



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ZARAGOZA

**ESTUDIO DE PREFACTIBILIDAD TÉCNICO-
ECONÓMICO PARA EL APROVECHAMIENTO DE
BIOGÁS Y MATERIA ORGÁNICA EN EL PROCESO DE
TRATAMIENTO DE LODOS RESIDUALES.**

T E S I S
Para obtener el título de:
INGENIERO QUÍMICO

P R E S E N T A N :

**Pimentel Pérez Ariana
Salcedo Rojo Sergio Heriberto**

**DIRECTOR DE TESIS:
Dr. Rodolfo Alberto Herrera Toledo**

Ciudad de México, 2018.





Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES

ZARAGOZA

CARRERA DE INGENIERÍA QUÍMICA

OFICIO: FESZ/JCIQ/ 361/18

ASUNTO: Asignación de Jurado

Alumno (a): Salcedo Rojo Sergio Heriberto

PRESENTE

En respuesta a su solicitud de asignación de jurado, la jefatura a mi cargo, ha propuesto a los siguientes sinodales:

PRESIDENTE	I.Q. GONZALO RAFAEL COELLO GARCÍA
VOCAL	DR. RODOLFO ALBERTO HERRERA TOLEDO
SECRETARIO	M. EN C. ANA LILIA MALDONADO ARELLANO
SUPLENTE	M. EN I. MARÍA ESTELA DE LA TORRE GÓMEZ TAGLE
SUPLENTE	M. EN I. ELISA BLANCA VIÑAS REYES

Sin más por el momento, reciba un cordial saludo.

ATENTAMENTE
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"
México, Cd. MX a 30 de Agosto de 2018.

JEFA DE CARRERA


I.Q. DOMINGA ORTIZ BAUTISTA



Agradecimientos

Agradecemos a la Universidad Nacional Autónoma de México y en especial a la Facultad de Estudios Superiores Zaragoza, por permitirnos ser parte de esta gran institución, donde pasamos momentos inolvidables, aprendimos muchas cosas y nos permitió conocer a maestros y amigos increíbles que nos ayudaron en nuestra formación personal y académica.

Al Dr. Rodolfo Herrera Toledo por todas sus aportaciones, recomendaciones y tiempo dedicado para la elaboración de este trabajo. Muchas gracias por su confianza, paciencia y amistad.

Al Sistema de Aguas de la Ciudad de México, especialmente al ingeniero Martín Victoria López por el tiempo y asesoría que nos brindó. Gracias por su amistad y por transmitirnos parte de sus conocimientos.

A los miembros del jurado que enriquecieron con sus comentarios este trabajo.

A nuestros amigos por los buenos momentos que compartimos, por su apoyo y compañía a lo largo de esta etapa.

A cada uno de nuestros profesores, que nos aportaron sus conocimientos, experiencias y consejos. Gracias por su dedicación y trabajo a la enseñanza para la formación de grandes profesionistas.

Dedicatoria

Ariana:

Quiero dedicar este trabajo a mis padres: Olga, mami, sin todo tu apoyo no sería la persona que soy y no hubiese llegado hasta este momento, siempre has estado para mí y me has enseñado que todo es posible cuando uno se esfuerza por conseguirlo. Goyo, porque sin ti no vería la vida como la veo, siempre con optimismo, por tener una sonrisa que compartir, ganas de seguir y también por enseñarme que nada dura para siempre y hay que aprovechar cada etapa que vivimos al máximo.

A mi hermana, Anahí, que siempre ha sido mi modelo por seguir. Toda tú me llena de orgullo y me inspira en todo lo que hago. Me has enseñado que debemos tener un motivo para lograr tantas cosas. Porque me has dado dos sobrinos maravillosos que me han enseñado mucho y que hacen que quiera ser una mejor persona.

A mis sobrinos, Edu y Bi, que llenaron y seguirán llenando mi vida de alegría y responsabilidad. Ustedes me hacen tan, pero tan feliz.

A toda mi familia que de alguna forma ha contribuido en mi desarrollo personal y en especial a mi abuelita Esperanza, hubiese querido compartir cada uno de mis momentos contigo y que me vieras crecer aún más.

A todos ustedes los quiero infinitamente.

Sergio:

A Dios por guiarme siempre por el buen camino, cuidarme, darme salud para seguir adelante y fortaleza para enfrentar las adversidades.

A mi madre Guíllermína Rojo Hinojosa que gracias a su gran esfuerzo y trabajo pude lograr terminar mis estudios. Gracias a tu apoyo, comprensión, amor y consejos que me has brindado me he convertido en todo lo que soy como persona, sin tí no habría podido lograr este sueño.

A mis abuelitos Aurora e Ignacio por siempre cuidarme, apoyarme y preocuparse por mi salud y educación, estaré eternamente agradecido con ustedes, los amo.

A mi hermano Ricardo que siempre fue una fuente de motivación para terminar mis estudios, y seguir adelante. Gracias por siempre mantener en mí un espíritu joven y alegre.

Y a toda mi familia y amigos que siempre me apoyaron, motivaron y me desearon lo mejor.

Contenido

Agradecimientos.....	3
Dedicatoria.....	4
Lista de figuras.....	12
Índice de tablas.....	14
Lista de gráficas.....	16
Introducción.....	17
Objetivos.....	18
Objetivo general.....	18
Objetivos particulares.....	18
Capítulo I. Panorama general de los recursos hídricos y el tratamiento de aguas residuales.....	19
Introducción.....	20
1.1 Recursos hídricos.....	20
1.2 Calidad del agua.....	25
1.3 Aguas residuales.....	26
1.3.1 Características de las aguas residuales.....	28
1.4 Tratamiento de aguas residuales.....	29
1.5 Normatividad aplicable en el tratamiento de aguas residuales.....	36
Capítulo II. Tratamiento de lodos.....	38
Introducción.....	39
2.1 Características de los lodos.....	39
2.2 Normatividad aplicable en el tratamiento de lodos residuales.....	40
NOM-004-SEMARNAT-2002.....	40
NOM-083-SEMARNAT-2003.....	41
2.3 Procesos de tratamiento de lodos.....	42
2.3.1 Pretratamiento.....	42
Dilaceración.....	42
Desarenado.....	42
Mezclado.....	42
2.3.2 Espesamiento.....	42
Espesador de gravedad.....	43

Espesador de flotación por aire disuelto.....	44
Espesador centrífugo.....	44
Espesador de filtro banda por gravedad.....	45
Espesador de tambor rotatorio	46
Comparación de los métodos de espesamiento	46
Tecnologías de uso reciente	48
Espesador de disco.....	48
Espesador de voluta/tornillo.....	48
Espesador de membranas.....	49
2.3.3 Estabilización	49
Estabilización alcalina.....	50
Compostaje	50
Tratamiento térmico	50
Digestión aeróbica	50
Digestión anaeróbica	50
Comparación de los métodos de estabilización.....	50
2.3.4 Desinfección	52
Pasteurización	52
Almacenamiento a largo plazo	52
2.3.5 Acondicionamiento	53
2.3.6 Deshidratación.....	54
Filtros banda.....	54
Filtros prensa de placas.....	54
Centrifugación.....	54
Lechos y lagunas de secado.....	55
Comparación de los métodos de deshidratación.....	56
2.4 Alternativas para el aprovechamiento de lodos residuales.....	57
2.4.1 Fundamentos de la producción de biogás.....	57
2.4.2 Estabilidad del proceso	59
Cambios de carga	59
Tiempo de retención hidráulica	59
Temperatura.....	60

pH y alcalinidad	60
Ácidos grasos volátiles (AGV)	61
Toxicidad	61
Mezclado y agitación	61
Forma del tanque	61
2.4.3 Variaciones al proceso.....	61
Digestión de baja tasa	62
Digestión de alta tasa.....	62
Digestión de dos etapas.....	62
Capítulo III. Propuesta de tratamiento de lodos residuales para la PTAR “Cerro de la Estrella”	63
Introducción.....	64
3.1 Lodos generados en la PTAR “Cerro de la Estrella”.....	64
3.2 Selección del tren de tratamiento de lodos.	65
3.2.1 Descripción del proceso de tratamiento de lodos residuales.....	66
3.3 Balance de masa para la producción de biogás.	68
3.3.1 Producción de lodo primario y secundario.....	69
3.3.2 Espesamiento	70
3.3.3 Digestión.....	70
3.3.4 Deshidratación.....	72
3.4 Dimensionamiento de los equipos del proceso de tratamiento de lodos.....	73
3.4.1 Espesamiento	73
3.4.2 Digestión.....	73
3.4.3 Pasteurización	74
3.4.4 Deshidratación.....	75
Acondicionamiento	75
3.4.5 Bombas	76
Capítulo IV. Propuesta para la integración de un sistema de cogeneración en la PTAR “Cerro de la Estrella”	77
Introducción.....	78
4.1 Cogeneración.....	78
4.1.1 Necesidades de calor.....	80
4.1.2 Consumos y costos energéticos en la planta	82

4.1.3	Selección del sistema de cogeneración.....	83
4.2	Análisis económico.....	88
4.2.1	Inversión.....	88
	Activos fijos.....	88
	Activos diferidos.....	89
	Capital de trabajo.....	89
4.2.2	Estado de resultados proforma.....	89
	Ingresos.....	89
	Egresos.....	90
4.2.3	Evaluación financiera.....	90
	Valor presente neto (VPN).....	90
	Tasa interna de retorno (TIR).....	91
	Tiempo de recuperación de la inversión (TRI).....	91
4.2.4	Análisis de sensibilidad.....	94
	Precio de la energía eléctrica.....	94
	Venta de lodo.....	95
	Generación de Energía eléctrica.....	95
Capítulo V. Disposición final de lodo.....		97
Introducción.....		98
5.1	Opciones para la disposición de lodos.....	98
5.1.1	Usos agrícolas.....	98
	Ventajas.....	98
5.1.2	Usos forestales.....	99
	Ventajas.....	100
5.1.3	Recuperación de terrenos.....	100
	Ventajas.....	100
5.1.4	Terrenos destinados a la evacuación del lodo.....	101
	Ventajas.....	101
5.2	Limitaciones para la aplicación de lodos.....	101
	Contenido orgánico y patógenos.....	102
	Nutrientes.....	102
	Metales.....	102

5.3	Evaluación de sitio para la disposición de lodos.....	102
5.3.1	Características físicas de los sitios para disposición.....	102
	Permeabilidad	103
	Profundidad al nivel freático.....	103
	Topografía y proximidad a zonas críticas.....	103
	Aguas superficiales.....	104
	Urbanizaciones y viviendas.....	104
	Pozos de agua	105
5.3.2	Tasas de aplicación del lodo.....	105
	Tasas de aplicación basadas en cargas contaminantes	106
	Tasas de aplicación basadas en las cargas de nutrientes.....	106
5.3.3	Necesidades de superficie.....	109
5.4	Ejemplos de aplicación de lodos en México	109
5.4.1	Jalisco.....	109
5.4.2	Durango	110
5.4.3	Chihuahua	111
5.5	Disposición final de los lodos generados en la PTAR “Cerro de la Estrella”.	112
	Conclusiones	115
	Bibliografía	117
	ANEXO 1. Diagramas.....	124
	ANEXO 2. Balance de masa.....	131
	ANEXO 3. Dimensionamiento de equipos	142
	Espesador.....	142
	Digestor.....	143
	Tanques de retención (pasteurización)	145
	Deshidratador	146
	Acondicionamiento	147
	Cálculo de tuberías y bombas.....	148
	Cálculo para bomba de cárcamo de lodos a espesadores (BL-101).....	148
	ANEXO 4. Requerimiento de calor en el tratamiento de lodos.....	154
	Digestión mesofílica.....	154
	Pérdidas de calor en el digestor	155

Descenso de la temperatura en el digestor	159
Pasteurización.....	159
ANEXO 5. Dimensionamiento del sistema de cogeneración.	161
Intercambiador de pasteurización (IE-302).	163
Intercambiador de digestión (IE-201 y IE-202).	164
Intercambiador de recuperación de calor (IE-301)	164

Lista de figuras

Figura 1. 1 Grado de presión sobre los recursos hídricos.	23
Figura 1. 2 Grado de presión por región hidrológico-administrativa, 2016.	24
Figura 1. 3 Parámetros más usados para identificar la calidad del agua.	25
Figura 1. 4 Componentes de las aguas residuales y sus efectos.	27
Figura 1. 5 Principales características físicas, químicas y biológicas del agua residual.	28
Figura 1. 6 Porcentaje y cantidad de agua municipal e industrial tratada en México.	31
Figura 1. 7 Objetivos principales del tratamiento de las aguas residuales.	32
Figura 1. 8 Tecnologías para el tratamiento de aguas residuales.	34
Figura 1. 9 Nivel de especificidad de la legislación nacional relativa al control de las descargas de aguas residuales.	37
Figura 1. 10 Normas oficiales mexicanas relacionadas con el tratamiento de aguas residuales ..	37
Figura 2. 1. Ejemplo de un espesador de gravedad.	44
Figura 2. 2 Espesador de flotación por aire disuelto.	44
Figura 2. 3 Centrifugas utilizadas (a) centrífuga de camisa maciza y (b) centrífuga de cesta.	45
Figura 2. 4 Esquema de un espesador filtro banda por gravedad.	46
Figura 2. 5 Esquema de un espesador de tambor rotatorio.	46
Figura 2. 6 Esquema de un espesador de disco.	48
Figura 2. 7 Esquema de espesador de voluta.	49
Figura 2. 8 Esquema de un espesador de membrana.	49
Figura 2. 9 Esquema de un sistema de pasteurización con recuperación de calor.	52
Figura 2. 10 Ejemplos de acondicionadores químicos.	53
Figura 2. 11 Esquema de un filtro banda.	54
Figura 2. 12 Filtro prensa de volumen fijo y volumen variable, respectivamente.	55
Figura 2. 13 Lecho de secado de arena típico.	55
Figura 2. 14 Esquema de reacciones de la digestión anaeróbica.	58
Figura 2. 15 Efecto de la temperatura y el tiempo de retención sobre la eliminación de SSV.	59
Figura 2. 16 Tasa de crecimiento de microorganismos según la temperatura.	60
Figura 2. 17 Dependencia del pH en la actividad metanogénica.	61
Figura 3. 1 Diagrama de Flujo de Proceso sencillo.	67
Figura 4. 1 Esquema de funcionamiento de una central térmica.	78
Figura 4. 2 Comparativa de un esquema de consumos tradicional de energía y usando una planta de cogeneración.	79
Figura 4. 3 Esquema de los mecanismos de transferencia en la pared del digestor.	81
Figura 4. 4 Información correspondientes al motor de cogeneración de la marca GE Power.	86
Figura 4. 5 Esquema de la distribución de la energía eléctrica.	90

Figura 5. 1 Rendimiento de cultivos en la agricultura a diferentes tasas de aplicación.	99
Figura 5. 2 Crecimiento de árboles con la aplicación de lodos.	100
Figura 5. 3 Lodos utilizados como mejoradores de suelo, antes y después de la aplicación	101
Figura 5. 4 Experimento llevado a cabo con biosólidos en el cultivo de maíz y sorgo.	110
Figura 5. 5 Rendimientos de los diferente cultivos estudiados.	111

Índice de tablas.

Tabla 1. 1 Países con mayor agua renovable per cápita.....	22
Tabla 1. 2 Países con mayor grado de presión sobre los recursos hídricos.	22
Tabla 1. 3 Ejemplos de impactos negativos de las aguas residuales no tratadas en la salud humana, en el medio ambiente y las actividades productivas.	27
Tabla 1. 4 Composición típica del agua residual doméstica.	29
Tabla 1. 5 Contaminantes de importancia en el tratamiento de agua residual.	30
Tabla 1. 6 Operaciones unitarias empleadas para la eliminación de los posibles contaminantes presentes en las aguas residuales.	33
Tabla 1. 7 Tipos de tratamiento de aguas residuales.....	35
Tabla 2. 1 Composición típica de lodos primarios y secundarios.	39
Tabla 2. 2 Límites máximos permisibles para metales pesados en biosólidos.....	40
Tabla 2. 3 Límites máximos permisibles para patógenos y parásitos en lodos y biosólidos.	41
Tabla 2. 4 Aprovechamiento de biosólidos.	41
Tabla 2. 5 Categorías de los sitios de disposición final.....	41
Tabla 2. 6 Métodos de espesado en el tratamiento de lodos.....	43
Tabla 2. 7 Comparativa entre los diferentes procesos de espesamiento.....	47
Tabla 2. 8 Comparativa entre los diferentes procesos de estabilización.	51
Tabla 2. 9 Comparativa entre los diferentes procesos de deshidratación.	56
Tabla 2. 10 Características generales del biogás.	57
Tabla 3. 1 Comparación entre las características de los lodos residuales de “Cerro de la Estrella” y la normatividad aplicable NOM-004.	64
Tabla 3. 2 Resultados del balance para la producción de lodo primario y secundario (mezcla). 69	
Tabla 3. 3 Resultados del balance en el espesador: lodo espesado (L.E.).....	70
Tabla 3. 4 Resultados del balance en el digestor: lodo digerido (L.D.).	71
Tabla 3. 5 Resultados del balance en el digestor para la producción de biogás.	71
Tabla 3. 6 Resultados del balance en el deshidratador: lodo deshidratado (L.Des.).....	72
Tabla 3. 7 Resultado del dimensionamiento del espesador de gravedad.....	73
Tabla 3. 8 Resultados del dimensionamiento del digestor tipo huevo.	74
Tabla 3. 9 Resultados del dimensionamiento de los tanques de retención en la pasteurización.	74
Tabla 3. 10 Resultados del dimensionamiento de los filtros banda para la deshidratación del lodo.	75
Tabla 3. 11 Resultados del dimensionamiento del tanque de preparación de polímero.....	75
Tabla 4. 1 Emisiones de plantas de cogeneración y generación convencional en g/kWh eléctrico.	79
Tabla 4. 2 Requerimiento de calor para la digestión mesofílica.	80

Tabla 4. 3 Requerimientos de calor para la pasteurización.	81
Tabla 4. 4 Pérdidas de calor en el digestor.....	81
Tabla 4. 5 Requerimiento total de calor.	82
Tabla 4. 6 Relación Q/E.....	83
Tabla 4. 7 Tipos de combustible para la generación de calidad de calor.	85
Tabla 4. 8 Balance energético alrededor del sistema de cogeneración.....	87
Tabla 4. 9 Resultados del dimensionamiento de los intercambiadores de calor.....	88
Tabla 4. 10 Inversión inicial en activos fijos y diferidos y capital de trabajo.....	89
Tabla 4. 11 Estado de resultados pro-forma.	92
Tabla 4. 12 Flujos de efectivo descontados y acumulados para la obtención del VPN.	94
Tabla 5. 1 Limitaciones para la aplicación de lodo basado en diferentes características del suelo.	102
Tabla 5. 2 Distancia mínima al nivel freático para la disposición de lodos.	103
Tabla 5. 3 Limitaciones de pendiente típicas para la aplicación de lodo al suelo.....	104
Tabla 5. 4 Consideraciones requeridas por la zona amortiguadora para aguas superficiales.	104
Tabla 5. 5 Distancias sugeridas para las áreas de aplicación de lodos.....	105
Tabla 5. 6 Tasas de aplicación de lodo para las diferentes opciones de disposición.	105
Tabla 5. 7 Tasas de mineralización del nitrógeno orgánico presente en el lodo.....	107
Tabla 5. 8 Consumo de nutrientes de diversos cultivos.....	108
Tabla 5. 9 Resultados obtenidos en los cultivos estudiados con y sin aplicación de biosólidos.	112
Tabla 5. 10 Superficie requerida para la disposición de lodos por tipo de cultivo.	113

Lista de gráficas

Gráfica 1. 1 Países con mayor consumo de agua per cápita.	21
Gráfica 1. 2 Distribución de los volúmenes concesionados por usos consuntivos.....	24
Gráfica 1. 3 Nivel de tratamiento de aguas residuales.	32
Gráfica 1. 4 Principales procesos de tratamiento de aguas residuales municipales por caudal tratado, 2016.	36
Gráfica 3. 1 Variación de la producción de biogás en función de los SSVD.....	72
Gráfica 4. 1 Consumos energéticos de la PTAR “Cerro de la Estrella”.	83
Gráfica 4. 2 VPN y TIR obtenidas con la variación en el precio de energía eléctrica.....	95
Gráfica 4. 3 VPN y TIR obtenidas con la variación de la venta de lodo.....	96
Gráfica 4. 4 VPN y TIR obtenidas con la variación en la producción de energía eléctrica.	96
Gráfica 5. 1 Superficie sembrada de los cultivos seleccionado en diferentes estados.	113

Introducción

Los recursos hídricos son de vital importancia para el desarrollo de nuestra sociedad, pues su uso está ligado a la producción de alimentos y energía, consumo, actividades recreativas y para desempeñar las actividades que desarrollamos cotidianamente. Las aguas residuales son generadas por la mayoría de las actividades que realizamos, en el año 2016 se generaron en México 14,074 hm³ de aguas residuales municipales e industriales según CONAGUA, lamentablemente las aguas residuales son un tema al que se le da poca importancia en comparación con el agua potable y su distribución.

Actualmente en México se tratan cerca del 58.25 % de las aguas residuales municipales generadas, y el 56 % del caudal tratado es por medio del proceso de lodos activados, de acuerdo con lo reportado por CONAGUA, lo cual genera residuos que en muchos casos no son tratados adecuadamente, lo que ocasiona la contaminación de los cuerpos de agua donde se vierten. Aunque el tratamiento de los lodos es costoso, estos deben dejar de verse como un problema y tomarse como una solución, ya que se puede obtener de ellos beneficios, tanto económicos como para la población en general, tales como la producción de biogás que puede emplearse en la generación de energía, y biosólidos para mejorar las características del suelo.

Los biosólidos que se generan en un proceso de tratamiento de lodos están regulados por la normatividad NOM-004-SEMARNAT-2002 (NOM-004), la cual establece los límites máximos permisibles en cuanto a contaminantes para su aprovechamiento y disposición final. El Instituto de Ingeniería de la UNAM reporta que los lodos de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales “Cerro de la Estrella” (PTAR “CE”), presentan un alto contenido de huevos de helminto (HH), esto se vuelve un problema ya que su destrucción no sería posible con una digestión anaerobia mesofílica, debido a que se requiere una mayor temperatura para su eliminación, el no eliminarlos dejaría a los lodos fuera de la normatividad y requerirían de un manejo especial, por ende, es necesario implementar un sistema adicional de desinfección para la destrucción de estos parásitos y se cumpla con lo exigido por la NOM-004.

Existen varios procesos para el tratamiento de los lodos residuales, pero, en su mayoría se emplea la digestión aerobia y anaerobia para la estabilización de estos residuos. De acuerdo con el caudal tratado de la PTAR “CE” y a las características del lodo generado, en este trabajo se propuso un tren de tratamiento de lodos que incluye la digestión anaerobia mesofílica para la producción de biogás y su aprovechamiento en un sistema de cogeneración. El sistema de cogeneración aportaría 1 530 kW de energía eléctrica para satisfacer en un 45.8 % las necesidades energéticas de la PTAR “CE” y 1 702 kW de energía térmica que podrían utilizarse en el proceso de tratamiento de lodos en la digestión y desinfección.

Los biosólidos pueden ser utilizados como acondicionadores de suelos en la agricultura, ya que mejoran sus características y proveen nutrientes esenciales para el crecimiento vegetal como: nitrógeno, fósforo, níquel, zinc y cobre. Debido a sus ventajas los biosólidos pueden utilizarse como sustitutos de fertilizantes químicos. La experiencia de la aplicación de lodos residuales en México se ha incrementado y el lodo estabilizado ha sido utilizado para la producción de chile,

cebolla, alfalfa, avena, maíz, cultivos forrajeros, trigo y sorgo, de acuerdo con estudios realizados por diversas instituciones como el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) y la Comisión Estatal del Agua (CEA).

Finalmente, con el tren de tratamiento propuesto se pretende obtener biosólidos clase A, B o C para disponerlos principalmente en zonas agrícolas, para mejorar el rendimiento y producción de cultivos de maíz, alfalfa, trigo y flores en la CDMX y en diferentes estados de la república aledaños a la ciudad, así como en zonas forestales y como mejoradores de suelos dañados por diversas actividades.

Objetivos.

