el Decreto Reglamentario en el Artículo 2, siendo esta la Secretaría de Energía (dependiente del Ministerio de Planificación Federal, Inversión Pública y Servicios) salvo en lo referente a cuestiones fiscales, siendo en este caso, el Ministerio de Economía y Producción. También podrá intervenir el Ministerio de Planificación Federal, Inversión Pública y Servicios en el criterio de priorización de proyectos a calificar.

A su vez, establece condiciones de uso de los biocombustibles, como el biogás que se utilizará solo en sistemas, líneas de transporte y distribución de acuerdo con lo establecido por la autoridad de aplicación.

## Programa GENREN

El programa GENREN (Generación Eléctrica a partir de Fuentes Renovables) fue desarrollado por el Ministerio de Planificación Federal, Inversión Pública y Servicios, y ejecutado a través de ENARSA (Energía Argentina S.A.). El mismo fue anunciado por el secretario de energía del país en el 2009 y fue implementado con el fin de fomentar el desarrollo de generación eléctrica a partir de fuentes renovables, de modo de afianzar el desarrollo sustentable de las energías renovables del país. Con el programa GENREN, se realizarán contratos durante 15 años.

En un principio, el objetivo de este programa fue incorporar al mercado eléctrico mayorista unos 1000 MW mediante la adquisición de electricidad proveniente de generadores de energía a partir de fuentes renovables, sin contar las grandes represas hidroeléctricas. A su vez, como beneficios colaterales, se anunció la reducción de las emisiones de CO<sub>2</sub> al ambiente de hasta tres millones de toneladas anuales, la creación de 8000 puestos de trabajo, la atracción de inversiones nacionales extranjeras por US\$ 2500 millones y se asegura el cumplimiento de la Ley de Fomento Nacional para el uso de fuentes renovables de energía, alcanzando el 8% del consumo eléctrico del país abastecido por fuentes de energía renovables en un plazo de 10 años.

La empresa Cammesa (Compañía Administradora del Mercado Mayorista Eléctrico), quien firma los contratos, formada por el Estado Nacional y representantes del sector privado, no fue capaz de satisfacer las garantías requeridas por los inversionistas internacionales relativas al cumplimiento de los contratos firmados en el ámbito del proyecto GENREN. Por lo tanto, solamente se pudieron construir aquellas plantas que accedieron a créditos en el mercado nacional o que contaban con los fondos para realizar las inversiones sin financiamiento externo.

## Programa RenovAR

Hasta 2015, más del 60% de la energía producida en la matriz eléctrica argentina provenía de los hidrocarburos (Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable, 2017). Para cumplir con las metas establecidas en la Ley 27.191 y transformar la matriz energética incorporando energías renovables a la oferta eléctrica del país, se lanzó el plan RenovAr en mayo de 2016. Comenzó con un Proceso de Convocatoria Abierta para la contratación en el Mercado Eléctrico Mayorista (MEM) de empresas a través de una licitación pública, en la cual presentan sus proyectos de inversión y el precio al cual están dispuestos a vender su capacidad.

La primera ronda licitatoria (RenovAr 1) se realizó a fines del 2016. Dicho programa tiene como objetivo principal alcanzar un 20% de energía (equivalente a 10 mil megavatios) a partir de fuentes renovables para el año 2025. Hasta ese año, el país no llegaba al 2% de fuentes renovables. Mientras que, en octubre del 2017 y del 2018, se llevaron a cabo la segunda y la tercera ronda licitatoria (RenovAr 2 y 3) respectivamente.

Otro de los principales objetivos es la reducción de la emisión de gases al medio ambiente, llegando a bajar dos millones de toneladas de dióxido de carbono por año. Asimismo, también se crearán entre 5 y 8 mil nuevos puestos de trabajo e implicará un ahorro de 300 millones de dólares por combustibles que se dejarán de importar.

## Legislación provincial

### Ley 12.257 - Código de Aguas de la Provincia de Buenos Aires

El Código de Aguas establece el régimen de protección, conservación y manejo del recurso hídrico de la Provincia de Buenos Aires.

Los principales contenidos son: las atribuciones del Poder Ejecutivo Provincial, la creación de la Autoridad del Agua (ente autárquico que tendrá a su cargo la planificación, el registro, la constitución y la protección de los derechos, la policía y el cumplimiento y ejecución de las demás misiones del Código). A tales efectos, la Autoridad del Agua (ADA) tendrá la facultad de: reglamentar, supervisar y vigilar todas las actividades y obras relativas al estudio, captación, uso, conservación y evacuación del agua. Es decir, las atribuciones del ADA son: la planificación hidrológica, acciones preventivas y emergencias hídricas, las vedas sanitarias, obras susceptibles de repercusión interjurisdiccional, y el uso y aprovechamiento del agua de los cauces públicos (abastecimiento de agua potable y uso agropecuario, industrial, recreativos, energético, terapéutico, minero, navegación, etc.).

A partir de la ley, ADA sancionó la resolución N° 336/2003, la cual establece los límites admisibles de los parámetros característicos del agua residual en la etapa de evacuación sobre colectoras cloacales, cuerpos de aguas superficiales, suelos y mar abierto, con el fin de evitar la contaminación del ambiente.

## Ley 11.820 - Ley de agua y desagües cloacales en la Provincia de Buenos Aires

La Ley 11.820 fue promulgada en el año 1996 y establece el marco regulatorio para la prestación de los servicios públicos de provisión de agua potable y desagües cloacales en la Provincia de Buenos Aires, y las condiciones particulares de regulación para la concesión de los servicios sanitarios de jurisdicción provincial. A su vez, crea el Organismo Regulador Bonaerense de Aguas y Saneamiento (ORBAS) como Autoridad de Aplicación.

Los objetivos del marco regulatorio son:

- Garantizar el mantenimiento y promover la expansión del sistema de provisión de agua potable y desagües cloacales.
- Establecer un sistema normativo que garantice la calidad y continuidad del servicio público regulado.
- Regular la acción y proteger adecuadamente los derechos, obligaciones y atribución de los usuarios, los concedentes, los prestadores y del ORBAS.
- Garantizar la operación de los servicios que actualmente se prestan y los que se incorporen en el futuro en un todo de acuerdo a las condiciones de calidad, continuidad, regularidad de los servicios y razonabilidad tarifaria.
- Proteger la salud pública, los recursos hídricos y el medio ambiente.

Esta ley a su vez determina los límites admisibles para la descargar de los efluentes cloacales en cursos de agua, mar y suelos.

## Ley 14.838 - Fuentes renovables destinada a la producción de energía eléctrica

La Ley 14.834 fue promulgada el 14 de septiembre de 2016 y deroga la Ley 12.603. La norma declara de interés provincial la generación y producción de energía eléctrica a través de fuentes de energía renovable alternativa no convencional o no contaminante. Esta ley marca la adhesión de la provincia de Buenos Aires a la Ley Nacional 26.190 y su modificación 27.191.

Los beneficiarios de esta ley son aquellas personas físicas y/o jurídicas que son titulares de inversiones y/o concesionarios de proyectos de instalación de centrales de generación eléctrica a partir del aprovechamiento de fuentes renovables de energía con radiación en el territorio provincial, cuya producción esté destinada al Mercado Eléctrico Mayorista y/o a la prestación de servicios públicos.

La ley establece ciertos beneficios para los beneficiarios, como el no pago de impuestos por 15 años, el recibimiento de apoyo económico y estabilidad fiscal. A su vez, establece que el Poder Ejecutivo debe desarrollar programas y/o proyectos con el objetivo de incentivar la generación y producción de energías renovables.

## CAPÍTULO III: Fundamentos Teóricos

### Aguas Residuales

Todas las comunidades generan residuos, tanto líquidos como sólidos. La fracción líquida corresponde a las aguas residuales y está constituida, esencialmente, por agua de abastecimiento después de haber sido contaminada por diversos usos a los que ha sido sometida. Desde el punto de vista de su origen, las aguas residuales pueden definirse como una combinación de desechos líquidos (procedentes de viviendas, instituciones y establecimientos comerciales e industriales) con aguas subterráneas superficiales y de lluvia.

Las aguas residuales son una mezcla compleja que contiene agua con contaminantes orgánicos e inorgánicos, tanto en suspensión como disueltos. Estas aguas están conformadas por aguas residuales de áreas residenciales e industriales, y normalmente se suelen clasificar en cuatro categorías (Metcalf y Eddy, 1998):

#### 1. Uso doméstico

Las aguas residuales de uso doméstico están conformadas por:

- Aguas con fines culinarios: sólidos, materia orgánica, grasas, sales.
- Aguas usadas para limpieza: detergentes, nutrientes.
- Aguas usadas para higiene: jabones, geles, champús.
- Aguas negras, procedentes de metabolismo humano: sólidos, materia orgánica, nutrientes, sales, organismos patógenos.

Las aguas domésticas se recogen en un sistema de alcantarillado público (alcantarillas, registros, estaciones bombeo, etc.) y se envían a los centros de tratamiento para evitar riesgos de contaminación en su disposición final. En muchas ciudades la recolección de estas aguas se realiza en conjunto con las aguas producidas en establecimientos comerciales e industriales; y los efluentes producto de actividades como el riego de sectores públicos y el lavado de calles, lo cual dificulta el sistema de tratamiento de las mismas (Metcalf y Eddy, 1998).

#### 2. Uso Industrial

La cantidad de agua con que los municipios abastecen a las industrias para su uso en los diferentes procesos de producción presenta una gran variabilidad. Las industrias grandes consumidoras de agua, como las químicas y las alimenticias, suelen abastecerse al margen de las redes públicas de abastecimiento de agua. En cambio, industrias cuyas necesidades y consumos son bastante menores, como las dedicadas a productos de tecnología, sí se abastecen a través de las redes públicas (Reynolds, 2002).

Las aguas residuales de las industrias incluyen los residuos sanitarios de los empleados, los residuos de proceso derivados de la manufactura, aguas de lavado y



aguas relativamente poco contaminadas procedentes de las operaciones de calentamiento y enfriamiento (Metcalf y Eddy, 1998).

En la práctica, debido a que los usos industriales del agua son muy variados, es conveniente estudiar con detenimiento tanto el origen del agua utilizada como los residuos producidos previo a la elección de un tratamiento.

### **3. Servicio Público**

El agua destinada a los servicios públicos representa el menor de los componentes del uso público del agua, e incluye al abastecimiento de los edificios públicos, la irrigación de espacios verdes municipales, y el mantenimiento de infraestructuras (Reynolds, 2002).

Las aguas residuales de los servicios públicos contienen una variedad de contaminantes como microorganismos patógenos, nutrientes, materia orgánica, productos de combustión incompletos, partículas suspendidas, pesticidas, etc. (Reynolds, 2002).

### **4. Pérdida en la red y fugas**

Las pérdidas en la red y fugas engloban los usos y conexiones no autorizadas. Las fugas se producen como consecuencia del envejecimiento de la red, calidad de los materiales de construcción y falta de mantenimiento. Es por esto que, aunque los datos sobre abastecimiento y consumo puede ser de utilidad para estimar los caudales de aguas residuales, se deben fijar cuidadosamente (Metcalf y Eddy, 1998).

A estas aguas, se suman las aguas provenientes de las precipitaciones pluviales. La cantidad de aguas pluviales varía en gran medida con la época del año, el tipo de terreno, la intensidad y duración de las tormentas que se producen. En las ciudades, el desagüe de agua pluvial contiene aceites, grasas, polvo y otros particulados procedentes de caminos, hojas de árboles, recortes de pastos, así como contaminantes del aire (Metcalf y Eddy, 1998).

Las aguas residuales recogidas deben ser conducidas, en última instancia, a cuerpos de agua receptores o al mismo terreno. En muchos casos, el destino de las aguas residuales evidencia que los vertidos pueden superar la capacidad de carga naturales de estos cursos y cuerpos de agua para su autodepuración. Por lo tanto, el vertido de efluentes constituye un importante aporte de carga orgánica e inorgánica a los cursos de agua, produciendo impactos negativos como:

#### **1. Aparición de fangos y flotantes**

La fracción sedimentable de los sólidos en suspensión origina sedimentos en el fondo de los cauces. Además, la fracción no sedimentable da lugar a la acumulación de grandes cantidades de sólidos en la superficie y/o en las orillas de los cauces receptores formando capas flotantes (Metcalf y Eddy, 1998).

Los depósitos de fangos y flotantes no sólo provocan un impacto visual negativo, sino que, debido al carácter reductor de la materia orgánica, se puede llegar a provocar el agotamiento del oxígeno disuelto en las aguas y originar el desprendimiento de malos olores (Reynolds, 2002).

## **2. Agotamiento del contenido de oxígeno presente en las aguas**

Los componentes de las aguas residuales fácilmente oxidables comenzarán a ser degradados vía aerobia por la flora bacteriana de las aguas del cauce, con el consiguiente consumo de parte del oxígeno disuelto en la masa líquida. Si el consumo es excesivo, el contenido en oxígeno disuelto descenderá por debajo de los valores mínimos, necesarios para el desarrollo de la vida acuática (Metcalf y Eddy, 1998).

Consumido el oxígeno disponible, los procesos de degradación vía anaerobia generan olores desagradables, al liberarse gases que son los causantes de estos olores, y un impacto sobre la dinámica del ecosistema local (Metcalf y Eddy, 1998).

## **3. Aportes excesivos de nutrientes**

El exceso de nutrientes (como el nitrógeno y el fósforo) pueden provocar un proceso de crecimiento descontrolado de algas y otras plantas en los cauces receptores denominado eutrofización, lo cual puede provocar una disminución de la biodiversidad e impedir el empleo de estas aguas para usos domésticos e industriales (Reynolds, 2002).

## **4. Proliferación de agentes patógenos**

Los vertidos de aguas residuales sin tratar a cauces públicos pueden fomentar la propagación de organismos patógenos para el ser humano (virus, bacterias, protozoos y helmintos). Entre las enfermedades que pueden propagarse a través de las aguas contaminadas por los vertidos de aguas residuales urbanas, destacan: el tifu, el cólera, la disentería y la hepatitis (Reynolds, 2002).

Para evitar estos impactos negativos en su disposición, es necesario el tratamiento de las aguas residuales y saber qué hacer con los efluentes una vez tratados. Las estaciones depuradoras son capaces de eliminar una elevada proporción de contaminantes presentes en las aguas residuales y verter efluentes depurados que pueden ser asimilados de forma natural por los cauces receptores (Henry y Heinke, 1999).

El conocimiento de los caudales y características de los efluentes generados es importante para el correcto diseño de los sistemas de recogida, tratamiento y evacuación. A su vez, las estaciones depuradoras de aguas residuales deben pensarse para poder hacer frente a las variaciones diarias de caudal y carga que experimentan estas aguas (Dirección nacional de agua potable y saneamiento, 2017).

El caudal que se genera en los sectores urbanos es proporcionalmente directo con el consumo de agua de abastecimiento, y este consumo viene relacionado con el grado de

desarrollo económico y social (un mayor desarrollo trae un mayor y más diverso uso del agua en las actividades humanas).

Existen varios factores que afectan las variaciones en los caudales y las características del agua residual. En muchas poblaciones, los caudales y las cargas de DBO y sólidos en suspensión pueden alcanzar máximos superiores al doble de su valor medio (Secretariado Alianza por el Agua, 2008). Los principales factores responsables de estas variaciones son: las costumbres de los habitantes, las condiciones de carácter estacional, la actividad industrial y el sistema de recolección de aguas residuales (Dirección nacional de agua potable y saneamiento, 2017).

Las variaciones horarias de la concentración del agua residual están vinculadas con las costumbres de los habitantes. Los caudales mínimos se producen durante las primeras horas, cuando el consumo de agua es más bajo y cuando el caudal circulante se debe, principalmente a escapes, infiltraciones y pequeñas cantidades de agua residual sanitaria (Metcalf y Eddy, 1998).

La primera punta de caudal se presenta, en general, inmediatamente después del máximo uso de agua, producido a última hora de la mañana. Mientras que una segunda punta se presenta normalmente en las últimas horas de la tarde (entre las 19 y las 21 hs) (Metcalf y Eddy, 1998).

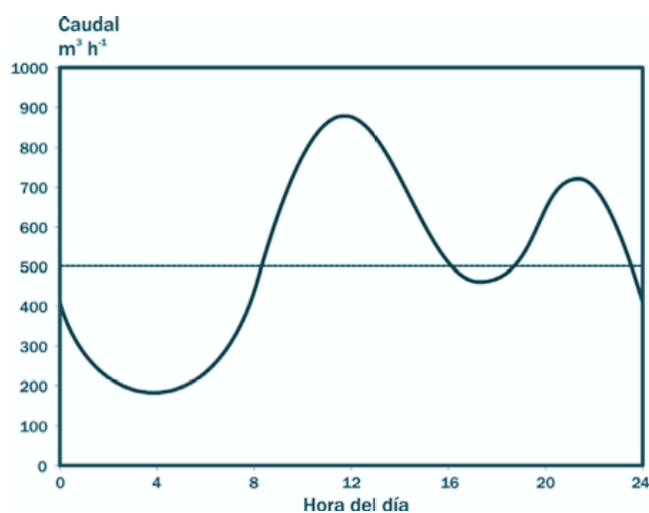


Figura 1: Gráfico de la variación horaria del caudal de agua residual doméstica. Fuente de elaboración: Metcalf y Eddy (1998)

Los caudales provenientes de infiltraciones y conexiones incontroladas pueden variar estacionalmente. El agua pluvial y subterránea que penetra por infiltraciones tiene variaciones estacionales según el régimen de lluvias de la región (Metcalf y Eddy, 1998).

A su vez, las variaciones estacionales se dan principalmente en las zonas turísticas, pequeñas comunidades con colegios y universidades. También sucede en zonas en las que las actividades tanto comerciales como industriales se concentran en diferentes épocas del año.

Por otro lado, el sistema de recolección de aguas residuales puede ser separado o combinado. En los sistemas separados se utilizan diferentes conjuntos de tuberías para

transportar las aguas residuales y la escorrentía urbana mientras que en los sistemas combinados ambos flujos se transportan juntos. Los sistemas separados reducen el caudal de agua residual a tratar, evitando el desbordamiento y el tratamiento innecesario de grandes volúmenes de escorrentía urbana (Reynolds, 2002).

### Componentes de aguas residuales

Las aguas residuales contienen una variedad de compuestos químicos (como urea, albúminas, proteínas, ácidos acéticos y lácticos, bases jabonosas y almidones, aceites, hidrocarburos, gases, etc.) y microorganismos. Para caracterizarlas se emplea un conjunto de parámetros que sirven para cuantificar los contaminantes:

Tabla 2: Principales contaminantes de aguas residuales, su fuente, proporción y efectos (XXX = Alta proporción, XX = Proporción Intermedia, X = Baja Proporción). Fuente de elaboración: Secretaría de Energía de México (2017)

Parámetros	Parámetros representativos principales	Aguas Residuales Domésticas	Impactos
Sólidos en Suspensión (SS)	Total de sólidos suspendidos	XXX	Problemas estéticos
			Depósito de lodos
			Adsorción de contaminantes
			Protección de patógenos
Sólidos Disueltos (SD)	Sólidos totales disueltos, conductividad	XX	Aumento de la salinidad
			Toxicidad para las plantas
			Afecta la permeabilidad del suelo
Materia Orgánica	DBO Y DQO	XXX	Consumo de oxígeno
			Condiciones sépticas
			Mortandad de peces
Organismos Patógenos	Coliformes	XXX	Problemas en la salud
Nutrientes	Nitrógeno, fósforo	XXX	Crecimiento excesivo de algas
			Toxicidad para los peces (amoníaco)
			Enfermedades en recién nacidos (nitrato)
			Contaminación del agua subterránea
Metales		X	Toxicidad

	Elementos específicos (As, Cd, Cr, Cu, Hg, etc.)		Inhibición del tratamiento biológico de lodos residuales
			Problemas con el uso agrícola de lodos
			Contaminación de las aguas subterráneas
Otros Componentes Inorgánicos	Pesticidas, detergentes, otros	X	Toxicidad
			Espuma
			Reducción de la transferencia de oxígeno
			No biodegradabilidad
			Mal olor

## 1. Sólidos

Los sólidos totales de las aguas residuales son los residuos que quedan una vez que la porción líquida se ha evaporado y el remanente se ha secado a peso constante a 103°C. El contenido total de la materia sólida contenida en el agua se define como sólidos totales, tanto orgánicos como inorgánicos (Secretaría de Energía de México, 2017). Estos pueden encontrarse como:

1. Sólidos Disueltos (SD), aquellos que no se sedimentan al encontrarse en el agua en estado iónico o molecular.
2. Sólidos en Suspensión (SS), los cuales pueden ser:
  - a. Sedimentables (Ss), ya que por su peso pueden sedimentarse fácilmente en un período de tiempo.
  - b. No sedimentables (Sc), aquellos que no sedimentan tan fácilmente en un periodo de tiempo.

## 2. Materia Orgánica

Las proteínas y carbohidratos constituyen el 90% de la materia orgánica de las aguas residuales y le dan el carácter reductor a la materia orgánica, lo cual puede llegar a provocar el agotamiento del oxígeno disuelto presente en las aguas y originar el desprendimiento de malos olores. Las fuentes de estos contaminantes biodegradables incluyen los excrementos y orina humanos, residuos de alimentos, polvo y suciedad, detergentes, jabones y otros productos de limpieza (Secretaría de Energía de México, 2017).

Se utilizan diversos parámetros como medida de la concentración orgánica de las aguas residuales. Los métodos más comunes se basan en la cantidad de oxígeno que se necesita para convertir el material oxidable en productos finales estables. Los dos métodos de uso más frecuente para determinar las necesidades de oxígeno de las aguas residuales son las pruebas de DQO y DBO (Dirección nacional de agua potable y saneamiento, 2017).

La demanda bioquímica de oxígeno (DBO) es la cantidad de oxígeno (expresada en mg/L) que requieren microorganismos aclimatados para degradar biológicamente la materia orgánica de las aguas residuales en condiciones de ensayo (20°C, presión atmosférica y oscuridad) y en un tiempo dado. Es decir, refleja la materia orgánica que existe en el agua, indicando el oxígeno necesario para alimentar a los microorganismos y las reacciones químicas (Metcalf y Eddy, 1998).

Mientras que la demanda química de oxígeno (DQO) de las aguas residuales es la cantidad de oxígeno necesario para oxidar químicamente las sustancias orgánicas presentes. Su determinación es más rápida que la correspondiente a la DBO, precisando su ensayo 1 o 2 horas, si la oxidación se efectúa en frío, o bien 20 o 30 minutos si la oxidación se efectúa con dicromato en caliente (Metcalf y Eddy, 1998).

La DBO es el parámetro más importante en el control de la contaminación del agua. Este dato se utiliza como una medida de la contaminación orgánica, como una base para estimar el oxígeno necesario para los procesos biológicos y como un indicador del rendimiento de los procesos (Dirección nacional de agua potable y saneamiento, 2017).

### **3. Organismos Patógenos**

Los microorganismos prosperan teniendo el alimento adecuado, suficiente humedad y una temperatura idónea. Las aguas residuales proporcionan un ambiente ideal para una gran cantidad de microorganismos. La mayoría de ellos son inofensivos y pueden ser utilizados en procesos biológicos para transformar materia orgánica en productos finales estables. Sin embargo, también puede contener agentes patógenos (Dirección nacional de agua potable y saneamiento, 2017).

Los organismos patógenos se encuentran en las aguas residuales en muy pequeñas cantidades siendo muy difícil su aislamiento, por ello, se emplean habitualmente los coliformes como organismos indicadores (Centro de las Nuevas Tecnologías del Agua de Sevilla, 2008).

### **4. Componentes Inorgánicos**

Los nutrientes y los metales pesados son componentes inorgánicos que se encuentran en mayor proporción en las aguas residuales. Dentro de los nutrientes, se encuentran principalmente el nitrógeno y el fósforo en sus diversas formas (orgánicas e inorgánicas) (Centro de las Nuevas Tecnologías del Agua de Sevilla, 2008).

El nitrógeno se presenta en las aguas residuales en forma de nitrógeno orgánico, amoníaco y, en menor cantidad, de nitratos y nitritos. Mientras que el fósforo aparece principalmente como fosfato orgánico y polifosfato. Ambos componentes se determinan, en sus distintas formas, mediante métodos espectrofotométricos (Centro de las Nuevas Tecnologías del Agua de Sevilla, 2008).

Por otro lado, los metales pesados, como Cd, Cr, Cu, Hg, Pb y Zn, pueden estar presentes en las aguas residuales industriales (Secretariado Alianza por el Agua, 2008). Además de esas dos clasificaciones, los componentes inorgánicos también incluyen:

- Cloruros y sulfatos (presentes normalmente en el agua y en residuos generados por humanos).
- Carbonatos y bicarbonatos (normalmente presentes en el agua y en los residuos como sales de calcio y de magnesio).
- Sustancias tóxicas (como arsénico y cianuro).
- Gases disueltos (en especial de oxígeno).
- Iones de hidrógeno (concentración expresada como pH).

## Planta de Tratamiento de Aguas Residuales

Las plantas de tratamiento de aguas residuales tienen como objetivo final la remoción de partículas contaminantes solubles y no solubles del agua residual y la separación y el tratamiento de la biomasa generada en los procesos biológicos. Las instalaciones para el tratamiento constan de tres elementos principales:

1. Recolección y conducción de las aguas residuales hasta la estación de tratamiento.
2. Tratamiento de las aguas residuales.
3. Evacuación de los productos resultantes del tratamiento: efluentes depurados y lodos.

### Recolección y conducción

La recolección y conducción de las aguas residuales desde donde se generan hasta la estación depuradora se realiza a través de una compleja red de tuberías (alcantarillados colectores). Dependiendo de la topografía, las aguas discurrirán por gravedad o con ayuda de un bombeo (ONU, 2017).