Objetivo general.

Plantear un sistema de tratamiento de lodos con la finalidad de obtener un lodo estabilizado, a través de un proceso biológico de digestión anaerobia para la producción de biogás, y a partir de este integrar un proceso de cogeneración eficiente, aprovechando así la energía producida para disminuir los gastos de los consumos energéticos que el proceso de tratamiento de aguas residuales demanda y determinar el costo-beneficio.

Objetivos particulares.

- Conocer la situación actual de los recursos hídricos y el tratamiento de las aguas residuales.
- Proponer un tren de tratamiento de lodos para la generación de biogás analizando los procesos más adoptados.
- Estimar la cantidad de biogás que puede obtenerse a partir de la digestión anaerobia de los lodos.
- Dimensionar los equipos del proceso de tratamiento de lodos y seleccionar los equipos de acondicionamiento de biogás para su posterior uso.
- Analizar los consumos energéticos de una PTAR.
- Dimensionar el sistema de cogeneración más adecuado para una PTAR.
- Proponer el uso de los biosólidos obtenidos en el tratamiento de los lodos.
- Realizar el análisis económico y determinar si es factible económicamente la implementación de este proyecto.

Panorama general de los recursos hídricos y el tratamiento de aguas residuales



Introducción

El agua tiene presencia en la vida social y económica de nuestra población. La calidad de vida de la población está íntimamente relacionada con este elemento, ya que al escasear o tener una mala calidad da como resultado afectaciones a la salud y el bienestar. Su preservación en cantidad y calidad es una tarea que debe interesarnos vitalmente a todos, tarea que se vuelve aún más compleja debido al crecimiento de la población, concentración en áreas urbanas, la demanda de servicios y productos, además de las modificaciones al ciclo del agua que pueden ser atribuidas al cambio climático.

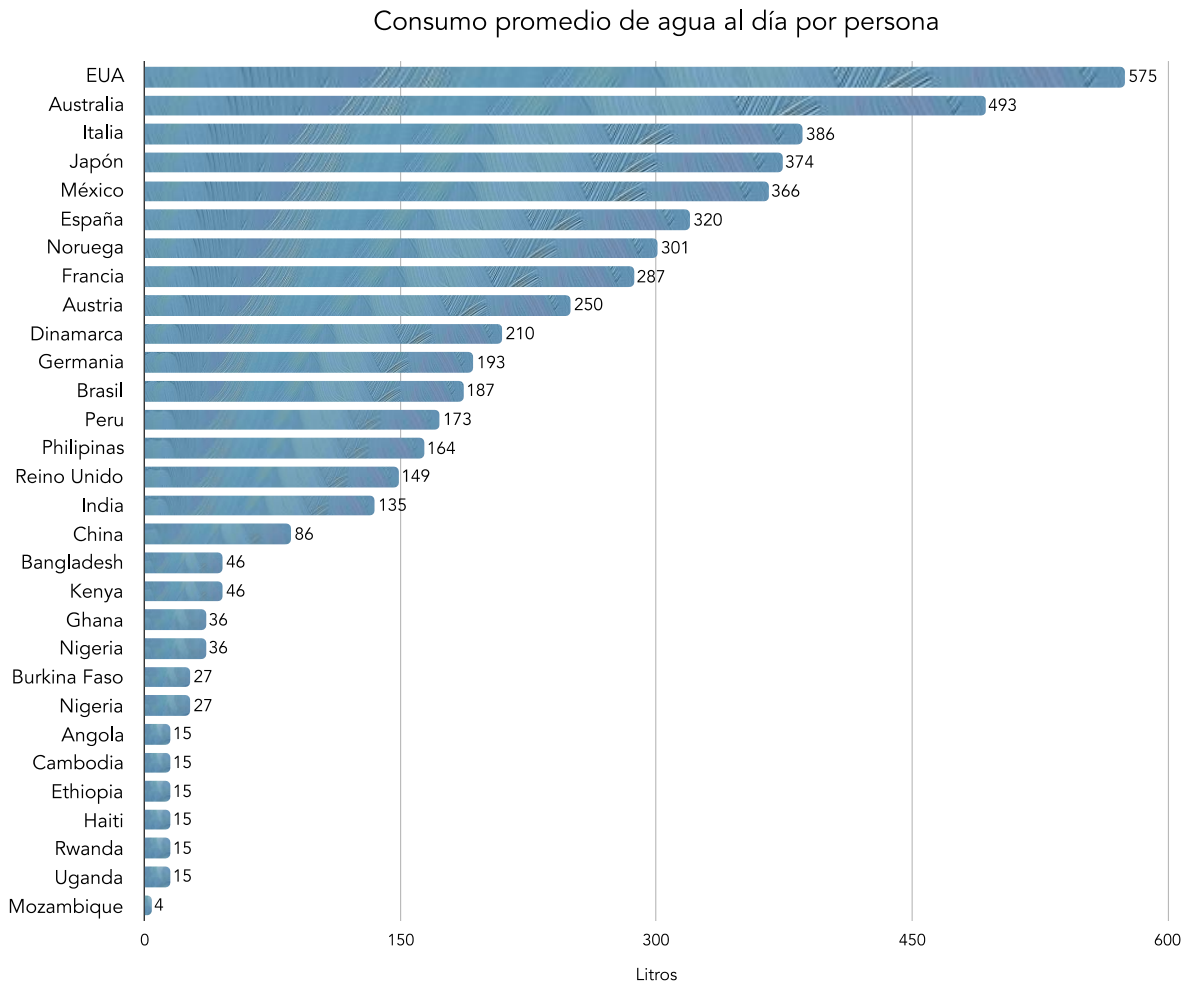
1.1 Recursos hídricos

Nuestro planeta también es llamado el planeta azul, ya que alrededor del 70 % de la superficie de la tierra está cubierta por agua, a pesar de ser uno de los compuestos más abundantes en la naturaleza diferentes factores limitan la cantidad disponible para el consumo humano. En la tierra hay cerca de 1 386 billones de hm^3 de los cuales solo 10.67 billones son agua dulce accesible para el ser humano, esto representa un 0.77 % del agua disponible en el planeta (NUMERAGUA, 2017). El agua es un elemento esencial para la existencia de la vida en nuestro planeta, los seres vivos somos, en mayor o menor medida agua, es necesario consumirla de forma continua para vivir y fundamental para realizar nuestras actividades cotidianas.

El consumo de este recurso tan valioso está en función de una serie de factores inherentes a la localidad que se abastece y varía de una ciudad a otra. Los principales factores que influyen en el consumo de agua en una localidad pueden ser:

Clima, nivel de vida de la población, costumbres de la población, sistema de provisión y cobranza (servicio médico o no), calidad del agua suministrada, costo del agua (tarifa), presión en la red de distribución, consumo comercial, consumo industrial, consumo público, pérdidas en el sistema, existencia de red de alcantarillado y otros factores (Instituto de Ingeniería, UNAM).

El consumo de agua en los países desarrollados puede ser alto, según el Foro Económico Mundial 2017, en promedio un estadounidense usa cerca de 575 litros por día, esta cifra coloca a Estados Unidos en la primera posición a nivel mundial de consumo per cápita para realizar sus actividades cotidianas, en la misma lista México ocupa el lugar número 5 con 366 litros por día por habitante ([gráfica 1.1](#)). Aunque México no es considerado un país desarrollado, el consumo per cápita es alto, esto puede ser atribuido a los factores antes mencionados y a una falta de cultura del uso consiente del agua.



Gráfica 1. 1 Países con mayor consumo de agua per cápita. Elaboración propia con datos tomados de Foro Económico Mundial 2017 & Data360.

El agua renovable es un indicador importante en el mundo, ya que nos dice la cantidad máxima de agua factible a explotarse anualmente en cada país sin alterar el ecosistema, en otras palabras, la cantidad de agua renovada por la lluvia, y los flujos de salida (exportaciones) y de entrada (importaciones) de agua con países vecinos. Anualmente México recibe aproximadamente 1 449 471 millones de metros cúbicos de agua en forma de precipitación, pero no toda puede ser utilizada ya que se estima que el 72.2 % se evapotranspira y regresa a la atmósfera, el 21.5 % escurre por los ríos y arroyos y el 6.3 % restante se infiltra al subsuelo de forma natural y recarga los acuíferos. En cuanto a las entradas de agua se reportan 48 381 hm³ y de salidas 432 hm³. Con estas consideraciones México reporta anualmente cerca de 450 828 millones de metros cúbicos de agua dulce renovable (CONAGUA, 2015).

Este indicador tiene más sentido si se toma en cuenta el número de habitantes del país calculando así un agua renovable per cápita. En el año 2016 México reportó un volumen de 451 000 hm³ de agua renovable, y 122 273 000 habitantes, teniendo así un agua renovable per cápita de 3 687 m³/hab/año, a nivel mundial estas cifras colocan a México 92 lugares por debajo de Islandia (ver [tabla 1.1](#)) que es el número 1 con 516 090 m³/hab/año, casi 14 000 % más que

México, cabe mencionar que Islandia en el año 2016 reportó una población de 329 000 habitantes.

Los recursos hídricos en el mundo se encuentran bajo una constante presión, cada año aumenta significativamente la necesidad del uso de agua, siendo el incremento en el consumo en los hogares, la agricultura y la industria las principales razones, estos factores conducen a la escasez del agua lo que perjudicaría enormemente el desarrollo adecuado de la población. Es posible cuantificar la presión sobre los recursos hídricos al dividir la extracción del recurso entre el agua renovable o disponible.

Tabla 1.1 Países con mayor agua renovable per cápita.

No	País	Población (miles de habitantes)	Agua renovable (miles de hm ³)	Agua renovable per cápita (m ³ /hab/año)
1	Islandia	329	170	516 090
2	Guyana	767	271	353 279
3	Surinam	543	99	182 320
4	Congo	4 620	832	180 087
5	Papúa Nueva Guinea	7 619	801	105 132
12	Belice	359	22	60 479
13	Perú	31 377	1880	59 916
14	Paraguay	6 639	388	58 412
20	Colombia	48 229	2 360	48 933
22	Brasil	207 848	8 647	41 603
61	E.U.A.	321 774	3 069	9 536
93	México	122 273	451	3 687
98	Francia	64 395	211	3 277
108	Turquía	78 666	212	2 690
151	Sudáfrica	54 490	51	942

Fuente: Atlas del Agua en México, 2017.

Actualmente a nivel mundial la zona de África del Norte y Medio Oriente presentan un alto grado de presión (ver [tabla 1.2](#) y [figura 1.1](#)) México presenta un grado de presión de 19.2 % este porcentaje es considerado bajo, pero puede ser engañoso, ya que, al ser calculado a escala nacional, se presentan valores de alta presión en gran parte de la república e inclusive se presenta un muy alto grado de presión en el Valle de México con un 139.2 % ([figura 1.2](#)). Este indicador es un referente importante al que debemos prestar atención y buscar la reducción de este, ya que de descuidarlo pueden presentarse serios problemas a mediano y largo plazo.

Tabla 1.2 Países con mayor grado de presión sobre los recursos hídricos.

No	País	Agua renovable (miles de hm ³)	Extracción total (miles de hm ³)	Grado de presión (%)	Clasificación del grado de presión
1	Kuwait	0.00	0.90	2 075.00	Muy alto
2	Emiratos Árabes Unidos	0.20	4.00	1 867.00	Muy alto
3	Arabia Saudita	2.40	23.70	943.30	Muy alto
4	Libia	0.70	5.80	822.90	Muy alto

5	Qatar	0.10	0.40	374.10	Muy alto
6	Bahréin	0.10	0.40	205.80	Muy alto
7	Yemen	2.10	3.60	168.60	Muy alto
8	Egipto	58.30	78.00	126.60	Muy alto
9	Turkmenistán	24.80	28.00	112.50	Muy alto
10	Uzbekistán	48.90	56.00	100.60	Muy alto
49	México	450.8	86.60	19.20	Bajo
60	Francia	211.60	30.20	14.10	Bajo
62	Estados Unidos de América	3 069.00	485.60	13.60	Bajo
145	Brasil	8 647.00	74.80	0.90	Sin estrés

Fuente: Atlas del Agua en México, 2017.

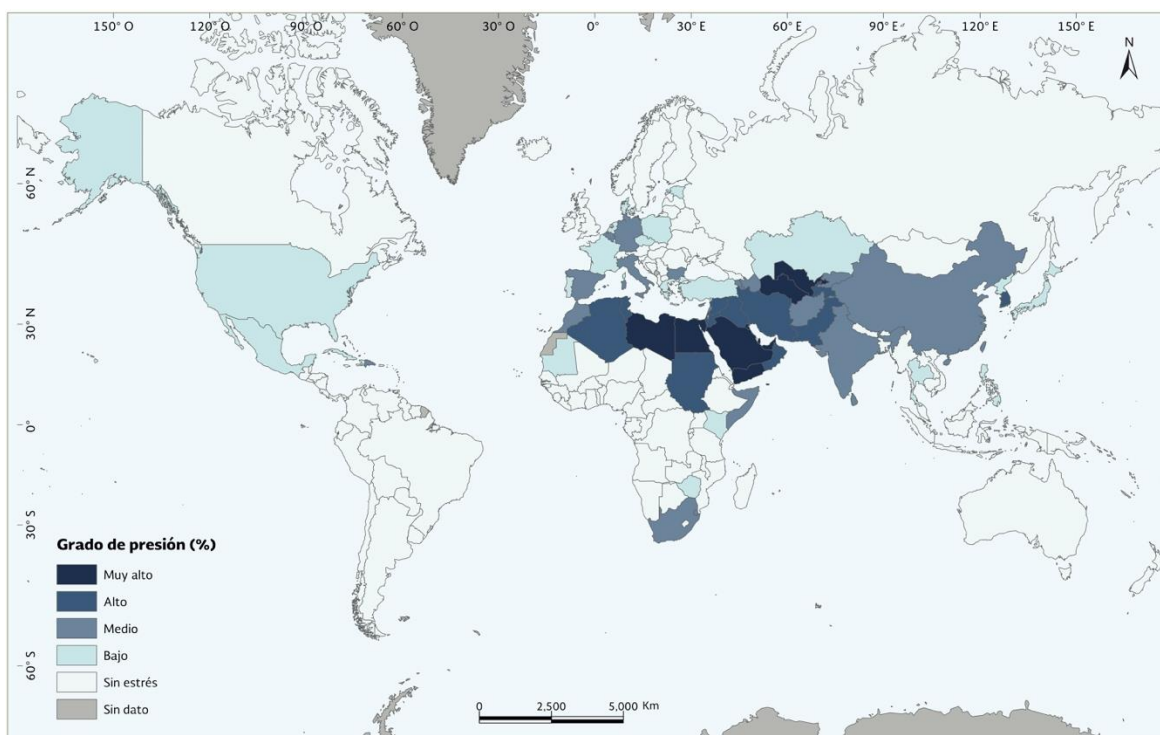


Figura 1. 1 Grado de presión sobre los recursos hídricos (fuente: Atlas del Agua en México, 2017).

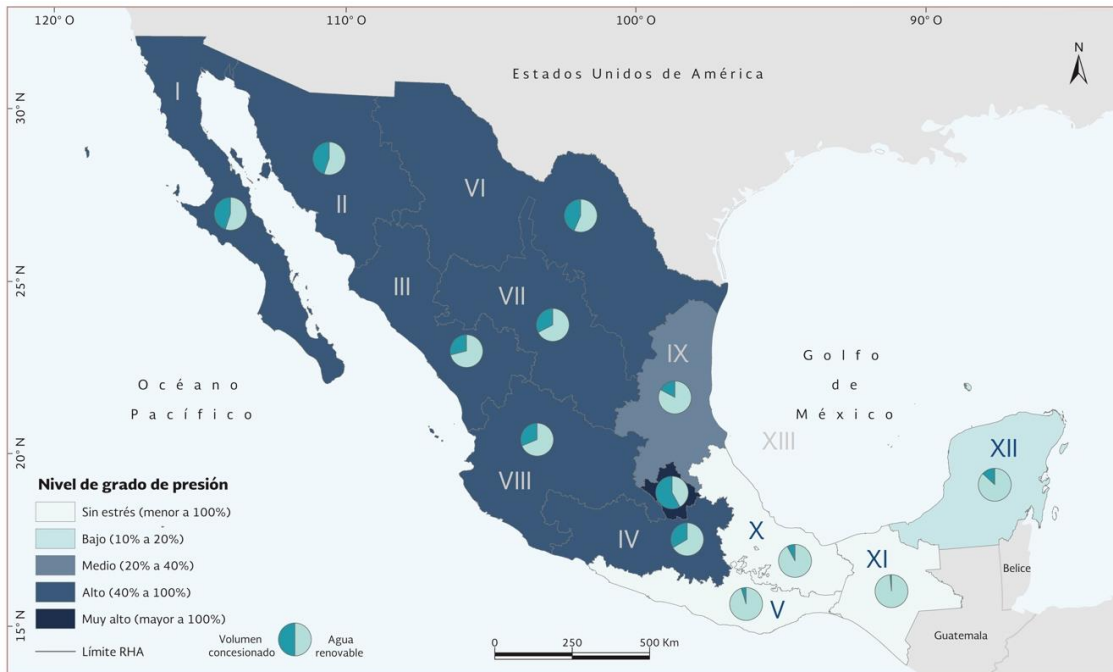
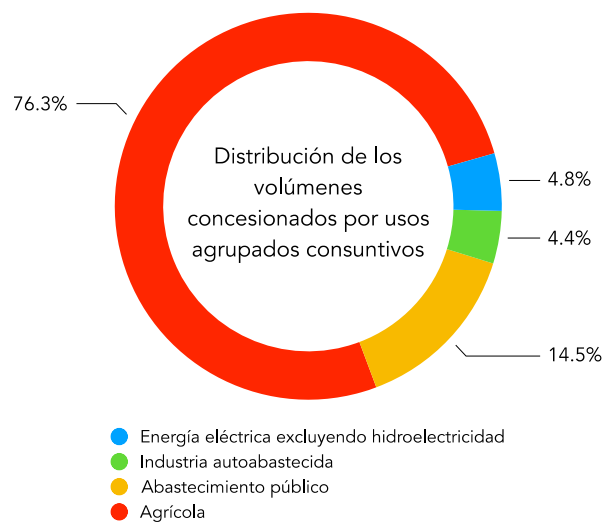


Figura 1. 2 Grado de presión por región hidrológico-administrativa en 2016 (fuente: Atlas del Agua en México, 2017).

El uso del agua se ha clasificado en dos grupos: usos consuntivos, (es decir, usos donde hay diferencia entre el volumen extraído y el volumen descargado), y los no consuntivos que involucra el uso de la energía motriz del agua para producir electricidad (hidroeléctricas) y la conservación ecológica. Según el Informe de Estadísticas del Agua en México, el volumen concesionado para usos consuntivos en el año 2016 fue de 86 577 hm³, y para uso no consuntivo fue de 182 712 hm³. Es importante señalar que el sector que demanda más agua es el agrícola con el 76.3 % del volumen concesionado para usos consuntivos (ver [gráfica 1.2](#)).

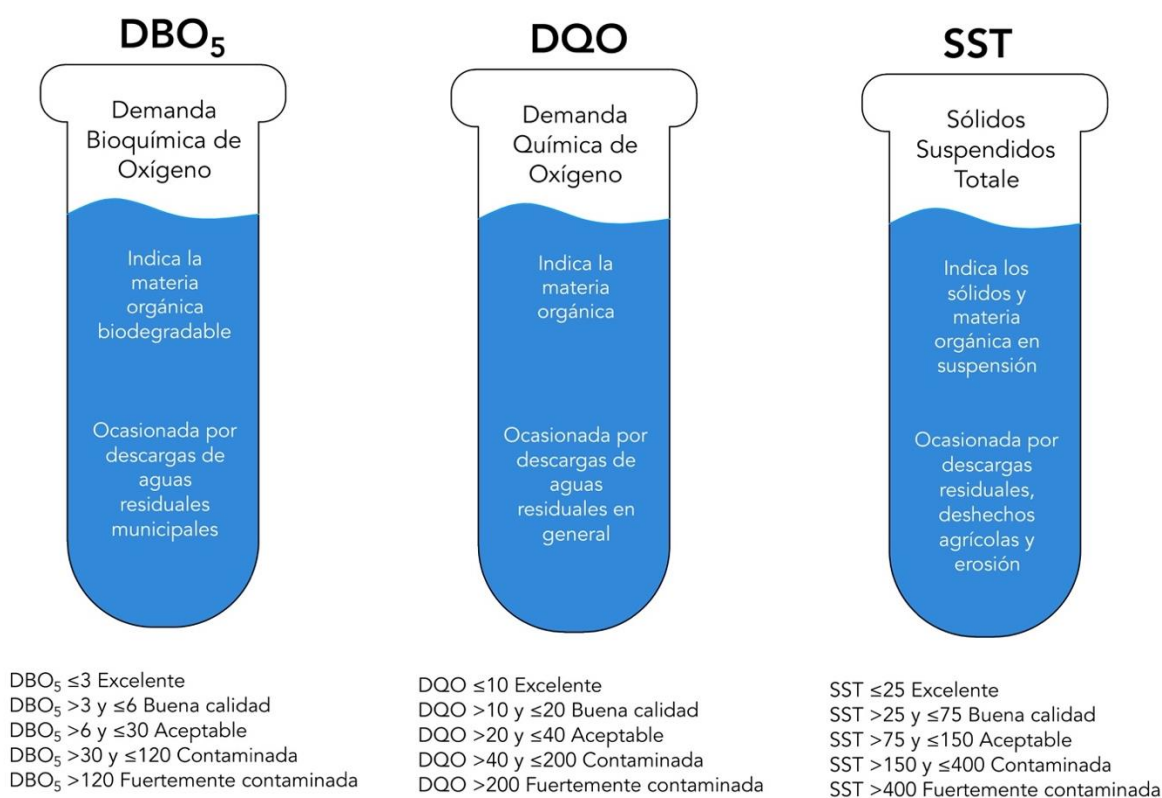


Gráfica 1. 2 Distribución de los volúmenes concesionados por usos consuntivos (elaboración propia con datos de Estadísticas del agua en México, 2017).

1.2 Calidad del agua

La disponibilidad de los recursos hídricos está intrínsecamente ligada a la calidad del agua, ya que la contaminación de las fuentes de agua puede limitar su uso para ciertas actividades. El aumento de los vertidos de aguas residuales sin tratar, junto con la escorrentía de tierras agrícolas y las aguas residuales industriales con tratamiento inadecuado, han llevado al deterioro de la calidad del agua en el mundo. Si las tendencias actuales perduran, la calidad del agua continuará deteriorándose en las próximas décadas, especialmente en los países de bajos recursos de zonas áridas, poniendo así aún en mayor riesgo la salud humana y los ecosistemas.

La calidad del agua se determina mediante la caracterización física y química de muestras de agua y su comparación con normas y estándares de calidad. De esta forma se puede identificar si el agua es idónea para los requerimientos de calidad asociados a un uso determinado (CONAGUA, 2016). Para determinar la calidad del agua se usan principalmente tres parámetros DBO₅ (demanda biológica de oxígeno a cinco días), DQO (demanda química de oxígeno) y SST (sólidos suspendidos totales), según el Atlas del Agua en México, los intervalos de valores que indican la calidad del agua se muestran en la [figura 1.3](#).



Unidades en mg/L

Figura 1. 3 Parámetros más usados para identificar la calidad del agua (elaboración propia con datos de Atlas del Agua en México, 2017).

El agua tiene diversos usos como la pesca, agricultura, propagación de vida silvestre, usos recreativos, industriales específicos o generación de energía, y para cada uno de ellos se requiere

de una cierta calidad, en algunos casos las características del agua adecuadas para un fin pueden no serlo para otro. Por ello es importante saber la diferencia entre requerimientos de calidad del agua y estándares de la calidad del agua. Los primeros están basados en la experiencia de uso y los segundos son cantidades establecidas por instituciones gubernamentales (Arellano, J., 2002).

1.3 Aguas residuales

El vertido de aguas residuales no tratadas o parcialmente tratadas en el medio ambiente provoca la contaminación de las aguas superficiales, el suelo y las aguas subterráneas. Las aguas residuales son un componente crítico del ciclo del agua y deben ser tomadas en cuenta durante todo el ciclo de gestión del agua: desde la captación de agua dulce, el tratamiento, la distribución, el uso, la recolección y retorno final al medio ambiente, donde se repone la fuente para las subsiguientes captaciones de agua. Una vez vertidas en las masas de agua, las aguas residuales se diluyen y son transportadas aguas abajo, o se filtran en los acuíferos, donde pueden afectar la calidad (y, por lo tanto, la disponibilidad) de los suministros de agua dulce. El destino final de las aguas residuales vertidas en ríos y lagos es, a menudo, el océano.

Lamentablemente la gestión de las aguas residuales por lo general recibe poca atención social y política en comparación con los retos del abastecimiento de agua, especialmente en el contexto de la escasez de agua. Sin embargo, ambos están fuertemente relacionados: actuar con negligencia en relación con las aguas residuales puede tener impactos altamente perjudiciales para la sostenibilidad del abastecimiento de agua, la salud humana, la economía y el medio ambiente.

El vertido de aguas residuales sin tratar o con tratamiento inadecuado tendrá consecuencias que se clasifican en tres grupos, según tengan: efectos adversos para la salud humana por la reducción de la calidad del agua; efectos ambientales negativos debido a la degradación de las masas de agua y de los ecosistemas; y posibles efectos en las actividades económicas (PNUMA, 2015b). En la [figura 1.4](#) y [tabla 1.3](#) se muestran los componentes de aguas residuales y sus impactos en la salud, ambiente y economía.

Las fuentes de aguas residuales fundamentalmente son cuatro: domésticas o sanitarias, industriales, agrícolas y pluviales. Las aguas residuales domésticas provienen principalmente de zonas residenciales, instalaciones comerciales, públicas (hospitales, escuelas, centros de recreación, etc.) o similares. Para que una industria pueda descargar en el sistema de alcantarillado municipal, si es que no tiene cierta compatibilidad con las aguas domésticas y dependiendo del tipo de industria, debe dar un tratamiento previo a sus aguas.

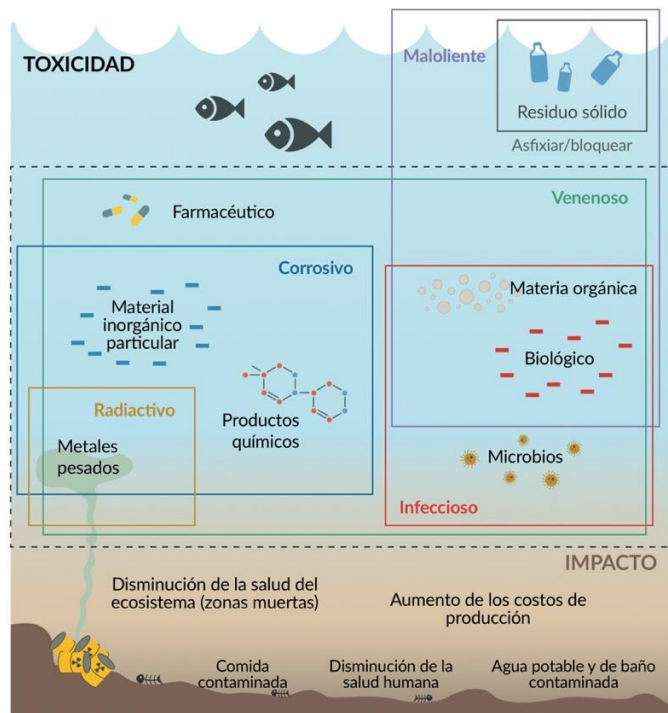


Figura 1. 4 Componentes de las aguas residuales y sus efectos (fuente: UNESCO, 2017).

Tabla 1. 3 Ejemplos de impactos negativos de las aguas residuales no tratadas en la salud humana, en el medio ambiente y las actividades productivas.

Impactos en	Ejemplos de impacto
Salud	Aumento de la morbilidad debido a la reducción de la calidad del agua potable Aumento de la morbilidad por alimentos nocivos (pescado contaminado, verduras y otros productos de regadío) Aumento del riesgo de morbilidad por estar cerca de un punto de descarga de aguas residuales Aumento de la morbilidad por contacto de agua con calidad baja
Ambiente	Disminución de biodiversidad (desaparición de hábitats, migración de especies, muerte de especies principalmente peces) Degradación de ecosistemas acuáticos (eutrofización y zonas muertas) Olores desagradables Disminución de oportunidades recreativas Aumento de la temperatura del agua Bioacumulación de metales y toxinas Cambios genéticos de algunas especies Contaminación de ríos, lagos y océanos (disminución de la capacidad para recuperar sus condiciones iniciales por impactos acumulativos)
Economía	Reducción de la productividad industrial Reducción de la productividad agrícola

- Reducción del valor de mercado de los cultivos (utilización de aguas sospechosas)
- Reducción de actividades recreativas (reducción de turistas)
- Reducción de la captura de peces y mariscos o reducción del valor de mercado
- Aumento de la carga financiera sobre asistencia sanitaria
- Costos más altos del tratamiento del agua
- Reducción del valor de propiedades cerca de cuerpos contaminados de agua

Fuente: UNESCO, 2017 & Gómez B.A., 2002.

1.3.1 Características de las aguas residuales.

Las aguas residuales se consideran como una combinación de uno o más de los siguientes: efluentes domésticos que consisten en aguas negras (excremento, orina y lodos fecales) y aguas grises (aguas servidas de lavado y baño); agua de establecimientos comerciales e instituciones, incluidos hospitales; efluentes industriales, aguas pluviales y otras escorrentías urbanas; y escorrentías agrícola, hortícola y acuícola (Raschid y Jayakody, 2008).

Las aguas residuales municipales son colectadas por el sistema de drenaje municipal y el caudal se compone principalmente de aguas domésticas, industriales y pluviales. Debido a la cantidad de usos que se le da al agua potable, las aguas residuales varían en composición física, química y biológica, en la [figura 1.5](#) se presentan las características más importantes. De acuerdo con la concentración es posible clasificar el agua residual en débil, media y alta ([tabla 1.4](#)) y los principales contaminantes que deben ser eliminados en el tratamiento ([tabla 1.5](#)).

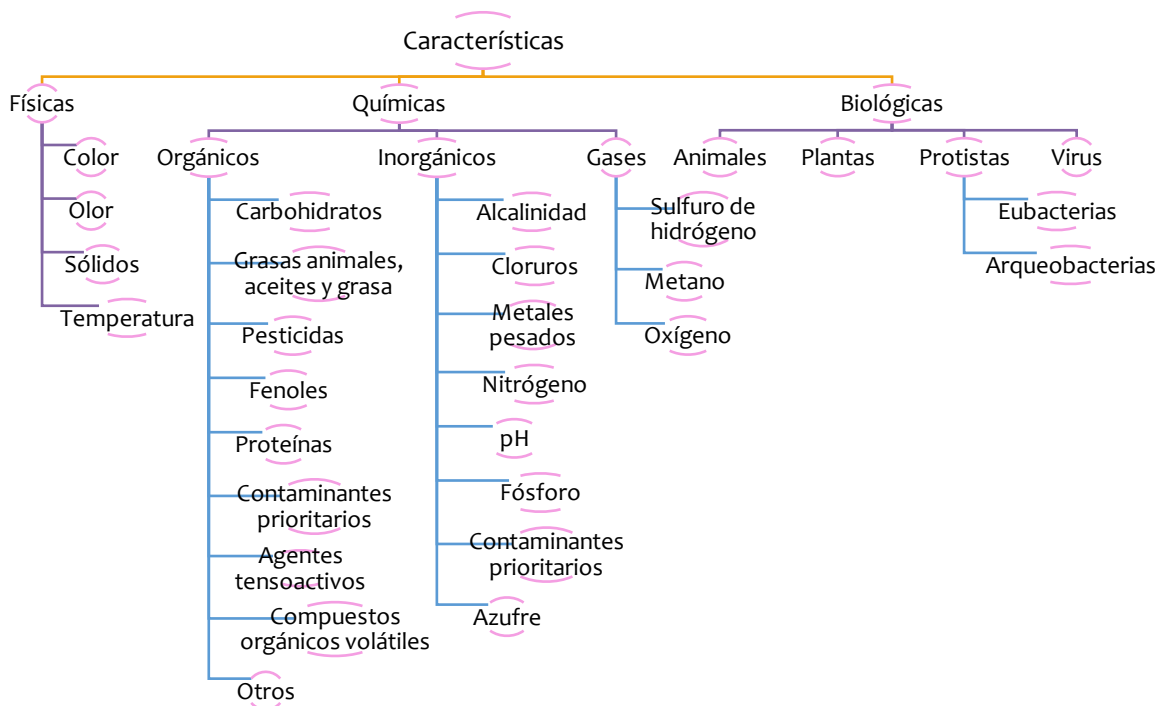


Figura 1. 5 Principales características físicas, químicas y biológicas del agua residual (fuente: Metcalf & Eddy, 2003).

1.4 Tratamiento de aguas residuales.

Las aguas residuales siguen siendo el servicio al que menos importancia se ha prestado. Es necesario que las aguas residuales dejen de verse como una carga o molestia que debe ser eliminada o ignorada y debe buscarse su valor, ya que pueden ser una fuente para diversos usos en los que no se requiera de agua potable: riego, recarga de lagunas, descarga de sanitarios, autolavados, entre otros. Se estima que a nivel mundial más del 80 % de las aguas residuales son vertidas al medio ambiente sin un tratamiento adecuado (IMNUDRH¹, 2017).

Tabla 1.4 Composición típica del agua residual doméstica.

Constituyente	Concentración (mg/l)		
	Fuerte	Media	Débil
Sólidos totales (STT)	1 200	720	350
Disueltos totales (SDT)	850	500	250
Fijos (SDF)	525	300	145
Volátiles (SDV)	325	200	105
Suspendidos totales (SST)	350	220	100
Fijos (SSF)	75	55	20
Volátiles (SSV)	275	165	80
Sólidos sedimentables	20	10	5
Demanda bioquímica de oxígeno, 5 días a 20°C (DBO₅)	400	220	110
Carbono orgánico total (COT)	290	160	80
Demanda química de oxígeno (DQO)	1 000	500	250
Nitrógeno (total como N)	85	40	20
Orgánico	35	15	8
Amoniacal	50	25	12
Nitritos	0	0	0
Nitratos	0	0	0
Fósforo (total como P)	15	8	4
Orgánico	5	3	1
Inorgánico	10	5	3
Cloruros	100	50	30
Alcalinidad (como CaCO₃)	200	100	50
Grasas	150	100	50

Fuente: Metcalf & Eddy, 2003.

Los procesos biológicos en el tratamiento de aguas residuales reproducen la degradación que ocurre naturalmente en ríos, lagos y arroyos. Estos procesos se utilizan en plantas de tratamiento de aguas residuales donde los reactores biológicos están diseñados para potenciar la degradación bioquímica en condiciones cuidadosamente controladas, aumentando así la eliminación de contaminantes y la estabilización de los lodos. (IMNUDRH, 2017).

¹ Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos.

Tabla 1. 5 Contaminantes de importancia en el tratamiento de agua residual.

Contaminantes	Razón de la importancia
Sólidos en suspensión	Pueden dar lugar al desarrollo de depósitos de fango y de condiciones anaerobias cuando se vierte agua residual sin tratar al entorno acuático.
Materia orgánica biodegradable	Se compone principalmente por proteínas, carbohidratos y grasas. Se miden en términos de DBO y DQO. Si se descargan al entorno sin tratar, su estabilización biológica puede llevar al agotamiento de los recursos naturales de oxígeno y al desarrollo de condiciones sépticas.
Patógenos	Pueden transmitirse enfermedades contagiosas por medio de los organismos patógenos presentes en el agua residual.
Nutrientes	Tanto el nitrógeno como el fósforo, junto con el carbono, son nutrientes esenciales para el crecimiento. Cuando se vierten al entorno acuático, estos nutrientes pueden favorecer el crecimiento de una vida acuática no deseada. Cuando se vierten al terreno en cantidades excesivas, también pueden provocar la contaminación del agua subterránea.
Contaminantes prioritarios	Son compuestos orgánicos o inorgánicos determinados en base a su carcinogenicidad, mutagenicidad, teratogenicidad o toxicidad aguda conocida o sospechosa. Muchos de estos compuestos se hallan presentes en el agua residual.
Materia orgánica refractaria	Esta materia orgánica tiende a resistir los métodos convencionales de tratamiento. Ejemplos típicos son los agentes tensoactivos, los fenoles y los pesticidas agrícolas.
Metales pesados	Los metales pesados son, frecuentemente, añadidos al agua residual por ciertas actividades comerciales e industriales.
Sólidos inorgánicos disueltos	Los constituyentes inorgánicos como el calcio, sodio y los sulfatos se añaden al agua de suministro como consecuencia del uso del agua.

Fuente: Metcalf & Eddy, 2003.

CONAGUA divide las aguas residuales en industriales y municipales, en el año 2016 en México se generaron un total de 14 074 hm³ de aguas residuales, de los cuales 6 768.8 hm³ fueron residuales industriales y se trataron aproximadamente 2 223.5 hm³ que es el 34.91 % del total de las aguas residuales industriales, con respecto a las aguas residuales municipales se generaron 7 218.6 hm³ y de esta cantidad el sistema de alcantarillado recolectó 6 919.9 hm³ de los cuales solo se trataron 3 812.9 hm³ que es el 58.25 % del total de las aguas residuales municipales (ver [fig. 1.6](#)).

Uno de los retos a largo plazo para México, es tratar todas las aguas residuales generadas en el país, meta planteada en la Agenda del Agua 2030 donde se estableció que, para antes del año 2030, todas las aguas residuales municipales captadas en los sistemas de alcantarillado contarán con tratamiento (CONAGUA AA, 2011). Esto presenta grandes beneficios y oportunidades en función del agua, pero sin duda aún queda un largo camino por recorrer y para lograr este

objetivo se requiere de grandes inversiones que impulsen a México a tratar el 100 % de las aguas residuales.

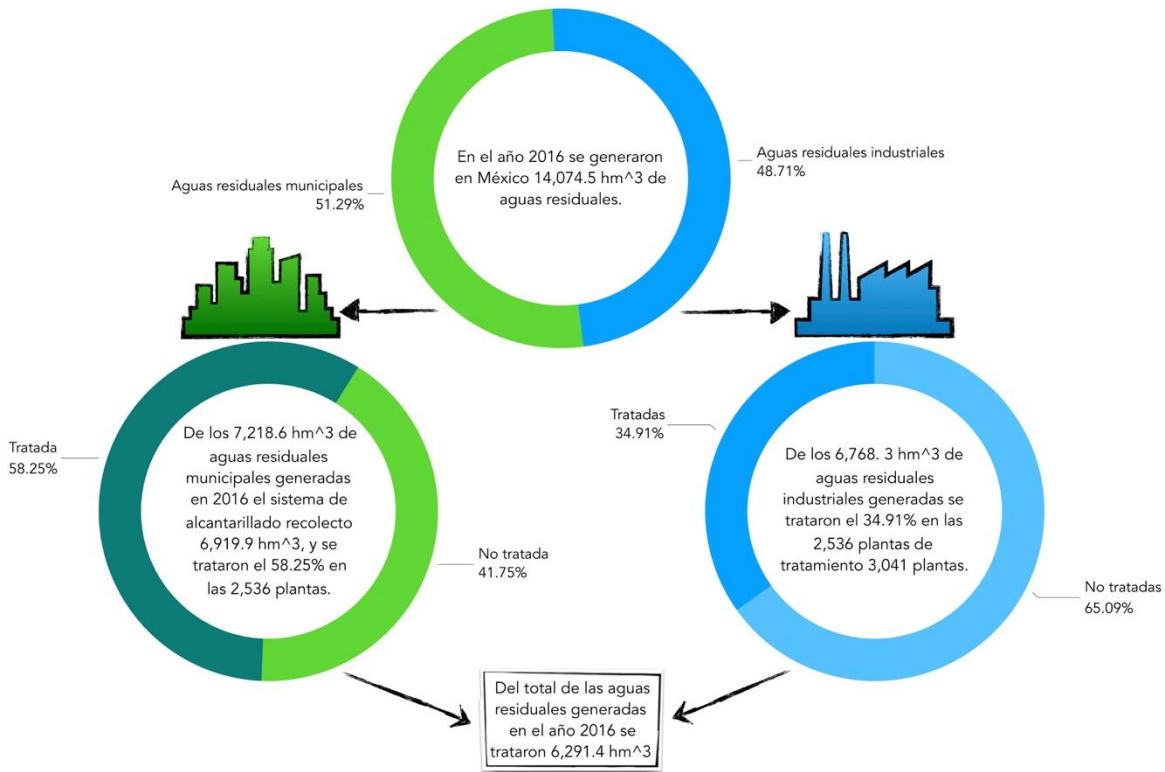
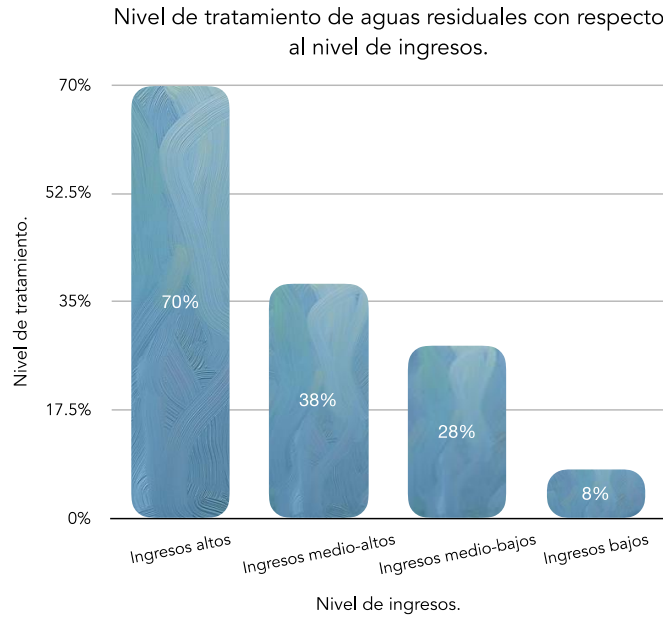


Figura 1. 6 Porcentaje y cantidad de agua municipal e industrial tratada en México (elaboración propia con datos de Atlas del Agua en México, 2017).

Es importante destacar que el nivel de tratamiento de aguas residuales industriales y municipales de un país es generalmente un reflejo de su nivel de ingresos (ver [gráfica 1.3](#)). En promedio, los países de ingresos altos tratan cerca del 70 % de las aguas residuales municipales e industriales que generan. Este promedio cae al 38 % en los países de ingresos medios-altos y a un 28 % en los países de ingresos medios-bajos. En los países de ingresos bajos solo el 8 % recibe algún tratamiento (IMNUDRH, 2017).

De acuerdo con la fuente de agua residual, la caracterización de estas es muy diferente y a su vez el tratamiento al que deben ser sometidas, pero sin importar las características de las aguas residuales el objetivo es el mismo, remover los contaminantes presentes en el agua (ver [figura 1.7](#)).



Gráfica 1. 3 Nivel de tratamiento de aguas residuales (elaboración propia con datos tomados del IMNUDRH, 2017).

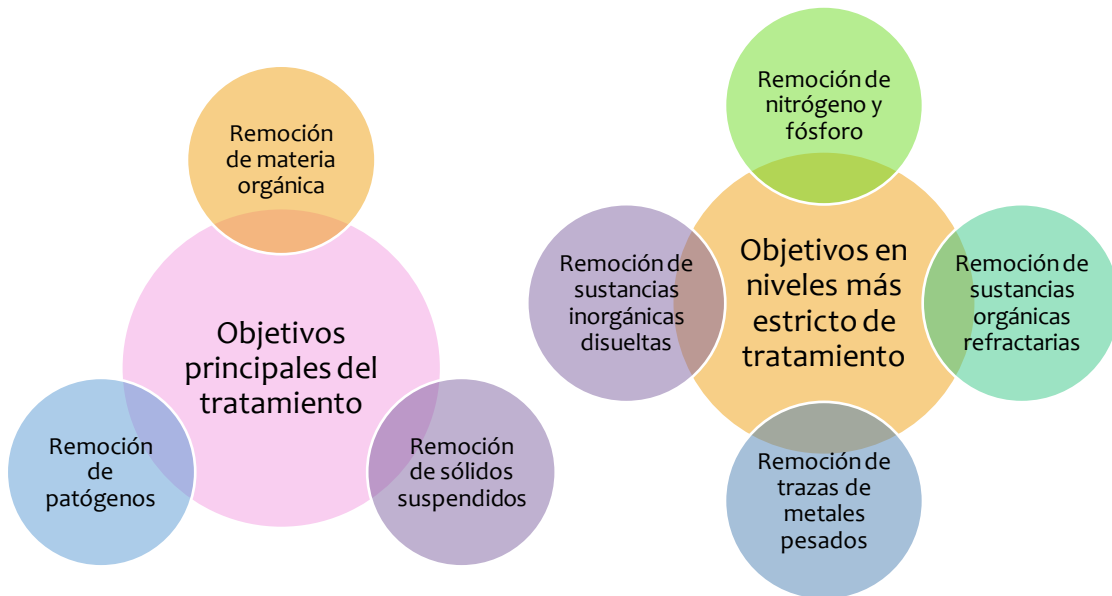


Figura 1. 7 Objetivos principales del tratamiento de las aguas residuales (elaboración propia).

Los contaminantes presentes en el agua residual pueden eliminarse por medio de procesos químicos, físicos y/o biológicos. En la [tabla 1.6](#) se muestran los contaminantes más importantes de las aguas residuales junto con las operaciones unitarias que se pueden emplear para su eliminación.

Tabla 1. 6 Operaciones unitarias empleadas para la eliminación de los posibles contaminantes presentes en las aguas residuales.

Contaminante	Operaciones unitarias
Sólidos en suspensión	Desbaste y dilaceración
	Desarenado
	Sedimentación
	Filtración
	Flotación
	Adición de polímeros
	Coagulación/sedimentación
	Sistemas naturales (tratamiento por evacuación al terreno)
Materia orgánica biodegradable	Variantes de lodos activados
	Película fija: filtros percoladores
	Película fija: biodiscos (RBC)
	Variantes de lagunaje
	Filtración intermitente en arena
	Sistemas fisicoquímicos
	Sistemas naturales
Compuestos orgánicos volátiles	Arrastre por aire
	Tratamiento de gases
	Adsorción en carbón
Patógenos	Cloración
	Hipocloración
	Cloruro de bromo
	Ozonación
	Radiación UV
	Sistemas naturales
Nutrientes:	
Nitrógeno	Variantes de sistemas de cultivo en suspensión con nitrificación y desnitrificación
	Variantes de sistemas de película fija con nitrificación y desnitrificación
	Arrastre de amoníaco
	Intercambio iónico
	Cloración al breakpoint
	Sistemas naturales
Fósforo	Adición de sales metálicas
	Coagulación y sedimentación con cal
	Eliminación biológica del fósforo
	Eliminación biológica-química del fósforo
	Sistemas naturales
Nitrógeno y fósforo	Eliminación biológica de nutrientes
Materia orgánica refractaria	Adsorción en carbón
	Ozonación terciaria

	Sistemas naturales
Metales pesados	Precipitación química
	Intercambio iónico
	Sistemas de tratamiento por evacuación al terreno
Sólidos orgánicos disueltos	Intercambio iónico
	Osmosis inversa
	Electrodialisis

Fuente: Metcalf & Eddy, 2003.

De acuerdo con la disposición final y características de las aguas residuales se debe seleccionar el proceso adecuado para su tratamiento. En la [Figura 1.8](#) se esquematiza un abanico de posibilidades tecnológicas para integrar un tren de tratamiento de aguas residuales.