Normalmente, los sistemas de recolección son unitarios (se recogen aguas residuales y lluvias en una misma alcantarilla) mientras que otros son sistemas separados, los cuales están compuestos por una red cloacal para conducir las aguas residuales y otra red para aguas de lluvia (Crespi et al., 2005).

Por otro lado, con el objetivo de que a la estación depuradora no llegue más caudal del proyectado, en los colectores y/o en las obras de llegada de las estaciones depuradoras de aguas residuales se instalan aliviaderos que permiten derivar el exceso de caudal (como en los periodos de lluvia) (ONU, 2017).

### Tratamiento

El tratamiento de las aguas residuales consta de un conjunto de operaciones físicas, biológicas y químicas, que persiguen eliminar la mayor cantidad posible de parámetros contaminantes antes de su vertido, de forma que los niveles de contaminación que queden en

los efluentes tratados cumplan los límites legales existentes y puedan ser asimilados de forma natural por los cauces receptores (Metcalf y Eddy, 1998).

En las plantas depuradoras convencionales se distinguen dos líneas de tratamiento: línea de agua (incluye los procesos o tratamientos que permiten reducir los contaminantes presentes en las aguas residuales) y la línea de lodos (donde se tratan la mayor parte de los subproductos que se originan en la línea de agua).

### **1. Línea de Agua**

Los procesos y operaciones unitarias que tienen lugar en la línea de agua se combinan y complementan para dar lugar a diversos niveles de tratamiento:

#### **a. Pre – tratamiento**

Previo a la incorporación de los líquidos residuales a la planta de tratamiento, se realiza un proceso de pre – tratamiento, el cual comprende una serie de operaciones físicas y mecánicas cuya finalidad es eliminar los sólidos de mayor tamaño que pueden llegar a obstruir los tratamientos posteriores.

El correcto diseño y posterior mantenimiento de esta etapa son aspectos de gran importancia, ya que cualquier deficiencia en los mismos repercutirá negativamente en el resto de las instalaciones originando obturaciones de tuberías, válvulas y bombas, desgaste de equipos, formación de costras, etc. (Crespi et al., 2005).

A su vez, esta etapa, tiene como objetivo agilizar el proceso y abaratar costos, disminuyendo la utilización de reactivos que necesitarían para la sedimentación de sólidos de gran tamaño.

Las operaciones de pre – tratamientos más importantes son:

- Separación de grandes sólidos.
- Desbaste.
- Tamizado.
- Desarenado – Desengrase.

Generalmente todas las plantas de tratamiento de efluentes cloacales incluyen rejas y desarenadores. Mientras que las demás unidades son más frecuentemente empleadas para residuos líquidos industriales (Crespi et al., 2005).

#### **b. Tratamiento Primario**

El tratamiento primario es el tratamiento de aguas residuales urbanas mediante un proceso físico o fisicoquímico. El principal objetivo consiste en eliminar los sólidos en suspensión, consiguiéndose además una cierta reducción de la contaminación biodegradable, ya que una parte considerable de los sólidos que se eliminan está constituida por materia orgánica (Metcalf y Eddy, 1998).

Los tratamientos primarios más habituales son la decantación primaria y los tratamientos fisicoquímicos. El fin de la decantación primaria es la eliminación de la mayor parte de los sólidos



sedimentables, bajo la acción de la gravedad. Mientras que en los tratamientos fisicoquímicos se incorporan reactivos químicos que permiten incrementar la reducción de los sólidos en suspensión y los sólidos coloidales (Centro de las Nuevas Tecnologías del Agua de Sevilla, 2008).

### **c. Tratamiento Secundario**

El tratamiento secundario es el tratamiento de aguas residuales urbanas mediante un proceso que incluya un tratamiento biológico con sedimentación secundaria u otro proceso en el que se consiga la eliminación de la materia orgánica.

Son procesos de naturaleza biológica, los cuales se emplean para eliminar la mayor parte de la materia orgánica. El tratamiento biológico se realiza con la ayuda de microorganismos (fundamentalmente bacterias) que en condiciones aerobias actúan sobre la materia orgánica presente en las aguas residuales (Metcalf y Eddy, 1998).

### **d. Tratamiento Terciario**

Los tratamientos terciarios son poco usuales, permiten obtener efluentes finales de mejor calidad para que puedan ser vertidos en zonas donde los requisitos son más exigentes o puedan ser reutilizados. La finalidad de los tratamientos terciarios es eliminar la carga orgánica residual y aquellas otras sustancias contaminantes no eliminadas en los tratamientos secundarios, como, por ejemplo, los nutrientes, fósforos y nitrógenos.

## **2. Línea de Lodos**

El tratamiento de las aguas residuales conduce a la producción de residuos sólidos que requieren, a su vez, de una gestión. Los contaminantes del agua, así como los productos que se forman durante su tratamiento, separados mediante distintos procesos conforman suspensiones que se denominan lodos o barros (Montes Moran y Menendez, 2010).

La materia orgánica que forma parte de los lodos presenta dos problemas fundamentales: los olores ligados a su proceso de descomposición y sus características favorables para servir como caldo de cultivo de microorganismos patógenos que pueden afectar a la salud pública (ONU, 2017). Por estos motivos, los lodos generados requieren de un proceso de estabilización previo a su utilización y/o disposición final.

La estabilización es un tratamiento que forma parte de la gestión de lodos, el cual consiste en reducir la fracción biodegradable presente en los lodos para evitar su putrefacción y la proliferación de microorganismos patógenos. Los lodos que necesitan ser estabilizados se denominan “lodos frescos”, mientras que, una vez llevada a cabo la estabilización los lodos pasan a denominarse “lodo digerido” o “lodo estabilizado”. Los procesos de estabilización más utilizados son la digestión (anaerobia y aerobia), la estabilización química o la estabilización térmica (pasteurización) (Vicent et al., 2018).

En muchos casos, se requiere implementar tratamientos previos a la estabilización, como el acondicionamiento y/o la deshidratación. El acondicionamiento es un proceso en el cual se

incorporan productos químicos para mejorar la deshidratación de los lodos facilitando la eliminación de agua. Mientras que el proceso de deshidratación consiste en eliminar parte del agua contenida en los lodos transformándolos en sólidos fácilmente manejables y transportables. Los métodos más habituales de este tratamiento son: centrifugación, filtro banda, secado térmico o eras de secado (Vicent et al.,2018).

La cantidad y calidad de los lodos obtenidos en los procesos de depuración de aguas residuales no es constante y varía en el tiempo. Esto es debido a que la producción de lodos está ligada a diferentes factores:

- Caudal de agua
- Contaminantes presentes
- Número de habitantes
- Hábitos de vida
- Sistema de saneamiento
- Presencia de efluentes industriales, etc.

A su vez, los tipos de procesos que generan los lodos y el estado en el que se encuentran las instalaciones también va a influir en la cantidad y la calidad de los mismos (González Granados, 2015).

Para proyectar convenientemente el tipo de tratamiento, las instalaciones para el tratamiento y evacuación de barros, es necesario conocer la cantidad y características de los lodos a tratar. El criterio de diseño establecido por los sólidos afecta el tamaño de las unidades del proceso, el período de operación y los costos totales. No haber planificado correctamente la gestión de los lodos que se van a generar es una de las principales causas de su mal funcionamiento (ONU, 2017).

## Evacuación

En una estación depuradora, la corriente entrante (aguas residuales urbanas), como consecuencia de los procesos de tratamiento a que se ve sometida, se transforma en dos corrientes salientes (efluentes depurados y lodos). Con la evacuación de ambas corrientes se da por finalizado el tratamiento de las aguas residuales urbanas (Mantilla Morales, 2016).

Los efluentes depurados, si han alcanzado el grado de tratamiento requerido en cada caso, pueden ser vertidos. No obstante, y cada vez con mayor frecuencia, los efluentes depurados se destinan a otros usos como la reutilización en riego agrícola, refrigeración industrial, usos recreativos, recarga de acuíferos, producción de energía, etc. (Mantilla Morales, 2016).

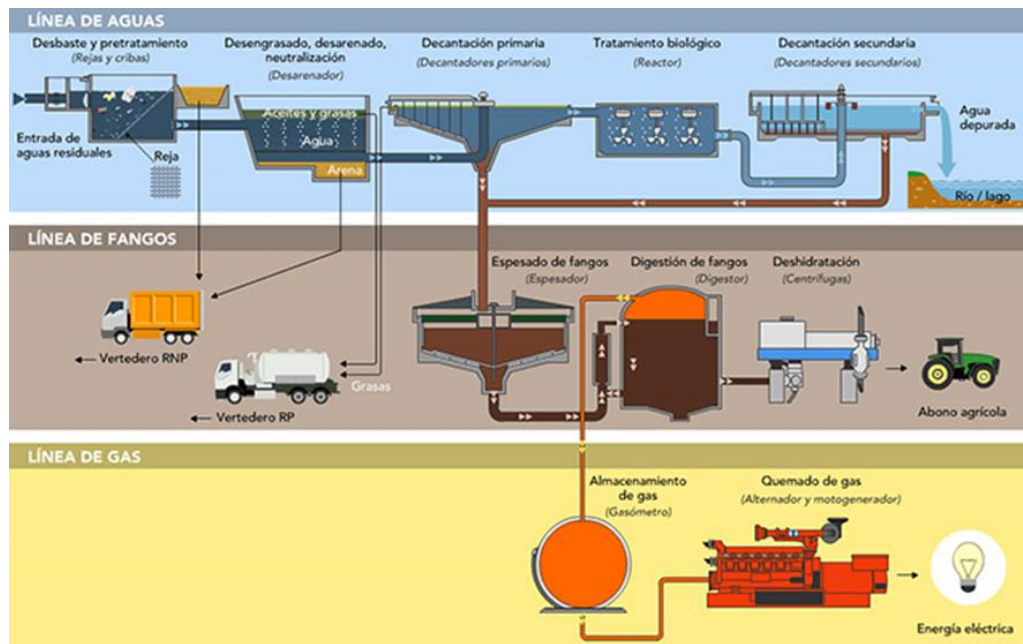


Figura 2: Esquema de procesos de tratamiento y evacuación de aguas residuales. Fuente de elaboración: Mantilla Morales (2016)

## Digestión Anaerobia

### Descripción del Proceso

La digestión anaerobia es un proceso de descomposición de biomasa, se produce en ausencia de oxígeno y es provocado por microorganismos, los cuales convierten y degradan la materia orgánica compleja hasta obtener metano ( $\text{CH}_4$ ), dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), agua ( $\text{H}_2\text{O}$ ), sulfuro de hidrógeno ( $\text{H}_2\text{S}$ ), amoníaco ( $\text{NH}_3$ ) y lodos (Tchobanoglous, Theisen y Vigil, 1994).



Los microorganismos responsables de este tipo de descomposición de biomasa son capaces de obtener la energía que necesitan para mantenerse vivos rompiendo enlaces de los carbohidratos y convirtiendo parte del carbono presente en biogás. Este gas está compuesto por dióxido de carbono, otra parte en metano, y otros compuestos que pueden actuar como impurezas, como el sulfuro de hidrógeno, amoníaco, compuestos aromáticos y compuestos organohalogenados, dependiendo del sustrato que se utilice (Tchobanoglous et al., 1994).

Se denomina digestión porque el proceso es similar al que se produce en el tracto digestivo de los rumiantes (Amaya y Sanchez, 2017). Cualquier material de origen biológico experimenta este proceso de descomposición y se produce en ambientes cálidos, húmedos y faltos de aireación de manera más favorable.

El proceso de digestión anaeróbica está conformado por diversas reacciones que pueden dividirse en tres fases generales: hidrólisis, deshidrogenación y metanogénesis.

En la primera fase tiene lugar la descomposición de la materia orgánica en azúcares. Las bacterias liberan enzimas que convierten los carbohidratos complejos en monómeros y azúcares; las proteínas en aminoácidos; y los lípidos (grasas) en ácidos grasos (Amaya y Sanchez, 2017). Durante esta etapa la mayor parte de la biomasa es soluble en agua, está formada por compuestos más sencillos, los cuales pueden intervenir como reactivos en la segunda fase del proceso, y suele ocurrir en un valor de pH de entre 5 y 6 (Tchobanoglous et al., 1994).

En paralelo, se lleva a cabo la segunda fase, las mismas bacterias fermentan la materia orgánica hidrolizada, mediante la acidogénesis de los productos obtenidos y con esto forman moléculas más pequeñas. Por medio del proceso de deshidrogenación, las bacterias acidófilas transforman los azúcares en ácidos orgánicos. Esta etapa requiere de un pH de entre 6 y 7 para que sea efectiva (Tchobanoglous et al., 1994).

El proceso de acidificación puede comenzar antes cuando los lodos con alto contenido de materia orgánica permanecen cierto tiempo en condiciones anaerobias. Esta etapa puede limitar el proceso anaerobio cuando los sustratos no son fácilmente hidrolizables (por ejemplo, aquellos con alto contenido de celulosa, pectina, proteínas complejas, lípidos o grasas y lodos estabilizados previamente). Por otro lado, los ácidos orgánicos obtenidos pueden reducir el pH a menos de 6, por lo que es necesario tener un control del parámetro durante esta etapa (Amaya y Sanchez, 2017).

La tercer y última fase se denomina metanogénesis. En ella tiene lugar la formación de biogás a partir de ácido acético resultante de las dos primeras. Las bacterias metanogénicas son anaerobias estrictas (la presencia de oxígeno libre inhibe su crecimiento) y muy sensibles a tóxicos e inhibidores (exceso de acidez, la presencia de sales metálicas, sulfuros solubles, penicilina o amoníaco) (Tchobanoglous et al., 1994). La formación de metano se realiza a través de dos rutas metabólicas:

- Metanogénesis acetoclástica a partir de la degradación del ácido acético.
- Metanogénesis hidrogenófila a partir del H<sub>2</sub> y del CO<sub>2</sub>.

Las reacciones en la tercera fase se producen durante semanas mientras que tanto la primer como la segunda fase pueden durar horas o días, según el tipo de biomasa del que se parte.

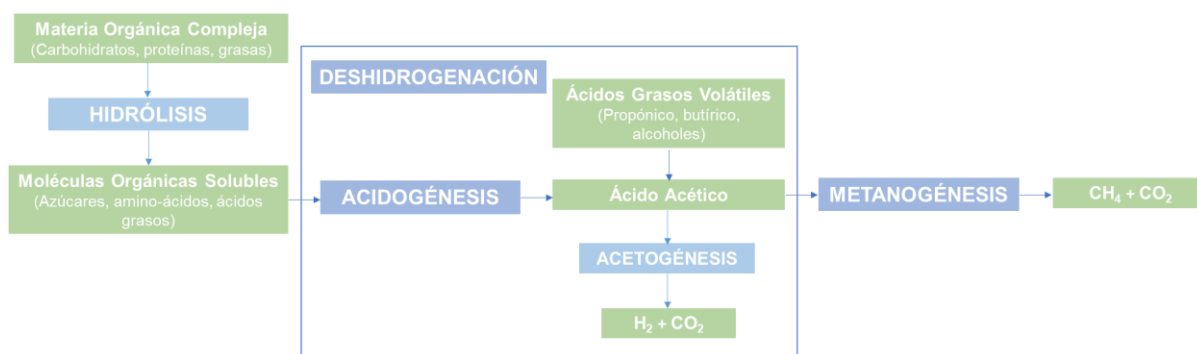


Figura 3: Esquema de etapas del proceso de digestión anaerobia.

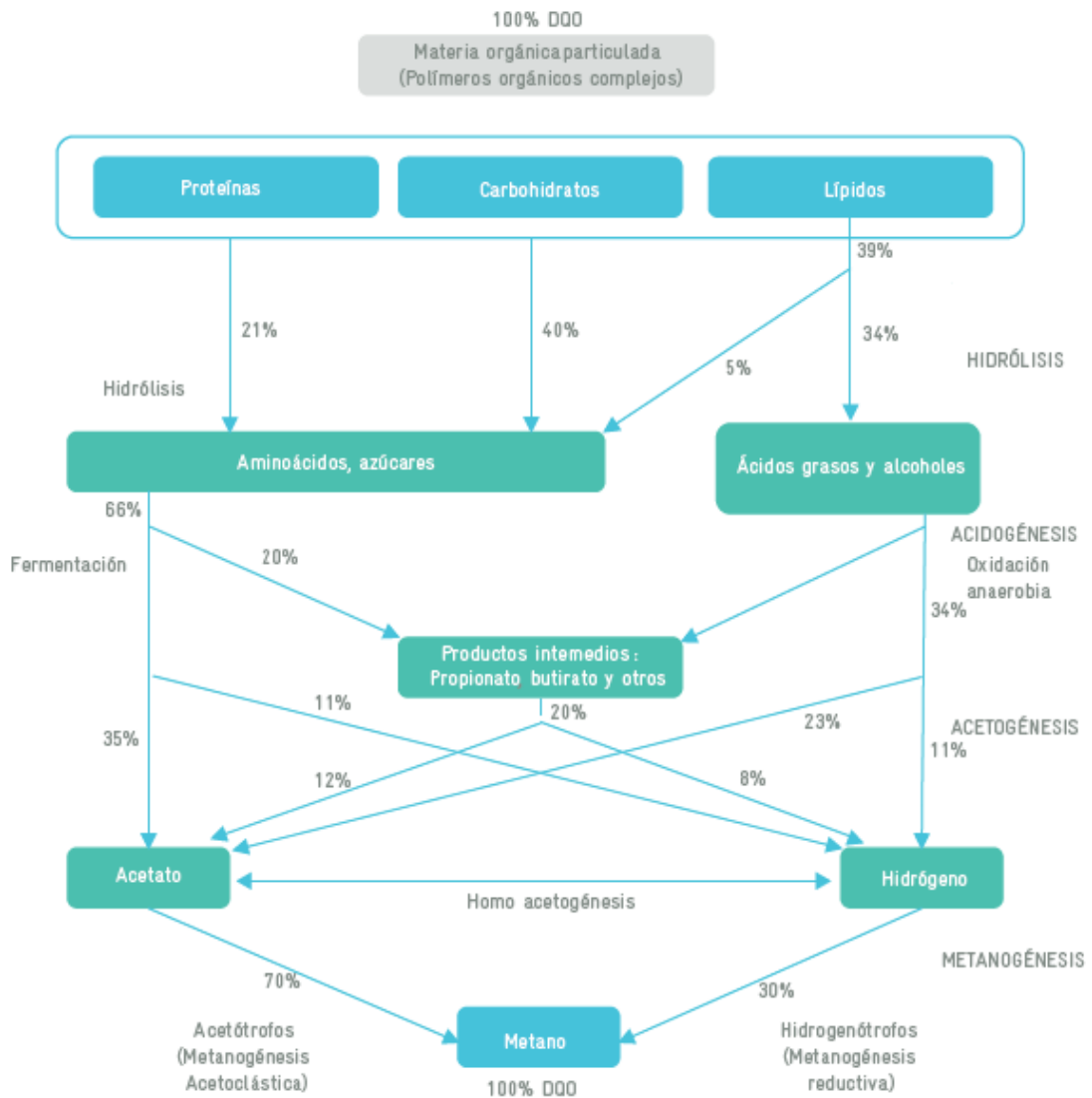


Figura 4: Mapa conceptual de etapas del proceso de digestión anaerobia. Fuente de elaboración: Secretaría de Energía de México (2017)

También puede generarse biogás a partir de ácido fórmico o metanol, aminoácidos, proteínas y lípidos; o por hidrólisis de aceites y grasas. Se genera más biogás a partir de proteínas y grasas que a partir de carbohidratos, por lo que la proporción de biogás generado a partir de la biomasa inicial será mayor cuando es más elevado el contenido de proteínas y grasas (Secretaría de Energía de México, 2017).

Las bacterias involucradas en la digestión anaerobia poseen distintas características y reaccionan de manera diferente a los distintos parámetros que se les presentan (Tchobanoglous et al., 1994). Las bacterias hidrolíticas y acidogénicas reaccionan de manera similar mientras que las bacterias metanogénicas poseen otras características:

Tabla 3: Reacción de las bacterias hidrolíticas, acidogénicas y metanogénicas a diferentes parámetros (Tchobanoglous et al., 1994).

Parámetros	Bacterias hidrolíticas y acidogénicas	Bacterias metanogénicas
------------	---------------------------------------	-------------------------

Tiempo de Reproducción	De 3 horas a 3 días	6-14 días
Temperatura Óptima	30 a 65°C variable	37°C o 55°C
Valor pH	Mínimo hasta 3,5 y máximo 7,8	Cerca de 7,8
Vitalidad	Robusta, resisten perturbaciones en la temperatura y el valor del pH	Muy sensibles frente a cualquier perturbación en el valor del pH y la temperatura
Sensibilidad aerobia	Trabajan también ante la introducción de oxígeno cuando se produce en la carga del depósito de hidrólisis	Mueren con el contacto con el oxígeno
Producción de Biogás	Poca Cantidad de metano 0 -30%	Alta Cantidad de metano > 50%

### Tipo de Sustratos

Una de las grandes ventajas del biogás, es que puede ser producido a partir de una variedad de sustratos provenientes de la biomasa. Sin embargo, la composición de los mismos varía mucho entre sí, por lo que la producción de biogás también varía ampliamente. Los principales factores que determinan la producción de biogás por unidad de masa son: humedad, porcentaje de materia orgánica, proporción de las diferentes biomoléculas, existencia de bacterias que intervengan en la reacción, entre otros (Amaya y Sanchez, 2017).

Muchos de los sustratos utilizados poseen un bajo costo, o hasta pueden representar un costo negativo debido a que se trata de efluentes de otras industrias que, de no ser utilizados, requerirían de un tratamiento por parte de la empresa productora (Blanco Cobain, 2009). Debido a esto, la disponibilidad de sustrato será generalmente la limitante a la hora de instalar una planta generadora de biogás.

Las materias primas que suelen ser utilizadas para la digestión anaeróbica son:

1. Residuos agrícolas y ganaderos.
2. Aguas y residuos sólidos industriales.
3. Aguas residuales municipales y fracción orgánica de Residuos Sólidos Urbanos (RSU).
4. Cultivos energéticos.

De acuerdo con la materia prima utilizada, los objetivos de aplicación del tratamiento pueden ser diferentes: saneamiento ambiental, producción de energía o producción de enmiendas orgánicas. El saneamiento ambiental busca obtener un producto con características físicas, químicas y biológicas que no representen un riesgo de contaminación en su disposición final. Mientras que la producción de energía se refiere a obtener máximos rendimientos en la

producción de metano o la mayor conversión de materia orgánica en biogás. Y el objetivo de producir enmiendas orgánicas busca obtener productos estabilizados (tanto química como biológicamente), de manera que su aplicación directa a los suelos para cultivos no represente un riesgo de contaminación (Amaya y Sanchez, 2017).

Tabla 4: Esquema de objetivos de la digestión anaeróbica según la materia prima utilizada (Amaya y Sanchez, 2017).

Materias Primas	Objetivos
Residuos Agrícolas y Ganaderos	Producción de Energía
	Producción de enmiendas orgánicas
	Saneamiento Ambiental
Aguas y Residuos Sólidos Industriales	Saneamiento Ambiental
	Producción de Energía
Aguas Residuales Municipales y RSU	Saneamiento Ambiental
	Producción de Energía
Cultivos Energéticos	Producción de Energía

### Parámetros del Proceso

Al tratarse de un proceso biológico llevado a cabo por microorganismos es importante tener en cuenta los parámetros que afectan su crecimiento y reproducción. Los microorganismos, especialmente los metanogénicos, son muy susceptibles a los cambios en las condiciones ambientales en las que se encuentran, por lo que la calidad y la cantidad de biogás que se genere dependerá del monitoreo de parámetros agrupados en relación a:

1. Materia prima a tratar:
  - a. Relación Carbono/Nitrógeno y contenido de otros nutrientes.
  - b. Tamaño de las partículas.
  - c. Concentración de sólidos.
  - d. Humedad.
2. Condiciones ambientales del proceso:
  - a. Potencial Redox.
  - b. Temperatura.
  - c. pH y alcalinidad.
  - d. Presencia de inhibidores.
3. Condiciones de operación del proceso:
  - a. Agitación.
  - b. Utilización de inóculos.
  - c. Carga orgánica volumétrica (COV), velocidad de carga volumétrica y Tiempo de retención hidráulica (TRH).

## Materia prima a tratar

### 1. Relación Carbono/Nitrógeno y contenido de nutrientes

La mayor parte de la materia orgánica es capaz de producir biogás, la cantidad y calidad del mismo va a depender de la composición y la naturaleza del residuo utilizado. Los niveles de nutrientes deben de estar por encima de la concentración óptima para las metanobacterias, ya que ellas se inhiben severamente por falta de nutrientes (González Velasco, 2009).

El carbono y el nitrógeno son las principales fuentes de alimentación de las bacterias metanogénicas. El carbono constituye la fuente de energía y el nitrógeno es utilizado para formación de nuevas células. Estas bacterias consumen 30 veces más carbono que nitrógeno por lo que la relación óptima de estos dos elementos en la materia prima se considera en un rango de 30:1 hasta 20:1 (Varnero Moreno, 2011).

Sin embargo, la descomposición de materiales con alto contenido de carbono (superior a 35:1) ocurre más lentamente, porque la multiplicación y desarrollo de las bacterias es bajo, por falta de nitrógeno, pero el período de producción de biogás es más prolongado (González Velasco, 2009).

En cambio, con una relación C/N menor de 8:1 se inhibe la actividad bacteriana debido a la formación de un excesivo contenido de amonio, el cual en grandes cantidades es tóxico e inhibe el proceso (González Velasco, 2009).

Como para todo proceso biológico, es imprescindible la presencia de macronutrientes y micronutrientes en cantidades adecuadas. El exceso de nitrógeno (amoniaco) provoca problemas por inhibición de las bacterias metanogénicas. El proceso anaerobio requiere pocos nutrientes debido a la baja producción celular (Varnero Moreno, 2011).

### 2. Tamaño de las partículas

El tamaño de las partículas influye sobre la velocidad de generación de biogás. Cuanto menor es el tamaño de las partículas mayor es la superficie de contacto entre las bacterias y éstas. De esta manera, se obtienen mayores velocidades de degradación de la materia orgánica y, por consiguiente, menores tiempos de permanencia de ella dentro del biodigestor, lo que significa menor volumen del biodigestor (González Velasco, 2009).

Sin embargo, existe un límite para esta variable. Una trituración excesiva de las partículas, por el contrario, puede provocar inestabilidad en el desarrollo del proceso. Por lo tanto, resulta conveniente reducir el tamaño de las partículas, en los casos que se necesario, hasta lograr diámetros entre 5 mm y 25 mm. Además, cabe mencionar que un tamaño adecuado evita obstrucciones en las conducciones del biodigestor, en el caso que sea continuo (Dinamarca, 2010).

### 3. Concentración de sólidos



La materia prima que se destina a la alimentación de los biodigestores está compuesta por una fracción sólida y una cantidad determinada de agua. La eficiencia y producción de biogás depende de la concentración de sólidos dentro del biodigestor. Altas concentraciones pueden provocar la desestabilización del sistema anaeróbico, causando una acumulación de ácidos que puede llegar a paralizar el proceso. Este fenómeno comúnmente se denomina sobrecarga orgánica, y es más crítico durante el arranque del biodigestor (González Velasco, 2009).

Desde el punto de vista biológico, esta desestabilización se debe a que la movilidad de las bacterias metanogénicas dentro del sustrato, se ve limitada de manera creciente a medida que aumenta la concentración de sólidos dentro del biodigestor. Los mejores resultados para biodigestores se obtienen con porcentajes de sólidos entre 7% y 9% (Dinamarca, 2010).

La concentración de sólidos en una materia prima se determina aplicando el método analítico de sólidos totales (ST) a una muestra. A partir de este valor, se calcula el volumen de agua necesario para diluir la materia prima hasta el nivel pretendido antes de que se ingrese al biodigestor (González Velasco, 2009).

#### **4. Humedad**

Se necesita una humedad superior al 75%, ya que las reacciones metabólicas se desarrollan en medio líquido (González Velasco, 2009). Este grado de humedad permite también una distribución homogénea de nutrientes y microorganismos.

### **Condiciones ambientales del proceso**

#### **1. Potencial Redox**

El potencial RedOx es un indicador de la presencia/ausencia de oxígeno. Es un parámetro clave para el buen funcionamiento del proceso, ya que las bacterias metanogénicas son anaeróbicas estrictas, por lo que pequeñas cantidades de oxígeno resultan tóxicas para su metabolismo.

Para un adecuado crecimiento de los microorganismos anaerobios el valor del potencial redox se debe mantener entre -220 mV a -350 mV a pH 7.0 de manera de asegurar el ambiente óptimo (Varnero Moreno, 2011).

#### **2. Temperatura**

La velocidad de reacción de los procesos biológicos depende de la velocidad de crecimiento de los microorganismos involucrados, la cual puede verse afectada principalmente por la temperatura. A medida que aumenta la temperatura, aumenta la velocidad de crecimiento de los microorganismos y se acelera el proceso de digestión.

Existen tres rangos de temperatura en los que pueden trabajar los microorganismos anaerobios:

- Psicrófilo: temperaturas menores de 20°C.
- Mesófilo: temperaturas entre 20 y 40°C.

- Termófilo: temperaturas mayores a 40°C.

La velocidad máxima específica de mayor crecimiento se da con el aumento del rango de temperatura. Dentro de cada rango, existe un intervalo para el cual dicho parámetro se hace máximo, determinando así la temperatura de trabajo óptimo en cada uno de los rangos posibles de operación (Secretaría de Energía de México, 2017).

Por otra parte, la solubilidad de la mayoría de las sales aumenta con la temperatura de manera que la materia orgánica es más accesible para los microorganismos y, por lo tanto, la velocidad del proceso también aumenta. Sin embargo, si se trata de compuestos tóxicos, al aumentar su solubilidad también serán potencialmente más tóxicos (Secretaría de Energía de México, 2017). Con el aumento de la temperatura se favorece las formas no ionizadas, que resultan más tóxicas para los microorganismos ( $\text{NH}_3$  y AGV no ionizados); y se disminuye la viscosidad de sólidos y semisólidos, lo cual implica menor necesidad de agitación (González Velasco, 2009).

En conclusión, la temperatura de operación del digestor es considerado uno de los principales parámetros de diseño. A mayor temperatura, mayor será la velocidad del proceso; sin embargo, es aconsejable que la temperatura sea próxima a la óptima en cada uno de los rangos. Y es importante garantizar una temperatura homogénea a partir de un sistema adecuado de agitación y un correcto controlador de temperatura (Secretaría de Energía de México, 2017).

### **3. pH y alcalinidad**

A pesar de que cada uno de los grupos de microorganismos anaerobios se desarrolla en un rango propio de pH óptimo, el proceso se desarrolla correctamente si el pH está próximo a la neutralidad (González Velasco, 2009). El valor de este parámetro en el digestor no sólo determina la producción de biogás sino también su composición.

Uno de los principales problemas en reactores anaerobios es tener una elevada acidez como consecuencia de las condiciones de inestabilidad y desequilibrio de las actividades de los microorganismos (Carta González et al., 2009).

Los microorganismos metanogénicos son los más susceptibles a las variaciones de pH, el intervalo óptimo para mantener su actividad se encuentra entre 6,8 y 7,5. Mientras que el intervalo óptimo de bacterias fermentativas se halla entre 5 y 6, con tolerancia para valores de pH de hasta 4,5. Esa diferencia causa uno de los principales problemas operacionales: la disminución del valor de pH acelera la actividad de bacterias fermentativas, mientras los consumidores de sus productos, que son más lentos, son inhibidos por el aumento de acidez. Esto genera un biogás pobre en metano y, por lo tanto, con menores cualidades energéticas (Secretaría de Energía de México, 2017).

A su vez, la sobrecarga orgánica y el exceso de sustratos de fácil degradación ocasionan la acumulación de ácidos orgánicos producidos en la fase de acidogénesis, lo cual inhibe el crecimiento de las bacterias acetogénicas y, por consiguiente, la metanogénesis (Carta González et al., 2009).

El pH de un sistema anaerobio, operando dentro de los rangos aceptables, es controlado principalmente por la alcalinidad natural del sistema. La destrucción de la materia orgánica, principalmente de las proteínas, libera amoníaco. El amoníaco reacciona con el dióxido de carbono produciendo bicarbonato de amonio, el cual contribuye a la alcalinidad del sistema. Sin embargo, un aumento elevado de las concentraciones de amoníaco también puede actuar como inhibidor del crecimiento microbiano (Secretaría de Energía de México, 2017).

En conclusión, la metanogénesis es la etapa limitante del proceso y es necesario mantener el pH del sistema cercano a la neutralidad.

#### **4. Presencia de inhibidores**

Las concentraciones elevadas de determinadas sustancias pueden provocar fenómenos de inhibición y/o toxicidad. Estas sustancias pueden formar parte de las materias primas que entran al digestor o pueden ser subproductos de la actividad metabólica de los microorganismos anaerobios (Secretaría de Energía de México, 2017).

En algunos casos, la magnitud del efecto tóxico de una sustancia puede ser reducido significativamente a partir de la aclimatación de la población de microorganismos al tóxico. Por otro lado, muchas de estas sustancias a bajas concentraciones pueden ser estimuladoras del proceso (González Velasco, 2009).

Por esto, es importante llevar a cabo monitoreos de las concentraciones y tomar medidas que eviten los procesos de toxicidad e inhibición de las siguientes sustancias:

- Ácidos grasos volátiles
- Hidrógeno
- Amoníaco
- Sulfatos y sulfuros
- Cationes y metales pesados

### **Condiciones de operación del proceso**

#### **1. Agitación**

La agitación del residuo dentro del reactor para posibilitar el contacto entre los microorganismos y el residuo es clave para el proceso. Los objetivos de este proceso son:

- a. Remover los metabolitos producidos por los microorganismos metanogénicos ya que favorece la salida de gases.
- b. Homogeneizar la densidad bacteriana en el medio para evitar la formación de espacios sin actividad biológica.
- c. Evitar la formación de espumas y capas superficiales como así la sedimentación.
- d. Evitar la formación de caminos preferenciales para impedir que parte del sustrato abandone el biodigestor sin haberse degradado lo suficiente.

- e. Eliminar la estratificación térmica para mantener una temperatura uniforme en todo el biodigestor.

Una agitación demasiado intensa puede romper los flóculos o agregados bacterianos que son los que fomentan la colonización de todo el sustrato, generando una disminución en la producción de biogás. Por lo tanto, es importante controlar la frecuencia y la intensidad de la agitación, debido a que puede afectar el equilibrio simbiótico entre los distintos tipos de microorganismos (Weber, 2012).

La agitación puede ser mecánica mediante dispositivos sumergidos como agitadores manuales o con motores eléctricos; hidráulica a través de bombas de flujo lento que recircula la biomasa; o neumática mediante la inyección de biogás comprimido dentro de la cámara produciendo burbujeo y el movimiento de la biomasa (Pizano, 2018).

Para biodigestores que operan en el rango mesofílico de temperaturas, se requiere una leve agitación, siendo suficiente un movimiento intermitente realizado por algún dispositivo mecánico manual o automático (Amaya y Sanchez, 2017).

Mientras que, en el caso de trabajar en el rango termofílico, la agitación debe ser continua para mantener una temperatura uniforme en todo el biodigestor. Esto se logra mediante la agitación mecánica por paletas, recirculación del efluente por bombeo o la inyección de biogás desde la parte superior hacia el fondo del biodigestor (Amaya y Sanchez, 2017).

Sin embargo, algunos tipos de biodigestores pueden funcionar bien sin ningún sistema de agitación, basándose solamente en el arrastre de partículas de materia a medida que asciende el biogás (Pizano, 2018).

## **2. Utilización de inóculos**

Los inóculos son materiales que contienen carga bacteriana suficientemente grande y en plena actividad, que sirve para acelerar el proceso de degradación de una porción mucho mayor de materia orgánica (Dinamarca, 2010). En el caso del proceso anaerobio, la utilización de inóculos es necesario para acelerar la etapa de arranque del biodigestor, y así, adelantar el inicio de la producción de biogás (Díaz, Montarcé y Viñas, 2017).

La efectividad de un inóculo depende de su naturaleza y de la proporción añadida al sustrato a degradar. Según su naturaleza, el inóculo apropiado es aquel que posee una alta capacidad para aclimatarse a las condiciones del nuevo medio, una alta capacidad de amortiguamiento de pH y la ausencia de cualquier sustancia inhibitoras (Pizano, 2018). Generalmente, se utilizan lodos provenientes de otros biodigestores que ya se encuentran estabilizados (Díaz et al., 2017).

Otras fuentes de inóculos alternativas son los lodos activados, los lodos provenientes de fosas sépticas, estiércol de vaca, estiércol de cerdo, sedimentos de lagunas y lodos de lagunas anaerobias. Es importante tener en cuenta que la aclimatación del inóculo será más rápida si proviene del mismo material que se va a tratar (Díaz et al., 2017).

Cuanto mayor es la proporción de inóculos, menor es el tiempo de arranque de un biodigestor. Sin embargo, esto significa una limitación cuando se trabaja a grandes escalas. Por lo tanto, resulta necesario conocer el porcentaje de inóculo óptimo, es decir, el mayor porcentaje posible sin comprometer la factibilidad de la escala de trabajo. Los porcentajes de inoculación utilizados en procesos de digestión anaerobia con alto contenido en sólidos suelen oscilar entre 10 y 50% (Dinamarca, 2010).

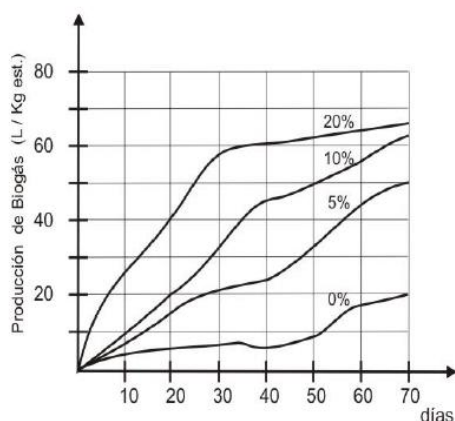


Figura 5: Gráfico de la velocidad de producción de biogás para distintos porcentajes de inóculo Fuente de Elaboración: Dinamarca (2010)

### 3. Carga orgánica volumétrica (COV), velocidad de carga volumétrica y tiempo de retención hidráulica (TRH)

Tanto la carga orgánica volumétrica (COV), como la velocidad de carga volumétrica y el tiempo de retención hidráulica (TRH) son parámetros de diseño de biodigestores. La carga orgánica volumétrica es la cantidad de materia orgánica diaria con la cual se alimenta el biodigestor por metro cúbico. El incremento en la COV implica una reducción en la producción de biogás por unidad de materia orgánica introducida, debiendo encontrarse un valor óptimo técnico/económico para cada instalación y residuo a aprovechar.

Mientras que la velocidad de carga volumétrica se define como el volumen de sustrato que se carga diariamente al biodigestor. La importancia de este parámetro se debe a que determina la capacidad de tratamiento de un biodigestor de un volumen determinado y tiene una relación de tipo inversa con el TRH, dado que a medida que se incrementa la carga volumétrica disminuye el tiempo de retención (Dinamarca, 2010).

Por otro lado, el TRH se define como el tiempo conveniente que debe dejarse el sustrato dentro del biodigestor para que, por medio del proceso biológico, el contenido inicial de sólidos volátiles se reduzca hasta que se logre la estabilización del sustrato. El TRH depende de la materia prima a tratar y de la temperatura de trabajo.

Cuanto mayor sea la temperatura elegida menores serán los TRH requeridos y consecuentemente menor será el volumen del biodigestor necesario para digerir un determinado volumen de sustrato por día. Sin embargo, el mínimo de TRH se alcanza a temperaturas

alrededor de los 55°C, para luego volver a aumentar, junto con la temperatura, hasta que cesa la actividad biológica (Dinamarca, 2010).

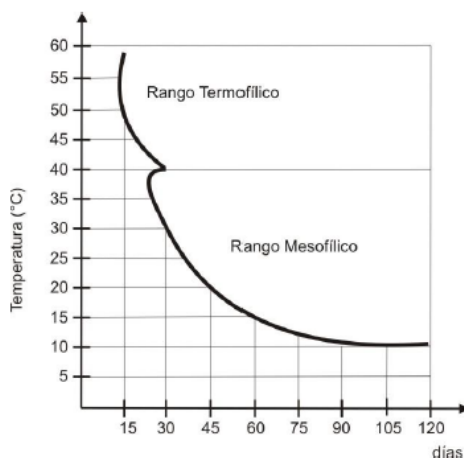


Figura 6: Gráfico del efecto de la temperatura sobre el Tiempo de Retención Hidráulica (TRH) Fuente de elaboración: Dinamarca (2010)

Mientras que la relación con la materia prima se debe a que cuanto mayor es el contenido de moléculas carbonadas resistentes como la celulosa, la degradación completa demandará mayores TRH (Díaz et al., 2017).

El TRH mínimo está dado por la tasa de reproducción de las bacterias metanogénicas debido a que la salida continua del efluente del biodigestor arrastra dichos microorganismos. Si el TRH es muy corto, estos no permanecen el tiempo suficiente en contacto con el sustrato y, por lo tanto, no degradan toda la materia orgánica presente, obteniéndose bajos rendimientos de biogás (Dinamarca, 2010).

Y, con respecto al máximo, la fracción de materia orgánica degradada aumenta al aumentar el TRH, sin embargo, la producción de metano disminuye una vez superado el óptimo (Dinamarca, 2010). Por lo tanto, es necesario determinar el tiempo de retención que optimiza el proceso según el tipo de sustrato y la temperatura de trabajo elegida.

## Productos finales

Como residuos de la digestión anaerobia en los biodigestores, se obtienen dos productos aprovechables: biogás y bio-abono.

## Biogás

El biogás es un gas combustible compuesto por metano (entre un 55% y un 70%), dióxido de carbono, y pequeñas cantidades de otros gases como hidrógeno, nitrógeno, oxígeno y sulfuro de hidrógeno. La composición del biogás va a depender del tipo de sustrato utilizado y de las condiciones del proceso.

*Tabla 5: Principales componentes y concentraciones promedio del biogás. Fuente de elaboración: Amaya y Sánchez (2017)*

Componente	Concentración
Metano (CH <sub>4</sub> )	50 – 75 % (vol)
Dióxido de Carbono (CO <sub>2</sub> )	25 – 45 % (vol)
Vapor de agua (H <sub>2</sub> O)	2-7 % (vol)
Sulfuro de hidrógeno (H <sub>2</sub> S)	20 – 20000 ppm
Nitrógeno (N <sub>2</sub> )	< 2 % (vol)
Oxígeno (O <sub>2</sub> )	< 2 % (vol)
Hidrógeno (H <sub>2</sub> )	< 1 % (vol)

Tabla 6: Principales características del biogás. Fuente de elaboración: Amaya y Sánchez (2017)

Energía disponible en 1 m <sup>3</sup> de biogás	6 - 6.5 kWh
Capacidad calorífica	6000 – 7500 kcal/m <sup>3</sup>
Densidad	1.16 – 1.27 kg/m <sup>3</sup>
Temperatura de combustión	650 – 750°C
Presión dentro de un reactor de biogás	0.05 atm

El biogás, por su alto contenido de metano, es una fuente de energía que puede ser utilizada para los mismos fines que el gas natural o envasado. Su valor energético se encuentra entre 20-25 MJ/m<sup>3</sup> mientras que el gas natural se ubica entre 33-38 MJ/m<sup>3</sup>. El metano es un gas combustible, incoloro e inodoro. La combustión de este gas produce una llama azul y productos no contaminantes, principalmente agua y dióxido de carbono (Tchobanoglous et al, 1994).

Las plantas productoras de biogás utilizan como sustrato residuos agrícolas, residuos urbanos, recortes de biomasa verde, etc., y destinan el gas a la combustión en plantas de cogeneración con motores de combustión interna, o a la producción de energía eléctrica o calórica. Estas plantas, poseen biodigestores herméticos equipados con sistemas de suministro de materias primas, de calefacción, mezcla, etc.

### Bio-abono (Biol)

El bio-abono es una mezcla semi-sólida obtenida de la digestión anaerobia considerado como una fuente importante de nutrientes. Es un lodo compuesto por fracción orgánica que no alcanza a degradarse, materia orgánica agotada y desechos inorgánicos que puede ser utilizado como mejorador de suelos.

Durante la digestión, parte de la materia orgánica es mineralizada, principalmente en CO<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub>, dejando fibras difícilmente digeribles, minerales y productos secundarios, como el amonio (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>). El elevado contenido de nitrógeno en forma de NH<sub>4</sub><sup>+</sup> presente en el bio-abono ayuda a evitar la pérdida por lavado y lixiviación del nitrógeno del suelo, al igual que las pérdidas por volatilización producidas por los procesos de desnitrificación biológica (Tchobanoglous et al., 1994).

Por otro lado, el proceso transforma los sólidos suspendidos del sustrato a un estado de granulometría más fino con mayor desintegración, lo cual facilita su percolación en el suelo al

utilizarlo como fertilizante. Y, en el caso del bio-abono obtenido a partir de sólidos cloacales, los ácidos húmicos presentes contribuyen, a su vez, a mejorar la estructura del suelo y su porosidad, aumentando al mismo tiempo la capacidad de intercambio iónico.

En comparación con los sustratos, el bio-abono producido durante la digestión anaerobia tiene características más favorables, como su olor, consistencia, actividad biológica y contenido de nutrientes. Sin embargo, la calidad química y biológica del lodo va a depender, principalmente, del sustrato utilizado, del TRH y de las condiciones ambientales del proceso (Dinamarca, 2010).

Mientras que la aplicación de los desechos cloacales sobre el suelo puede causar la liberación de olores persistentes debido a compuestos como fenoles, amoníaco y ácidos grasos volátiles, los lodos digeridos contienen en alta concentración sólo los últimos dos compuestos y, gracias a su pH, los ácidos grasos volátiles y el amoníaco se encuentran disociados reduciendo así la tasa de evaporación. Esta reducción de sólidos volátiles genera una viscosidad menor del efluente y un mayor grado de estabilización química, minimizando, a su vez, los olores del bio-abono (Díaz et al., 2017).

Con excepción del azufre, que es mineralizado a sulfuro de hidrógeno y liberado como contaminante en el biogás, el resto de los nutrientes se encuentran en su totalidad en forma accesible para las plantas. Los contenidos de fósforo y potasio presente en la materia prima se mantienen en el efluente luego del tratamiento anaerobio. Mientras que, en el caso del nitrógeno y el carbono, un porcentaje significativo pasa a formar parte del biogás, por lo que el biofertilizante tiene una relación C:N más baja, clasificándose como un buen fertilizante orgánico (Dinamarca, 2010).

Respecto a la contaminación microbiológica, como patógenos y compuestos bioquímicos, generalmente se observa una disminución drástica durante la digestión. Sin embargo, los lodos derivados de plantas de tratamiento requieren de un manejo especial, debido a que la remoción no siempre asegura la higienización del residuo (Díaz et al., 2017).

Por lo tanto, las características biológicas del efluente tienden a limitar su uso como mejorador de suelos. Y, por otro lado, se debe considerar para su utilización, que la composición del mismo no puede ser considerada constante, ya que varía con la materia prima utilizada y el tratamiento previo, durante y después de la digestión.

## Biodigestor

Un biodigestor es un sistema cerrado herméticamente e impermeable que aprovecha la digestión anaerobia de las bacterias para producir biogás. Son utilizados principalmente para la estabilización de lodos provenientes del pre - tratamiento, tratamiento primario y/o tratamiento secundario del agua residual. La estabilización reduce el volumen de lodo para su disposición final y posibilita el aprovechamiento de la energía debida a la generación de biogás.

Los biodigestores son depósitos que se alimentan a partir de sustratos (biomasa), poseen una descarga de efluentes (biol o bioabono) y tienen un sistema de recolección y almacenamiento de



biogás para su aprovechamiento energético. La alimentación que se realiza a un biodigestor es la mezcla de una fase sólida; que viene a ser el sustrato a degradar mediante la digestión anaerobia y de una fase líquida donde normalmente se emplea agua de uso cotidiano.

El volumen necesario para el biodigestor depende del tipo y cantidad de sustrato, de la temperatura de operación, del sistema de agitación y de la carga orgánica volumétrica aplicada (Pizano, 2018). El dimensionamiento del biodigestor comprende el cálculo del volumen de los tanques de alimentación, biodigestores, tanques de descarga, almacenamiento de biogás, lecho de secado de lodos, sistemas de captación y conducción de biogás, sistema de reducción de H<sub>2</sub>S, sistema de agitación, sistemas de seguridad y control, calefacción, aprovechamiento del biogás (generadores, calderas, etc.).

Los biodigestores anaerobios son diseñados por el TRH, el cual debe ser mayor al óptimo para compensar eventuales problemas operacionales como la fluctuación del volumen de lodo producido, la ineficiencia del sistema de mezclado, la variación de la temperatura ambiente, etc. Sin embargo, el parámetro más predominante para el cálculo del volumen del biodigestor es la selección adecuada de velocidad de carga orgánica volumétrica (Dinamarca, 2010).

## Componentes Principales

Los reactores de producción de biogás deben cumplir ciertas características, como proveer una atmósfera anóxica (reductora), tener una salida para el gas, entre otras. A su vez, el rendimiento también depende de su geometría, forma y configuración (Pizano, 2018). Sin embargo, todos los biodigestores poseen ciertos componentes principales:

### 1. Cámara de carga

Es un recipiente en el cual se prepara la mezcla homogénea de materia prima, en determinadas proporciones, que va a ser introducida en la cámara de digestión. Para ello cuenta con un sistema de alimentación de agua para realizar las diluciones y algún mecanismo de agitación para homogeneizar la carga. Esta cámara puede tener distintas formas o tamaños según el diseño del biodigestor adoptado.

El agua agregada puede ser precalentada, para evitar un choque térmico dentro de la cámara de digestión, y además favorecer a la homogenización de la mezcla y a la velocidad de degradación (Pizano, 2018).

### 2. Conducto de carga

El conducto de carga comunica la cámara de carga con la cámara de digestión. La materia prima ya diluida y homogeneizada, circula por acción de la gravedad debido a que la cámara de carga está ubicada por encima del nivel del sustrato de la cámara de digestión. En el caso de biodigestores de gran tamaño, la mezcla se introduce por bombeo.

El conducto de carga tiene que ser convenientemente recto, sin curvas que puedan producir obstrucciones en el ingreso, y que permita también una fácil limpieza. Para su construcción, se

utilizan caños de fibrocemento o de PVC (Policloruro de Vinilo) reforzados, de diámetros entre 160 y 300 mm, según sea el caudal de carga que se desea (Gropelli et al., 2004).

### **3. Cámara de digestión**

La cámara de digestión es el recinto donde se lleva a cabo el proceso biológico anaerobia del sustrato cargado. Independientemente del diseño del biodigestor, la cámara de digestión debe:

- a. Ser impermeable al gas y al agua para evitar que la fracción líquida del sustrato alcance las aguas freáticas y las contamine, y también, evitar pérdidas de biogás que disminuyan la eficiencia y seguridad de todo el sistema, ya que significarían un riesgo de explosión en las cercanías del biodigestor.
- b. Tener aislación térmica para mantener la temperatura de digestión y evitar posibles variaciones. Y para obtener máximos rendimientos energéticos en caso de biodigestores que trabajan a temperaturas mesofílicas y termofílicas.
- c. Minimizar la relación superficie/volumen con el fin de economizar los costos de material y mano de obra, así como también reducir la superficie de intercambio de calor.
- d. Tener estabilidad estructural capaz de soportar cargas estáticas y dinámicas.