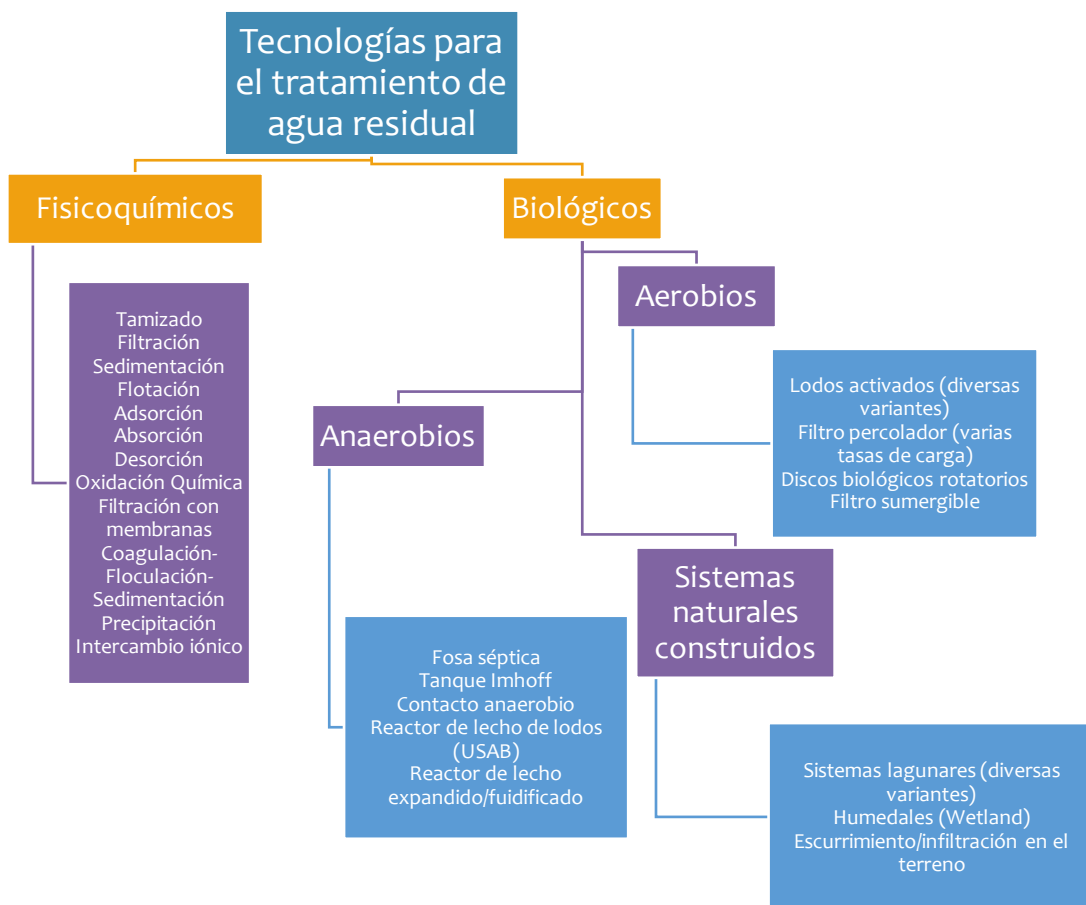


Figura 1. 8 Tecnologías para el tratamiento de aguas residuales (fuente: Noyola A., 2013).

Una Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR), generalmente se compone de un pretratamiento, un tratamiento primario, secundario y terciario o avanzado. La [tabla 1.7](#) muestra las operaciones unitarias de acuerdo con estos niveles de tratamiento.

Tabla 1.7 Tipos de tratamiento de aguas residuales.

Tratamiento primario

Cribado o desbrozo
Sedimentación
Flotación
Separación de aceites
Homogenización
Neutralización

Tratamiento secundario

Lodos activos
Aireación prolongada (procesos de oxidación total)
Estabilización por contacto
Otras modificaciones del sistema convencional de lodos activos: aireación por fases, mezcla completa, aireación descendente, alta carga, aireación con oxígeno puro
Lagunaje con aireación
Estabilización por lagunaje
Filtros biológicos (percoladores)
Discos biológicos
Tratamientos anaerobios: procesos de contacto, filtros (sumergidos)

Tratamiento terciario o <<avanzado>>

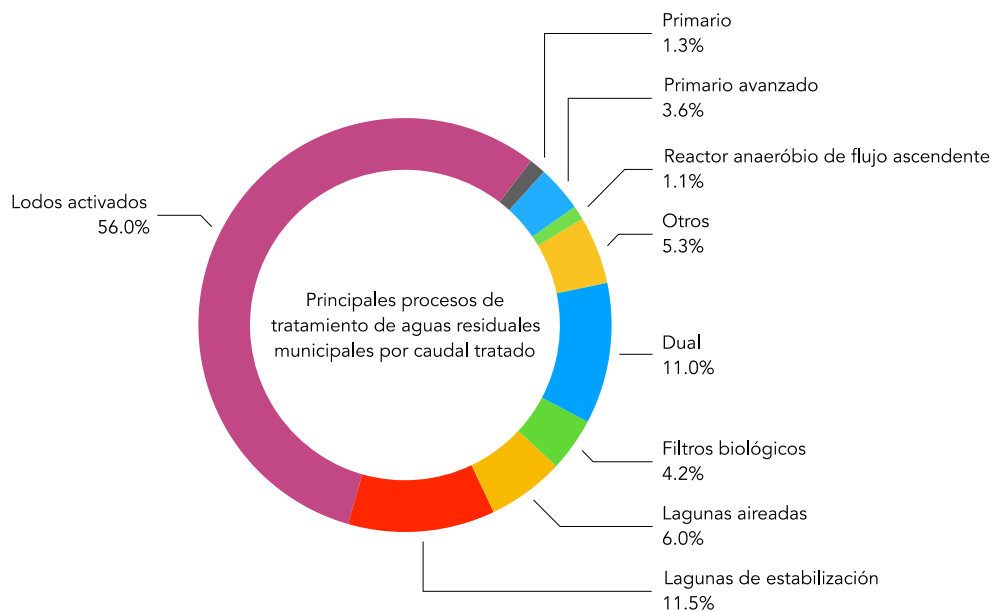
Microtamizado
Filtración (lecho de arena, antracita, diatomeas...)
Precipitación y coagulación
Adsorción (carbón activado)
Intercambio iónico
Ósmosis inversa
Electrodialisis
Cloración y ozonización
Proceso de reducción de nutrientes
Otros

Fuente: Ramalho, R., 1996.

En general, el proceso de tratamiento se compone de las siguientes etapas:

- Pretratamiento, tiene como objetivo remover del agua aquellos constituyentes que pueden causar dificultades de operación y mantenimiento en las etapas siguientes.
- Tratamiento primario, se refiere a la remoción parcial de sólidos suspendidos, materia orgánica u organismos patógenos, mediante sedimentación, de esta manera se acondiciona el agua para la siguiente etapa.
- Tratamiento secundario, se utiliza principalmente para remoción de DBO y sólidos suspendidos, en esta etapa se incluyen los procesos biológicos.
- Tratamiento terciario se remueven nutrientes para impedir la eutrofización en fuentes receptoras o para mejorar la calidad del efluente final.

Actualmente el tratamiento por lodos activados es el más utilizado en México para tratar las aguas residuales municipales (ver [gráfica 1.4](#)).



Gráfica 1. 4 Principales procesos de tratamiento de aguas residuales municipales por caudal tratado en 2016 (elaboración propia con datos tomados de Estadísticas del Agua en México, 2017).

En la [gráfica 1.4](#) se puede observar que el proceso de lodos activados predomina frente a los demás, ya que el 56 % de las aguas residuales tratadas emplean este proceso. La principal desventaja del proceso de lodos activados es la generación de residuos, estos lodos activados tienen que ser purgados continuamente en el proceso de tratamiento, y en general poseen altas cargas de contaminantes, que pueden ocasionar los mismos efectos en el medio ambiente que las aguas residuales, por ello tiene la misma importancia que el tratamiento de las aguas residuales. Es tan importante que en muchos países existen normas estrictas que prohíben verter los lodos al medio ambiente sin un tratamiento previo, en México la Norma aplicable a estos residuos es la NOM-SEMARNAT-004-2002 que establece los límites permisibles de contaminantes que pueden contener estos residuos, en el [capítulo 2](#) y [capítulo 3](#) se hablará un poco más de esta Norma.

1.5 Normatividad aplicable en el tratamiento de aguas residuales

Las aguas residuales tratadas tienen que cumplir normas específicas de calidad antes de que se puedan volver a usar, o con normas estrictamente definidas antes de que se puedan descargar en un cuerpo de agua. Esta facultad se ejerce en el marco de las leyes federales y estatales. Por otro lado, la Ley de Aguas Nacionales tiene por objeto regular la explotación, uso o aprovechamiento de dichas aguas, su distribución y control, así como la preservación de su cantidad y calidad para lograr su desarrollo integral sustentable (CONAGUA LAN, 2017).



Figura 1. 9 Nivel de especificidad de la legislación nacional relativa al control de las descargas de aguas residuales (fuente: Valdez, E., 2003).

Por su parte, las normas técnicas que hacen posible la aplicación de las disposiciones legales sobre la materia están contenidas en un conjunto de Normas Oficiales Mexicanas, su finalidad es prevenir y controlar la contaminación de las aguas y son de observancia obligatoria para los responsables de descargas. En la [figura 1.10](#) se presentan las Normas Oficiales Mexicanas que son aplicables a las aguas residuales, cada una de ellas establece límites máximos de contaminantes según su utilización.

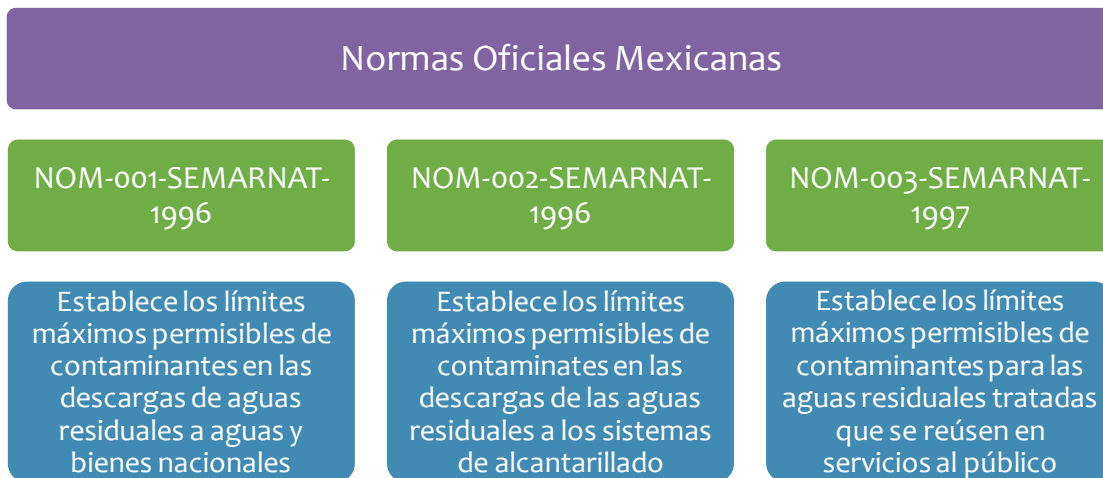


Figura 1. 10 Normas Oficiales Mexicanas relacionadas con el tratamiento de aguas residuales (elaborado a partir de las NOM 01, 02 y 03).

Tratamiento de lodos



Introducción

La cantidad y procedencia de los sólidos producidos en una PTAR depende del tipo de operaciones que se llevaron a cabo para tratar el agua. En general, los sólidos eliminados en este tratamiento incluyen basuras, arenas y lodos. Los lodos obtenidos son el constituyente de mayor proporción, por lo que su tratamiento, disposición y reúso representan un grave problema.

Para un tratamiento adecuado de lodos y disposición de ellos es necesario conocer las características del lodo a tratar, ya que varían de acuerdo con: el origen, la edad y del tipo de proceso al que fueron sometidos. A su vez, la correcta disposición en México debe estar basada en la normatividad vigente NOM-004-SEMARNAT-2002 de acuerdo con lo establecido por la Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales.

2.1 Características de los lodos

Los lodos generados en el proceso de tratamiento de aguas residuales provienen de los procesos primarios, biológicos y avanzados. Los lodos primarios, son aquellos sedimentos que se obtienen en la sedimentación primaria, este tipo de lodo está compuesto principalmente por materia orgánica y se caracteriza por tener un contenido de agua de entre el 92 % y 98 %. El lodo secundario proviene de los procesos biológicos, estos lodos consisten en sólidos suspendidos inertes, biomasa viva y productos en descomposición. Los lodos terciarios son los que se obtienen a partir de un tratamiento avanzado. En la [tabla 2.1](#) se muestran algunos datos de la composición de los lodos.

Tabla 2.1 Composición típica de lodos primarios y secundarios.

Características	Unidad	Lodo primario	Lodo secundario
Sólidos secos totales	(%)	2 - 8	0.83 - 1.16
Sólidos volátiles	(% de ST)	60 - 80	59 - 88
pH		5 - 8	6.5 - 8
Grasas y aceites	(% de ST)		
Solubles en éter		6 - 30	–
Extractable en éter		7 - 35	5 - 12
Proteínas	(% de ST)	20 - 30	32 - 41
Nitrógeno	(% de ST)	1.5 - 4	2.4 - 5
Fósforo	(% de ST)	0.8 - 2.8	2.8 - 11
Potasio	(% de ST)	0 - 1	0.5 - 0.7
Celulosa	(% de ST)	8 - 15	–
Hierro	(% de ST)	2 - 4	–
Sílice	(% de ST)	15 - 20	–
Alcalinidad	(mg/L CaCO ₃)	500 - 1 500	580 - 1 100
Ácidos orgánicos	(mg/L HAc)	200 - 2 000	1 100 - 1 700
Poder calorífico	(MJ/kg)	23 000 - 29 000	18 500 - 23 000

Fuente: Adaptado de EPA, 1979.

2.2 Normatividad aplicable en el tratamiento de lodos residuales.

En el proceso de tratamiento, los lodos generados deben de cumplir con la normatividad vigente de acuerdo con el uso o disposición que se tenga planeada para ellos. Las Normas Oficiales Mexicanas que deben seguirse son: la NOM-004-SEMARNAT-2002 (NOM-004) y la NOM-083-SEMARNAT-2003 (NOM-083) para seleccionar el sitio de disposición.

NOM-004-SEMARNAT-2002

La NOM-004-SEMARNAT-2002 establece las especificaciones y los límites permisibles de contaminantes en los lodos y biosólidos provenientes del desazolve, de las plantas potabilizadoras y PTAR's, con el fin de posibilitar su aprovechamiento o disposición final y proteger al medio ambiente y la salud humana (NOM-004).

Dentro de las especificaciones que se deben de cumplir para que los biosólidos puedan ser aprovechados se encuentran:

- Los biosólidos deben ser tratados para controlar la atracción de vectores², reduciendo el contenido de sólidos volátiles al menos un 38 % empleando un método de estabilización.
- Los biosólidos se clasifican en excelente o bueno según su contenido de metales pesados (Tabla 2.2) y en clase A, B o C de acuerdo con su contenido de patógenos y parásitos (Tabla 2.3).
- El aprovechamiento que se debe de dar a los biosólidos depende de su clasificación (Tabla 2.4).

Tabla 2.2 Límites máximos permisibles para metales pesados en biosólidos.

Contaminante (determinados en forma total)	Excelente mg/kg en base seca	Buenos mg/kg en base seca
Arsénico	41	75
Cadmio	39	85
Cromo	1 200	3 000
Cobre	1 500	4 300
Plomo	300	840
Mercurio	17	57
Níquel	420	420
Zinc	2 800	7 500

Fuente: NOM-004.

² Atracción de vectores. Es la característica de los lodos y biosólidos para atraer vectores como roedores, moscas, mosquitos u otros organismos capaces de transportar agentes infecciosos (NOM-004).

Tabla 2.3 Límites máximos permisibles para patógenos y parásitos en lodos y biosólidos.

Clase	Indicador bacteriológico de contaminación	Patógenos	Parásitos
	Coliformes fecales NMP/g en base seca	Salmonella spp. NMP/g en base seca	Huevos de helminto/g en base seca
A	Menor de 1000	Menor de 3	Menor de 1 (a)
B	Menor de 1000	Menor de 3	Menor de 10
C	Menor de 2 000 000	Menor de 300	Menor de 35

(a)Huevos de Helminto viables

Fuente: NOM-004.

Tabla 2.4 Aprovechamiento de biosólidos.

Tipo	Clase	Aprovechamiento
Excelente	A	Usos urbanos con contacto público directo durante su aplicación. Los establecidos para clase B y C.
Excelente o Bueno	B	Usos urbanos sin contacto público directo durante su aplicación. Los establecidos para clase C.
Excelente o Bueno	C	Usos forestales. Mejoramiento de suelos. Usos agrícolas.

Fuente: NOM-004.

NOM-083 - SEMARNAT - 2003

La NOM-083-SEMARNAT-2003 establece las especificaciones de selección del sitio, el diseño, construcción, operación, monitoreo, clausura y obras complementarias de un sitio de disposición final de residuos sólidos urbanos y de manejo especial (NOM-083).

Los sitios de disposición final se categorizan de acuerdo con la cantidad de toneladas de residuos sólidos que ingresan por día (Tabla 2.5).

Tabla 2.5 Categorías de los sitios de disposición final.

Tipo	Tonelaje recibido (Ton/día)
A	Mayor a 100
B	50 hasta 100
C	10 y menor a 50
D	Menor a 10

Fuente: NOM-083.

Aunque los lodos generados en una planta de tratamiento de aguas residuales municipales fueron desclasificados de la NOM-052-SEMARNAT-2005 para ser regulados por la NOM-004-SEMARNAT-2002, es recomendable descartarlos como residuos peligrosos bajo un estudio CRETI según la NOM-052-SEMARNAT-2005 y de esta manera garantizar que no representa ningún riesgo para su disposición final.

2.3 Procesos de tratamiento de lodos

Los lodos están compuestos en su mayoría por agua, entre 90 a +99 % (Spellman, 2003) y un contenido bajo de materia sólida. El objetivo de un sistema de tratamiento es reducir el volumen de los sólidos de desecho, reduciendo el contenido de agua y materia orgánica, así como la eliminación de organismos patógenos y la atracción de vectores.

Existen diversos métodos para integrar un tren de tratamiento de lodos residuales, los cuales incluyen: [pretratamiento](#), [espesamiento](#), [estabilización](#), [desinfección](#), [acondicionamiento](#) y [deshidratación](#).

2.3.1 Pretratamiento

El pretratamiento es necesario para conseguir una alimentación de lodo constante y homogénea, de forma que los equipos posteriores en el proceso no tengan problemas de alimentación.

Dilaceración

La dilaceración es una operación en la que se consigue reducir la materia de gran tamaño contenida en el lodo en partículas más pequeñas, de esta manera se previenen obstrucciones o atascamientos en las siguientes operaciones unitarias.

Desarenado

El principal objetivo de esta operación es prevenir las obturaciones en equipos posteriores. Cuando no se dispone de desarenadores antes de los sedimentadores primarios, puede ser necesaria la desarenación del lodo. Se recomienda un desarenado en casos en los que se proceda al espesamiento del lodo.

Mezclado

El lodo generado en los procesos de tratamiento primario, secundario y avanzado tienen diferentes características, por lo que es necesario un mezclado para conseguir una alimentación homogénea en los siguientes procesos. La uniformidad de mezcla reduce los tiempos de retención en operaciones como deshidratación, tratamiento térmico o incineración y favorece el funcionamiento y rendimiento de las plantas (Metcalf & Eddy, 2003).

2.3.2 Espesamiento

Mediante el espesamiento de lodos se consigue aumentar la cantidad de sólidos, es decir, un lodo concentrado eliminando cierta cantidad de agua, disminuyendo así el volumen de lodos. Esta etapa es utilizada para facilitar las operaciones subsiguientes de acondicionamiento. El espesamiento de los lodos se consigue mediante procesos físicos: [gravedad](#), [flotación](#), [centrifugación](#) y [filtros banda por gravedad](#). En la [tabla 2.6](#) se presentan los procedimientos de espesado típicos.

Tabla 2. 6 Métodos de espesado en el tratamiento de lodos.

Método	Tipo de lodo	Frecuencia de uso	Éxito y concentraciones obtenidas
Gravedad	PC	Utilizado a menudo	Excelentes resultados
	PC y LA	Utilizado a menudo, especialmente en plantas pequeñas.	Resultados satisfactorios; entre 4 y 6 %.
	LA	Utilizado en pocas ocasiones	Pobres concentraciones de sólidos (2-3 %).
Flotación por aire disuelto	PC y LA	Uso limitado	Resultados similares a los de los espesadores por gravedad.
	LA	Uso común	Buenos resultados; variables entre el 3.5 y 5 %.
Centrífuga de cesta	LA	Uso limitado	Resultados excelentes; variables entre el 8 y 10 %.
Centrífuga de camisa maciza	LA	En aumento	Buenos resultados; entre 4 y 6 %.
Filtro banda por gravedad	LA	En aumento	Buenos resultados; variables entre el 3 y 6 %.
Espesador de tambor rotativo	LA	Uso limitado	Resultados excelentes; entre el 5 y 9 %.

PC: Primario Crudo y LA: Lodos Activados
Metcalf & Eddy, 2003.

Espesador de gravedad

El espesamiento por gravedad se lleva a cabo en tanques de configuración circular provisto con un sistema de rascado y diseño similar al de un tanque de sedimentación primaria. Los sólidos se acumulan en la parte inferior facilitando su posterior extracción. El sobrenadante que se origina se recircula a la entrada del proceso de tratamiento de agua (sedimentador primario). En la [figura 2.1](#) se puede apreciar un esquema del espesador por gravedad.

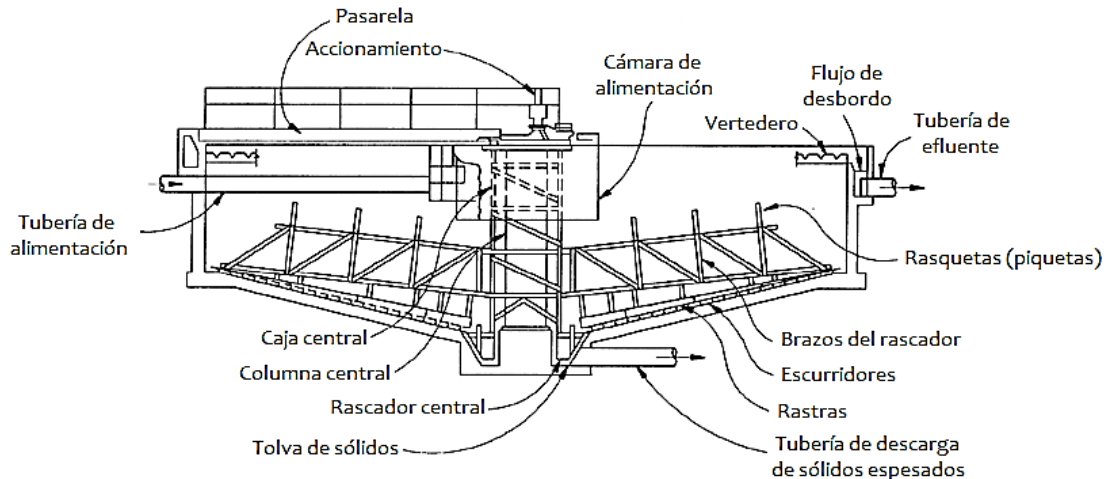


Figura 2. 1. Ejemplo de un espesador de gravedad (fuente: WEF, 2010).

Espesador de flotación por aire disuelto

El espesamiento por flotación es comúnmente usado para lodos biológicos. Contrario al espesado por gravedad, los lodos quedan en la superficie del espesador. Al lodo se le inyecta una cantidad de aire a presión y se dirige a un tanque abierto, donde se forman finas burbujas que se adhieren a los sólidos y permiten que floten hacia la superficie. En la superficie, el lodo forma una capa que es removida mediante un mecanismo colector (Fig. 2.2).