### **4. Conducto de descarga**

El conducto de descarga comunica la cámara de digestión con la cámara de descarga, posibilitando la extracción del material estabilizado (efluente) que ya ha cumplido con el TRH determinado. El movimiento del efluente puede ser por principio de vasos comunicantes o, en el caso de biodigestores de gran tamaño, por bombeo. Al ingresar una cantidad determinada de mezcla a digerir, se descarga simultáneamente un volumen igual de efluente.

Para su construcción, se suelen utilizar las mismas consideraciones mencionadas para el conducto de carga.

### **5. Cámara de descarga**

La cámara de descarga es el recipiente en el cual se deposita el efluente obtenido del proceso. Esta cámara puede tener distintas formas o tamaños según el diseño del biodigestor adoptado. Como mínimo deberá tener un volumen 2 a 3 veces superior al volumen de descarga diaria (Pizano, 2018).

### **6. Gasómetro**

El gasómetro es un recinto o cámara donde se almacena el biogás generado que no es utilizado inmediatamente. El volumen del gasómetro depende del consumo diario y generalmente se diseña de volumen no menor al 50% de la producción diaria de biogás. Puede estar incorporado al biodigestor oficiando como cubierta superior o separado del mismo (Dinamarca, 2010).

### **7. Agitador**

El agitador es necesario para lograr un mayor rendimiento del tratamiento ya que: mezcla continuamente la biomasa fresca con la biomasa digerida; mejora la distribución, la mezcla de nutrientes y el calor; reduce la formación de costras, sedimentos y flóculos de biomasa que pueden sedimentarse en el fondo del biodigestor; y mejoran y facilitan la extracción de biogás (desprenden las burbujas de biogás) (Pizano, 2018). El tipo más conveniente de agitador va a depender del diseño del biodigestor y del tipo de sustrato a degradar.

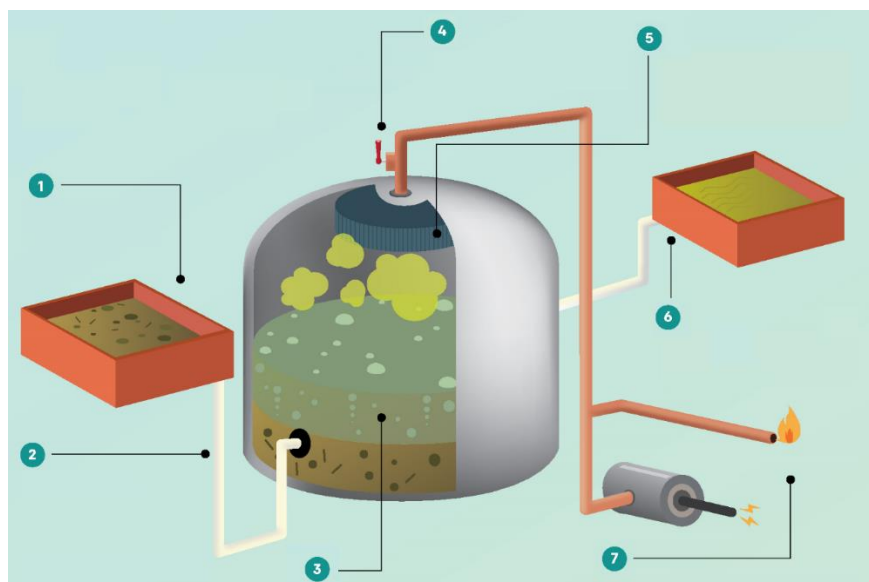


Figura 7: Esquema de los componentes principales del proceso de generación de biogás (1: Cámara de carga, 2: Conducto de carga, 3: Cámara de digestión, 4: Conducto de descarga, 5: Filtro de gases corrosivos, 6: Cámara de descarga y 7: Salida de biogás). Fuente de elaboración: Pizano (2018)

## 8. Lecho de Secado

Los lodos que se extraen del biodigestor deben ser secados para su aplicación como fertilizante orgánico o para su transporte al relleno sanitario. Las ventajas de este proceso de secado son: es una estructura simple, de costos bajos de construcción, bajo consumo de energía eléctrica, baja sensibilidad a la variabilidad del lodo y no requiere de incorporación de químicos.

## Clasificaciones

La elección de la tecnología más conveniente dependerá de los objetivos de tratamiento, de las características de la materia prima a tratar, de las restricciones legales, técnicas y del medio físico natural, y de la relación costo de inversión-beneficios (Dinamarca, 2010).

Algunos criterios de clasificación de biodigestores según criterios de operación son:

Tabla 7: Clasificación de biodigestores según criterios de operación. Fuente de elaboración: Dinamarca, 2010

Criterio	Clasificación
Tipo de alimentación	Continuo
	Semicontinuo
	Discontinuo

<b>Forma geométrica de la cámara de digestión</b>	<b>Cilíndricos, verticales u horizontales</b>
	<b>Esféricos</b>
	<b>Ovoides o tipo balón</b>
	<b>Paralelepípedos, verticales u horizontales</b>
<b>Número de fases</b>	<b>De una fase</b>
	<b>De dos fases</b>
<b>Posición respecto de la superficie del terreno</b>	<b>Subterráneos</b>
	<b>Semienterrados</b>
	<b>Superficiales</b>

## **1. Tipo de Alimentación**

### **a. Continuo**

Los biodigestores continuos desarrollan su actividad de manera ininterrumpida, son cargados y vaciados constantemente. Se vacían automáticamente cuando el material cargado ha sido digerido y posteriormente se rellenan con nuevo material. La producción de gas es constante y mayor que en las plantas discontinuas (Weber, 2012).

En este tipo de reactores, tanto el sustrato como los microorganismos, deben mantener una distribución uniforme de concentraciones, lo cual se puede lograr mediante un sistema de agitación (mecánico o neumático) (Secretaría de Energía de México, 2017).

A su vez, el tiempo de retención hidráulica (TRH) en los biodigestores continuos se define como el cociente entre el volumen del biodigestor y la velocidad de carga volumétrica. Este parámetro varía entre un día y un mes, y se emplea cuando la materia prima disponible es abundante y su generación es continuada en el tiempo (Secretaría de Energía de México, 2017).

### **b. Semicontinuo**

Los biodigestores semicontinuos son utilizados para operar dos materias primas con diferente tiempo de digestión o cuando la generación de la materia prima es variable en el tiempo por lo que se cargan de forma intermitente (Weber, 2012).

El período de carga del sustrato es dominado por el rendimiento en la producción de gas. Se realiza una primera carga y conforme disminuya el rendimiento de generación de gas, se va agregando nueva materia prima y descargando el efluente en igual volumen (Secretaría de Energía de México, 2017).

### **c. Discontinuo**

Los biodigestores discontinuos no se rellenan de biomasa fresca hasta que la biomasa que se introdujo el tratamiento anterior haya fermentado (TRH de 20 a 60 días), se haya recogido el gas producido, se haya almacenado y se haya vaciado la materia sólida no digerida (Secretaría de Energía de México, 2017).

En este tipo de biodigestores el TRH coincide con el tiempo de permanencia del sustrato dentro del biodigestor antes de vaciar el mismo. Es decir, el tiempo de retención fija se calcula

en función del tipo de materia prima y su capacidad de producción de gas. Los biodigestores discontinuos se usan cuando la disponibilidad de materia orgánica es limitada o intermitente (Weber, 2012).

## **2. Forma geométrica de la cámara de digestión**

Las formas geométricas pueden ser muy variadas, pero existen cinco formas básicas de las cuales derivan las demás: cilíndrica vertical u horizontal, esférica, ovoide, paralelepípeda vertical u horizontal y domo o cúpula. Cada una posee sus ventajas y desventajas, pero no existen evidencias que hayan demostrado que la forma de la cámara influye en la producción de biogás (Dinamarca, 2010).

## **3. Número de fases**

### **a. Biodigestores de una fase**

Los biodigestores de una fase desarrollan la digestión anaeróbica en una sola cámara de digestión. Las principales ventajas son su simplicidad, bajo costo y fácil operación. Mientras que una de las desventajas más importantes es que toda la comunidad bacteriana convive bajo las mismas condiciones ambientales durante todo el proceso, lo cual no resulta óptimo para el desarrollo de todas las poblaciones. (Dinamarca, 2010).

### **b. Biodigestores de dos fases**

En los biodigestores de dos fases, la digestión anaerobia se lleva a cabo en dos biodigestores en serie. En el primero se desarrollan las etapas de hidrólisis y fermentación, y en el segundo la acetogénica y la metanogénica (Dinamarca, 2010).

Este tipo de biodigestores permite desarrollar de manera más controlada las distintas etapas de la digestión anaerobia y extraer los sólidos no diferidos antes de pasar a la etapa metanogénica. Sin embargo, estos biodigestores aún no se han perfeccionado para emplearlos en grandes escalas (Dinamarca, 2010).

## **4. Posición respecto de la superficie del terreno**

### **a. Biodigestores subterráneos**

Los biodigestores subterráneos se recomiendan para aquellas zonas geográficas donde predominan amplitudes térmicas considerables, con el fin de moderar los cambios de temperatura (Dinamarca, 2010).

Este tipo de biodigestores pueden estar contruidos a partir de geomembranas u hormigón. Los biodigestores con geomembranas se utilizan principalmente para el tratamiento de grandes cantidades diarias de residuos. La membrana debe encontrarse completamente sellada y puede estar formada por polietileno de alta densidad o PVC. Las ventajas de ambos materiales son la alta resistencia a diferentes condiciones climáticas y la flexibilidad frente a las diferentes presiones que surgen de la producción de biogás. A su vez, poseen un bajo costo de producción y es de fácil instalación (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, 2019).

Tanto la permeabilidad del polietileno como del PVC no constituye un problema frente a las posibles fugas de metano que se podrían generar. A su vez, ambos materiales han demostrado ser eficientes en el proceso de reducción de la materia orgánica. Sin embargo, la diferencia de ambos materiales radica en su durabilidad. El polietileno de alta densidad a pesar de ser ligero y de bajo costo presenta una durabilidad más baja que la geomembrana compuesta por PVC. La geomembrana de PVC presenta una mayor durabilidad, lo que se traduce en un mayor costo del biodigestor (Arrieta-Palacios, 2016).

Los biodigestores de hormigón, por otro lado, se utilizan normalmente a escala industrial. Requiere de materiales de calidad, así como también de mano de obra para su construcción por lo que suelen ser más costosos (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, 2019).

#### **b. Biodigestores semienterrados**

Los biodigestores semienterrados son utilizados para aprovechar la aislación térmica del suelo. También se utilizan cuando existen condicionantes geológicos-hidrogeológicos óptimas en el terreno donde se quiere instalar el biodigestor, como altos niveles freáticos o suelos poco rocosos que favorecen la excavación (Dinamarca, 2010).

#### **c. Biodigestores superficiales**

En el caso de grandes instalaciones, se recomienda que los biodigestores se dispongan sobre el nivel del terreno, contando con un sistema de calefacción y aislación que mantengan la temperatura elegida de trabajo, evitando el efecto de los cambios de temperatura del medio ambiente (Dinamarca, 2010).

La cantidad de biogás y la estabilidad del proceso son una de las ventajas de utilizar biodigestores superficiales. Mientras que una de las desventajas de estas instalaciones es la exposición directa al exterior, lo cual produce daños de corrosión en los materiales utilizados (Dinamarca, 2010).

### **Tratamiento Posterior del Biogás y Bio-abono**

Los productos finales de la digestión anaerobia son biogás y bio-abono. El biogás, a pesar de poseer una elevada capacidad calorífica, no es absolutamente puro, contiene partículas y trazas de otros gases. Todas estas impurezas deben ser removidas dependiendo del tipo de utilización que tendrá el biogás para brindarle un valor agregado, a través de un tratamiento de purificación.

Es importante la purificación por dos razones principales: para aumentar el poder calorífico del biogás y cumplir los requerimientos de algunas aplicaciones de gas (motores, calderas, celdas de combustibles, etc.). El tratamiento completo implica la eliminación de gran parte del CO<sub>2</sub>, vapor de agua y otros gases trazas (Gropelli et al., 2004).

El primer problema que surge al plantear la purificación del biogás es su alta composición de CO<sub>2</sub>, la cual puede oscilar entre 25-45% dependiendo del sustrato y del grado de avance de la reacción dentro del biorreactor utilizado. Si bien el CO<sub>2</sub> no genera un riesgo por sí mismo, al encontrarse en altas proporciones genera una disminución notable del poder calorífico del biogás. Esto se debe a que el CO<sub>2</sub> es el producto final de la oxidación del carbono y por ello no puede combustionar (Secretaría de Energía de México, 2017).

El vapor de agua también debe ser removido del biogás con el fin de proteger los componentes del equipo de uso de biogás contra desgaste y daños por corrosión. La cantidad de vapor de agua que puede contener depende de su temperatura. La remoción de agua del biogás se da por: secado por condensación, secado por adsorción y secado por absorción.

El otro componente que debe eliminarse de la corriente de biogás es el sulfuro de hidrógeno (H<sub>2</sub>S). La reacción del sulfuro de hidrógeno con el agua en presencia de oxígeno produce ácido sulfúrico, el cual exige que los materiales utilizados tengan a una elevada resistencia a la corrosión (Secretaría de Energía de México, 2017).

Para aumentar la durabilidad de los componentes del sistema y cumplir los requisitos de calidad de los fabricantes de plantas de cogeneración y calderas es necesario que la cantidad de sulfuro de hidrógeno sea reducida. Los procesos de remoción de H<sub>2</sub>S, o desulfuración, pueden ser biológicos, químicos o físicos; la elección del proceso, o la combinación de procesos se define en función del uso del biogás tratado (Díaz et al., 2018).

Por otro lado, el bio-abono proveniente de la producción de biogás también tiene un valor comercial. Es una solución orgánica estabilizada que tiene valor como fertilizante debido a su menor relación Carbono/Nitrógeno, su olor muy inferior con respecto al sustrato original y su bajo costo. A su vez, cuenta con una mayor concentración de ácidos húmicos y de cationes amonio que contribuyen a evitar la desnitrificación del suelo, a aumentar su porosidad y mejorar su estructura (Peralta et al., 2002).

Este fertilizante, puede ser usado de forma inmediata. Sin embargo, es recomendable realizarle una evaluación de la presencia de organismos patógenos para disminuir los riesgos a la salud pública en el momento de aplicación.

## Usos del Biogás

A través del proceso de combustión, el biogás puede recuperarse para diversos fines y su uso puede ser directo o indirecto. El proceso es una reacción química en la cual ocurre una rápida oxigenación/oxidación del biogás. La combustión completa puede ser representada por la siguiente ecuación química:



El requerimiento de aire mínimo sería del 21% pero esta cifra debe ser aumentada para lograr una buena combustión. La relación aire-gas puede ser optimizada aumentando la presión

del aire. Se debe tener especial precaución en este aspecto, para lo cual se debe calcular las pérdidas de presión (Tchobanoglous et al., 1994).

Dentro de una Planta de Tratamiento de Aguas Residuales se puede utilizar de diferentes maneras. La mejor opción de aprovechamiento debe elegirse teniendo en cuenta los aspectos económicos, técnicos y ambientales; y el biogás no aprovechado debe ser retirado del sistema de forma adecuada y segura.

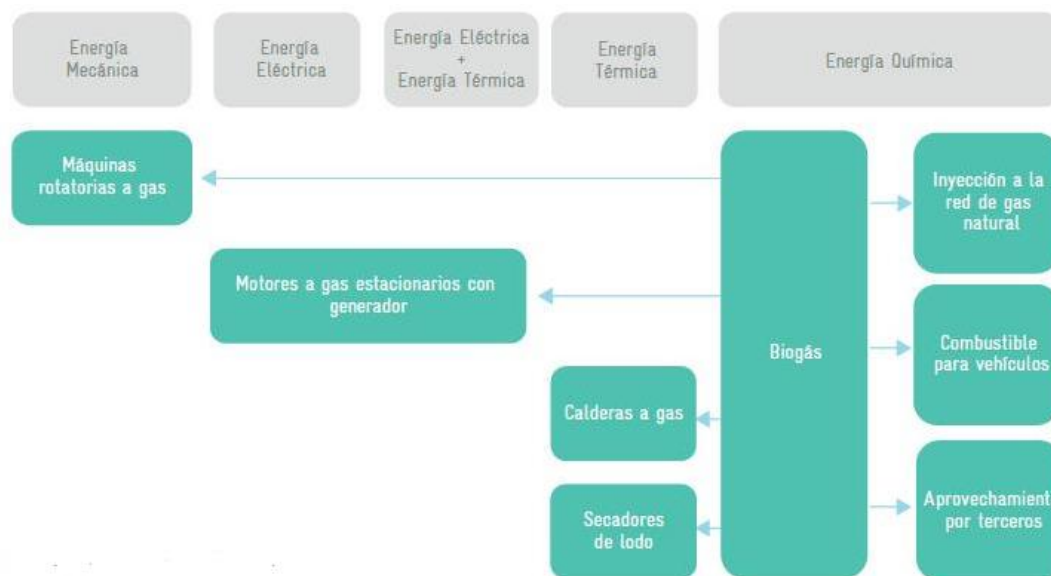


Figura 8: Esquema de distintos usos del biogás. Fuente de elaboración: Secretaría de Energía de México (2017)

Existen diversas opciones para la utilización del biogás. Dentro de éstas destacan la producción de calor o vapor, generación de electricidad y combustible de vehículos.

### Producción de calor o vapor

El uso más simple del biogás es para la obtención de energía térmica (calor). Para la generación de calor, el biogás debe presentar un contenido mínimo de metano de 50%. La conversión en calor de energía química contenida en el biogás se realiza por medio de la generación de agua caliente o vapor (González Velasco, 2009).

En las calderas se utilizan generalmente quemadores de combustibles duales, los cuales pueden quemar otros gases o aceites combustibles además de biogás. De esta forma, la escasez de biogás puede ser compensada por otras fuentes de energía convencionales. La eficiencia de la caldera de gas es generalmente superior al 90% (Amaya y Sanchez, 2017).

La combustión de una mezcla de gas natural y biogás demanda sólo pequeñas adaptaciones en la caldera. Cuando ya está previsto el uso del biogás como combustible principal, los sistemas de alimentación y quemador deben ser modificados con los objetivos de compensar el poder calorífico inferior del biogás en comparación con el gas natural (Amaya y Sanchez, 2017).



Como el biogás se acumula de forma continua y la demanda de calor está sujeta a las fluctuaciones estacionales, ocurre excedentes de biogás, el cual, por cuestiones de seguridad y para minimizar la emisión de contaminantes a la atmósfera, debe enviarse a un quemador (González Velasco, 2009).

### Generación de electricidad o combinación de calor y electricidad

Los sistemas combinados de calor y electricidad utilizan la electricidad generada por el combustible y el calor residual que se genera. Algunos sistemas combinados producen principalmente calor y la electricidad es secundaria. Otros sistemas producen principalmente electricidad y el calor residual se utiliza para calentar el agua del proceso. En ambos casos, se aumenta la eficiencia del proceso en contraste si se utilizara el biogás sólo para producir electricidad o calor (Carta González et al., 2009).

Un sistema de cogeneración es la generación secuencial o simultánea de múltiples formas de energía útil (en general, mecánica y térmica) en un único sistema integrado. Los sistemas de cogeneración consisten en ciertos números de componentes individuales según la tecnología utilizada, pero en todo caso siempre quedan definidos por un accionador primario, que es el equipo que mueve todo el sistema. Los accionadores primarios también pueden emplearse para mover equipos rotatorios, tales como compresores, bombas y ventiladores (Carta González et al., 2009).

La energía térmica generada por el sistema se puede utilizar en aplicaciones de proceso directa o indirectamente para producir vapor, agua caliente, aire caliente para secado o agua fría para la refrigeración de otros procesos.

La unidad de generación de electricidad en una Planta de Tratamiento debe funcionar en paralelo a la red; la electricidad producida se inyecta en la red pública sólo cuando excede la demanda de la planta, aunque puede presentarse el caso de plantas que operan aisladas de la red y ceden el excedente a determinados consumidores.

### Combustible para vehículos

El uso del biogás es posible y en la realidad se ha empleado desde hace bastante tiempo. Para esto, el biogás debe tener una calidad similar a la del gas natural, para usarse en vehículos que se han acondicionado para el funcionamiento con gas natural. La mayoría de los vehículos de esta categoría han sido equipados con un tanque de gas y un sistema de suministro de gas, además del sistema de gasolina normal de combustible (Secretaría de Energía de México, 2017).

Para que pueda usarse es necesario tratar el biogás hasta el nivel exigido para su aprovechamiento. En la selección de la tecnología para el aprovechamiento de biogás es necesario considerar no sólo su poder calorífico y su composición, sino también otras propiedades, como la presencia de humedad, presión, contaminantes, gases inertes y gases

ácidos, estos últimos responsables de la eventual corrosión de los equipos y la emisión de contaminantes (Gropelli et al., 2004).

Por lo tanto, si la calidad del biogás crudo no cumple los requisitos para su aprovechamiento energético es preciso algún tipo de tratamiento, que podría ser sencillo en caso de aplicaciones como la combustión directa, en la que prácticamente sólo se requiere la remoción de condensados (Gropelli et al., 2004).

### Beneficios Ambientales

La implementación de sistemas de tratamientos de efluentes efectivos, así como una buena gestión de los residuos que los tratamientos generan, mejora la calidad del ambiente circundante. El concepto de ambiente es un sistema que interrelaciona tres subsistemas: natural, económico y social.

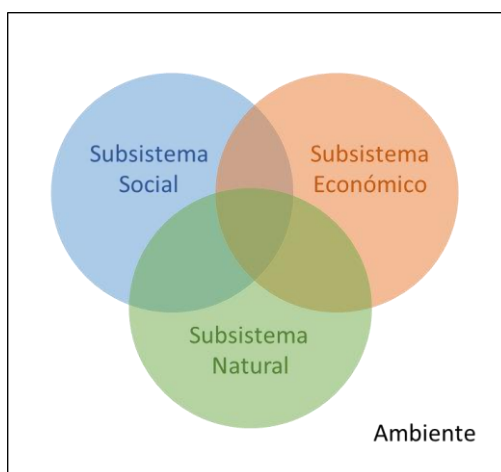


Figura 9: Esquema de interrelación entre subsistemas (social, económico y natural) en el ambiente.

La implementación de tecnologías de digestión anaerobia permite obtener beneficios naturales, económicos y sociales. Basándose en los tres subsistemas planteados, se puede garantizar que el tratamiento de la biomasa para la producción de biogás genera impactos positivos en el ambiente.

### Beneficios en el Subsistema Natural

Como se analizó previamente, el efecto más evidente del proceso de digestión anaerobia es la eliminación de gran parte de la materia orgánica transformándola en biogás. Al desarrollarse en un sistema cerrado, el proceso permite capturar el biogás, el cual puede ser utilizado en la producción de energía.

A diferencia de los procesos aerobios, la digestión anaerobia tiene una gran demanda energética para llevarse a cabo, pero su balance energético resulta positivo. Mientras que en la degradación aerobia se generan compuestos de bajo poder energético (como  $\text{CO}_2$  y  $\text{H}_2\text{O}$ ), el tratamiento anaerobio genera productos con alto poder energético (como el metano). A su vez,

se estima que la pérdida de energía de un proceso aerobio es aproximadamente veinte veces superior al de un proceso anaerobio (Varnero Moreno, 2011).

La concentración del metano es un factor determinante en el potencial energético del biogás (Secretaría de Energía de México, 2017). Debido a la potencialidad del CH<sub>4</sub>, como GEI, su recuperación y aprovechamiento es una actividad prioritaria para crear una matriz energética más limpia (Dinamarca, 2010).

Para evaluar los impactos de la emisión de los diferentes gases de efecto invernadero, se estableció, a partir del Protocolo de Kyoto, la asignación de factores que representarían una medida de sus potenciales efectos en el calentamiento global. Para ello se utilizó el CO<sub>2</sub> como gas de referencia, creando como unidad de medición universal el CO<sub>2</sub> equivalente. (Varnero Moreno, 2011).

La siguiente tabla incluye los Potenciales de Calentamiento Global (PCG) en tres intervalos de años y está adaptada del Quinto Informe realizado por el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC por su sigla en inglés):

Tabla 8: Potencial de Calentamiento Global (PCG) de los principales Gases de Efecto Invernadero (GEI). Fuente de elaboración: (IPCC, 2007)

Gases de Efecto Invernadero	Potencial de Calentamiento Global		
	20 años	100 años	500 años
Dióxido de Carbono (CO <sub>2</sub> )	1	1	1
Metano (CH <sub>4</sub> )	72	25	7,6
Óxido Nitroso (N <sub>2</sub> O)	289	298	153

A partir de esta unidad de medición, es posible establecer la cantidad equivalente de dióxido de carbono que se reduciría al capturar y utilizar el biogás producido:

$$CO_2 \text{ eq} = \%V_{CH_4} * Q * \rho_{CH_4} * F$$

*CO<sub>2</sub> eq:* Cantidad de CO<sub>2</sub> equivalente generadas (tCO<sub>2</sub> eq)

*%V<sub>CH<sub>4</sub></sub>:* Porcentaje del volumen estimado de metano en el biogás

*Q:* Caudal de biogás estimado (m<sup>3</sup>/año)

*ρ<sub>CH<sub>4</sub></sub>:* Densidad de metano (t/m<sup>3</sup>)

*F:* Factor de potencial de calentamiento del CH<sub>4</sub> (tCO<sub>2</sub>/tCH<sub>4</sub>)

Figura 10: Fórmula de toneladas equivalentes de CO<sub>2</sub>. Fuente de elaboración: Panesso, Cadena, Mora Flórez y Ordoñez, 2011

A su vez, la producción neta de energía a partir de la materia orgánica contribuye a crear una matriz energética más limpia sustituyendo el uso de energías basadas en combustibles fósiles por una energía alternativa. Estudios de análisis de ciclo de vida muestran que la producción energética a partir de biogás supone un ahorro en combustibles fósiles de unos 2 kg CO<sub>2</sub> -eqv/m<sup>3</sup> biogás (Vicent et al., 2018). Esta disminución del uso de combustibles fósiles también reduce la emisión de GEI a la atmósfera.

Otro beneficio natural importante de las plantas de biogás es la estabilización y homogeneización de los residuos orgánicos, disminuyendo aproximadamente el 50% del contenido sólido volátil, lo cual facilita el manejo y disposición final de los lodos. De esta forma se reducen significativamente los costos de la disposición de residuos orgánicos, e incluso se podrían obtener sub-productos con valor agregado (fertilizante orgánico) (Dinamarca, 2010).

Aunque durante la digestión anaerobia se reduce gran cantidad de sólidos, los lodos restantes pueden utilizarse como biofertilizantes ya que el proceso le otorga características que mejoran su infiltración en el suelo, como la conservación de gran parte de los nutrientes del efluente, la mineralización del nitrógeno orgánico, la reducción del tamaño de las partículas y de la viscosidad. Estas características permiten minimizar los impactos negativos que los barros pueden generar en el suelo, aire y los cuerpos de aguas (Varnero Moreno, 2011).

A su vez, mediante la utilización de los lodos estabilizados como fertilizantes se reduce el uso de fertilizantes químicos, cuya producción y aplicación también tiene consecuencias negativas en el ambiente.

Por último, la digestión anaerobia es un proceso natural que, aunque requiere del medio propicio para que ocurra, no necesita grandes cantidades de nutrientes ni reactivos químicos. Las características del agua residual permiten mantener un pH adecuado y cubrir las necesidades nutricionales de los microorganismos (ONU, 2017).

### Beneficios en el Subsistema Económico

La incorporación de biodigestores para la producción de biogás permite reciclar los lodos y transformarlos en un recurso con valor económico. La generación de energía, eléctrica o térmica, a partir del biogás permite obtener una rentabilidad o reducir los gastos de servicios (eléctrico o térmicos). Además de los beneficios energéticos del biogás, el bio-fertilizante producto de la digestión anaerobia, por ser un buen mejorador de suelos, también es apto para ser comercializado.

Por ser un producto que se genera de manera constante, las ganancias económicas pueden ser sostenibles a largo plazo. Y, al ser una fuente de energía alternativa que disminuye el uso de combustibles fósiles y la emisión de GEI, su financiamiento puede ser promovido por entes que buscan implementar un enfoque sustentable en la gestión ambiental de las organizaciones (ONU, 2017).

El principal problema de la gestión de lodos es su transporte a los rellenos sanitarios, esta etapa es un gasto para las estaciones depuradoras que no poseen tratamientos que estabilicen la materia orgánica. La instalación de un biodigestor en las plantas de tratamientos de aguas residuales eliminaría la etapa de transporte y sus gastos.

A su vez, un biodigestor puede instalarse en cualquier sector del país garantizando, mientras haya producción de lodos, la generación continua de biogás y bio-abono, y, por lo tanto, de sus ganancias. El aprovechamiento del biogás producido en los digestores sólo presenta interés

económico cuando se trata de grandes plantas. Su conversión en electricidad resulta interesante en el caso de plantas de capacidad equivalente a 20.000 habitantes (Ruiz, Alvarez y Sato, 2002).

Por otro lado, la construcción y operación de los biodigestores es relativamente simple, presenta una gran versatilidad pudiendo adaptarse a diferentes escalas. Además, su funcionamiento es independiente de las condiciones climáticas. Por estas características, los procesos anaerobios son una gran alternativa de tratamiento en países con bajos presupuestos (Ruiz et al., 2002).

A pesar de los beneficios económicos planteados, la viabilidad de las plantas de biogás también se verá influenciada por la relación costo-beneficio presente en las distintas zonas y/o actividades. Por lo tanto, es necesario realizar para cada caso un análisis económico integral (ONU, 2017).

### Beneficios en el Subsistema Social

Al ser sistemas descentralizadas de producción de energía, las plantas de biogás acarrearán beneficios sociales tanto para los productores de biogás como para las zonas lindantes.

Como se desarrolló previamente, la digestión anaerobia es considerada un proceso de higienización, el cual reduce el volumen de lodos y disminuye la concentración final de compuestos, como los ácidos grasos volátiles (AGVs), responsables de los malos olores que los barros producen (Secretaría de Energía de México, 2017). Estas características generan una aceptación social de la implementación de la digestión anaerobia como tratamiento.

A su vez, aunque la eliminación de agentes patógenos es parcial, la incorporación de un biodigestor para el tratamiento de barros disminuye la proliferación de insectos y vectores sanitarios que pueden afectar a los habitantes lindantes.

Otro de los beneficios sociales, es la generación de puestos de trabajo y la aplicación de insumos y servicios nacionales. Debido a la demanda de mano de obra calificada para su construcción, operación y mantenimiento de las instalaciones, la incorporación de un biodigestor aumenta los niveles de empleo (Castro Soto, 2016).

Por último, al fomentar una matriz energética más limpia, las Estaciones Depuradoras de Aguas Residuales con plantas de biogás pueden ser distinguidas, diferenciadas y reconocidas como servicios con conciencia ambiental (Castro Soto, 2016).

## CAPÍTULO IV: Análisis Preliminar

### Sistema de saneamiento de aguas residuales en Mar del Plata

En Argentina, el consumo medio a nivel nacional de agua es del orden de los 180 L/hab/día superando el promedio recomendado por la Organización Mundial de la Salud (OMS)<sup>1</sup>. Mientras que en la ciudad de Mar del Plata, el consumo por habitante es de 366 L/hab/día (Mar del Plata entre Todos, 2018), tres veces más de lo establecido por la OMS.

Los servicios de agua corriente, saneamiento y el mantenimiento de los desagües pluviales en el Partido de General Pueyrredón están a cargo del municipio a través de Obras Sanitarias (OSSE). El área cubierta por los desagües pluviales abarca el 80% de la zona urbana, con una extensión de 331,6 km de conductos a tender y 3037 bocas de tormenta (Mar del Plata entre Todos, 2018).

Por otro lado, la cobertura del servicio cloacal corresponde al 83,91% de la ciudad (aproximadamente 591.706 habitantes) (Obras Sanitarias S.E. MGP (OSSE) y Universidad Tecnológica Nacional (UTN), 2017). El efluente cloacal urbano está integrado por las descargas provenientes de viviendas (residenciales) y comercios, industrias y otros usuarios (no residenciales) que están conectados a las redes colectoras. A su vez, las descargas de los líquidos cloacales de la localidad de Batán, Parque Industrial y la Cárcel de Batán también están conectadas al sistema de desagües atendido por OSSE.

El sistema de saneamiento se inició en 1920 e incluye 4 colectores máximos y 14 estaciones elevadoras que, hasta el 2018, se descargaban en la Planta de Pretratamiento Ing. Baltar (con capacidad de tratar 300.000 m<sup>3</sup> por día) ubicada en la zona de Camet, a la altura del km 507 de la Ruta Provincial N°11. Los efluentes que llegaban a la planta eran sometidos al proceso de tamizado a través de una malla de acero inoxidable de 0,5 mm de abertura, el cual retenía una fracción importante de los sólidos contendios en el líquido cloacal (25 Tn/diarias con un contenido de humedad del 80%). Dichos sólidos eran sometidos a un proceso de deshumectación y acondicionamiento para su posterior tratamiento en una planta de estabilización aerobia. A su vez, la planta contaba con una captación, transporte y tratamiento de los gases que se desprenden del proceso.

En el año 2014, se inauguró el Emisario Submarino (ES), el cual descarga los desechos alrededor de los 4 km de la línea de costa. El objetivo del emisario es asegurar una disposición final de los líquidos residuales que genere un menor impacto negativo en el ambiente.

La capacidad de las instalaciones y el nivel de pretratamiento que brindaba la Planta Ing. Baltar no era suficiente para asegurar la disposición final correcta de los efluentes a través del Emisario Submarino. A su vez, las emanaciones de olores por la descargas de efluentes

---

<sup>1</sup> El consumo establecido por la OMS es de 100 L de agua por día por persona.

industriales (tanto a la red cloacal como a través de camiones atmosféricos), generaban constantes reclamos de los vecinos. Estas razones, junto con la corrosión de las instalaciones de la Planta, llevaron a realizar un proyecto de construcción de la Estación Depuradora de Aguas Residuales de la ciudad de Mar del Plata.

El 17 de agosto de 2018 se inauguró la EDAR, la cual tiene como objetivo acondicionar el efluente cloacal de la ciudad de Mar del Plata, para una adecuada condición de descarga en el mar a través del emisario submarino, logrando reducir el impacto contaminante a los niveles requeridos para preservar la calidad recreativa de las aguas del frente costero local.

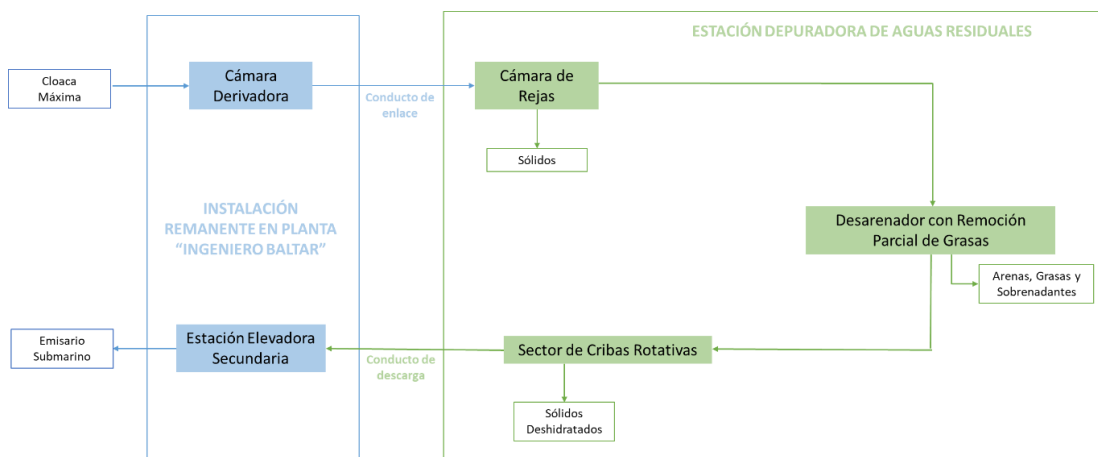


Figura 11: Esquema de instalación remanente en Planta "Ingeniero Baltar" y Estación Depuradora de Aguas Residuales (EDAR), Mar del Plata. Fuente de elaboración: OSSE y UTN (2017)

### Estación Depuradora de Aguas Residuales (EDAR)

La Estación Depuradora de Aguas Residuales (EDAR) se encuentra sobre la Autovía N°11 (Ruta Provincial N° 11), a 600 metros de la Planta "Ingeniero Baltar". La planta es lindera con el barrio Camet-Parque Peña hacia Mar del Plata y con el barrio Félix U. Camet hacia Santa Clara del Mar.

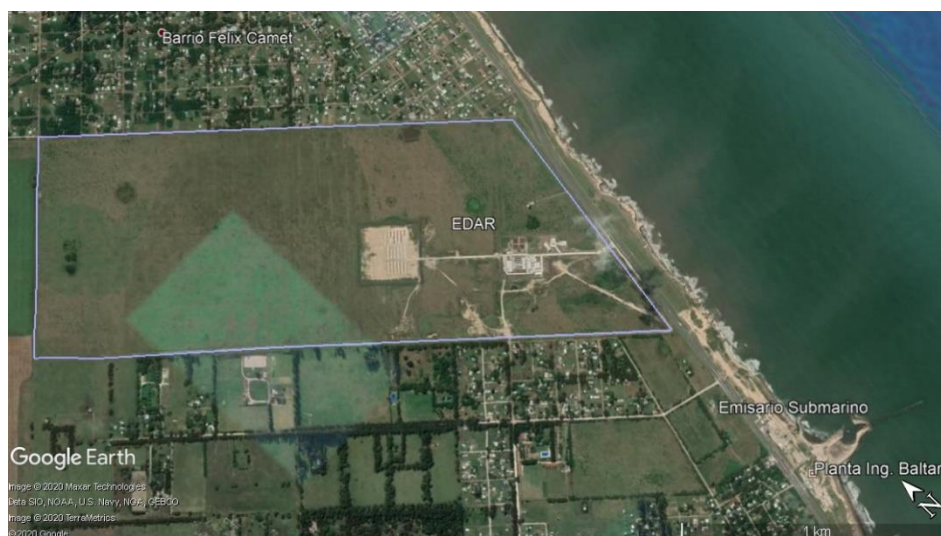


Figura 12: Mapa de la ubicación de la EDAR, el Emisario Submarino y la Planta de Tratamiento "Ingeniero Baltar"

Junto con el emisario submarino, la EDAR tiene como objetivo separar y extraer sólidos, arenas, grasas y aceites cloacales, para poder mejorar la calidad recreativa de las playas y minimizar el impacto negativo en el ambiente de los efluentes cloacales. A su vez, la extracción y la eliminación de los residuos, evita la sedimentación y la ruptura del emisario submarino (con la instalación de la EDAR, se redujo la sedimentación del 60 al 40% (OSSE y UTN, 2017)).

La EDAR tiene un caudal máximo de diseño de 8 m<sup>3</sup>/s y de trabajo de 6 m<sup>3</sup>/s, pero, en la actualidad, trabaja con un promedio de 2-3 m<sup>3</sup>/s de aguas residuales durante la temporada no estival. Previo a su construcción, se realizó un Informe de Parámetros Básico de Diseño, en el cual se definen los caudales característicos y la población servida a lo largo del período de diseño para cada temporada (OSSE y UTN (2017)):

*Tabla 9: Caudal máximo horario y población servida durante la etapa no estival (marzo a diciembre). Fuente de elaboración: OSSE y UTN (2017)*

	Año 0	Año 10	Año 20
Caudal máximo horario (m <sup>3</sup> /s)	3,4	3,7	4,2
Población servida	555.232	674.804	790.508

*Tabla 10: Caudal máximo horario y población servida durante la etapa estival (enero y febrero). Fuente de elaboración: OSSE y UTN (2017)*

	Año 0	Año 10	Año 20
Caudal máximo horario (m <sup>3</sup> /s)	6,4	7,0	8,0
Población servida	867.242	1.000.837	1.189.956

Los principales efluentes provienen del puerto y la red cloacal domiciliaria de la ciudad. En el 2019, se sumó la red de los barrios costeros incluyendo Santa Clara del Mar. Efluentes cloacales e industriales son tratados en la planta de manera conjunta, están compuestos por descargas domésticas, de instituciones, establecimientos comerciales, establecimientos gastronómicos e industrias (mayormente de la pesca y alimenticias).

Por otro lado, la ciudad cuenta con un sistema de desagües separativo, es decir, que la infraestructura pluvial y cloacal funcionan de forma independiente. Sin embargo, los días con altas precipitaciones, el canal pluvial puede llegar a rebalsar e ingresar al canal cloacal y, en los casos en los que los límites de ingreso son excedidos, se ven obligados a depositar el excedente en la costa.

Según los análisis de caracterización fisicoquímica realizados por OSSE, contiene elevados contenidos de aceites y grasas previo a su ingreso a la planta de pretratamiento, producto de vuelcos puntuales en el sistema cloacal. Los picos de grasa se presentan en forma aleatoria, tienen lugar varias veces a la semana y con una duración variable (pueden llegar a superar a las dos horas de ocurrencia) (OSSE y UTN, 2017).

Con respecto a la temperatura del agua residual que ingresa a la EDAR, esta varía entre:

*Tabla 11: Datos hidrológicos del agua residual ingresada en la EDAR. Fuente de elaboración: OSSE y UTN (2017)*



Datos Hidrológicos	
Temperatura mínima	14°C
Temperatura media	18°C
Temperatura máxima	25°C

El predio cuenta con 187 Ha de las cuales un gran porcentaje de ellas aún está sin utilizarse, lo cual aporta la posibilidad de ampliar la planta e incorporar nuevos tratamientos secundarios o terciarios. En la actualidad, las instalaciones en funcionamiento son: una estación central, una sala de rejillas gruesas, una estación elevadora de líquido crudo, una sala de rejillas finas, desarenadores e interceptores de grasas, una sala de cribas, piletas de filtrado biológico y un sector de compostaje.



Figura 13: Mapa de la Estación Depuradora de Aguas Residuales (EDAR), Mar del Plata. Fuente de elaboración: COARCO S.A. (2017)

Cada proceso está diseñado en paralelo para evitar cortes por problemas en algún equipo, así como también la planta cuenta con un generador de soporte para asegurar un caudal mínimo de 1-2 m<sup>3</sup>/s. Todos los procesos de la planta están automatizados y controlados por un sistema de computación que se maneja desde el tablero de control ubicado en el edificio central de la EDAR. A su vez, los equipos tienen su panel de control en cada punto del proceso.



Imagen 1: Edificio central, EDAR.



Imagen 2: Estación Depuradora de Aguas Residuales.

El transporte del efluente es constante para aumentar el oxígeno y evitar el crecimiento de bacterias que producen malos olores. Y, en la actualidad, el material filtrado en la EDAR, por sector, es:

Tabla 12: Material filtrado por sector y cantidad de contenedores. Fuente de elaboración: OSSE y UTN (2017)

Sector	Material Filtrado (m <sup>3</sup> /día)	Contenedores
Desbaste	0,8	1 de 5 m <sup>3</sup> por semana
Elevación	1,9	3 de 5 m <sup>3</sup> por semana
Rejas Finas	8,8	3 de 5 m <sup>3</sup> por dos días
Desarenador	1,9	1 de 2 m <sup>3</sup> por día
Cribas	10	10 de 2 m <sup>3</sup> por día
Servicios Auxiliares	24,3	5 de 5 m <sup>3</sup> por día

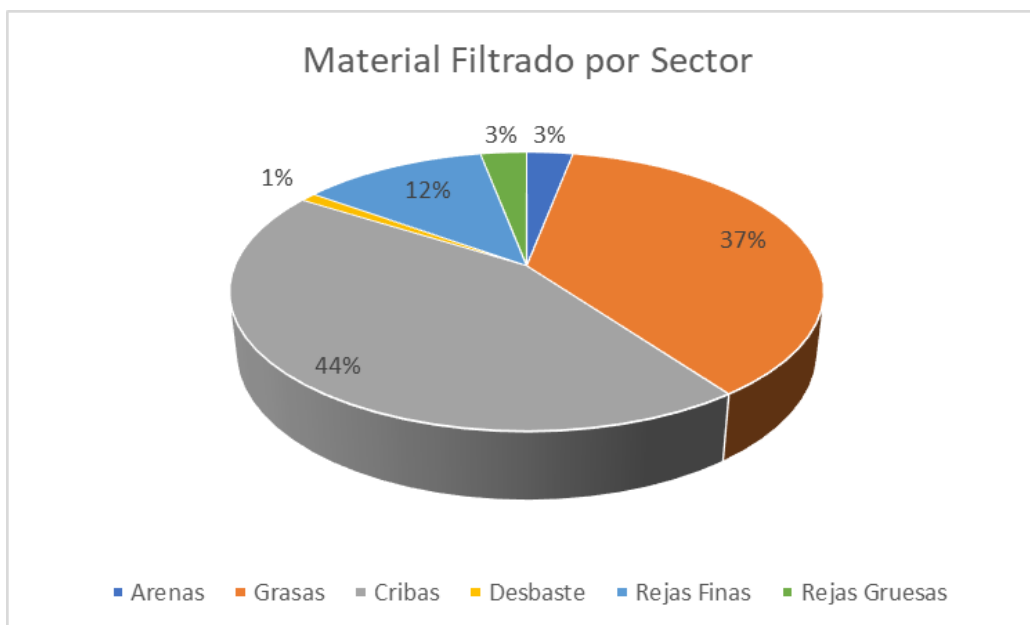


Figura 14: Gráfico del material filtrado por sector (OSSE y UTN, 2017).

Por otro lado, la planta de tratamiento cuenta con una cobertura de servicio de red de energía eléctrica provisto por la empresa EDEA S.A. Sobre la Ruta N° 11 se encuentra el tendido de una línea de media tensión que fue prologada desde la Planta Baltar a las instalaciones de media tensión de la EDAR para abastecer la planta.

La energía total mensual requerida por sector es:

Tabla 13: Energía total mensual de cada sector. Fuente de elaboración: OSSE y UTN (2017)

Sector	Energía Total Mensual (kW/h)
Desbaste	1000
Elevación	430.000
Rejas Finas	5.600
Desarenador	31.200
Cribas	5.100
Servicios Auxiliares	56.300

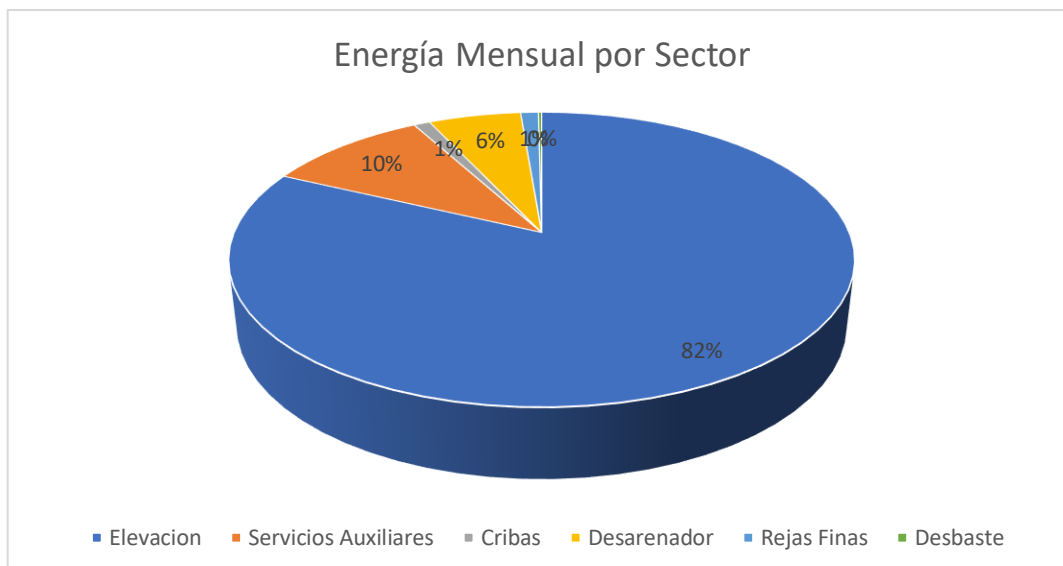


Figura 15: Gráfico de la energía porcentual por sector (OSSE y UTN, 2017).

## Tratamientos de Aguas Residuales en la EDAR

Las diferentes etapas de tratamiento que conforman la EDAR se dividen en dos tipos: línea de aguas residuales y línea lodos. En el siguiente esquema se puede observar los diferentes procesos que tienen lugar en la planta:

Tabla 14: Etapas de tratamiento de la EDAR con sus respectivas entradas y salidas

ETAPAS	ENTRADAS	SALIDAS	
		PRODUCTOS	RESIDUOS
<b>Línea de Agua</b>			
<b>Conducto de Enlace</b>	Aguas Residuales	-	Sólidos Gruesos
<b>Rejas Gruesas</b>	Energía	-	Sólidos Gruesos
<b>Estación Elevadora</b>	Energía	-	-
<b>Rejas Finas</b>	Energía	-	Sólidos Finos
<b>Desarenador e Interceptor de grasas</b>	Energía	-	Arenas
			Grasas
			Aceites
<b>Cribas</b>	Energía	Barros Cloacales	-
<b>Conducto de descarga</b>	Energía	-	Agua Depurada
<b>Línea de Lodos</b>			
<b>Hilera de Compostaje</b>	Barros Cloacales	Abono	Lixiviados

## Línea de Aguas

### Conducto de Enlace – Conducción del Efluente Crudo

Los efluentes cloacales provenientes de la ciudad ingresan a través de un conducto de 15 m de largo por gravedad, ingresándolo a la Estación Elevadora de Líquido Crudo. El conducto posee un diámetro de 2,6 metros con una pendiente de 0,75 m/km.

El efluente ingresa al foso de grueso donde se retiran elementos de alta densidad como palos, piedras, y otros elementos de apreciable dimensión, los cuales son transportados a contenedores. Y, a partir de ahí, parten tres canales a la zona de rejillas interceptoras.

### Reja Gruesa

El primer paso en el tratamiento del agua residual consiste en la separación de los sólidos gruesos de elevada densidad. El líquido crudo ingresa a la Estación Depuradora de Aguas Residuales a través de tres canales de 1,80 m de ancho, los cuales contienen cada uno rejillas gruesas del tipo vertical con aberturas libres de 3 pulgadas de separación entre cada barrote y una compuerta seccionadora aguas arriba y aguas abajo. La compuerta permite sacar de servicio una de las rejillas, aislando el recinto correspondiente.

Las tres rejillas se encuentran dispuestas en paralelo, con rastrillo de limpieza. Las dimensiones de las rejillas son establecidas para que se tenga una sección de flujo con velocidad adecuada. Velocidades muy bajas a través de las barras pueden contribuir para un aumento indeseable de material retenido y también para la sedimentación de la arena en el canal de acceso y, al revés, velocidades muy grandes fomentan el arrastre de material que debería quedar retenido.