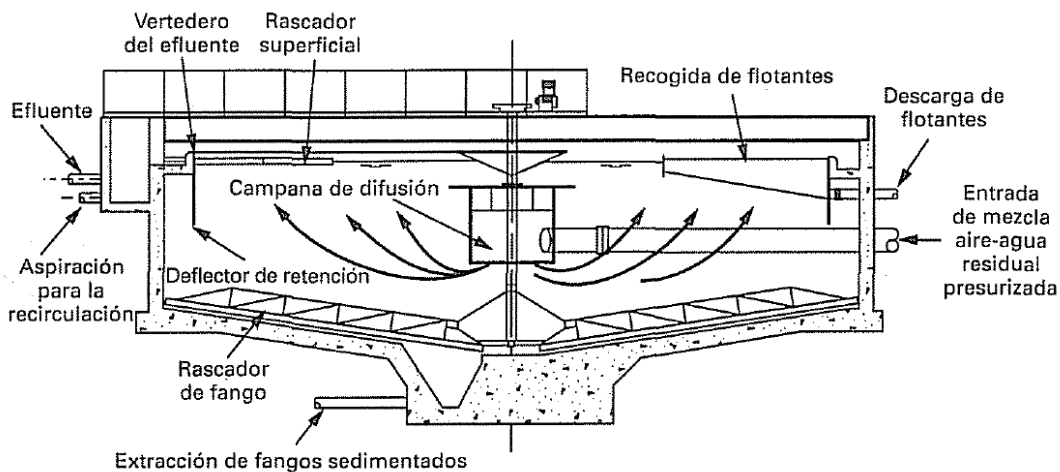
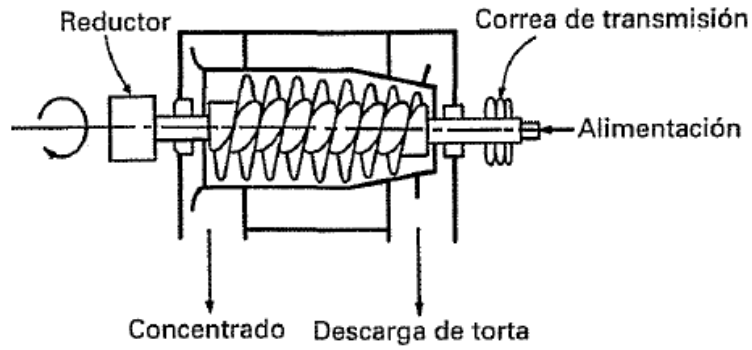


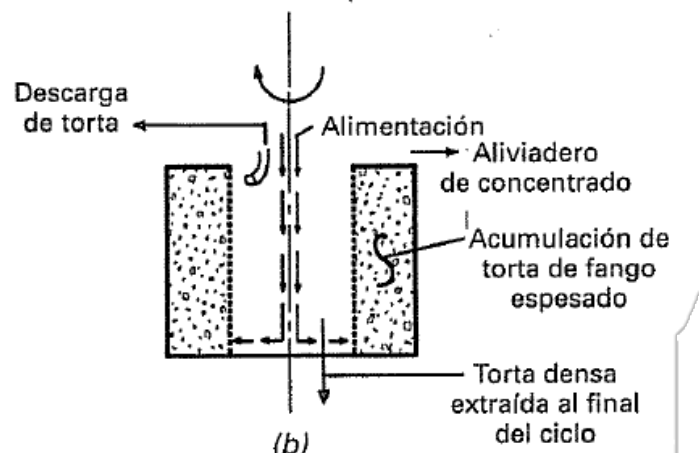
Figura 2. 2 Espesador de flotación por aire disuelto (fuente: Metcalf & Eddy, 2003).

Espesador centrífugo

El espesado por centrifugación implica la acción de fuerzas centrífugas al lodo haciendo que las partículas de sólidos en suspensión se muevan a través del líquido desde o hacia el eje de rotación de la centrífuga. Las centrífugas utilizadas son la denominadas de camisa maciza y de cesta (Fig. 2.3)



(a)



(b)

Figura 2. 3 Centrífugas utilizadas (a) centrífuga de camisa maciza y (b) centrífuga de cesta (fuente: Metcalf & Eddy, 1995).

Espesador de filtro banda por gravedad

El espesado de lodo mediante un espesador de este tipo se consigue mediante la filtración de agua por gravedad a medida que pasa a través de una banda horizontal (fig. 2.4). Los equipos consisten en una banda de aproximadamente 2-3 m de ancho que se desplaza por unos rodillos. El lodo debe ser acondicionado químicamente mediante la adición de polímeros.

Este tipo de espesadores se seleccionan debido a los requisitos de espacio eficientes, bajos consumo de energía y costos moderados de capital, además se ha demostrado que funcionan bien con muchos tipos de sólidos y son menos afectados por problemas operativos comparado con otras unidades de espesamiento (WEF, 2010).

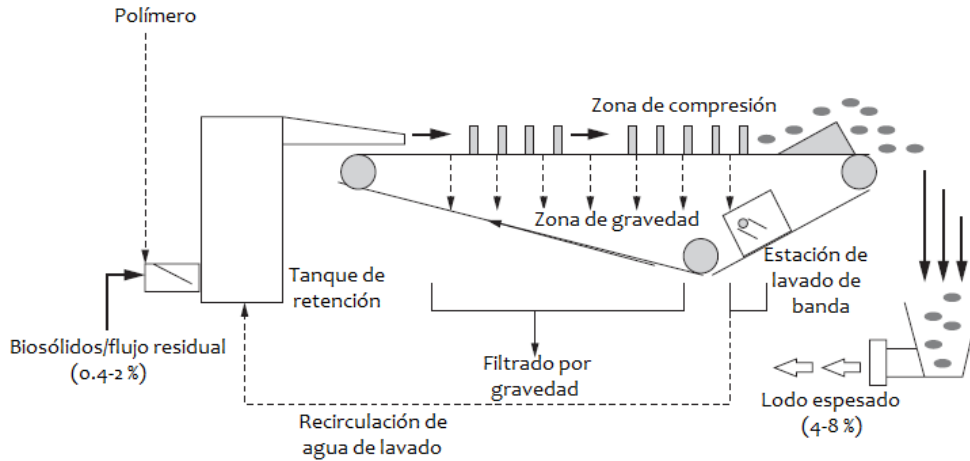


Figura 2. 4 Esquema de un espesador filtro banda por gravedad (fuente: WEF, 2018).

Espesador de tambor rotatorio

Un espesador de tambor rotatorio consiste en un tambor giratorio que se alimenta con un lodo acondicionado por la adición de polímeros. El agua se drena a través de un medio poroso en movimiento al mismo tiempo que retiene los sólidos. A medida que el tambor gira, el lodo sube por un costado del tambor y cae al fondo. El esquema de este tipo de espesador se presenta en la [figura 2.5](#).

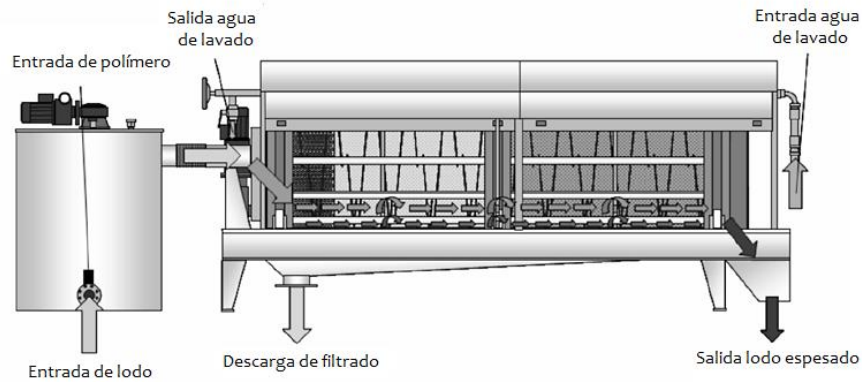


Figura 2. 5 Esquema de un espesador de tambor rotatorio (fuente: WEF, 2010).

Comparación de los métodos de espesamiento

La elección del equipo de espesamiento adecuado viene influenciada por diversos factores, pueden ser características del sitio, que incluyen la sensibilidad de las personas a malos olores, el espacio requerido, así como la concentración de sólidos esperada, la operación requerida y la compatibilidad con los procesos posteriores (Metcalf & Eddy, 1995). En la [tabla 2.7](#) se presentan las ventajas y desventajas de los diferentes procesos expuestos.

Tabla 2.7 Comparativa entre los diferentes procesos de espesamiento.

Método	Ventajas	Desventajas
Gravedad	<p>Bajo costo de operación y mantenimiento.</p> <p>Requiere poca atención del operario.</p> <p>Mayores capacidades de almacenamiento.</p> <p>No suelen ser necesarios productos de acondicionamiento.</p> <p>Consumo de energía mínimo.</p> <p>Ideal para lodos primarios.</p>	<p>Requiere grandes extensiones de terreno.</p> <p>Contribuye a la producción de malos olores.</p> <p>El porcentaje de concentración de sólidos puede ser variable, especialmente en lodos biológicos.</p> <p>Sólidos flotantes.</p>
Flotación por aire disuelto	<p>Proporciona mejor separación sólido-líquido comparado con el espesamiento por gravedad.</p> <p>Eficaz para lodo biológico.</p> <p>No requiere productos químicos acondicionadores a cargas reducidas.</p> <p>Componentes de equipo relativamente simples.</p> <p>Excelente homogeneidad de lodo.</p> <p>Produce menos problemas de olor.</p> <p>Elimina grasas y remueve arenas.</p>	<p>El costo de operación es mucho más alto en comparación con los espesadores de gravedad.</p> <p>Consumo de energía relativamente alto.</p> <p>Espesamiento de sólidos limitada.</p> <p>Requisitos moderados del operario.</p> <p>Requiere la adición de polímero para una alta concentración de sólidos o por una carga mayor.</p> <p>Poca capacidad de almacenamiento de lodos.</p>
Centrífugo	<p>Requisitos de espacio mínimo.</p> <p>Eficaz para lodo biológico.</p> <p>Minimiza las operaciones de limpieza y olor.</p> <p>Funciona sin la adición de productos químicos acondicionadores.</p> <p>Concentraciones altas de sólidos.</p> <p>Bajos costos de capital e instalación.</p> <p>Mejor apariencia a las instalaciones.</p>	<p>Requiere alto mantenimiento.</p> <p>Requiere de desarenado previo.</p> <p>Se necesita personal calificado para la operación y mantenimiento.</p> <p>Consumos de energía relativamente altos.</p> <p>Se requiere operación continua.</p>
Banda por gravedad	<p>Bajos costos de operación y capital.</p> <p>Ocupa poco espacio en comparación con otras tecnologías.</p> <p>Consumos de energía menores.</p> <p>Gran capacidad de captura de sólidos con mínima cantidad de polímero.</p> <p>Concentraciones altas.</p>	<p>Problemas de olor.</p> <p>Rendimientos variables de acuerdo con el tipo de lodo.</p> <p>Polímero dependiente.</p> <p>Requiere atención moderada del operador.</p>
Tambor rotatorio	<p>Bajos requisitos de espacio.</p> <p>Bajo costo de capital.</p>	<p>Polímero dependiente.</p> <p>Sensibilidad al tipo de polímero.</p>

<p>Consumo de energía relativamente bajo. Alta captura de sólidos.</p>	<p>Si se rompen los flóculos escapan las partículas de lodo por el filtrado. Requiere atención moderada del operador. Problemas de olor si no está encerrado.</p>
--	---

Fuente: WEF, 2010 & EPA, 1979.

Tecnologías de uso reciente

En la actualidad, han emergido nuevas tecnologías para el espesamiento de lodos que han sido aplicadas en diferentes países durante algunos años.

Espesador de disco

El espesador de disco consiste en un disco inclinado perforado y cubierto con un microfiltro que gira lentamente dentro de un tanque cerrado dividido en una zona de espesamiento y una zona de recolección de filtrado (WEF, 2018). El lodo alimentado debe ser acondicionado con un polímero y depositado a la superficie del filtro, los sólidos permanecen en el microfiltro y son descargado por la rotación del disco.

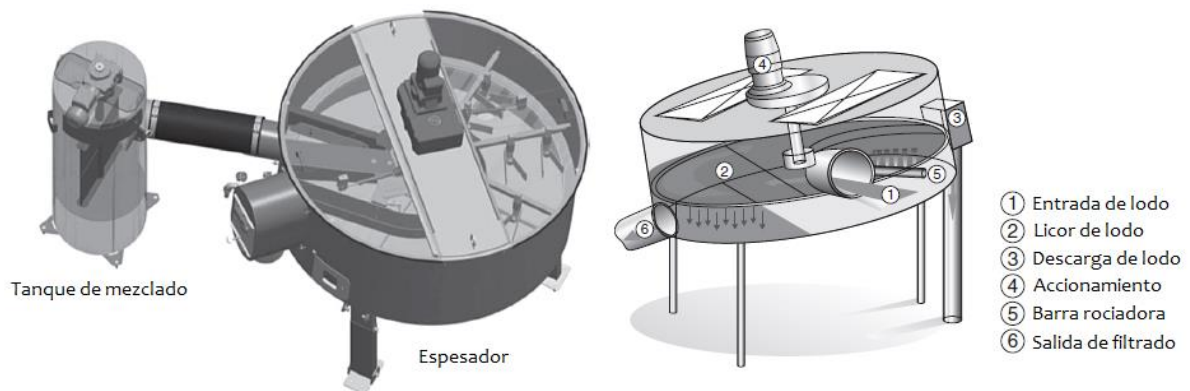


Figura 2. 6 Esquema de un espesador de disco (fuente: WEF, 2018).

Espesador de voluta/tornillo

Este tipo de espesadores están compuestos por un tornillo sinfín dentro de una carcasa cilíndrica. A medida que el lodo acondicionado se mueve mediante el tornillo, el agua se drena por las aberturas de la carcasa.

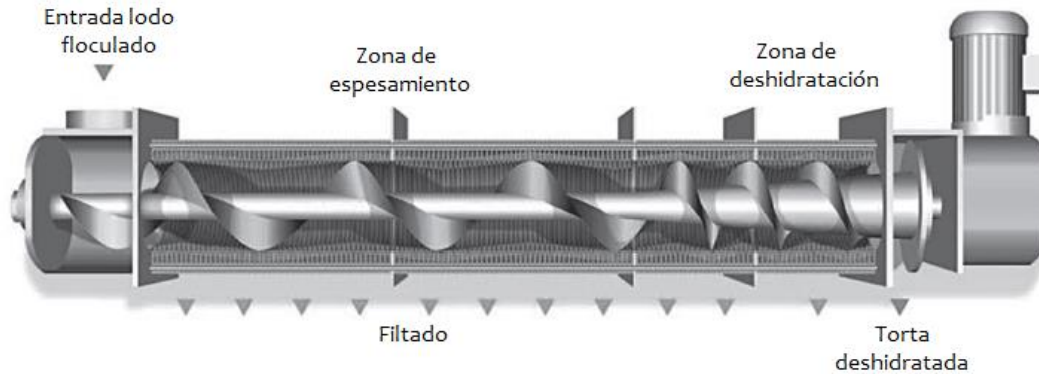


Figura 2. 7 Esquema de espesador de voluta (fuente: WEF, 2018).

Espesador de membranas

El interés en esta tecnología ha surgido con el creciente uso de biorreactores con membranas en el tratamiento de aguas (CONAGUA MAPAS, s.f.). Estos sistemas se utilizan a menudo como espesante de lodos biológicos previo a la digestión aerobia pues se consigue una concentración del lodo adecuada para esta etapa.

El lodo se mantiene en un tanque de retención y cuando existe el volumen suficiente fluye al tanque espesador de membrana, el líquido se permea mientras que los sólidos permanecen en el tanque para su posterior extracción (fig. 2.8).

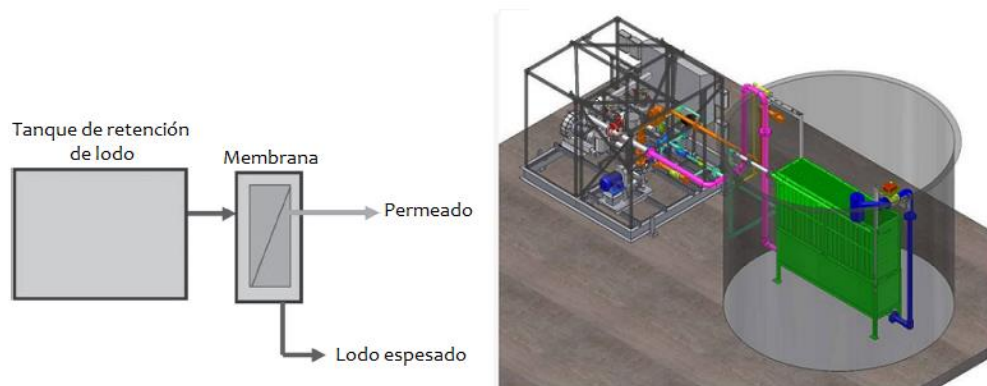


Figura 2. 8 Esquema de un espesador de membrana (fuente: WEF, 2018 & Ovivo®).

2.3.3 Estabilización

Los procesos de estabilización son de suma importancia en el tratamiento de lodos, ya que, se generan lodos con composición estable por la reducción de sólidos volátiles (fracción orgánica). De esta manera se consigue reducir los agentes patógenos, los olores y se inhibe el potencial de putrefacción y a su vez se consigue la reducción de masa orgánica y volumen.

De acuerdo con la disposición final de los biosólidos, se determina si es necesario el proceso de estabilización, es decir, si los biosólidos serán dispuestos en vertederos pueden no requerir esta etapa, o bien si se oxidarán térmicamente. Si, por el contrario, los biosólidos serán utilizados en la agricultura o serán distribuidos comercialmente, es necesario estabilizarlos.

Los procesos utilizados en la estabilización incluyen: estabilización alcalina, compostaje, tratamiento térmico y digestión aeróbica y anaeróbica.

Estabilización alcalina

El objetivo en este tipo de estabilización es incrementar la alcalinidad del lodo mediante la adición de químicos, principalmente cal viva o cal hidratada. Un pH elevado crea un entorno poco favorable para la supervivencia de microorganismos, evitando así el mal olor, la putrefacción y daños a la salud.

Compostaje

El compostaje es un proceso en el que la materia orgánica se descompone biológicamente en condiciones controladas y aeróbicas. Cualquier material orgánico puede ser compostado bajo cualquier condición, sin embargo, para acelerar el proceso se utilizan algunos materiales (astillas de madera, aserrín, desechos de jardín, etc.) para alcanzar un contenido de sólidos entre 38-45 % (WEF, 2018), se controla la temperatura, contenido de humedad y el oxígeno suministrado.

Tratamiento térmico

El tratamiento térmico es un proceso de estabilización y acondicionamiento de lodo, donde se calienta el lodo bajo presión durante periodos cortos de tiempo. Se emplea para la coagulación de sólidos y destruir la afinidad del agua a los sólidos, generando la esterilización y deshidratación rápida.

Digestión aeróbica

Consiste en la degradación de la materia orgánica en presencia de oxígeno (aereación prolongada). La digestión aeróbica se basa en el principio biológico de la respiración endógena. La respiración endógena ocurre cuando se agota el suministro de sustrato disponible (alimento) y los microorganismos comienzan a consumir su propio protoplasma para obtener energía para las reacciones de mantenimiento celular (Metcalf & Eddy, 1995).

Digestión anaeróbica

La digestión anaeróbica es un proceso biológico complejo y degradativo en el cual parte de los materiales orgánicos son convertidos a una serie de compuestos de bajo peso molecular, principalmente metano. La digestión anaeróbica se puede ver como una serie de pasos en los que los productos de desecho de un organismo son el alimento de otro. En la sección [fundamentos de la producción de biogás](#) se hablará más a detalle de este tipo de digestión.

Comparación de los métodos de estabilización.

Un proceso de estabilización implica identificar los motivos de que esta se lleve a cabo y las opciones que pueden integrarse al tratamiento de agua residuales. Se debe de considerar el uso final de los biosólidos, así como las exigencias de calidad para su disposición. En la [tabla 2.8](#) se presentan las ventajas y desventajas de los procesos de estabilización antes mencionados.

Tabla 2. 8 Comparativa entre los diferentes procesos de estabilización.

Método	Ventajas	Desventajas
Estabilización alcalina	<p>Bajo costo de inversión.</p> <p>Fácil operación.</p> <p>Facilita la operación de deshidratación</p> <p>Biosólidos de alta calidad.</p> <p>Excelente reducción de patógenos.</p>	<p>Los biosólidos pueden no ser aplicables a la tierra.</p> <p>El volumen de los biosólidos aumenta (no se reduce el contenido de materia orgánica).</p> <p>La reducción del pH después del tratamiento puede generar olores, debido a la descomposición biológica.</p> <p>Los costos de transporte y disposición aumentan.</p>
Compostaje	<p>Biosólidos de calidad alta con potencial para su venta y uso agrícola.</p> <p>Se puede combinar con otros procesos.</p> <p>Bajo costo inicial.</p>	<p>Puede requerir un área de tierra grande.</p> <p>Potencial de olor.</p> <p>Altos costos de operación: energía, mano de obra y químicos.</p> <p>Potencial de propagación de patógenos a través del aire.</p>
Tratamiento térmico	<p>Estabilización de lodos difíciles de estabilizar por otros medios.</p> <p>Reducción del contenido de sólidos al 30- 50 %.</p> <p>No requiere acondicionamiento con productos químicos.</p> <p>Destruye la mayor parte de organismos patógenos.</p> <p>El proceso es insensible a las variaciones en la composición del lodo.</p>	<p>Altos costos de inversión y operación.</p> <p>Requiere mantenimiento preventivo exhaustivo.</p> <p>Se generan gases muy olorosos que precisan confinamiento, tratamiento y/o destrucción.</p> <p>Formación de incrustaciones en los equipos.</p> <p>Se generan subproductos con alto contenido de materia orgánica.</p>
Digestión aeróbica	<p>Bajo costo inicial.</p> <p>Control operacional simple.</p> <p>No genera olores molestos si el diseño es correcto.</p> <p>Reduce la masa y volumen del lodo.</p>	<p>Destrucción de SSV más bajos que en la digestión anaeróbica.</p> <p>Potencial de propagación de patógenos.</p> <p>Las temperaturas bajas afectan el rendimiento.</p> <p>Altos costos de energía según la temperatura que se esté manejando.</p> <p>Se puede generar la formación de espumas.</p>
Digestión anaeróbica	<p>Generación de un subproducto útil (biogás).</p> <p>Buena destrucción de SSV (40-60 %).</p> <p>El costo operativo puede reducirse si se aprovecha el metano.</p> <p>Biosólidos adecuados para uso agrícola.</p> <p>Reduce la masa del lodo.</p>	<p>Puede generar olores molestos.</p> <p>Alto costo inicial.</p> <p>Cuestiones de seguridad por el uso de gas (inflamable).</p> <p>Puede requerir mantenimiento intensivo.</p> <p>Microorganismos susceptibles a los cambios en las condiciones.</p>

Se puede aumentar la producción de biogás y reducir los tiempos de retención.

Fuente: WEF, 2018 & Metcalf & Eddy, 1995.

2.3.4 Desinfección

La desinfección suele ser un proceso adicional para cumplir con las restricciones de reutilización de los biosólidos, principalmente para garantizar la salud pública, asegurando la eliminación de organismos patógenos.

Los métodos empleados para la desinfección de lodos provenientes de la digestión aerobia y anaerobia son la pasteurización y el almacenamiento a largo plazo.

Pasteurización

Suelen emplearse dos métodos de pasteurización, el primero es por inyección directa con vapor y el segundo mediante calentamiento indirecto. Una temperatura de pasteurización a 70°C inactiva los huevos de los parásitos y destruye rápida y completamente las bacterias incluyendo las resistentes al calor (Lang & Smith, 2007). Los tiempos de pasteurización recomendados son de 30 minutos a 1 hora. En la [figura 2.9](#) se puede apreciar un proceso de pasteurización.