Durante esta fase, se produce el desbaste de sólidos gruesos, que estén en suspensión o flotantes, con el fin de proteger las restantes instalaciones de daños o inconvenientes que puedan llegar a producir. También contribuyen a dar una mejor apariencia a la planta ya que reducen el volumen de flotantes (espuma). Los residuos de gran tamaño consisten en desechos tales como piedras, papel, restos de vegetales, ramas, partes de chatarra, raíces de árboles, plásticos, trapos y otros objetos que pueden pasar por los inodoros o por las aberturas de pozos de inspección de la red de alcantarillado. También pueden separarse materia orgánica.

Las rejillas de barras se pueden limpiar manual o mecánicamente. En el caso de la EDAR, la limpieza es mecánica, lo cual permite reducir los problemas generados por su uso, mejora el mantenimiento y permite una mejor separación de los residuos. A su vez, las rejillas son de acero inoxidable para evitar su corrosión. Las rejillas mecanizadas requieren de un mantenimiento cuidadoso por eso solo se emplean cuando es estrictamente necesario.

Mientras que el efluente continúa su curso hacia un único colector, los sólidos son elevados hasta el nivel de circulación vehicular para facilitar su posterior gestión. Son extraídos y descargados directamente a un contenedor para luego ser enviados para su disposición final al

Relleno Sanitario de la ciudad. Mientras que el líquido pasante de las rejillas se une en un solo canal colector que se bifurca a dos pozos de bombeo simétricos.

### Estación Elevadora de Líquido Crudo y Rejas Finas

La Estación Elevadora de líquido crudo posee bombas sumergibles instaladas en columnas, las cuales poseen un bombeo continuo. El caudal máximo de la estación es de  $8 \text{ m}^3/\text{s}$  y contienen variadores de velocidad que permiten incrementar o disminuir gradualmente el caudal bombeado. A través de las bombas elevadoras se descarga el caudal en un canal elevado común el cual se ensancha posteriormente para dirigirlo hacia los canales de rejillas finas.

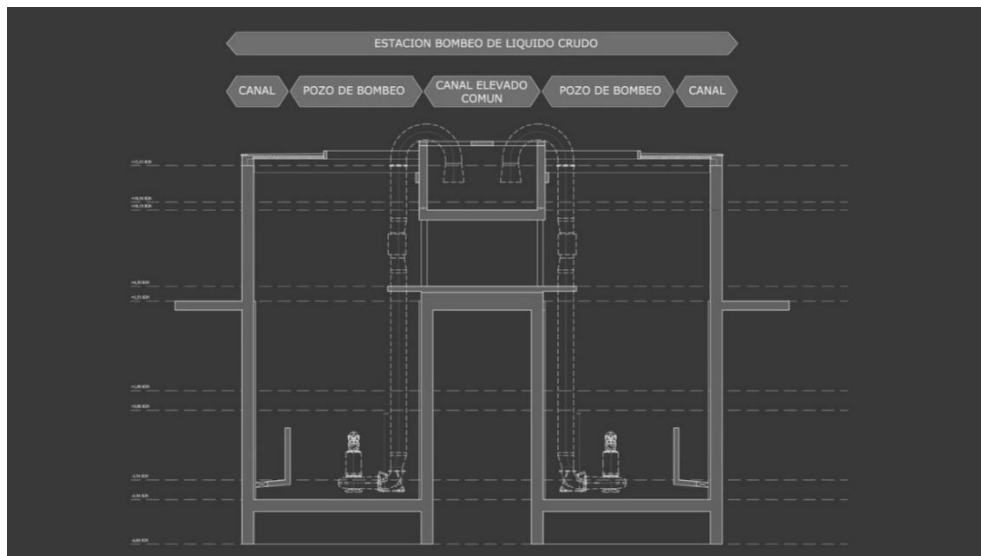


Figura 16: Plano estación elevadora de líquido crudo. Fuente de elaboración COARCO, 2017



Imagen 3: Estación Elevadora, EDAR.

Las rejas finas tienen una separación de barras de 10 mm. El desbaste es realizado a través de tamices rotativos auto limpiantes. Los sólidos separados son descargados en contenedores mientras que el caudal pasante se une en un colector que deriva los efluentes a los desarenadores. Actualmente, se llena un contenedor de 5 m<sup>3</sup> cada tres días aproximadamente.



Imagen 4: Sistema de rejas finas, EDAR.



Imagen 5: Sistema de rejas finas, EDAR.

### Desarenador e Interceptor de Grasas

Los desarenadores son unidades destinadas a retener la arena y otros detritos minerales inertes y pesados que se encuentran en las aguas residuales (cascotes, pedazos de ladrillo,

partículas metálicas, carbón, tierra y otros). Estos materiales son originados en operaciones de lavado, infiltraciones, desechos industriales, etc. La remoción de arenas tiene como finalidad proteger las bombas contra desgaste, para evitar obstrucciones de tuberías y para impedir la formación de depósito de material inerte en el interior de sedimentadores y digestores.



Imagen 6: Desarenador, EDAR.

Los desarenadores con remoción de grasas y sobrenadantes interceptados contienen seis canales de sección uniforme con incorporación de aire para favorecer la flotación de grasas. Cada canal, dispone de un puente con una bomba para la extracción de los sólidos decantados y un barredor superficial para las grasas. A su vez, las materias de menor densidad, como los aceites, ascienden a la superficie y forman una capa flotante, donde son interceptadas por un puente barredor de grasas.



Imagen 7: Desarenador, EDAR.

Los líquidos con alto contenido de arena retirados del fondo de los canales son conducidos a un pozo de bombeo desde el que se impulsan los mismos hasta una sala de clasificadores de



arena. La planta contiene dos clasificadores del tipo ciclónico. El material sólido removido se descarga en contenedores mientras que el líquido se deriva al canal de entrada de los desarenadores. A su vez, posee un sistema integrado de transporte de arenas por tornillo para descargar los sólidos de los mismos. Las grasas y aceites recolectados son impulsados por bombas a tornillo de eje excéntrico a un tanque de flotación donde se separará el agua de la misma, retirándose el sobrenadante debidamente acondicionado a disposición final, fuera de la Planta. El efluente cloacal de salida de los desarenadores se canaliza al conducto de descarga de la Estación Depuradora.

### Sala de Cribas

Luego, el líquido continúa hasta un canal de distribución hacia las cribas rotativas. Las mismas combinan en un equipo la función de tamizado de los líquidos, de lavado, transportado y compactado de deshidratación de los sólidos. Este tratamiento fue dispuesto luego del desarenador y desengrasador debido a que, en la Planta Baltar, el gran porcentaje de grasas y aceites empastan las cribas impidiendo su buen funcionamiento.

La sala de cribas contiene tamices rotativos auto limpiantes con una ranura continua de acero inoxidable de 1mm de separación y canalizaciones de descarga. El efluente cribado es transportado mediante un canal doble que deriva al desarenador. Cada criba se encuentra instalada en un canal independiente, con una compuerta de ingreso cada uno con el fin de poder sacar de servicio cualquier criba sin afectar el funcionamiento de la planta. El sistema de limpieza filtrante es automático, con una combinación de limpieza mecánica e hidráulica. A su vez, cuenta en forma individual con un sistema integrado de recolección, extracción, transporte mediante tornillo cerrado y deshidratado de los sólidos retenidos, garantizando un porcentaje de humedad del sólido menor que 75%. Los equipos son compactados y cerrados para evitar la circulación de líquidos o sólidos en contacto con el medio ambiente, contienen tapas removibles para su inspección y sensores de nivel.

Los sólidos extraídos y deshidratados por las cribas son conducidos mediante tornillos transportadores a contenedores. Mientras que las aguas tamizadas por las cribas se recogen en un canal colector común que a su vez ingresan a una cámara vertedero.



Imagen 8: Sala de cribas, EDAR.

### Conducto de descarga

Las aguas tamizadas por las cribas se recogen en un canal colector común e ingresan a una cámara vertedero, la cual posee tuberías que conducen el efluente. Las tuberías poseen 2 metros de diámetro y una pendiente de 0,8 m/km.

El efluente tratado es conducido a través de las tuberías desde la Estación Depuradora de Aguas Residuales hasta la Estación Elevadora Secundaria en el comienzo del Emisario Submarino. Para caudales medios a bajos, el transporte funciona a gravedad utilizando la pendiente de la tubería. Mientras que, para caudales medios a altos, el efluente es bombeado fuera de la EDAR.

### Línea de Lodos

#### Compostaje

Actualmente, los barros cloacales provenientes de la etapa de cribado se convierten en abono que es utilizado por el Departamento de Ingeniería y Gestión Ambiental de Obras Sanitarias. El proceso se basa en la biodegradación de los lodos mediante la flora bacteriana aerobia autóctona que poseen dichos barros; y permite asegurar la estabilización y maduración de los residuos transformándolos en una enmienda orgánica de calidad para ser utilizada como abono o acondicionador de suelos para uso forestal, o bien como cobertura del relleno sanitario o cavas.

Diariamente los contenedores son trasladados a filas de hormigón dispuestas al aire libre, que cuentan con una leve pendiente que permite recolectar los lixiviados. Previo al proceso de compostaje, el sustrato es mezclado con un soporte (aserrín, viruta o material de poda). La mezcla del barro con el soporte se realiza intercalando los baldes de cada material sobre el

hormigón para luego voltear la mezcla sobre el otro lateral libre de la plataforma de forma tal de homogeneizarla.

Las hileras son dispuestas en forma trapezoidal y requieren de un seguimiento del proceso mediante el control de temperaturas, humedad, vectores, análisis bacteriológico, nivel de olores, volteos, volumen de lixiviados y de lluvias, etc.

Los microorganismos que participan en el proceso pertenecen a dos grandes categorías: aerobios facultativos y obligados; y el proceso de compostaje se divide en cuatro etapas: mesofílica I, termofílica, mesofílica II y maduración.

El compost obtenido, a pesar de ser producto del mismo proceso, puede ser diferente debido a la heterogeneidad del barro y/o a los procesos de degradación diferentes en distintos sitios de las hileras. Por este motivo, se usa con fines ornamentales y no alimenticios.

### Caracterización de barros cloacales

La naturaleza y la producción diaria de lodos previstas en las estaciones depuradoras ejercen una marcada influencia sobre el tipo de sistema de tratamiento a utilizar. En la EDAR, son tratados aquellos barros provenientes de la etapa de cribado ya que, a diferencia de los otros sólidos extraídos del resto de las etapas, cuentan con un alto contenido de materia orgánica (86,2% de materia orgánica según análisis brindados por Obras Sanitarias), la cual facilita la biodegradación por parte de las bacterias. Además, posee un contenido de sólidos homogéneo que no requieren de una etapa de separación como así lo necesitarían los sólidos de extraídos de las primeras etapas.



Imagen 9: Lodos extraídos del proceso de cribado, EDAR.

En la actualidad, se producen 10 m<sup>3</sup> (dos contenedores de 5 m<sup>3</sup>) diarios de lodos cloacales y según datos brindados por Obras Sanitarias los parámetros que caracterizan los barros cloacales de la EDAR son:

Tabla 15: Parámetros de los lodos generados en la etapa de cribado brindados por OSSE, 2019. Fuente de elaboración: OSSE (2019).

PARÁMETRO	UNIDAD	VALOR
Humedad	%	81,49
pH	-	6,38
Escherichia Coli	NMP/g seco	1,7 10 <sup>7</sup>
Coliformes Fecales	NMP/g seco	2,25 10 <sup>7</sup>
Sólidos Totales	%	18,51
Sólidos Fijos	%	2,54
Sólidos Volátiles	%	15,97
Fósforo Total	gP/kg	5,1
Nitrógeno Total Kjeldahl	gN/kg	23
Aceites y grasas	g/kg	217,8
Hidrocarburos totales	g/kg	5,59
Zn	mg/kg	141,1
Cu	mg/kg	370,42
Cd	mg/kg	1,04
Pb	mg/kg	< 25
Ni	mg/kg	11,12
Cr	mg/kg	< 12.5
Hg	mg/kg	0,43
Conductividad Eléctrica	mS/cm	2030
Nitratos (NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )	gNO <sub>3</sub> <sup>-</sup> /kg	0,05
Potasio	gK/kg	1,01

### Extracción y Tratamiento de Gases

La Estación Depuradora cuenta con un sistema de extracción de gases húmedos producidos en los distintos recintos cerrados de tratamiento. Los sectores que forman parte del sistema son la cámara de bombeo, el cuenco de descarga de las bombas elevadoras del líquido crudo y los canales de cribas, ya que es donde se puede desprender gases debido al movimiento del efluente o la particularización del mismo.

A su vez, también se realiza una extracción y tratamiento de gases de los ambientes en los que hay emanaciones gaseosas u olores desagradables, como son la sala de rejillas y la sala de contenedores de sólidos extraídos por las cribas.

El sistema está diseñado para aspirar los gases de cada recinto para evitar la fuga de gases a las salas de trabajo y al exterior. Contiene una sala de ventiladores y un filtro biológico con una capacidad acorde a los caudales de aire filtrados. Los gases que se extraen se transportan a dos filtros biológicos con el objetivo de eliminar los contaminantes presentes antes de su evacuación a la atmósfera. Los filtros biológicos consisten en turbas que contienen a las bacterias

encargadas de la digestión de los gases y se encuentran divididos en unidades independientes: dos módulos de 375 m<sup>2</sup> de superficie cada uno.



Imagen 10: Piletas de filtrado biológico, EDAR.

### Instalaciones para descargas por contingencias

La EDAR posee un sector de recepción y descarga por contingencia de camiones atmosféricos. Las contingencias consideradas son todos los accidentes que puedan ocurrir durante la operatividad o mantenimiento de la Estación Depuradora como: derrames, roturas de ductos, escapes de gas, explosiones, incendios, accidentes personales. A su vez, se consideran contingencias por interrupción del servicio por fallas de energía u otras fallas, como riesgos de desbordes de líquidos cloacales.

La instalación es un lugar alternativo para vertidos, está ubicada de forma tal que la circulación de los camiones atmosféricos no interfiera con las actividades de la planta y se divide en dos sectores. Un sector posee dos equipos de recepción y pretratamiento de camiones atmosféricos, con extracción y deshidratado de sólidos retenidos y la incorporación de aditivos para el control de olores. Mientras que, en otro sector, se lleva a cabo la ejecución de instalaciones para el desbaste grueso de sólidos de camiones desobstructores. Los efluentes generados durante estos procesos son conducidos a gravedad hasta la cámara de aspiración de la Estación Depuradora de Líquido Crudo donde se une al efluente cloacal que ingresa a la planta.

Por otro lado, la planta contiene vertidos de emergencia, el cual consiste en un *by pass* para el vuelco sin tratamiento de líquidos cloacales por interrupción del servicio.

## CAPÍTULO V: Metodología

En el presente capítulo se detalla la metodología utilizada para alcanzar los objetivos planteados. Se describen las distintas etapas de recolección de datos junto con su procesamiento, desarrollando las características del *software* utilizado para evaluar la pre-factibilidad técnica de la instalación de un biodigestor en la EDAR.

### Recolección de datos

En primer lugar, se realizó una búsqueda bibliográfica del funcionamiento de la Estación Depuradora de Aguas Residuales de la ciudad de Mar del Plata. Al tener pocos años de funcionamiento, el único informe detallado que se encontró fue la Evaluación de Impacto Ambiental realizada previo a su construcción. También se tomaron datos de videos institucionales realizados por la empresa constructora y Obras Sanitarias sobre el funcionamiento de la planta.

En una segunda etapa, se llevó a cabo una visita guiada a la EDAR, en la cual se recorrieron las distintas instalaciones junto con ingenieros y técnicos que brindaron información sobre la gestión de aguas residuales. La visita permitió tener un conocimiento más detallado de los diferentes tratamientos que tienen lugar en la planta, así como también permitió profundizar sobre la gestión de lodos actual.

Por último, en una tercera etapa, se contactó con el Departamento de Gestión Ambiental de Obras Sanitarias para obtener datos característicos de los lodos provenientes de la etapa de cribado. Los parámetros necesarios para el Proyecto fueron detallados por la empresa Arcis Group. Parte de los valores de estos parámetros fueron brindados por OSSE mientras que los datos faltantes fueron extraídos de la base de datos de la empresa Arcis Group.

### Procesamiento de datos

Para la evaluación de pre-factibilidad técnica de incorporar un biodigestor al proceso de tratamiento de aguas residuales de la ciudad de Mar del Plata se trabajó en conjunto con la empresa Arcis Group.

La empresa Arcis Group se encuentra ubicada en la ciudad de Mar del Plata ofreciendo servicios de ingeniería vinculados al desarrollo de proyectos integrales de aprovechamiento de recursos renovables (biomasa, desechos orgánicos, aguas residuales, etc.). Arcis Group forma parte de un conjunto de empresas latinoamericanas que actúan como sucursales de la empresa Aqualimpia.

Aqualimpia es una empresa alemana de ingeniería integral dedicada al diseño y construcción de plantas de biogás y plantas depuradoras UASB (*Upflow Anaerobic Sludge Blanket*). Dentro de los servicios brindados por la empresa se encuentran: estudios de factibilidad y diseño de las plantas; la ejecución de proyectos; el suministro e instalación de partes y componentes; y el control periódico de la operación de biodigestores y plantas depuradoras de aguas residuales.

El estudio de pre-factibilidad técnica de este Proyecto se desarrolló a través de un programa denominado Biodigestor-pro, *software* creado por la empresa Aqualimpia para dimensionar y pre-diseñar biodigestores y plantas de biogás (sobre y bajo tierra). Debido a la confidencialidad del *software*, los datos fueron procesados por el Arquitecto Gustavo Blanco, Presidente de Arcis Group, representante en Argentina de la empresa Aqualimpia.

### Software: Biodigestor-pro

Biodigestor-pro permite el ingreso de hasta 5 tipos de: biomاسas, estiércoles y aguas residuales. Y tiene como objetivo principal dimensionar y diseñar todas las estructuras de plantas de biogás (tanque de alimentación, biodigestor, laguna de secado, tuberías, etc.); calcular la producción de biogás y bioabono (biol); y obtener el potencial energético de diferentes sustratos (biomasa, desechos orgánicos, estiércol, etc.).

Al contar con una amplia base de datos, el programa permite adaptar variables a lo largo del procesamiento de los datos en función de los resultados que se desean obtener. La adaptación de estos datos fue realizada junto con profesionales pertenecientes a la empresa Arcis Group en función de las características de los barros cloacales detallada en el apartado “Caracterización de barros cloacales” del Capítulo IV de este Proyecto.

Los elementos de entrada introducidos al *software* fueron los datos del proyecto (nombre, ubicación, proyectista y fecha) junto con las temperaturas del medio ambiente, en °C, y los tipos de desechos que van a ser utilizados como sustrato.

Nombre y ubicación del proyecto		Temperatura medio ambiente °C	
		°C	Días/año
Nombre del proyecto:	Planta de biogás en la EDAR	min. 14	
Ubicación:	EDAR, Mar del Plata	med. 18	
País:	Argentina	max. 25	
Provincia/Zona/Dep.:		Seleccione tipo de desechos que va a ingresar	
Ciudad:		<input type="checkbox"/> Estiércol por animal	
Proyectista:		<input checked="" type="checkbox"/> Biomasa (desechos agroindustriales)	
Fecha:		<input checked="" type="checkbox"/> Aguas residuales o aguas de lavado	

Figura 17: Plantilla del Biodigestor-pro de datos del proyecto y fuentes de biomasa.

Como se observa en la figura 17, se ingresaron las temperaturas mínimas, medias y máximas del medio ambiente, las cuales incidirán sobre la eficiencia de degradación del biodigestor; y, en el área de selección de desechos, se seleccionó biomasa y aguas residuales como materia prima del proceso.

En el siguiente paso, se eligió el tipo de sustrato a tratar: lodos provenientes de plantas depuradoras. Y, a partir de valores ya establecidos por el programa, se ajustaron los datos

básicos de la biomasa incorporando las cantidades de sustrato diarias, de masa seca (MS) y de masa volátil (MV) característicos de los lodos eliminados en la etapa de cribado de la EDAR.

Tabla 16: Parámetros de diseño como elementos de entrada del software Biodigestor-pro. Fuente de elaboración: OSSE (2019)

PARÁMETROS DE DISEÑO	
Temperatura Mínima	14°C
Temperatura Media	18°C
Temperatura Máxima	25°C
Lodos Cloacales	10,00 t/día
Masa Seca	3910,00 kg/día
Masa Volátil	3339,14 kg/día

Con los valores ingresados y la base de datos del programa, se determinó los tipos y volúmenes de diferentes desechos que se mezclarían con los lodos para obtener un biogás de calidad. Probando con distintos tipos de desechos y en base a las experiencias de los profesionales de la empresa Arcis Group, se llegó a la conclusión de que la mezcla más propicia se obtendría con aguas residuales y harinas de pescado (ver Figura 18).

The screenshot shows a window titled 'Resumen disponibilidad de biomasa' with a table containing the following data:

Resumen disponibilidad de biomasa				
N°	Animal	PE ( t/d)	MS ( kg/d)	MV (kg/d)
1				
Subtotal				
N°	Biomasa	BM ( t/d)	MS ( kg/d)	MV (kg/d)
	LODOS DEPURADORA	10,00	3.910,00	3.339,14
Subtotal				
		10,00	3.910,00	3.339,14
N°	Aguas residuales	Q (m3/día)		DQO(kg/d)
	AGUAS RESIDUALES	34,00		1.190,00
	HARINAS DE PESCADO	4,00		480,00
Subtotal				
		38,00		1670,00
Totales		48,00	3.910,00	5.009,14

Below the table, there are definitions for the abbreviations used:

- PE = Producción de estiércol (t/d)
- MS = Masa seca (t/d)
- MV = Masa volátil (t/d)
- BM = Volumen biomasa (t/d)
- DQO = Demanda química de oxígeno

At the bottom of the window, there are several buttons: 'Siguiente', 'Anterior', 'Cancelar', 'Ayuda', and 'Ver gráficos'.

Figura 18: Plantilla del Biodigestor-pro de resultados con características y cantidades de biomasa.

Una vez establecida la mezcla de la biomasa, el programa detalla los datos importantes y necesarios para el dimensionamiento del biodigestor. Como se estableció anteriormente, el



programa asume datos por defecto, los cuales pueden ser ajustados de acuerdo al sustrato y al producto que se quiere obtener.

Dos de los datos hidráulicos característicos del proceso de digestión anaerobia planteado son el tiempo de retención hidráulica y la carga orgánica volumétrica:

Tabla 17: Datos hidráulicos del biodigestor.

DATOS HIDRÁULICOS BIODIGESTOR	
Tiempo de retención hidráulica	30 días
Carga orgánica volumétrica (diaria)	2,68 kg/m <sup>3</sup>

El TRH fue el parámetro ajustado durante la etapa de resultados. Teniendo en cuenta la cantidad de sólidos volátiles, se estableció un TRH para lograr una estabilización del sustrato adecuado sin afectar la producción de metano. Mientras que la carga orgánica volumétrica diaria fue calculada por el *software* en base a la masa volátil y el volumen del biodigestor. Como se desarrolló en el marco teórico, es importante mantener bajo la COV para evitar la sobrecarga de materia orgánica.



Figura 19: Plantilla del Biodigestor-pro con resultados de dimensionamiento del biodigestor.

En las siguientes etapas, se obtuvieron los resultados del cálculo de la producción de metano, biogás, energía y sus respectivas características. El programa calcula la producción de gas metano en base al porcentaje de degradación de la masa volátil y, a partir de esta producción, la cantidad de biogás que se podrá generar. La energía tanto eléctrica como calorífica que se puede alcanzar aprovechando el biogás también es detallada en los resultados del *software*.

Al finalizar el procesamiento de los datos ingresados, el programa presenta un diseño conceptual del biodigestor y la planta de biogás. El *software* permite seleccionar si los

biodigestores se construirán bajo tierra (geomembrana u hormigón) o sobre tierra (acero u hormigón). Y recomienda las cantidades y dimensiones de los biodigestores y sus estructuras auxiliares, las cuales también pueden ser adaptadas de acuerdo el área de construcción y al producto que se quiere obtener.

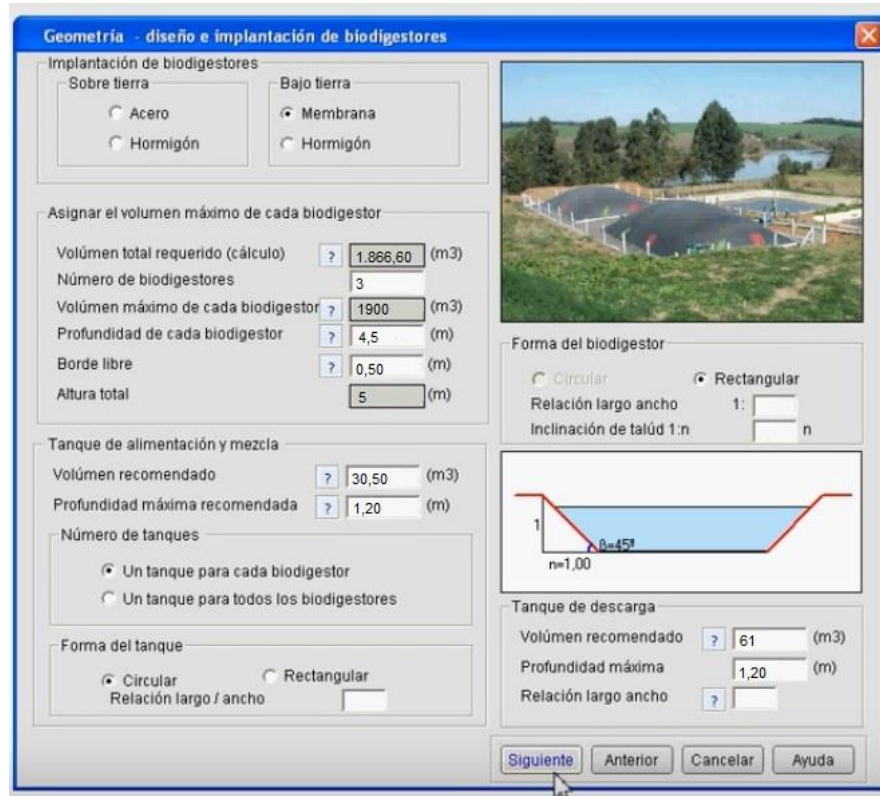


Figura 20: Plantilla del Biodigestor-pro de geometría, diseño e implantación de biodigestores.

En base al prediseño generado por el programa y las recomendaciones de la empresa Arcis Group, se definió la geometría y el diseño de los biodigestores, así como las estructuras auxiliares que formarían la planta de biogás. A su vez, por las grandes extensiones de terreno que posee la EDAR, se aceptaron las tres unidades biodigestores continuos de tipo bajo tierra propuestos por el *software*, con sus respectivas estructuras auxiliares.

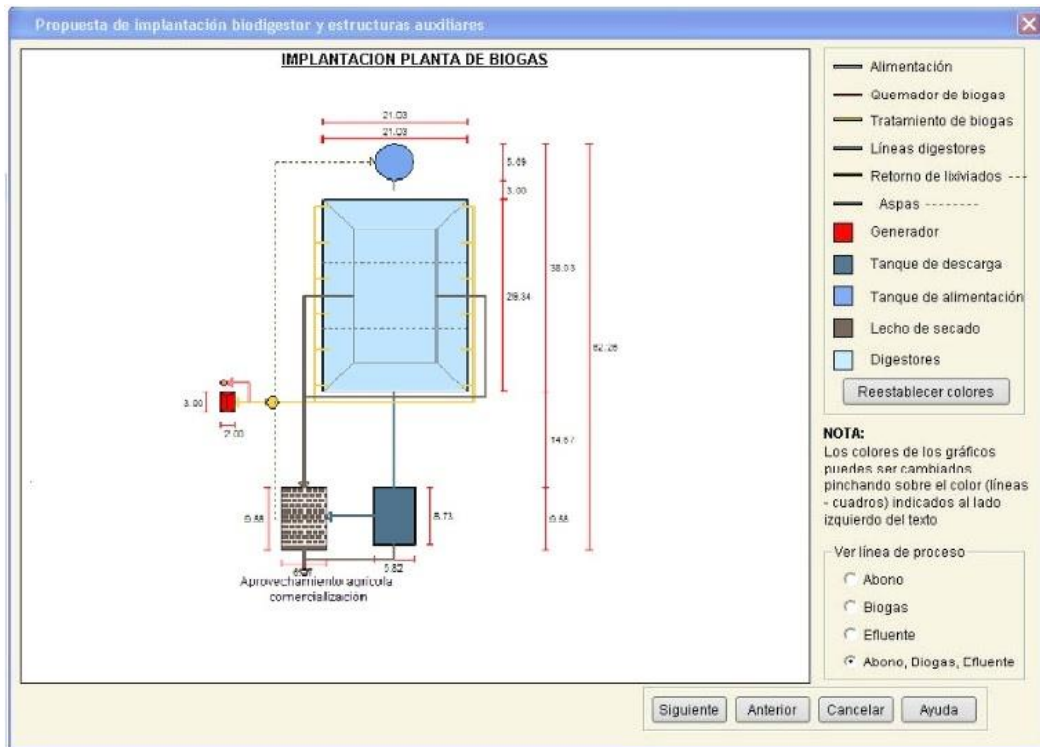


Figura 21: Plantilla de propuesta de implantación biodigestor y estructuras auxiliares.

Finalmente, una vez introducidos y ajustados todos los datos se obtuvieron los planos modelos finales del biodigestor, sus estructuras auxiliares con sus diferentes dimensiones y un resumen de las descripciones de las instalaciones. Dentro de los resultados, también se pudo observar la producción de biogás ( $m^3/día$  y  $m^3/año$ ) que podría generar el lodo proveniente de la etapa de cribado y las toneladas equivalentes de  $CO_2$ ; la potencia a instalar en kW, la estimación de la producción de bio-abono y nutrientes y la estimación de la producción de energía eléctrica (KWh) y calorífica (KWh-BTU) del biogás.

## Capítulo VI: Resultados

En el presente capítulo se detallan los resultados obtenidos a partir del procesamiento de los datos con Biodigestor-pro. Los resultados se dividieron en cuatro partes, en las cuales se desarrollan las características del sustrato, de los biodigestores con sus estructuras auxiliares, de los productos que se obtendrían (biogás y fertilizante orgánico) y una conclusión de la planta de biogás propuesta.

### Caracterización del sustrato

Una vez procesados los datos característicos de los lodos con Biodigestor-pro, se pudo constatar la posibilidad de producir biogás a través de biodigestores teniendo como materia prima los lodos desechados en la etapa de cribado.

Como se desarrolló previamente, los lodos desechados del proceso de cribado fueron elegidos para ser tratados por su alto contenido de materia orgánica y por ser una mezcla homogénea que no requeriría de una etapa de separación previa. Características óptimas como el contenido de humedad, pH o ausencia de inhibidores también favorecerían la producción de biogás de calidad. A su vez, su producción se desarrollaría de manera constante, lo cual beneficiaría el tratamiento continuo de los mismos.

Debido a la susceptibilidad de los microorganismos a las características del medio ambiente, el sustrato que ingresaría a la planta estaría conformado por lodos depurados, un porcentaje de aguas residuales y otro de harina de pescado para obtener un biogás de calidad y una cantidad redituable del mismo. Las cantidades y características del sustrato para la alimentación del biodigestor serían:

Tabla 18: Cantidades y características de los componentes del sustrato (\*considerando la densidad de la biomasa de 1 t/m<sup>3</sup>)

SUSTRATO						
Biomasa	Biomasa* (t/día)	Masa Seca (kg/día)	Masa Volátil (kg/día)	Nitrógeno (%)	Fósforo (%)	Potasio (%)
Lodos Estación Depuradora	10	3.910	3.339,14	7,82	35,19	4,3
SUBTOTAL	10	3.910	3.339,14	7,82	35,19	4,3
Aguas Residuales	Q (m <sup>3</sup> /día)	-	DQO (kg/día)	Nitrógeno (%)	Fósforo (%)	Potasio (%)
Agua Residual Depurada	34	-	1.190	2,3	1,82	0,9
Harinas de Pescado	4	-	480	10,08	9,12	5,76
SUBTOTAL	38	-	1670	12,38	10,94	6,66
TOTAL	48	3910	5009,14	20,2	46,13	10,96

## Biodigestor y estructuras auxiliares

La planta propuesta consistiría en tres unidades de biodigestores con sus respectivas estructuras auxiliares. El proceso de digestión anaerobia se desarrollaría en una sola fase. Y, debido a la producción constante de sustrato, el tipo de alimentación del biodigestor sería continuo, lo cual permitiría, a su vez, la producción ininterrumpida de biogás.

Por otro lado, debido a las condiciones climáticas de la ciudad y las grandes cantidades diarias de lodos generadas, el biodigestor sería de tipo subterráneo cubierto con un material de geomembrana. La geomembrana debería estar formado por PVC ya que es un material resistente y posee mayor durabilidad que polietileno de alta densidad.

A su vez, la instalación y ajuste al terreno de los biodigestores con geomembrana de PVC se llevarían a cabo con mayor facilidad que los construidos con hormigón. Y, como se desarrolló en el marco teórico, la geomembrana de PVC requeriría un costo menor de inversión sin afectar las condiciones necesarias para la producción de biogás.

Cada unidad de biodigestor estaría conformada por:

1. Tanque de alimentación (o cámara de carga)
  - a. Conducto de carga
2. Cámara de digestión
  - a. Pozos agitadores
  - b. Conductos de captación de biogás
3. Tanque de descarga (o cámara de descarga)
  - a. Conducto de descarga
  - b. Conducto de recirculación de lixiviados
4. Lecho de secado de lodos
  - a. Conducto de lodos
  - b. Pozo de bombeo de lodos
  - c. Conducto de retorno de lixiviados

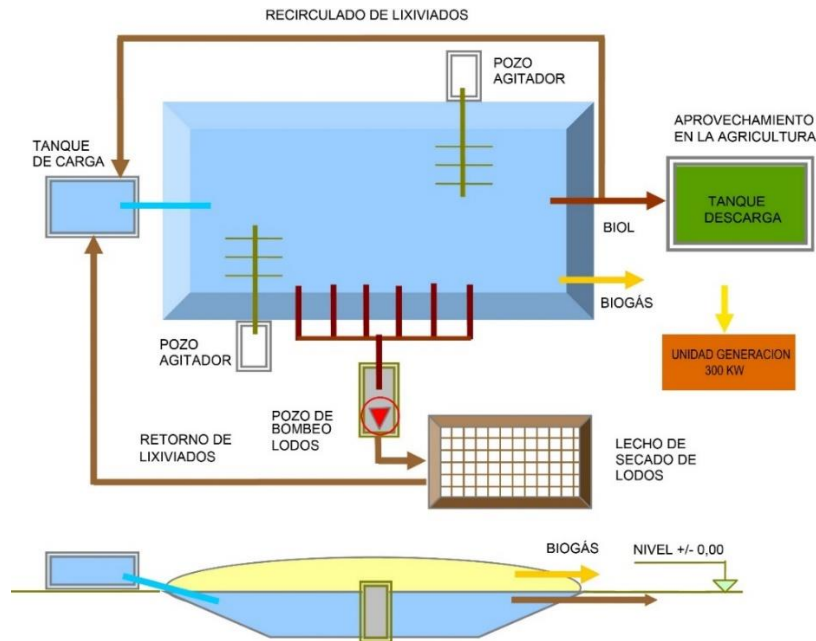


Figura 22: Modelo de la planta de biogás (Ver Anexo 1)

El sistema de conductos de conexión entre las cámaras (de carga y descarga) y las cámaras de digestión, así como también las derivaciones hacia el lecho de secado, serían de acero inoxidable. Si bien el costo de este material es elevado, el bajo mantenimiento lo hacen ser el más apropiado.

### Tanque de alimentación (o cámara de carga)

Los tanques de alimentación se dimensionaron en función al volumen diario de alimentación del biodigestor. Según recomendaciones de la empresa Aqualimpia, la mezcla se debe realizar una vez al día y se debería programar para que la mezcla, en este caso de lodos residuales, agua residual y harina de pescado, alimente al biodigestor cada 24 horas.

En la planta de biogás planteada, los tanques de alimentación deberían ubicarse por encima del suelo, a 4,2 metros de sus respectivos biodigestores y contar con las siguientes dimensiones:

Tabla 19: Dimensiones del tanque de alimentación (Ver Anexo 2 y Anexo 3)

TANQUE DE ALIMENTACIÓN	
Volumen	30,5 m <sup>3</sup>
Largo	5,69 m
Ancho	5,69 m
Profundidad	1,2 m

Una vez diluida y homogeneizada la mezcla, el sustrato entraría por acción de la gravedad a través de un conducto de carga a la cámara de digestión.

## Cámara de digestión

La mezcla de sustratos ingresaría a la cámara de digestión donde se produciría el proceso de digestión anaerobio. Cada biodigestor contaría con dos pozos agitadores cada uno. Como se desarrolló en la teoría, este mecanismo de agitación permitiría lograr un mayor rendimiento del tratamiento aumentando el contacto de los microorganismos con el sustrato y garantizando perfiles de temperatura constantes.

A su vez, en la cámara de digestión estarían ubicados los conductos de captación de biogás. Los requerimientos para los conductos, válvulas y accesorios para la captación y conducción serían similares a cualquier instalación de gas. Sin embargo, dado que el biogás contiene vapor de agua y sulfuro de hidrógeno, el sistema de conducción de biogás debería ser de PVC o de acero galvanizado (Arrieta-Palacios, 2016).

Las dimensiones de las cámaras de digestión planteadas son:

Tabla 20: Dimensiones de las cámaras de digestión (Ver Anexo 1 y Anexo 4)

CÁMARA DE DIGESTIÓN	
Volumen total requerido	1.866,60 m <sup>3</sup>
Volumen de cada unidad	1900 m <sup>3</sup>
Largo	29,34 m
Ancho	21,03 m
Profundidad	4,5 m

## Tanque de descarga

Una vez finalizada la digestión, el biol que ya cumplió con el TRH determinado, sería trasladado a través de un conducto de descarga hacia un tanque de descarga. Parte del lixiviado arrastrado por el biol, sería reincorporado al proceso de digestión anaerobia por un conducto de recirculado de lixiviados hacia el tanque de carga.

El tanque de descarga contaría con las siguientes características:

Tabla 21: Dimensiones de tanque de descarga (Ver Anexo 2 y Anexo 3)

TANQUE DE DESCARGA	
Volumen	61,00 m <sup>3</sup>
Largo	8,73 m
Ancho	5,82 m
Profundidad	1,20 m

## Lecho de secado de lodos

Los lodos sedimentados en el fondo de la cámara de digestión serían enviados a través de varios conductos por un pozo de bombeo hacia un lecho de secado para su deshidratación.

El lecho de secado contaría con las siguientes dimensiones:

Tabla 22: Dimensiones de lecho de secado (Ver Anexo 7)

LECHO DE SECADO	
Área	60,88 m <sup>2</sup>
Largo	9,56 m
Ancho	6,37 m

Los lixiviados producidos por el proceso de deshidratación serían enviados a través de un conducto de retorno al tanque de carga para volver a ingresar al proceso de digestión anaerobia.

### Caracterización de Productos

A partir del modelo de planta establecido y manteniendo constante la producción diaria de lodos en 10 m<sup>3</sup>, se obtendrían como principal producto 4680 m<sup>3</sup>/día (1.708.200 m<sup>3</sup>/año) de biogás.

El biogás producido contendría 2.808,46 m<sup>3</sup>/día (1.024.920 m<sup>3</sup>/año) de metano. Esta cantidad de metano equivaldría aproximadamente a un 60% del biogás producido, porcentaje que se encontraría en los límites establecido para obtener un biogás de calidad (ver Tabla 5).

Para calcular la cantidad de CO<sub>2</sub> equivalente del biogás producido, se utilizó la fórmula desarrollada en el marco teórico (ver Figura 10), con un horizonte temporal de 100 años y los siguientes datos:

Tabla 23: Equivalencia CO<sub>2</sub>

EQUIVALENCIA CO <sub>2</sub>	
Porcentaje del volumen de CH <sub>4</sub>	0.6
Caudal de biogás	1.708.200 m <sup>3</sup>
Densidad del CH <sub>4</sub>	0,00072 t/m <sup>3</sup>
Potencial de calentamiento del CH <sub>4</sub>	21 tCO <sub>2</sub> /tCH <sub>4</sub>

$$CO_{2 \text{ eq}} = \%V_{CH_4} * Q * \rho_{CH_4} * F$$

$$CO_{2 \text{ eq}} = 0,6 * 1.708.200 \text{ m}^3 * 0,00072 \frac{t_{CH_4}}{m^3} * 25 \frac{t_{CO_2}}{t_{CH_4}}$$

$$CO_{2 \text{ eq}} = 18.448,6 t_{CO_2}$$

La cantidad de CO<sub>2</sub> equivalente teórico de metano producido al año sería 18.448,6 t, es decir, que el biogás utilizado representaría 18.448,6 t de CO<sub>2</sub> que no serían emitidos a la atmósfera en un horizonte temporal de 100 años.

La equivalencia de CO<sub>2</sub> está vinculada a la disminución de gases de efecto invernadero. Por lo tanto, la incorporación de un biodigestor en la EDAR aportaría a alcanzar los objetivos planteados por tratados internacionales, como el Protocolo de Kyoto, vinculados con esta problemática ambiental.

Otros de los productos obtenidos durante el proceso de digestión anaerobia planteado es el fertilizante orgánico. Los lodos deshidratados en el lecho de secado junto con el biol desechado,



serían aprovechados como fertilizantes orgánicos. Las cantidades que se obtendrían de estos productos son:

Tabla 24: Cantidad de fertilizante orgánico producto de la digestión anaeróbica.

FERTILIZANTE ORGÁNICO		
Lodo Seco	2.435,33 kg/día	888,90 t/año
Biol	54.594,56 kg/día	19.927,01 t/año
<b>TOTAL</b>	<b>57.029,89 kg/día</b>	<b>20.815,91 t/año</b>

## Planta de Biogás

Aprovechando las grandes extensiones del terreno que posee la EDAR, la configuración del biodigestor y sus estructuras auxiliares sería de manera horizontal. Esto se debe a que la instalación de un cámara de digestión de forma vertical puede resultar problemático para su mantenimiento (Arrieta-Palacios, 2016).

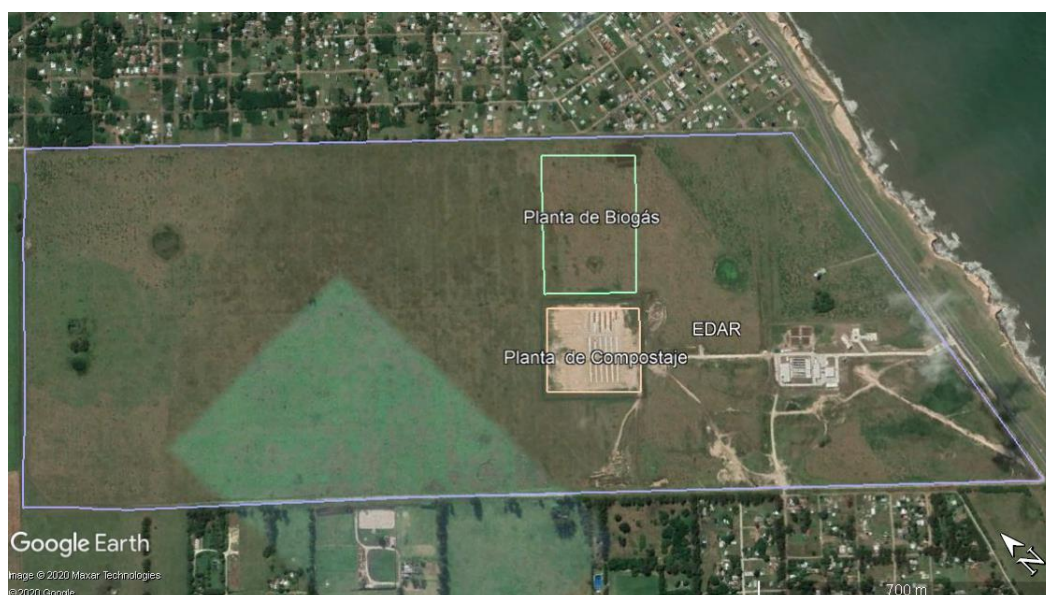


Figura 23: Mapa de la EDAR con la ubicación de la planta de biogás propuesta.

Comparando con el esquema de tratamiento actual (Ver Figura 12), las etapas de la línea de lodos serían:

Tabla 25: Etapas de tratamiento de la EDAR con sus respectivas entradas y salidas.

ETAPAS	ENTRADAS	SALIDAS	
		PRODUCTOS	RESIDUOS
<b>Línea de Agua</b>			
<b>Conducto de Enlace</b>	Aguas Residuales	-	Sólidos Gruesos
<b>Rejas Gruesas</b>	Energía	-	Sólidos Gruesos
<b>Estación Elevadora</b>	Energía	-	-
<b>Rejas Finas</b>	Energía	-	Sólidos Finos
	Energía	-	Arenas

<b>Desarenador e Interceptor de grasas</b>			Grasas
			Aceites
<b>Cribas</b>	Energía	Barros Cloacales	-
<b>Conducto de descarga</b>	Energía	-	Agua Depurada
<b>Línea de Lodos</b>			
<b>Biodigestor</b>	Barro Cloacales Energía	Biogás (energía)	-
		Abono I	
<b>Hilera de Compostaje</b>	Abono I	Abono II	Lixiviados

Como fue desarrollándose a lo largo del proyecto, la utilización de tecnologías de digestión anaerobia puede verse como un sistema de doble propósito que permite potenciar la utilización de los lodos como recurso. Por un lado, la instalación de la planta de biogás permitiría obtener biogás y, por el otro, continuar con la producción de fertilizante orgánico en la EDAR.

El biogás capturado es una fuente de energía renovable que podría utilizarse para la generación in situ de calor y electricidad. Esta generación de energía descentralizada permitiría ahorrar en infraestructura y transporte para la utilización del gas producido, y ahorrar energía consumida por la misma planta.

Tabla 26: Datos del biogás vinculados la generación de energía obtenidos a partir del Biodigestor-pro

GENERACIÓN DE ENERGÍA	
Potencia eléctrica a instalar	560 kWel
Potencia calorífica	460,28 kW
Producción de electricidad	2.171.085,7 kWh/año

Considerando el consumo total de los distintos sectores de la EDAR (ver Tabla 13), la producción de 2.171.085,7 kWh/año equivaldría a un ahorro aproximado del 34% de la energía eléctrica consumida

Por otro lado, aunque el fertilizante orgánico generado (ver Tabla 24) podría ser utilizado de manera inmediata, sería recomendable analizar la presencia de organismos patógeno para disminuir los riesgos a la salud pública en el momento de aplicación.

Y, continuar con el programa del Departamento de Ingeniería y Gestión Ambiental de Obras Sanitarias de producción de abono, permitiría mejorar la calidad nutricional del fertilizante y utilizarlo como acondicionador de suelos, cobertura de rellenos sanitarios o cavas, o incluso con fines alimenticios (en función de la presencia o no de agentes patógenos).

Por último, al provenir de una fuente de energía renovable, la financiación de la construcción e instalación del biodigestor podría realizarse a partir de programas como el RenovAR. Y permitiría alcanzar los objetivos de la Ley Nacional 27.191 de Energía Eléctrica de obtener el 20% de la energía a partir de fuentes renovables para el año 2020.

## CONCLUSIÓN

En este proyecto se buscó brindar una alternativa para la gestión de los lodos extraídos del proceso de cribado de la EDAR ubicada en la ciudad de Mar del Plata. Para ello, se incorporó al informe el desarrollo de la gestión de aguas residuales con el propósito de, por un lado, introducir el origen de los barros cloacales y, por el otro, resaltar el enfoque lineal que tiene la gestión. Los efluentes cloacales que ingresan a la planta son tratados y desechados al ambiente sin considerar su valor, al igual que los compuestos que se extraen de ellos.

Tanto las aguas residuales tratadas, como los residuos semisólidos y sólidos que se extraen de ella, deberían ser aprovechados como recursos (en forma de energía, nutrientes, etc.). Es decir, la planta de tratamiento de aguas residuales de la ciudad de Mar del Plata debería adoptar un modelo de desarrollo dirigido hacia una gestión circular, donde los productos, subproductos y el mismo efluente puedan ser reciclados y/o reutilizados.

Los resultados analíticos obtenidos demostraron que el proceso de digestión anaerobia propuesto es una alternativa factible para la gestión sostenible de los lodos producidos durante la etapa de cribado. Y, aunque la tecnología elegida para llevar a cabo el tratamiento no es única, se pudo concluir, a través de estudios de pre-factibilidad técnica, que la instalación de tres unidades de biodigestores bajo tierra con geomembranas permite una producción de biogás de calidad y se adecua tanto a las características de los barros cloacales como a las instalaciones de la EDAR ya existentes.

Como se desarrolló en el proyecto, la producción de biogás a partir de lodos cloacales trae aparejado numerosos beneficios ambientales. Si bien el objetivo principal de la digestión anaerobia es la estabilización y disminución de los residuos orgánicos, el balance energético positivo que se obtiene del proceso es el aspecto más destacado del tratamiento ya que genera una matriz energética más limpia y ganancia económica. Estos factores, sumado a la generación de puestos de trabajo, son claves a la hora de decidir implementar este tratamiento sobre los barros cloacales producidos en la etapa de cribado.

A su vez, a partir de los cálculos teóricos desarrollados, cabe destacar que la instalación de la planta de biogás planteada podría evitar emitir 18.448,6 t de CO<sub>2</sub> a la atmósfera en un horizonte temporal de 100 años. Esta cantidad de CO<sub>2</sub> equivalente aportaría a las medidas tomadas para disminuir los gases de efecto invernadero.

Por otro lado, se llegó a la conclusión que, aunque en la actualidad la EDAR ya cuenta con un programa de compostaje de los lodos cloacales, la instalación de la planta de producción de biogás no supondría finalizar con el programa, sino que permitiría desarrollar ambos procesos de manera complementaria para obtener fertilizantes orgánicos de mejor calidad.

En cuanto a la legislación, tanto Nacional como Provincial, deberían existir normas que aborden la problemática de los lodos de las estaciones depuradoras de aguas residuales de manera puntual y que unifiquen criterios. Se deberían sancionar normativas que establezcan una gestión adecuada de los sólidos desechados para minimizar sus impactos negativos en el

ambiente y cambiar el enfoque de considerar el lodo como un residuo a considerarlo como un producto.

Por último, es importante remarcar que, si bien los beneficios ambientales que proporcionaría la digestión anaerobia de los barros cloacales extraídos en la etapa de cribado fueron fundamentados claramente en este Proyecto, considero de gran importancia ampliar el análisis realizado con un estudio complementario que aborde profundamente la viabilidad económica de la instalación y operación de la planta de biogás en la EDAR.

## BIBLIOGRAFÍA

Akunna J. C. (2019). Anaerobic Wast-Wastewater treatment and biogas plants. CRC Press

Amaya, B. G. y Sánchez, M. (2017). Diseño de una planta de producción de biogás (Tesis de grado). Universidad Nacional de Mar del Plata.