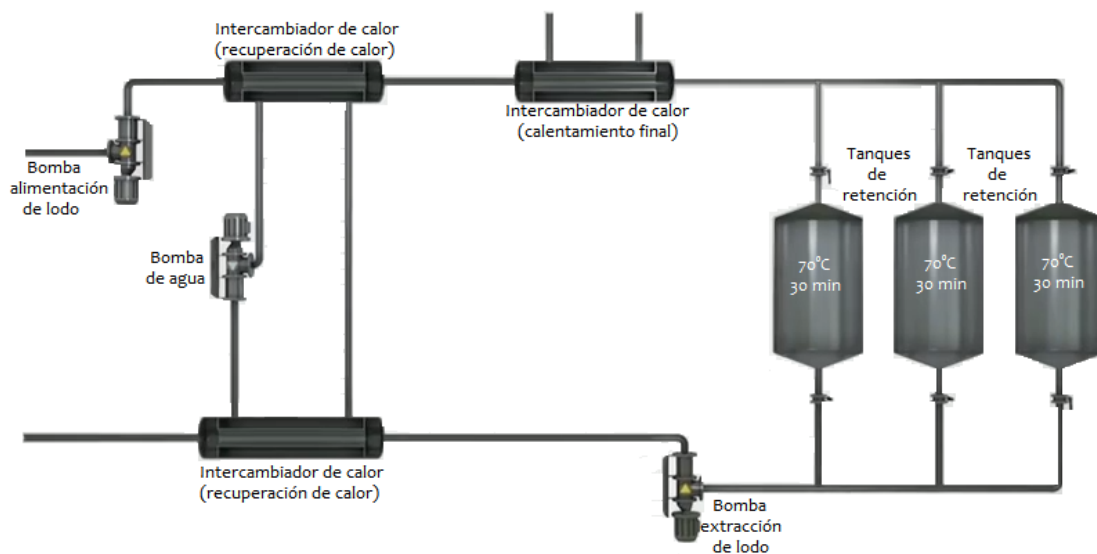


Figura 2. 9 Esquema de un sistema de pasteurización con recuperación de calor (fuente: HRS Heat Exchangers ©, 2018).

Almacenamiento a largo plazo

El almacenamiento a largo plazo se lleva a cabo en lagunas excavadas en el suelo, cumpliendo una doble función, el almacenaje de lodo cuando este no puede ser dispuesto y para desinfección. Los tiempos de desinfección típicos son de 60 días a 20°C y 120 días a 4°C (Metcalf & Eddy, 1995).

2.3.5 Acondicionamiento

El acondicionamiento de lodos se lleva a cabo para modificar las propiedades físicas, consiguiendo la coagulación de los sólidos y facilitar la liberación de agua durante el espesamiento o deshidratación y, así mejorar la eficiencia del proceso.

El acondicionamiento puede ser químico o térmico, los primeros utilizan químicos inorgánicos, polímeros orgánicos o ambos para mejorar las características de espesamiento y deshidratación. El acondicionamiento térmico utiliza calor para acondicionar y a su vez estabilizar los lodos (como se mencionó anteriormente).

El método de acondicionamiento propuesto debe de tener compatibilidad con el proceso de espesamiento o deshidratación. En la actualidad, existen diversos agentes acondicionadores, por lo que no es posible esperar que un solo agente sirva para todas las aplicaciones, además de que estos se seleccionan de acuerdo con las características del lodo a tratar y la cantidad vendrá dada por el tipo de lodo, según Metcalf & Eddy, la cantidad requerida de agente en orden creciente es el siguiente: (1) Lodo primario crudo, (2) lodo primario mezclado con lodo proveniente de filtros percoladores, (3) lodo primario mezclado con lodo activado, (4) lodo primario digerido anaeróbicamente, (5) mezcla de lodo primario digerido anaeróbicamente con lodo activado, (6) lodo activado crudo y (7) lodo de digestión aerobia.

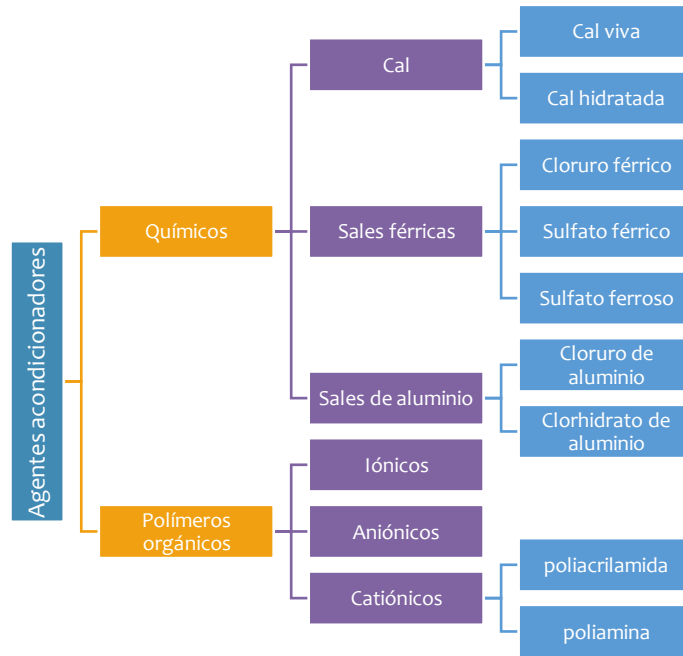


Figura 2. 10 Ejemplos de acondicionadores químicos (elaboración propia).

Los polímeros se han vuelto atractivos debido a que no aumentan notablemente el volumen de sólidos, son más seguros y de fácil manejo a diferencia de los acondicionadores químicos.

2.3.6 Deshidratación

La deshidratación es la eliminación de la mayor cantidad de agua posible (o restante) en los lodos. Esta etapa reduce los costos de inversión y operación que implican el manejo de los biosólidos tratados.

Los procesos más utilizados para la deshidratación son: [filtros banda](#), [filtros prensa](#), [centrifugación](#) y [lechos y lagunas de secado](#).

Filtros banda

Los sólidos acondicionados son introducidos primeramente a una zona de drenaje, donde la banda separa el agua mediante gravedad y compresión, para después pasar a una zona de compactación. En la [figura 2.11](#) se aprecia un esquema de este equipo.

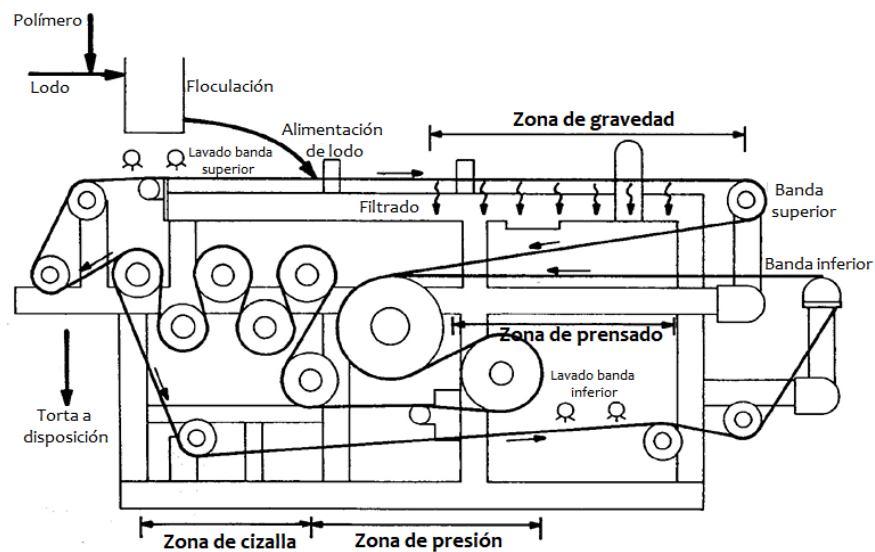


Figura 2. 11 Esquema de un filtro banda (fuente: WEF, 2010).

Filtros prensa de placas

El filtro prensa elimina el agua por la aplicación de una presión elevada. El lodo pasa a través de un medio filtrante, dejando los sólidos en el filtro y permitiendo el paso del agua, consiguiendo concentraciones altas de sólidos. Los dos tipos de filtros prensa son de volumen fijo y volumen variable, en la [figura 2.12](#) se muestra un esquema de estos filtros.

Centrifugación

Las centrífugas se utilizan tanto en el espesamiento como para la deshidratación, variando en las dimensiones del diseño interno.

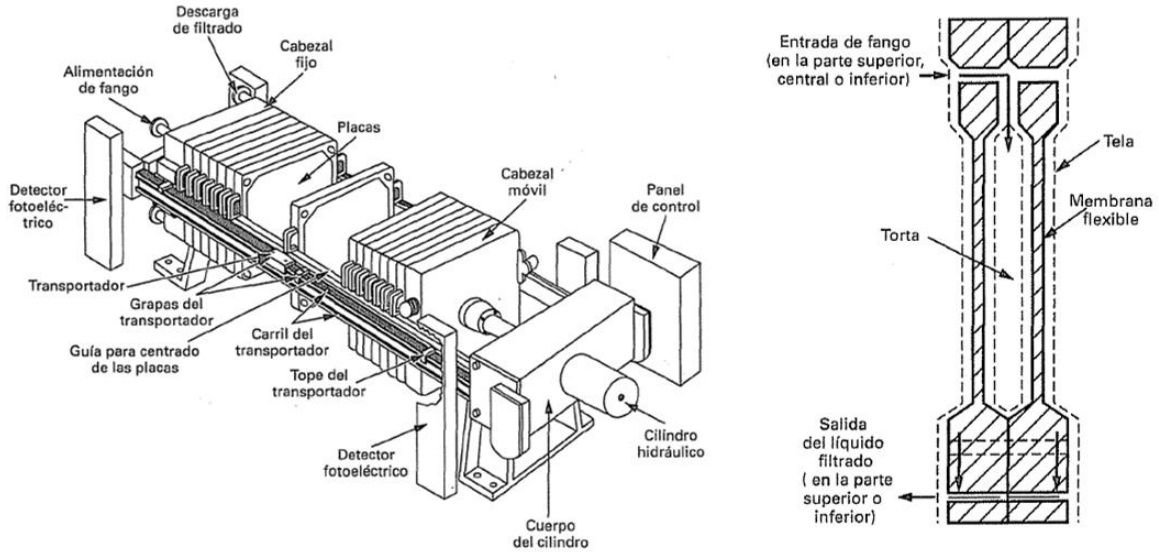


Figura 2. 12 Filtro prensa de volumen fijo y volumen variable, respectivamente (fuente: Metcalf & Eddy, 1995).

Lechos y lagunas de secado

Los lechos y lagunas de secado son ampliamente usados en instalaciones con un pequeño caudal y/o cuando se dispone de un terreno amplio. Los lechos de secado combinan filtración o drenaje por un medio poroso; generalmente formado por varias capas de arena y grava, y evaporación por un tiempo determinando para la deshidratación de los lodos.

Las lagunas son espacios de tierra naturales o artificiales, que se utilizan para el secado o para almacenamiento, son similares a los lechos de secado, sin embargo, los lodos se colocan a más profundidad. La deshidratación se lleva a cabo por evaporación y transpiración (fig. 2.13).

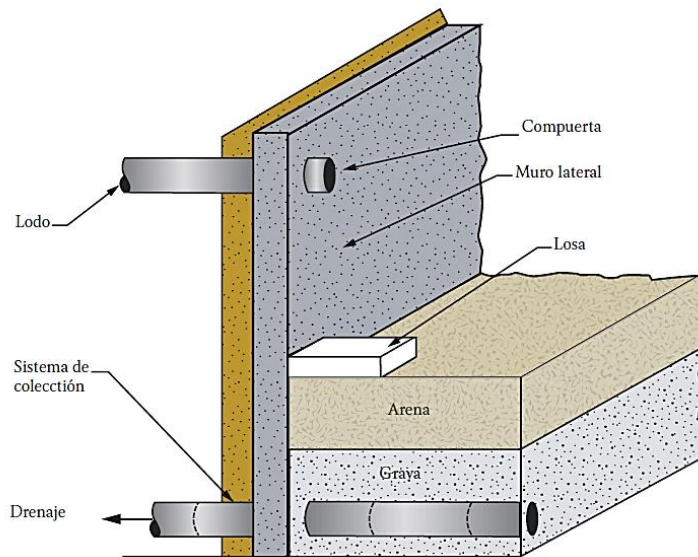


Figura 2. 13 Lecho de secado de arena típico (fuente: CONAGUA MAPAS, 2015).

Comparación de los métodos de deshidratación

La elección del método de deshidratación está en función de las características físicas y químicas del lodo a tratar, principalmente: tipo de lodo, cantidad de materia orgánica, el método de estabilización empleado, entre otros. Puede ser necesario que el lodo tenga un pretratamiento y un acondicionamiento. En la [tabla 2.9](#) se muestra una tabla comparativa de los diferentes procesos de deshidratación.

Tabla 2.9 Comparativa entre los diferentes procesos de deshidratación.

Método	Ventajas	Desventajas
Filtros banda	<p>Bajos costos de energía.</p> <p>Costos de inversión y mantenimiento relativamente bajos.</p> <p>Mecánica poco compleja y facilidad de mantenimiento.</p> <p>Las máquinas de alta presión permiten la obtención de una torta muy seca.</p> <p>El paro del sistema requiere un esfuerzo mínimo.</p>	<p>Precisa de un dilacerador en la alimentación de lodos.</p> <p>Muy sensible a las características del lodo alimentado.</p> <p>La vida del medio filtrante es corta en comparación a otros dispositivos.</p> <p>No se recomienda la automatización.</p> <p>Limitación en la producción hidráulica.</p>
Filtros prensa	<p>Consigue la mayor concentración de sólidos en la torta.</p> <p>Baja concentración de SS en el líquido filtrado.</p>	<p>Funcionamiento discontinuo.</p> <p>Elevado costo de los equipos y mano de obra.</p> <p>Necesidad de una estructura de soporte especial.</p> <p>Necesita persona calificado para su mantenimiento y operación.</p>
Centrifugación	<p>Apariencia limpia, mínimos problemas de olores.</p> <p>Arranques y paros rápidos.</p> <p>Fácil instalación.</p> <p>Produce una torta de lodo relativamente seca.</p>	<p>El desgaste es un grave problema de mantenimiento.</p> <p>Precisa eliminación de arenas y de un dilacerador en la alimentación del lodo.</p> <p>Se requiere personal calificado para mantenimiento y operación.</p>
Lechos de secado	<p>Método de menor costo inicial (si se dispone de la superficie).</p> <p>Bajo consumo de energía.</p> <p>Bajo o nulo consumo de productos químicos.</p> <p>Menos sensible a la variación en las características del lodo.</p> <p>Mayor contenido de sólidos que por sistemas mecánicos.</p>	<p>Precisa grandes superficies de terreno.</p> <p>Requiere lodos estabilizados.</p> <p>El diseño debe considerar las condiciones climáticas.</p> <p>El retiro de los lodos demanda mucha mano de obra.</p>

Lagunaje	Bajo consumo de energía. Nulo consumo de productos químicos. Estabilización adicional de la materia orgánica. El costo de inversión es bajo (cuando se dispone del terreno).	Problemas de olores y vectores. Riesgo de contaminación subterránea. Precisa de grandes superficies de terreno. El diseño debe de considerar las condiciones climáticas.
-----------------	---	---

Fuente: EPA, 1979 y 1985.

2.4 Alternativas para el aprovechamiento de lodos residuales

El tratamiento adecuado de los lodos residuales puede traer algunos beneficios si se utilizan principalmente como fuentes de energía o mejoradores de suelos.

La forma en que pueden aprovecharse los lodos como fuente de energía es por medio de la producción de biogás generado como subproducto de la digestión anaerobia. En plantas de tratamiento grandes, es beneficioso el aprovechamiento del biogás, al reducir los costos asociados al consumo energético que se demanda en el proceso de tratamiento de aguas con la implementación de un sistema de cogeneración. En el [capítulo 4](#) se hablará del aprovechamiento de biogás en un sistema de cogeneración.

2.4.1 Fundamentos de la producción de biogás

El biogás es una mezcla gaseosa formada principalmente de metano, dióxido de carbono y algunas impurezas (trazas de otros gases). La composición del biogás depende del material digerido y del funcionamiento del proceso (FAO, 2011). En la [tabla 2.10](#) se muestran algunas características del biogás.

Tabla 2.10 Características generales del biogás.

Composición	42-75 % metano 24-47 % dióxido de carbono Trazas de otros gases: 0.2-2 % hidrógeno 0.1-1.5 % sulfuro de hidrógeno 1-3 % nitrógeno
Poder calorífico	17 102 - 27 945 kJ/m ³
Densidad relativa (aire=1.213 kg/m³)	0.7-1.04

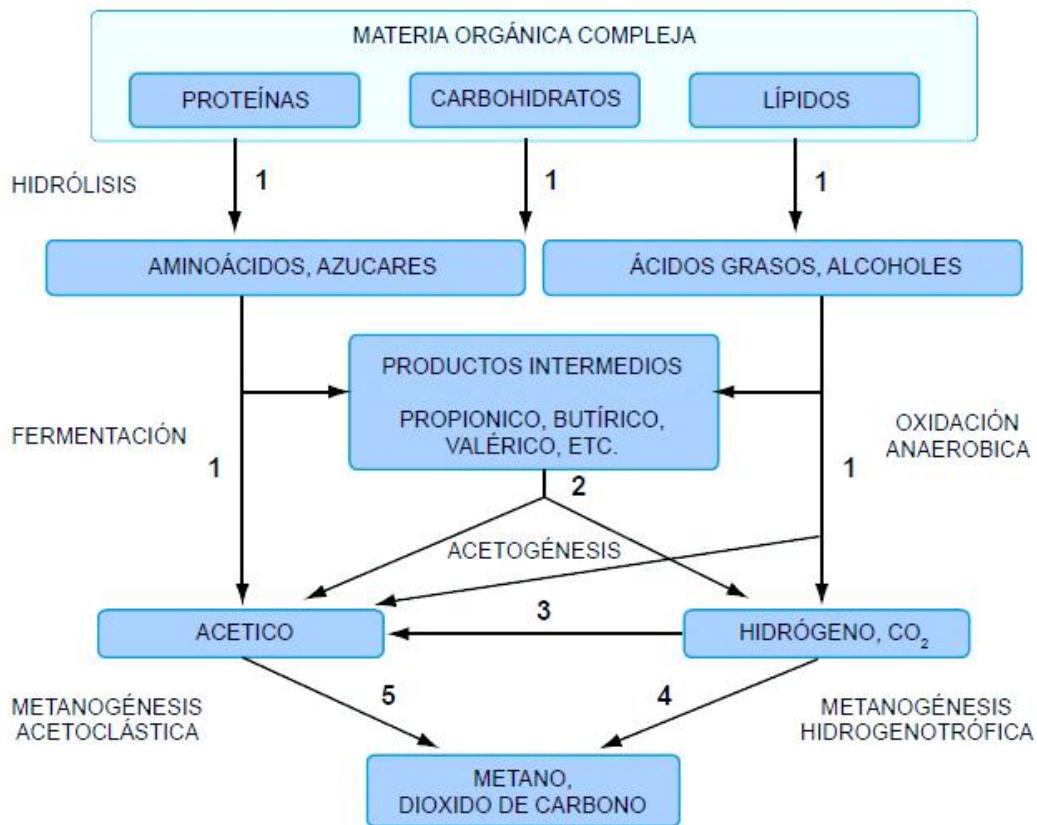
Fuente: WEF, 2018.

Por lo general, una composición del 60-70 % de metano y del 30-35 % de dióxido de carbono indican un buen funcionamiento del digestor.

La digestión anaerobia es un proceso complejo en el que se ven involucradas varias reacciones bioquímicas y microorganismos. El proceso de la descomposición de la materia se divide en cuatro etapas fundamentales:

- Hidrólisis: Los compuestos orgánicos complejos son degradados por la acción de microorganismos hidrolíticos a compuestos más simples que son solubles.
- Acidogénesis: Las moléculas orgánicas solubles de la etapa anterior se fermentan en compuestos que pueden ser utilizados por las bacterias metanogénicas y compuestos orgánicos intermedios de cadena corta.
- Acetogénesis: Los compuestos intermedios se transforman en productos más sencillos, como acetato e hidrógeno.
- Metanogénesis: Se completa el proceso de digestión mediante la formación de metano a partir de los monocarbonados formados por las etapas anteriores.

En la [figura 2.14](#) se muestran las distintas fases, los microorganismos que intervienen en cada una de estas fases y los productos intermedios generados.



Población bacteriana responsable del proceso. 1: bacterias fermentativas; 2: bacterias acetogénicas que producen hidrógeno; 3: bacterias homoacetogénicas; 4: bacterias metanogénicas hidrogenotróficas; 5: bacterias metanogénicas acetoclásticas.

Figura 2. 14 Esquema de reacciones de la digestión anaeróbica (fuente: FAO, 2011).

2.4.2 Estabilidad del proceso

Para la degradación eficiente de la materia orgánica por los microorganismos, es necesario mantener ciertos parámetros dentro del digestor, tales como: cambios de carga, tiempo de retención, uniformidad de la temperatura, pH, la proporción de nutrientes, entre otros. A continuación, se da una breve descripción de estos parámetros.

Cambios de carga

La digestión anaerobia puede verse afectada por los cambios de carga, tanto en cantidad como en calidad, por lo que se debe de tomar especial cuidado al cambiar condiciones de carga. La tasa de carga se refiere a la masa de sólidos volátiles añadidos al digestor cada día dividido por el volumen del digestor ($\text{kg SV}/\text{m}^3 \cdot \text{d}$)

La frecuencia de carga puede afectar las operaciones y el diseño. Los microorganismos generalmente prefieren mantenerse en un estado metabólico constante (estado estacionario), que se logra mediante una carga constante. La carga constante también da como resultado una tasa de producción de gas más constante y puede reducir los requisitos de almacenamiento de gas cuando se utiliza gas (WEF, 2018).

Tiempo de retención hidráulica

El tiempo de retención hidráulica (TRH) es la duración en la cual la materia orgánica y los microorganismos deben permanecer en el digestor para alcanzar la degradación deseada. La velocidad de degradación (destrucción de sólidos volátiles) depende en parte de la temperatura, mientras mayor sea, menor será el tiempo de retención. En la [figura 2.15](#) se presenta una gráfica de los tiempos de retención relacionados con la destrucción de sólidos volátiles a diferentes rangos de temperatura.

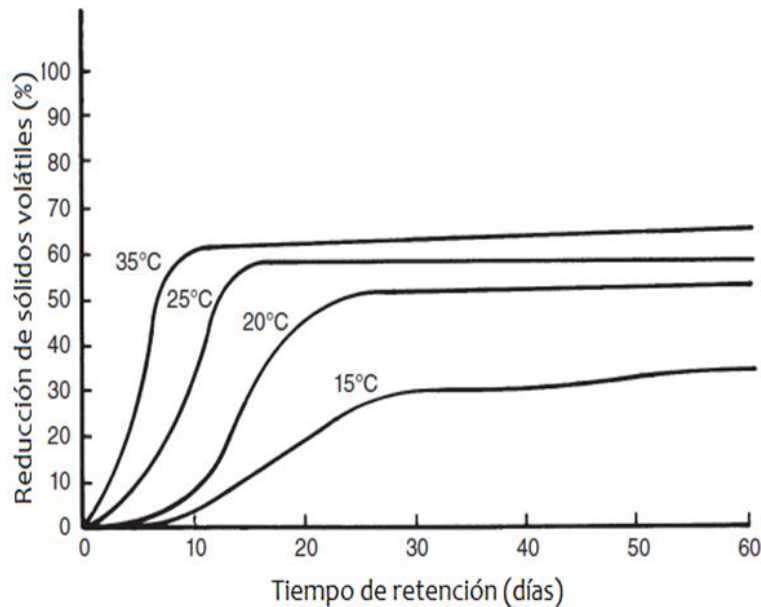


Figura 2. 15 Efecto de la temperatura y el tiempo de retención sobre la eliminación de SSV (fuente: WEF, 2018).

Temperatura

La temperatura de un digestor anaeróbico afecta significativamente el rendimiento y la estabilidad del proceso. El crecimiento de los microorganismos depende de la temperatura. A medida que aumenta la temperatura, aumenta la velocidad de crecimiento de los organismos y por consiguiente se acelera el proceso (fig. 2.16).

La temperatura de operación es uno de los principales parámetros en el diseño de los digestores. Existen tres rangos de temperatura en los que pueden trabajar los microorganismos: psicrófilos donde se manejan temperaturas por debajo de los 25°C, mesófilos entre 25 y 45°C y termófilos entre 45 y 65°C, en cada uno existe un intervalo máximo que determina la mejor temperatura de operación.