Aqualimpia (12 de Septiembre de 2019). Recuperado de <https://www.aqualimpia.com/>

Aqualimpia (2008). Dimensionamiento y diseño de biodigestores y plantas de biogás. Grupo Aqualimpia Consultores.

Arcis Group (12 de Septiembre de 2019). Recuperado de <http://www.arcis-group.biz/>

Arrieta-Palacios W. (2016). Diseño de un biodigestor doméstico para el aprovechamiento energético del estiércol de ganado (Tesis de grado). Universidad de Piuro

Blanco Cobián D. (2009). Tratamiento biológico aerobio-anaerobio-aerobio de residuos ganaderos para la obtención de biogás y compost (Tesis de grado). Universidad de León

Cámara Argentina de Energías Renovables (29 de Agosto de 2019). Recuperado de <http://www.cader.org.ar/>

Carrillo L. (2004). Energía de biomasa. Edición del autor, S.S. Jujuy

Castro Soto I. A. (2016). Potencial de biogás a partir de estiércol animal e implementación de plantas de biogás en Chile para el tratamiento de desechos en segmento ganadero definido (Tesis de grado). Universidad Técnica Federico Santa María.

Carta González J.A., Calero Pérez R., Calmenar Santos A. y Castro Gil M. A. (2009). Generación de energías renovables: generación eléctrica con energías renovables. Pearson.

CARTIF (2018). Producción de biometano para combustible de transporte a partir de residuos de biomasa. Recuperado de <http://www.cytetd.org/es/biometrans>

Centro de las Nuevas Tecnologías del Agua de Sevilla (2008). Manual de Depuración de Aguas Residuales Urbanas. Alianza por el Agua. Recuperado de <http://www.alianzaporelagua.org>

COARCO S.A. (1 de Noviembre de 2017). EDAR video infográfico. Recuperado de <https://vimeo.com/240941923>

Crespi R., Plevich O., Thuar A., Grosso L., Rodríguez C., Ramos D., Barotto, Sartori M., Covinich M. y Boehler J. (2005). Manejo de aguas residuales urbanas (Tesis de posgrado). Universidad Nacional de Río Cuarto.

Díaz, A., Montarcé D. y Viñas J.D. (2017). Diseño de una planta de producción de biogás (Tesis de grado). Universidad Nacional de Mar del Plata.

Dinamarca, A. I. (2010) Tratamiento biológico combinado anaeróbico/aeróbico de estiércol generado en la cría intensiva de cerdo (Tesis de grado). Universidad FASTA.

Dirección nacional de agua potable y saneamiento (2017). Plan nacional de agua potable y saneamiento. Recuperado de <https://www.argentina.gob.ar>

González Granados I.C. (2015). Generación, caracterización y tratamiento de lodos de EDAR (Tesis de doctorado). Universidad de Córdoba.

González Velasco J. (2009). Energías renovables. Editorial Reverté.

Gropelli E., Giampaoli O., Maroni E., Lespinard A. y Muesati J. (2004). Puesta en marcha del biodigestor anaeróbico para el tratamiento de residuos orgánicos. Revista AI-DIS Argentina Ingeniería Sanitaria y Ambiental N°73.

Henry J.G. y Heinke G.W. (1999). Ingeniería Ambiental. México: Editorial Prentice Hall.

IPCC (2007). Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Recuperado de: <https://www.ipcc.ch/>

Información Legislativa y Documental (2019). Recuperado de <http://www.infoleg.gob.ar/>

Lothar Hess M. (1981). Tratamientos preliminares. Peru: CEPIS

Mantilla Morales G. (2016). Alternativas en el manejo integral de lodos en Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Municipales. Recuperado de <http://aneas.com.mx/>

Mar del Plata entre Todos (2018). Segundo informe de monitoreo ciudadano. Recuperado de <https://mardelplataentretodos.org>

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sustentable (2016). Informe del estado del ambiente. Recuperado de <https://www.argentina.gob.ar>

Metcalf y Eddy (1998). Ingeniería de aguas residuales. Mc Graw – Hill

Moncayo Roujero G. (2012). Manual de dimensionamiento y diseño de biodigestores industriales para clima tropical. AquaLimpia Enigneering e.k.

Montes Morán M. A. y Menéndez Díaz J. A. (2010). El problema de la gestión de lodos en EDARs. Universidad Internacional de Andalucía.

Obras Sanitarias S.E. (31 de Julio de 2018). Estación Depuradora de Aguas Residuales Mar del Plata. Recuperado de <https://www.youtube.com/watch?v=4XeMml7RjDg>

ONU (2017). Aguas residuales el recurso desaprovechado. Recuperado de <http://www.unesco.org>

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (2019). Guía teórico-práctico sobre el biogás y los biodigestores. Recuperado de <http://www.fao.org>

OSSE y UTN (2017). Proyecto nueva estación depuradora de aguas residuales de la ciudad de Mar del Plata. Recuperado de <http://www.osmgp.gov.ar>

Peralta E., González R., Von Haefen G., Comino A. P., Gayosos G., Vergara S., Genga G. y Scaglioia M. (2002). Compostaje aplicado a los barros cloacales primarios de la ciudad de Mar del Plata. Recuperado de <http://osmgp.gov.ar>

Pistoneci C., Haure J.L. y D'Elmar R. (2010). Energía a partir de las aguas residuales. Argentina: Editorial de la Universidad Tecnología Nacional

Pizano R. (2018). ¿Cómo funciona un biodigestor?. Recuperado de <http://www.proyectofose.mx/>

Panesso A.F., Cadena J.A., Mora Flórez J.J., Ordoñez M.C. (2011). Análisis del biogás captado en un relleno sanitario como combustible primario para la generación de energía eléctrica. Universidad Tecnológica de Pereira

Reynolds K. (2002). Tratamiento de Aguas Residuales en Latinoamérica. De la Llave

Román P., Martínez M.M., Pantoja A. (2013). Manual de Compostaje del Agricultor. Chile: FAO

Ruiz I., Álvarez J.A., Soto M. (2002). El potencial de la digestión anaerobia en el tratamiento de aguas residuales y efluentes de baja carga orgánica (Tesis de grado). Universidad de Coruña, Facultad de Ciencias.

Secretariado Alianza por el Agua (2008). Ecología y Desarrollo, Manual de depuración de aguas residuales urbanas. Recuperado de <http://idiaqua.eu>

Secretaría de Energía de México (2017). Guía técnica para el manejo y aprovechamiento de biogás en plantas de tratamiento de aguas residuales. Recuperado de <https://www.gob.mx>

Secretaria de Estado de la Energía (2018). Manual de energías renovables para municipios y comunas de la provincia de Santa Fe. Recuperado de <https://www.santafe.gov.ar>

Suárez D. A. (2018). Situación actual de América respecto a los residuos biodegradables y el biogás. España: CEDDET

Tchobanoglous G., Theisen H. y Vigil S. (1994). Gestión Integral de Residuos Sólidos. Mc Graw Hill

Tobares L. (2013). La importancia y el futuro del biogás en la Argentina. Argentina: Petrotecnia

Varnero Moreno, M. T. (2011). Manual de biogás. Chile

Vicent, S. C., Berlanga Clavijo J. G., Martínez Cuenca R. M. y Climent Agustina J. (2018). Depuración de aguas residuales: digestión anaerobia. Cátedra FACSA de Innovación en el Ciclo Integral del Agua.

Weber B. (2012). Producción de biogás en México. Red Mexicana de Bioenergía.

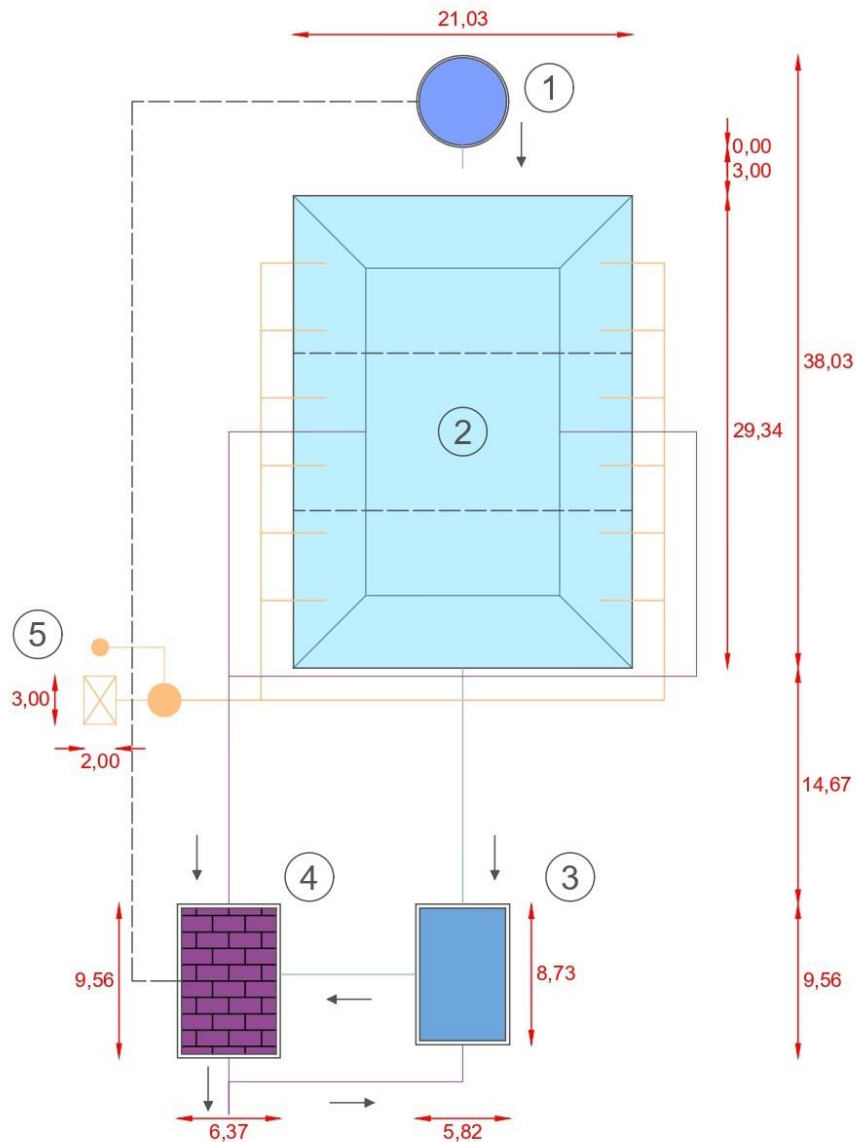


## ANEXOS

Los siguientes planos fueron realizados con AutoCAD basándose en los planos generados del procesamiento de datos con el software Biodigestor-Pro, utilizando el metro (m) como unidad de medición:

### ANEXO 1

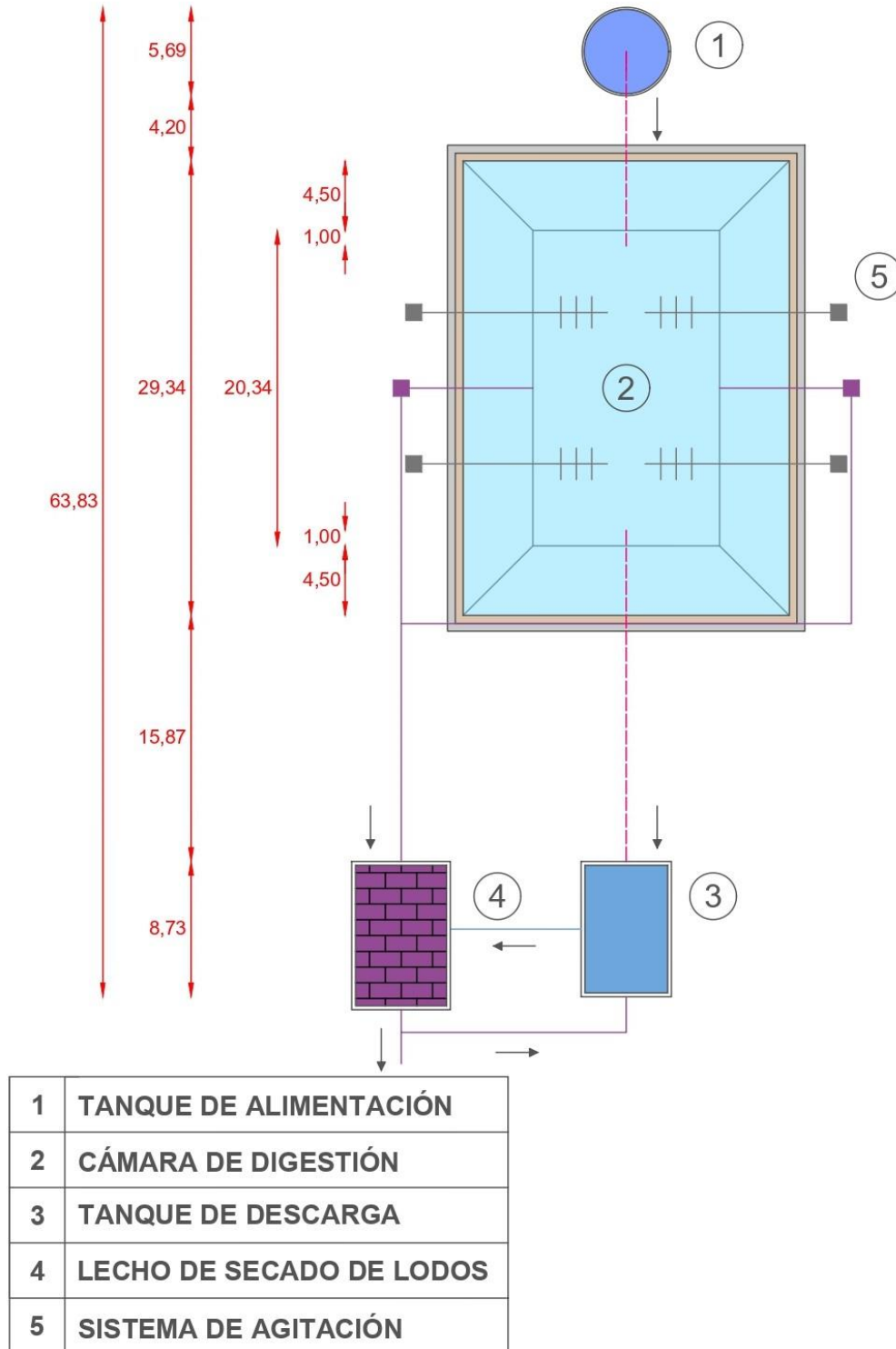
#### PLANO MODELO DE LA PLANTA DE BIOGÁS



1	TANQUE DE ALIMENTACIÓN
2	CÁMARA DE DIGESTIÓN
3	TANQUE DE DESCARGA
4	LECHO DE SECADO DE LODOS
5	GENERADOR

## ANEXO 2

### PLANO MODELO DE LOS SISTEMAS DE ALIMENTACIÓN Y DESCARGA

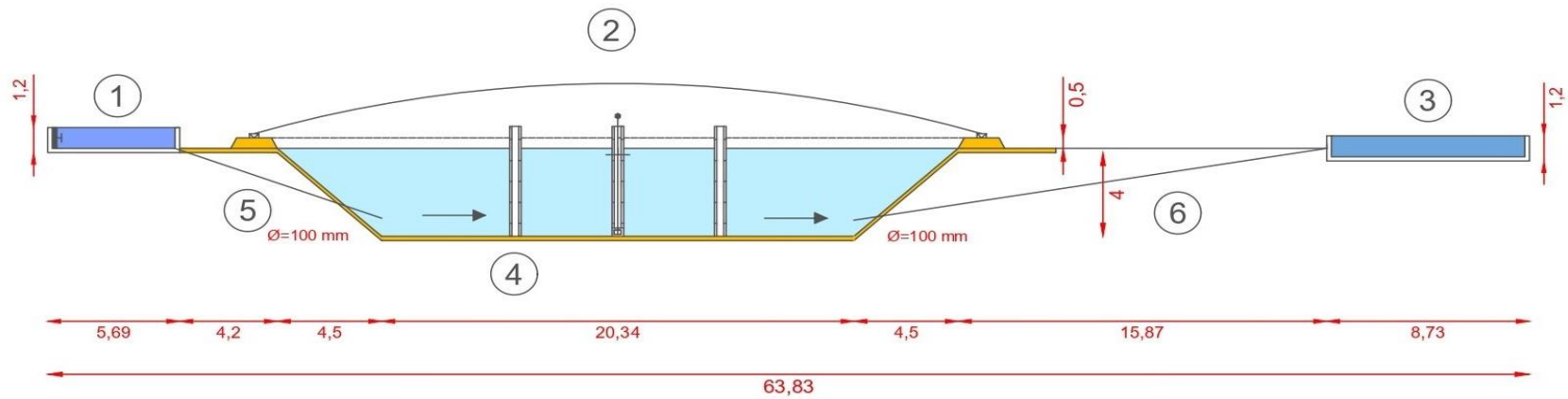


## ANEXO 3

### PLANO MODELO DE LOS SISTEMAS DE ALIMENTACIÓN Y DESCARGA

Superficie tanque de alimentación: 32,38 m<sup>2</sup>  
 Volumen tanque de alimentación: 30,50 m<sup>3</sup>

Superficie tanque de descarga: 50,81 m<sup>2</sup>  
 Volumen tanque de descarga: 61,00 m<sup>3</sup>



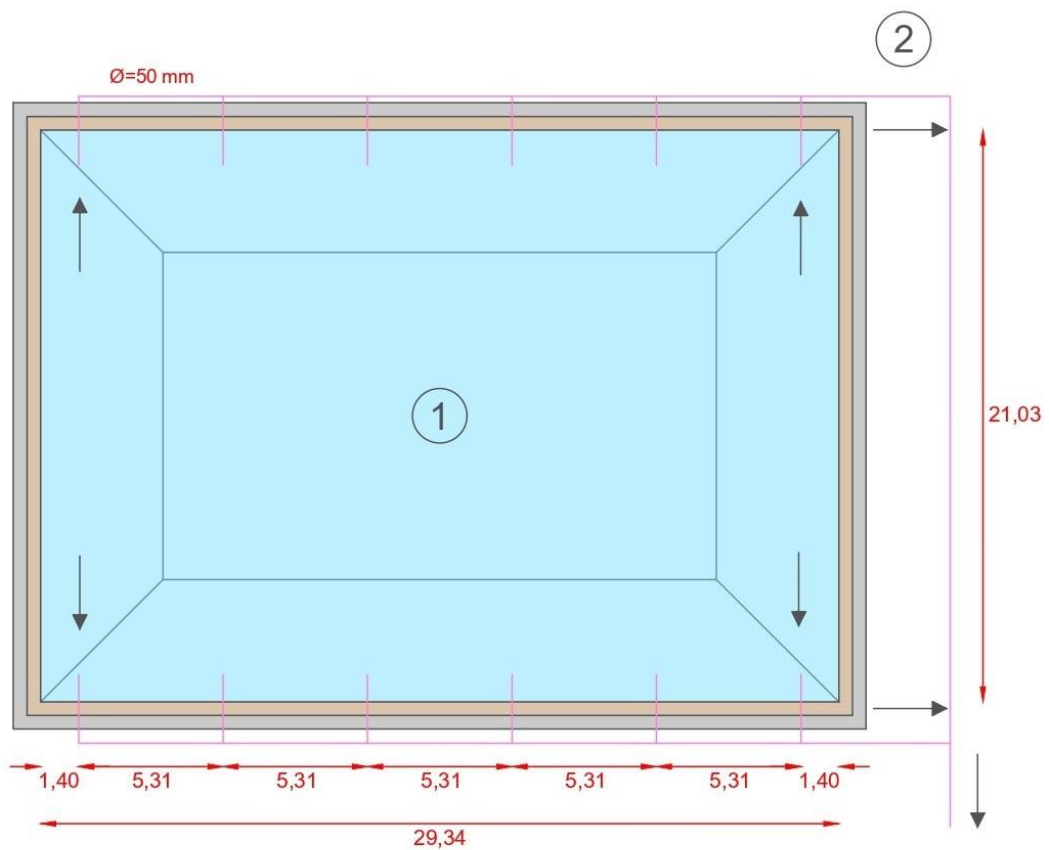
1	TANQUE DE ALIMENTACIÓN
2	CÁMARA DE DIGESTIÓN
3	TANQUE DE DESCARGA
4	GENERADOR
5	CONDUCTO DE ALIMENTACIÓN
6	CONDUCTO DE DESCARGA

## ANEXO 4

### PLANO MODELO DEL SISTEMA DE CAPTACIÓN DE BIOGÁS

Superficie cámara de digestión: 617,02 m<sup>2</sup>

Volumen cámara de digestión: 1900 m<sup>3</sup>



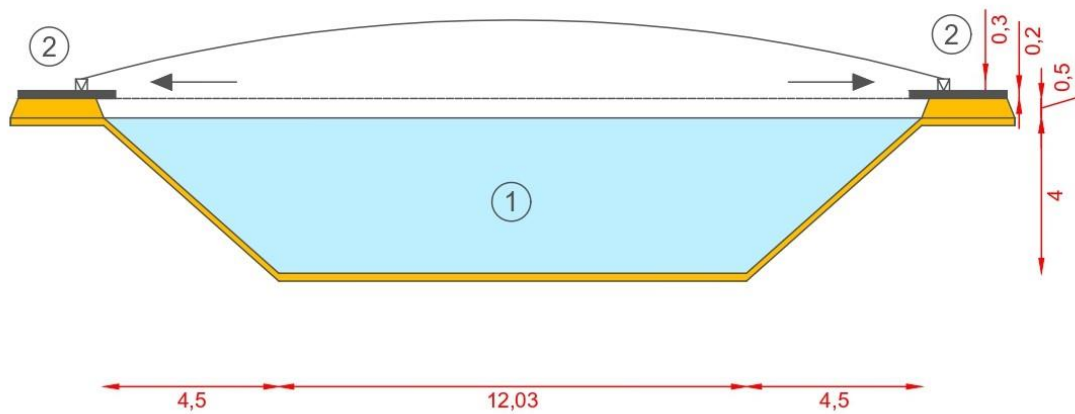
1	CÁMARA DE DIGESTIÓN
2	CONDUCTOS DE CAPTACIÓN DE BIOGÁS

## ANEXO 5

### PLANO MODELO DE CAPTACIÓN DE BIOGÁS

Superficie cámara de digestión: 617,02 m<sup>2</sup>

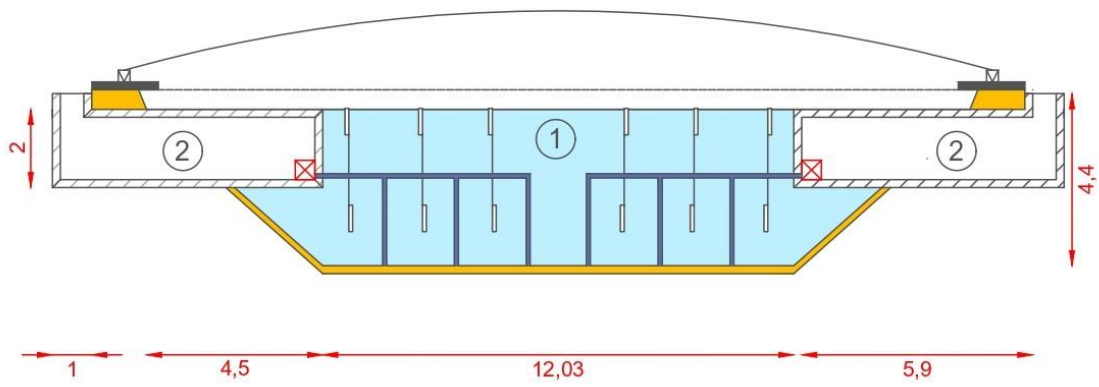
Volumen cámara de digestión: 1900 m<sup>3</sup>



1	CÁMARA DE DIGESTIÓN
2	CONDUCTOS DE CAPTACIÓN DE BIOGÁS

## ANEXO 6

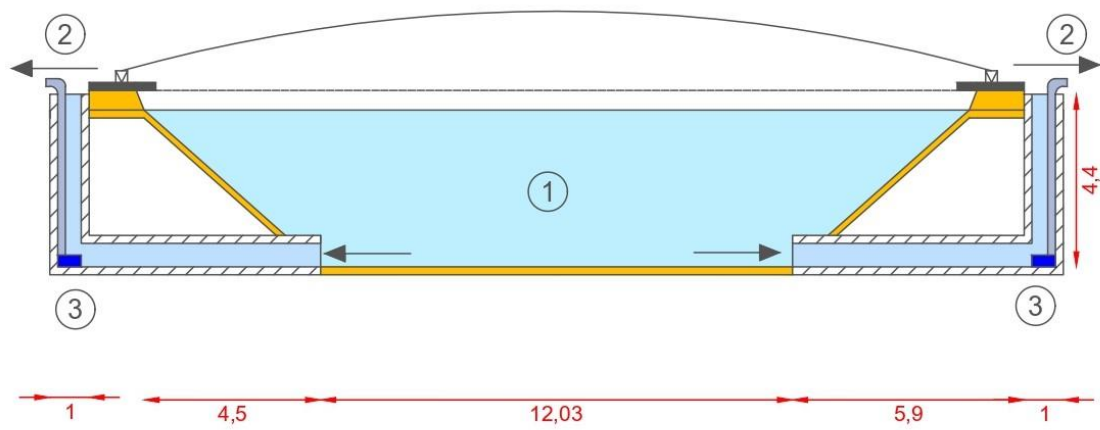
### PLANO MODELO DEL SISTEMA DE AGITACIÓN



1	CÁMARA DE DIGESTIÓN
2	SISTEMA DE AGITACIÓN

## ANEXO 7

### PLANO MODELO DEL SISTEMA DE DESCARGA DE LODOS



1	CÁMARA DE DIGESTIÓN
2	CONDUCTOS DE DESCARGA DE LODOS
3	BOMBAS