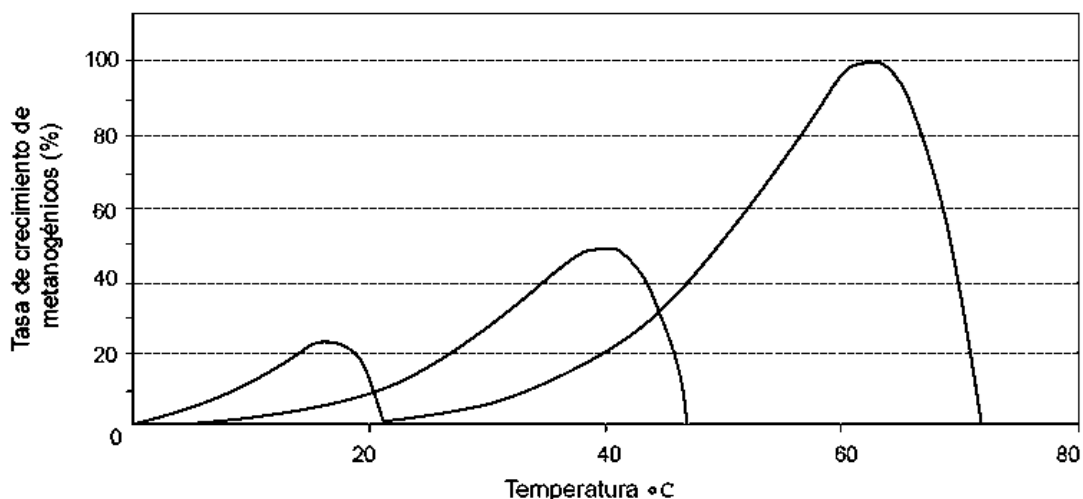


Figura 2. 16 Tasa de crecimiento de microorganismos según la temperatura (fuente: FAO, 2011).

La temperatura de diseño establece el TRH requerido para destruir una cantidad dada de sólidos volátiles (Figura 2.15). Actualmente, la mayoría de los digestores anaeróbicos están diseñados para operar en el rango de temperatura mesófila (alrededor de 35°C).

Independientemente de la temperatura de diseño, mantenerla constante es muy importante, ya que los microorganismos involucrados, especialmente los metanogénicos son sensibles a los cambios de temperatura; los cambios de temperatura estresan a los microorganismos desestabilizando el proceso. Por lo general se busca que las fluctuaciones de temperatura no sean superiores a 1°C/d. Un buen diseño evita los cambios de temperatura superiores a 0.5°C/d (WEF, 2018).

pH y alcalinidad

El pH óptimo se encuentra alrededor de 7. Un valor fuera del rango de 6.5 a 7.5 puede ocasionar la muerte para la mayoría de las bacterias metanogénicas. Una reducción en el pH promueve una mayor formación de ácido e inhibe la formación de metano. A medida que continúa la producción de ácido, la formación de metano y alcalinidad se inhiben aún más. Para que el proceso se lleve a cabo satisfactoriamente, el pH no debe ser menor de 6 ni mayor de 8. En la figura 2.17 se relaciona el pH con la actividad bacteriana.

El valor de pH está estrictamente ligado con la producción de biogás y su composición.

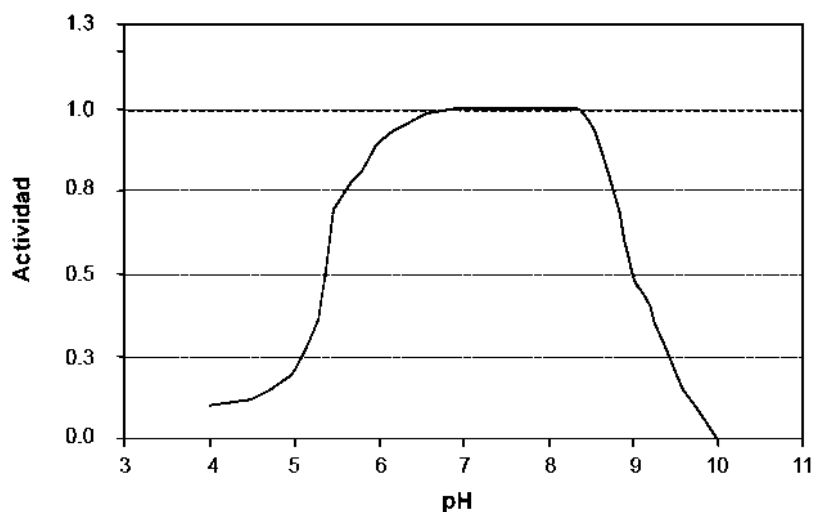


Figura 2. 17 Dependencia del pH en la actividad metanogénica (fuente: FAO, 2011).

Ácidos grasos volátiles (AGV)

Para el diseño de digestores se debe de conocer el efecto de las concentraciones de ácidos volátiles en el sistema. Los AGV se producen en la etapa de hidrólisis de sustancias orgánicas complejas. A medida que aumentan las concentraciones de ácido volátil se consume alcalinidad y el pH disminuirá, lo que provocará un trastorno y una falla en el proceso. Un rango aceptable de AGV se encuentra entre 50 y 300 mg/L (CONAGUA-MAPAS 32, 2015).

Toxicidad

La presencia de metales pesados y algunos compuestos inhiben el crecimiento de las bacterias del digestor. Una carga de tales materiales en el influente de la instalación o un cambio repentino en la operación del digestor puede crear condiciones tóxicas en el digestor.

Mezclado y agitación

El mezclado puede ser necesario para mantener un fluido uniforme dentro del digestor. Los principales objetivos del mezclado son: mantener un fluido homogéneo, impedir la formación de espumas y evitar cambios bruscos de temperatura en el digestor.

Para el mezclado se emplean diferentes sistemas. Los de uso más frecuente incluyen: la inyección de gas, la agitación mecánica y el bombeo mecánico.

Forma del tanque

La configuración del tanque (forma) afecta significativamente las características operativas de la digestión anaeróbica.

2.4.3 Variaciones al proceso

Las opciones de proceso para la digestión anaeróbica de sólidos de aguas residuales han avanzado significativamente, teniendo tres variaciones principales.

Digestión de baja tasa

Son digestores que se caracterizan por la alimentación intermitente, bajas tasas de carga orgánica, poco o nulo calentamiento o mezcla externa y tiempos de retención de 30 a 60 días. Actualmente pocos sistemas de baja tasa están en servicio porque los avances tecnológicos los han vuelto antieconómicos y poco atractivos (WEF, 2010).

Digestión de alta tasa

Se caracteriza por la adición de un sistema de calentamiento, mezclado, espesamiento del lodo crudo y alimentación constante al proceso. Estos factores ayudan a tener un proceso más estable y uniforme.

Digestión de dos etapas

Normalmente, un digestor de alta tasa se encuentra en serie con un segundo digestor. Por lo general, el segundo digestor no cuenta con calentamiento ni mezclado, su principal funcionalidad es permitir la concentración por gravedad de los sólidos y la eliminación del sobrenadante.

Propuesta de tratamiento de lodos residuales para la PTAR “Cerro de la Estrella”



Introducción

Como se mencionó con anterioridad, las características de un lodo están en función del proceso de tratamiento al que fue sometida el agua residual. Cada una de las plantas de tratamiento que actualmente operan en la Ciudad de México reciben el agua residual de diferentes fuentes y su tratamiento puede variar de una planta a otra. Se ha decidido tomar como referencia la PTAR “Cerro de la Estrella” (“CE”) para el objetivo que se persigue en este trabajo, tomando como base un proceso de tratamiento por lodos activados, que es el más utilizado en la mayoría de las plantas de tratamiento existentes en la república y por la importancia que representa. Actualmente, la PTAR “CE” no cuenta con un tratamiento y disposición de lodos adecuado, por lo que se requiere una solución a este problema cumpliendo con la normatividad vigente y así evitar daños perjudiciales para el ambiente y la salud.

3.1 Lodos generados en la PTAR “Cerro de la Estrella”

Los lodos y biosólidos están regulados por la NOM-004-SEMARNAT-2002. Las características de los lodos de “CE” a modo de comparativa se presentan en la [tabla 3.1](#).

Tabla 3.1 Comparación entre las características de los lodos residuales de “Cerro de la Estrella” y la normatividad aplicable NOM-004.

Parámetros	Unidades	Cerro de la Estrella	NOM-004
Arsénico	mg/kg	0.11	41
Cadmio	mg/kg	0.064	39
Cromo	mg/kg	1.227	1 200
Cobre	mg/kg	5.010	1 500
Plomo	mg/kg	1.687	300
Mercurio	mg/kg	0.004	17
Níquel	mg/kg	0.611	420
Zinc	mg/kg	9.536	2 800
Coliformes fecales	NMP/g ST	2 750 000	A y B: < 1 000 C: < 2 000 000
Salmonella spp	NMP/g ST	24 250	A y B: < 3 C: < 300
Huevos de helminto	HH/g ST	117 huevos totales 93 viables y 24 no viables	A: < 1 viable B: < 10 viables C: < 35 viables
Sólidos totales (ST)	% ST	1.17	N.A.
Sólidos volátiles (SV)	% SV de ST	57.28	N.A.
Sólidos fijos (SF)	% SF de ST	42.72	N.A.
pH		6.93	N.A.
Conductividad	μS/cm	916	N.A.

Elaborado a partir de datos proporcionados por el Instituto de Ingeniería, UNAM.

De acuerdo con los datos mostrados en la [tabla 3.1](#), los lodos residuales cumplen con la normatividad en cuanto a los límites máximos para metales, sin embargo, en relación con

patógenos y parásitos no se encuentran dentro de los límites permisibles de la norma, por lo que se debe de poner especial atención a este parámetro en cuanto al tren de tratamiento propuesto. Aunque los lodos generados en PTAR's municipales no deberían ser residuos peligrosos ya que fueron desclasificados de la NOM-052-SEMARNAT-2002, es conveniente comprobar que los lodos generados en la PTAR "CE" no son peligrosos, en el año 2000 el Instituto de Ingeniería contrató los servicios de un laboratorio certificado para realizar pruebas CRETI a los lodos de la PTAR "CE" y estos fueron clasificados como no peligrosos, no obstante, es necesario realizar nuevas pruebas que los descarten como residuos peligrosos, ya que, en caso de serlo se tendrían que detectar las descargas irregulares que los vuelven peligrosos.

La cantidad de lodo que se genera en la PTAR se estimó a partir del balance de masa mostrado más adelante.

3.2 Selección del tren de tratamiento de lodos.

Con base a lo mostrado en el capítulo 2 se decidió proponer un tren de tratamiento compuesto de las siguientes etapas:

1. Pretratamiento a través de un sistema de mezclado para la homogenización de los lodos primarios y secundarios provenientes de la PTAR.
2. Espesamiento a través de un espesador por gravedad para la concentración de sólidos y la reducción del volumen por la eliminación de agua, facilitando el manejo y favoreciendo las siguientes etapas.
3. Estabilización por medio de la digestión anaerobia para la producción de biogás y su aprovechamiento en la integración de un sistema de cogeneración, eficientando los recursos y tratando de disminuir la factura de energía eléctrica de la planta de tratamiento de aguas residuales. A su vez la obtención de un biosólido estable, reduciendo los agentes patógenos, los olores, el potencial de putrefacción, la materia orgánica y volumen.
4. Desinfección con un sistema de pasteurización para garantizar la eliminación de agentes patógenos y parásitos y obtener biosólidos clase A, B o C.
5. Deshidratación con filtro banda para la eliminación de la mayor cantidad de agua facilitando el manejo y transporte de los biosólidos.

La descripción correspondiente al tren de tratamiento propuesto se encuentra en el apartado siguiente (3.2.1), tomando como referencia la figura 3.1. El Diagrama de Flujo de Proceso (DFP) completo Se encuentra en el anexo 1, al igual que el Diagrama de Tubería e Instrumentación (DTI).

La planta de tratamiento de lodos puede localizarse en el terreno aledaño perteneciente a la PTAR "CE", el cual tiene un área de aproximadamente 20 800 m² (200 m largo y 104 m de ancho), la distribución propuesta de los equipos se muestra en el Plano de Localización General (PLG) en el anexo 1.

3.2.1 Descripción del proceso de tratamiento de lodos residuales

Los lodos provenientes de los sedimentadores primarios y secundarios de la PTAR “CE” son depositados en el cárcamo de lodos CL-101 el cual está provisto de un mezclador que permite homogenizar el lodo primario que en su mayoría se constituye de arenas y sólidos sedimentables, y el lodo secundario que básicamente está conformado por materia orgánica. Mediante la bomba de lóbulos BL-101 la mezcla de lodo es enviada al espesador de gravedad EG-101, en esta primera etapa se busca aumentar la cantidad de sólidos suspendidos llevando el lodo desde 1 % de SST a 4 % de SST, el lodo ingresa al espesador por la parte inferior del equipo y mediante un conducto que se encuentra en el centro de este es vertido en la superficie, el sobrenadante es enviado al cárcamo CS-301, y el lodo espesado es recolectado en el fondo del equipo y bombeado mediante la bomba de lóbulos BL-102 a la siguiente etapa llamada digestión anaerobia mesofílica, el lodo ingresa al intercambiador de calor en espiral IE-201 para elevar su temperatura de 18°C a 37°C esto mediante una corriente de agua caliente, y así ingresar al digestor tipo huevo D-201, en este tanque en forma de huevo es donde se lleva a cabo la digestión anaerobia mesofílica y básicamente lo que se busca es estabilizar el lodo y reducir la cantidad de sólidos mediante la descomposición de la materia orgánica a través de una serie de reacciones, de esta forma es posible obtener como subproducto biogás. Las condiciones de operación para llevar a cabo la digestión son: temperatura de 35°C y ausencia de oxígeno, por un periodo de 15 días, para mantener la temperatura de 35°C en el digestor, el lodo es recirculado mediante la bomba BL-201 y calentado nuevamente en el intercambiador de calor en espiral IE-201. El digestor está provisto de un mezclador para favorecer una temperatura homogénea del lodo. Del digestor se obtiene biogás, una corriente de sobrenadante y el lodo digerido.

El biogás obtenido es acondicionado pasando primero por un filtro de grava FG-201, por un filtro de cerámica FC-201, una trampa de condensados CD-201 y un filtro de limadura de hierro FH-201, los dos primeros filtros remueven partículas hasta de 10 micras, en la trampa de condensados se remueve una pequeña cantidad de agua y en el filtro de limadura de hierro se reduce el ácido sulfhídrico que pueda contener el gas, ya acondicionado es almacenado en el tanque TB-201 y por seguridad entre el acondicionamiento y el almacenamiento se tiene un quemador QB-201. El gas almacenado será utilizado para la generación de energía térmica y eléctrica en un sistema de cogeneración, el biogás almacenado se acondiciona nuevamente para ser utilizado en el sistema de cogeneración, para ello se dirige hacia una etapa de enfriamiento en el intercambiador E-201 que recibe una corriente del chiller EF-201, posteriormente pasa por un condensador donde se sigue removiendo agua, sulfuros y una pequeña fracción de siloxanos. Mediante el compresor C-201 se eleva la presión del biogás, y se hace pasar por una etapa de adsorción sobre carbón activado FA-201 compuesto de dos lechos. En el primero se elimina sulfuro y en el segundo siloxanos, este acondicionamiento y el anterior al almacenamiento son necesarios para el correcto funcionamiento de la unidad de cogeneración, el biogás ya acondicionado ingresa a la unidad de cogeneración, en este caso se ha seleccionado un motor de combustión, los gases producidos por el sistema pasan por el intercambiador E-202, donde se aprovecha la temperatura de estos gases para calentar agua que a su vez calentará el lodo, para las etapas de desinfección y para calentar el lodo a la entrada del digestor.

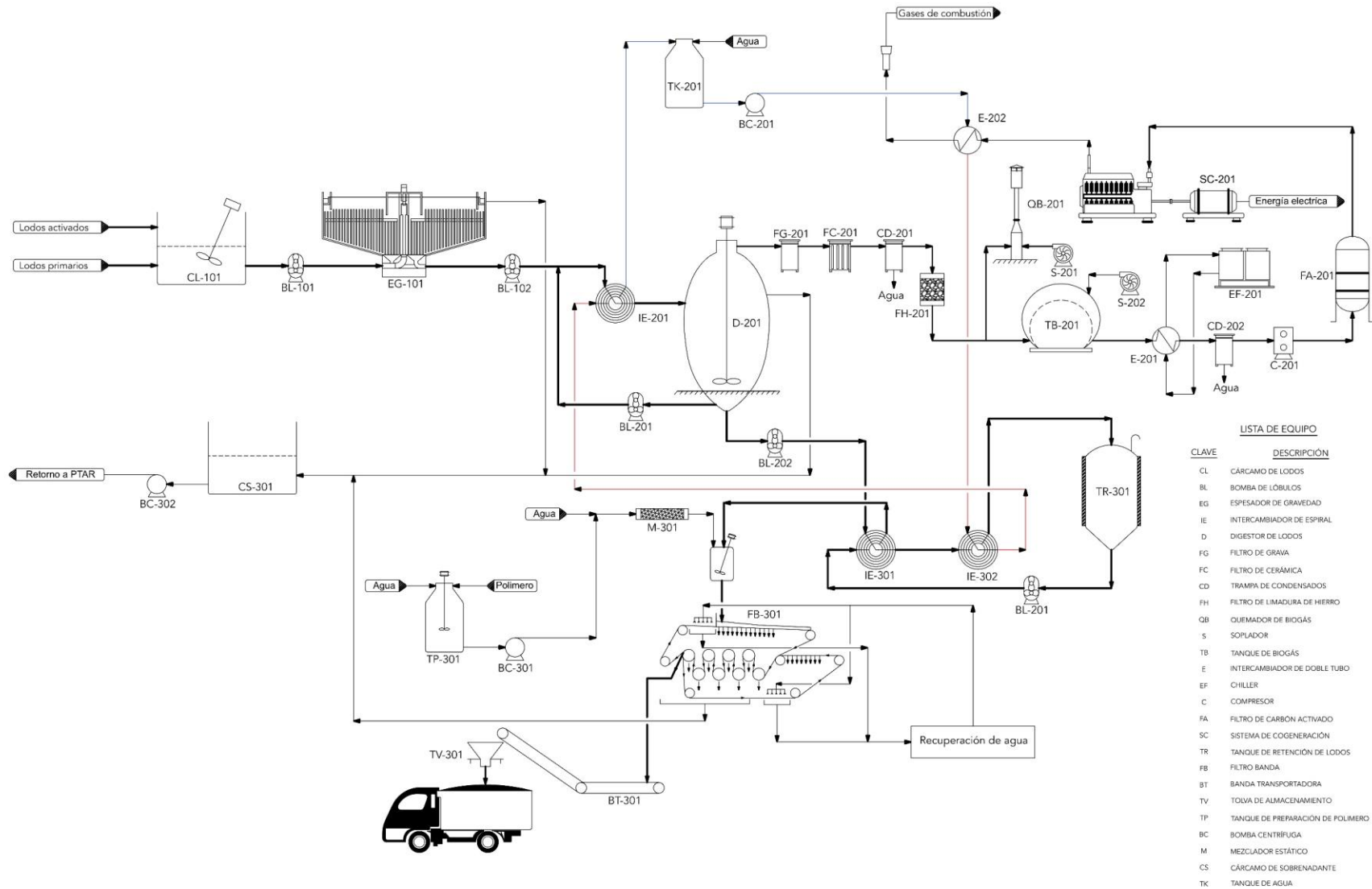


Figura 3. 1 Diagrama de Flujo de Proceso sencillo (elaboración propia).

El sobrenadante del digester es enviado al cárcamo de sobrenadantes CS-301. El lodo digerido sale del digester a 35°C y mediante la bomba BL-202 es enviado a la siguiente etapa llamada desinfección, el lodo ingresa al intercambiador de calor en espiral IE-301 lodo-lodo el cual precalienta el lodo de 35°C a 55°C mediante una corriente de lodo caliente proveniente del tanque de retención TR-301 de una etapa posterior, el lodo que sale del intercambiador de calor IE-301 ingresa a un segundo intercambiador de calor en espiral IE-302 lodo-agua elevando la temperatura del lodo hasta 70°C, mediante una corriente de agua a 120°C proveniente del sistema de cogeneración, el lodo a 70°C es enviado al tanque de retención TR-301, lo que se busca en esta etapa es inactivar las bacterias y parásitos contenidos en el lodo, después de los 30 minutos en el tanque de retención el lodo es enviado mediante la bomba BL-301 al intercambiador de calor IE-301 para precalentar los lodos provenientes del digester como se mencionó anteriormente, el lodo sale del intercambiador IE-301 a una temperatura aproximadamente de 40°C y es enviado a la siguiente etapa llamada deshidratación.

El lodo ya desinfectado proveniente del intercambiador IE-301 es acondicionado antes de ingresar al filtro banda, se mezcla con una disolución de polímero, esta es preparada en dos partes, en el tanque TP-301 se forma una disolución acuosa con una concentración de 0.5 % masa de polímero, y ya en línea mediante el mezclador estático M-301 y una línea de agua se diluye aún más el polímero hasta lograr una disolución de 0.05 % masa de polímero, ya adicionado el polímero al lodo ingresa al filtro banda, el cual tiene como objetivo reducir la cantidad de agua por compresión llegando a concentrar el lodo hasta un 22 % de sólidos, el agua retirada del lodo es enviada al cárcamo de sobrenadante CS-301, y el lodo obtenido es retirado mediante la banda transportadora BT-301 y conducido a la tolva TV-301, para su posterior uso.

3.3 Balance de masa para la producción de biogás.

En las etapas de espesamiento, digestión y deshidratación, se generan corrientes residuales que deben ser recirculadas al proceso de tratamiento de agua. Estos caudales recirculados aumentan las cargas de sólidos y deben de tomarse en cuenta de forma que no afecte el tren de tratamiento de agua ya diseñado, por lo que se procede a realizar un balance de masa, mismo que se utiliza para estimar la cantidad de biogás que se produciría en la digestión anaerobia.

El balance de masa se realizó mediante un procedimiento iterativo debido a las recirculaciones, para efectos prácticos solo se mostrarán las ecuaciones fundamentales del cálculo y las tablas de resultados que corresponden a la cuarta iteración (variación de 0.5 %), desglosadas en las respectivas etapas del tren de tratamiento. La mayoría de los valores de los parámetros utilizados en las ecuaciones siguientes fueron proporcionados por la PTAR “CE”. La primera iteración puede encontrarse en el [anexo 2](#) de forma detallada.

Además, para visualizar qué tan sensible es la producción de biogás en función de los sólidos suspendidos volátiles destruidos (SSVD) y la forma en cómo afectaría al dimensionamiento de la instalación de tratamiento, se decidió parametrizar este factor. Los resultados que se presentan corresponden a una variación de SSVD desde 40 % hasta 55 % que corresponde al rango para la digestión anaerobia de alta tasa, utilizando para el cálculo intervalos de 5 %.

3.3.1 Producción de lodo primario y secundario

Se debe conocer o estimar la cantidad de lodo producido en las instalaciones de tratamiento de aguas, para ello es esencial conocer ciertas características del lodo y algunos parámetros de diseño de la PTAR.

El volumen de lodo primario depende de las características del agua residual y las del lodo decantado, el tiempo de retención y el grado de tratamiento de los tanques sedimentadores. A partir de la [ecuación 3.1](#) se determina la cantidad de lodo primario decantado.

$$\dot{Q}_{L.P.} = \frac{m_{SST_{eliminado}}}{\rho_A \cdot dr_L \cdot \% \text{ sol}} \tag{3.1}$$

Donde:

- $Q_{L.P.}$: Flujo volumétrico de lodos primarios decantados (m³/d).
- $m_{SST_{eliminado}}$: Masa de sólidos suspendidos eliminados en la sedimentación primaria (kg/d); se estima a partir de la cantidad de sólidos del agua residual y las eficiencias de remoción del sedimentador.
- ρ_A : Densidad del agua (kg/m³).
- dr_L : Densidad relativa del lodo decantado.
- % sol: contenido de sólidos (%).

En el caso de lodos activados la purga diaria se estima a partir de la [ecuación 3.2](#). Es necesario conocer los coeficientes cinéticos de producción, así como las concentraciones de agua residual.

$$\dot{Q}_{L.S.} = \frac{m_{SST_{purga}}}{SS_r} \tag{3.2}$$

Donde:

- $Q_{L.S.}$: Flujo volumétrico de lodos secundarios purgados (m³/d).
- $m_{SST_{purga}}$: Masa de sólidos suspendidos en la purga del sedimentador secundario (kg/d); se estima a partir de la producción observada de células y la concentración de contaminantes (DBO).
- SS_r : Concentración de sólidos suspendidos en la recirculación (kg/m³).

La PTAR “CE” tiene una salida común de la purga de lodos primarios y secundarios, por lo que se considera como una mezcla ($Q_{L.M.}$). En la [tabla 3.2](#) se observan los resultados correspondientes a la producción de lodo mezcla.

Tabla 3.2 Resultados del balance para la producción de lodo primario y secundario (mezcla).

SSVD	$Q_{L.M.}$ (m ³ /d)	$SST_{L.M.}$ (kg/d)	$SSV_{L.M.}$ (kg/d)	$m_{L.M.}$ (kg/d)
40 %	4 323.262	42 655.760	32 101.729	4 452 960.79
45 %	4 325.512	42 797.645	32 174.218	4 455 278.13
50 %	4 327.909	42 949.153	32 251.279	4 457 746.92
55 %	4 330.236	43 096.806	32 326.542	4 460 143.75

Elaboración propia.

3.3.2 Espesamiento

La cantidad de lodo espesado se obtiene a partir de la [ecuación 3.3](#), que depende principalmente de la concentración de lodo alcanzada. La concentración varía de acuerdo con las características del lodo alimentado. La mezcla de lodos primarios y lodos activados oscila entre 2-6 % (Metcalf & Eddy, 1995).

$$\dot{Q}_{L.E.} = \frac{m_{SST_{mezcla}} \cdot \% \text{ rec. sólidos}}{\rho_L \cdot \% \text{ conc. sólidos}} \quad (3.3)$$

Donde:

- Q_{L.E.}: Flujo volumétrico de lodo espesado (m³/d).
- m_{SST_{mezcla}}: Masa de sólidos suspendidos de la mezcla (kg/d).
- ρ_L: Densidad del lodo (kg/m³).
- % rec. sólidos: Recuperación de sólidos (captura).
- % conc. sólidos: Concentración del lodo esperada.

En la [tabla 3.3](#) se muestran los resultados obtenidos con las características del lodo espesado con una concentración del 4 %.

Tabla 3.3 Resultados del balance en el espesador: lodo espesado (L.E.).

SSVD	Q _{L.E.} (m ³ /d)	SST _{L.E.} (kg/d)	SSV _{L.E.} (kg/d)	m _{L.E.} (kg/d)
40 %	880.033	36 257.396	27 286.469	906 434.916
45 %	882.961	36 377.998	27 348.085	909 449.958
50 %	886.086	36 506.780	27 413.587	912 669.519
55 %	889.133	36 632.285	27 477.561	915 807.139

Elaboración propia.

3.3.3 Digestión

En el balance de la etapa de digestión se obtiene la cantidad de lodo digerido que será alimentado al deshidratador y la cantidad de biogás producida a partir de los SSVD (de aquí parte el supuesto de variación).

Para calcular el caudal de lodo digerido se emplea la [ecuación 3.4](#) y la cantidad de biogás a partir de la [ecuación 3.5](#).

$$\dot{Q}_{L.D.} = \frac{m_{SST_{L.D.}}}{\rho_L \cdot \% \text{ conc. sólidos}} \quad (3.4)$$

Donde:

- Q_{L.D.}: Flujo volumétrico de lodo digerido (m³/d).
- m_{SST_{L.D.}}: Masa de sólidos suspendidos en el lodo digerido (kg/d).
- ρ_L: Densidad del lodo (kg/m³).
- % conc. sólidos: Concentración del lodo esperada.

$$\dot{Q}_{Biogás} = m_{SSVD} \cdot Prod_{Biogás} \quad (3.5)$$

Donde:

$Q_{\text{Biogás}}$: Flujo volumétrico del biogás (m^3/d).

m_{SSVD} : Masa de sólidos suspendidos volátiles destruidos (kg/d).

$\text{Prod}_{\text{Biogás}}$: Producción de biogás ($\text{m}^3/\text{kg-SSVD}$)

Los resultados de la cantidad de lodo digerido se encuentran en la [tabla 3.4](#) y en la [tabla 3.5](#) las cantidades de biogás producido de acuerdo con la variación de los SSVD, en la [gráfica 3.1](#) puede apreciarse de mejor manera esta variación.

Tabla 3. 4 Resultados del balance en el digester: lodo digerido (L.D.).

SSVD	$Q_{\text{L.D.}}$ (m^3/d)	$\text{SST}_{\text{L.D.}}$ (kg/d)	$\text{SSV}_{\text{L.D.}}$ (kg/d)	$m_{\text{L.D.}}$ (kg/d)
40 %	810.423	25 042.072	16 371.881	834 735.764
45 %	760.747	23 507.084	15 041.447	783 569.471
50 %	711.035	21 971.010	13 706.793	732 367.031
55 %	660.992	20 424.680	12 364.902	680 822.692

Elaboración propia.

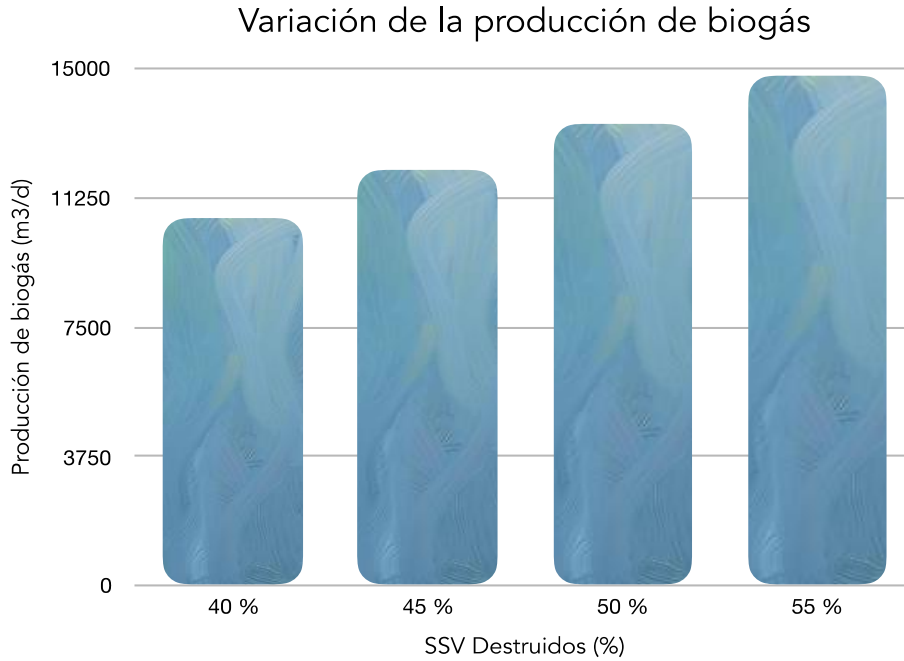
Tabla 3. 5 Resultados del balance en el digester para la producción de biogás.

SSVD	$Q_{\text{biogás}}$ (m^3/d)	$m_{\text{biogás}}$ (kg/d)
40 %	10 696.296	11 551.999
45 %	12 060.505	13 025.346
50 %	13 432.657	14 507.270
55 %	14 810.405	15 995.238

Elaboración propia.

Se puede deducir de las tablas [3.4](#) y [3.5](#) que la destrucción de sólidos volátiles influye directamente en la producción de biogás y a su vez en el contenido de sólidos en el lodo digerido, con una mayor destrucción de SV se produce una mayor cantidad de biogás y se obtiene un lodo con una menor carga orgánica lo que resulta beneficioso.

Como vemos en la [gráfica 3.1](#), la diferencia en la producción de biogás varía significativamente con respecto a la destrucción de SV, esta variación puede ser perjudicial para el sistema de cogeneración que se propone, al ser la fuente de combustible del sistema. Una menor producción de biogás puede afectar la cantidad de energía aportada por el sistema de cogeneración y, por lo tanto, no se estarían eficientando los recursos obtenidos. En el [capítulo 4](#) se analizará que tanto puede afectar la cantidad de biogás al sistema propuesto.



Gráfica 3.1 Variación de la producción de biogás en función de los SSVD (elaboración propia).

3.3.4 Deshidratación

La cantidad de lodo deshidratado (biosólido) se estima a partir de la [ecuación 3.6](#) y los resultados se muestran en la [tabla 3.6](#). Adicionalmente, en la última columna de la tabla se encuentra la cantidad de polímero agregado para el acondicionamiento del lodo y así mejorar el rendimiento del equipo deshidratador.

$$\dot{Q}_{L.Des.} = \frac{m_{SSTL.Des.}}{\rho_L \cdot \% \text{ conc. sólidos}} \tag{3.6}$$

Donde:

- $Q_{L.Des.}$: Flujo volumétrico de lodo deshidratado (m³/d).
- $m_{SSTL.Des.}$: Masa de sólidos suspendidos en el lodo deshidratado (kg/d).
- ρ_L : Densidad del lodo (kg/m³).
- % conc. sólidos: Concentración del lodo esperada.

Tabla 3.6 Resultados del balance en el deshidratador: lodo deshidratado (L. Des.).

SSVD	$Q_{L.Des.}$ (m³/d)	$SST_{L.Des.}$ (kg/d)	$SSV_{L.Des.}$ (kg/d)	$m_{L.Des.}$ (kg/d)	$m_{Polímero}$ (kg/d)
40 %	100.317	23 393.928	16 375.750	106 336.040	112.689
45 %	94.167	21 959.965	15 371.975	99 818.024	105.781
50 %	88.014	20 524.988	14 367.492	93 295.403	98.869
55 %	81.820	19 080.430	13 356.301	86 729.229	91.911

Elaboración propia.

Los resultados mostrados con anterioridad son la base para los cálculos siguientes.

3.4 Dimensionamiento de los equipos del proceso de tratamiento de lodos.

Cada una de las etapas del proceso de tratamiento tiene un equipo o equipos en particular que deben de dimensionarse para estimar los costos de inversión en el proceso de tratamiento de lodos. A continuación, se muestran los resultados de dimensionamiento de los diferentes equipos. Se sigue manteniendo el rango de variación en los SSVD. La secuencia de cálculo empleada puede verse en el [anexo 3](#).

3.4.1 Espesamiento

En la [tabla 3.7](#) pueden apreciarse los resultados correspondientes al dimensionamiento del espesador por gravedad a diferentes valores de los SSVD. El diámetro de las tres unidades de espesamiento propuestas en todos los casos de variación se redondea a 17.6 m, ya que la construcción de estos tanques varía de 0.3 en 0.3 m (EPA, 1979). El área superficial (A_{unidad}) y volumen (V_{unidad}) de cada unidad puede encontrarse en la columna 6 y 7, respectivamente, considerando el diámetro calculado (5ta columna). Con el diámetro de 17.6 m, el área superficial sería de 243.284 m² y el volumen de 973.139 m³. El tiempo de retención (TRH) mostrado en la última columna, se ajusta al valor más cercano siendo de 16 h.

Tabla 3.7 Resultado del dimensionamiento del espesador de gravedad.

SSVD	CS _{L.M.} (kg/d)	Sólidos _{L.M.} (%)	C _H (m ³ /m ² d)	D (m)	A _{unidad} (m ²)	V _{unidad} (m ³)	TRH (h)
40 %	42 655.760	0.958	6.081	17.37	236.976	947.905	15.786
45 %	42 797.645	0.961	6.064	17.39	237.764	951.058	15.830
50 %	42 949.153	0.963	6.046	17.429	238.606	954.425	15.878
55 %	43 096.806	0.966	6.028	17.459	239.426	957.706	15.924

Elaboración propia.

3.4.2 Digestión

Para la digestión es necesario determinar el volumen de los digestores tipo huevo, así como las necesidades de mezclado para mantener la uniformidad a lo largo del sistema. Se proponen dos digestores con las características mostradas en la [tabla 3.8](#).

El volumen de cada digestor (V_D) se encuentra en la segunda columna, considerando un tiempo de retención de 15 días y el volumen con un 20 % de sobrediseño para la generación de biogás se muestra en la tercera columna (V_T). En la cuarta columna (A) está el área de los digestores calculada a partir de la [ecuación 3.7](#).

Los datos de la 5ta y 6ta columna corresponden a la altura (h) y el diámetro (D) de cada digestor, respectivamente y en la 7ma columna la relación h/D. En la última columna (P) se encuentran los requerimientos de energía necesarios para el mezclado del lodo.

$$A = 2\pi a \frac{\left[b^2 \operatorname{Arctg} \left(\frac{\sqrt{b^2 - a^2}}{a} \right) + a\sqrt{b^2 - a^2} \right]}{\sqrt{b^2 - a^2}}, b > a \quad (3.7)$$

Donde:

a: Semieje horizontal (m).

b: Semieje vertical (m).

Tabla 3. 8 Resultados del dimensionamiento del digestor tipo huevo.

SSVD	V _D (m ³)	V _T (m ³)	A (m ²)	h (m)	D (m)	h/D	P (kW)
40 %	6 600.254	7 920.305	2 048.915	37.938	19.967	1.9	49.105
45 %	6 622.208	7 946.650	2 053.456	37.980	19.989	1.9	49.269
50 %	6 645.651	7 974.781	2 058.30	38.025	20.013	1.9	49.425
55 %	6 668.498	8 002.198	2 063.014	38.069	20.036	1.9	49.613

Elaboración propia.

3.4.3 Pasteurización

En la pasteurización, se requiere el dimensionamiento de los tanques de retención. Los lodos necesitan permanecer a una temperatura de 70°C durante 30 min en el tanque de retención. Mientras uno está lleno (pasteurizándose), otro se está llenando y el último vaciándose, de manera que se requieren tres tanques con las características mostradas en la [tabla 3.9](#).

Tabla 3. 9 Resultados del dimensionamiento de los tanques de retención en la pasteurización.

SSVD	Q _{LD} (m ³ /h)	V _T (m ³)	D (m)	L (m)	A (m ²)	V (m ³)	L/D _{nueva}
40 %	33.767	19.416	2.312	4.624	4.104	20.016	2.133
45 %	31.697	18.226	2.263	4.527	4.104	20.016	2.133
50 %	29.626	17.035	2.213	4.426	3.575	17.436	2.285
55 %	27.541	15.836	2.160	4.320	3.575	17.436	2.285

Elaboración propia.

En la tercera columna de la [tabla 3.9](#) se presenta el volumen total del tanque de retención (V_T) considerando un 15 % de sobrediseño con un tiempo de retención de 0.5 h.

Los valores calculados en la columna 4 y 5, que representan el diámetro (D) y la longitud (L) del tanque, respectivamente, se ajustaron a las medidas comerciales de acuerdo con las estandarizadas para tapas y placas de los tanques. El diámetro varía en 0.1524 m (1/2 ft), por lo que el diámetro comercial sería de 2.286 m para 40 y 45 % SSVD y 2.1336 m para 50 y 55 % SSVD. Las longitudes varían de 0.6096 m (2 ft), por lo que la longitud para los 4 casos sería de 4.877 m (16 ft). Los valores en la 6ta y 7ma columna corresponden al área y al volumen calculados a partir del diámetro y longitud comerciales.

Finalmente, la última columna corresponde a la L/D recalculada en función de las medidas comerciales. Se considera aceptable una L/D de entre 2 y 3.

Para mantener la temperatura a 70 °C durante los 30 min, se propuso implementar un aislamiento con fibra de vidrio de 1 pulgada de espesor, de esta manera, el descenso de la temperatura sería de 0.04 °C.

3.4.4 Deshidratación

En la siguiente tabla se encuentran los resultados correspondientes al dimensionamiento del filtro banda. En la tercera columna (SST_5) se encuentran los sólidos que serían procesados en un turno de 8 h, que corresponde a un ancho de banda total mostrado en la columna siguiente (W_{banda}), sin embargo, los anchos de banda comerciales se encuentran entre los 2-3 m de ancho (WEF, 2010), por lo que es necesario obtener el número de equipos requeridos. En el caso de 40 y 45 % de SSVD se requerirían 4 equipos, y en el de 50 y 55 % únicamente 3 equipos. El agua de lavado que se requeriría para remover el lodo remanente de las bandas del filtro se muestra en la última columna (Q_L)

Tabla 3. 10 Resultados del dimensionamiento de los filtros banda para la deshidratación del lodo.

SSVD	SST_5 (kg/d _{op})	SST_5 (kg/h _{op})	W_{banda} (m)	#equipos	Q_L (m ³ /d)
40 %	25 042.072	3 130.259	10.434	3.478	405.211
45 %	23 507.084	2 938.385	9.794	3.264	380.373
50 %	21 971.010	2 746.376	9.154	3.051	355.517
55 %	20 424.680	2 553.085	8.510	2.836	330.496

Elaboración propia.

Acondicionamiento

Como se mencionó en el capítulo 2, es recomendable agregar un floculante (polímero) para mejorar la etapa de deshidratación. En la tabla 3.11 se muestran los resultados correspondientes al dimensionamiento del tanque de preparación de la solución madre de polímero. El polímero seco se prepara a una concentración de 0.5 % peso (solución madre o stock), por lo general, el polímero debe dosificarse a una menor concentración (0.05 % peso), por lo que es necesaria agua de dilución. La cantidad de agua a adicionar para preparar la solución madre se encuentra en la segunda columna. El agua adicional que se requiere para reducir la concentración de la solución madre a 0.05 % peso se muestra en la 3er columna. El valor de la última columna corresponde al volumen del tanque de preparación de la solución madre. Se selecciona un tanque comercial de 20 000 a 25 000 L.

Tabla 3. 11 Resultados del dimensionamiento del tanque de preparación de polímero.

SSVD	m_{agua} (m ³ /d)	$m_{aguadiluida}$ (m ³ /d)	V (m ³)
40 %	22.425	202.840	22.537
45 %	21.050	190.407	21.156
50 %	19.675	177.965	19.773
55 %	18.290	165.439	18.382

Elaboración propia.

3.4.5 Bombas

Se calcularon los equipos de bombeo para el desplazamiento del lodo a las diferentes etapas del tratamiento, considerando las distancias propuestas en el plano de localización general (PLG), los planos isométricos ([anexo 1](#)), las válvulas requeridas en el DTI y caídas de presión en los intercambiadores de calor.

En la [tabla 3.12](#) se presentan las potencias requeridas para cada uno de los equipos de bombeo

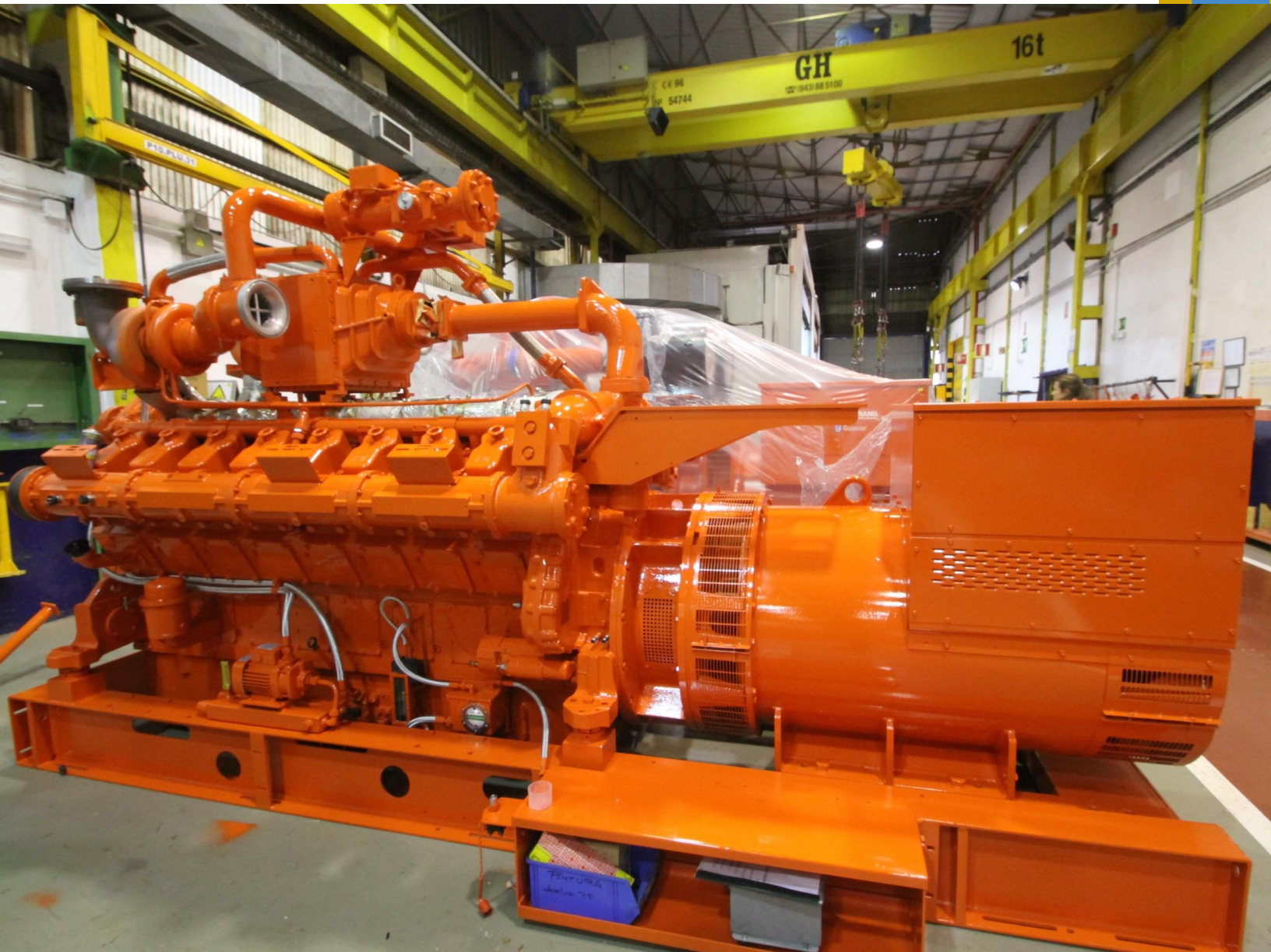
Tabla 3. 12 Resultados del dimensionamiento de las bombas.

Bomba	Potencia hidráulica (HP)	Potencia real (BHP)	Potencia nominal (PH)
BL-101	25.985	43.309	50
BL-102	2.047	3.411	5
BL-103	2.047	3.411	5
BL-104	2.047	3.411	5
BL-203	1.677	2.795	3
BL-204	1.677	2.795	3
BL-301	5.062	9.203	10

Elaboración propia.

Cada uno de los resultados mostrados en los apartados anteriores, servirán para la selección de equipos comerciales (cuando aplique) y la obtención de precios de cada uno de ellos, de esta manera se podrá proceder al análisis económico en el [capítulo 4](#).

Propuesta para la integración de un sistema de cogeneración en la PTAR “Cerro de la Estrella”



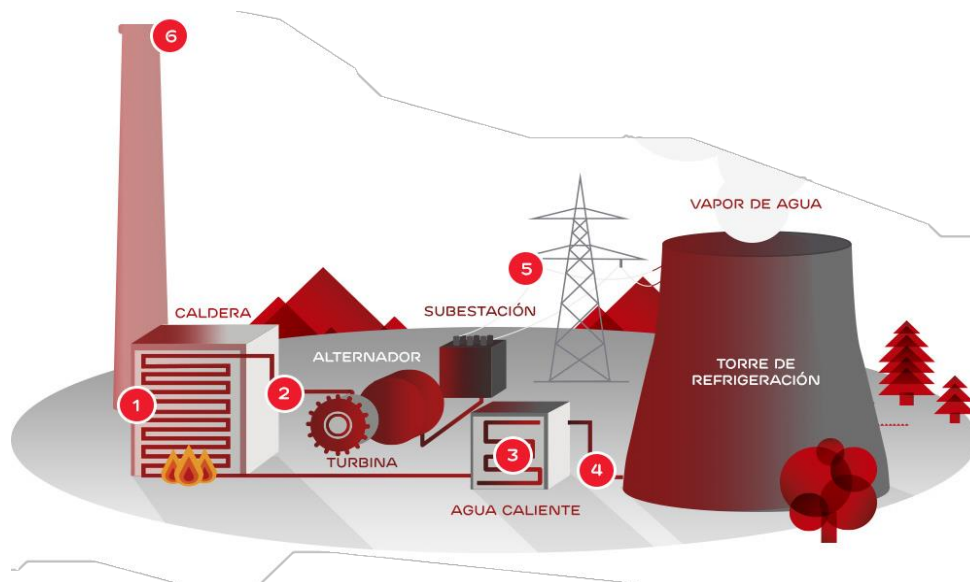
Introducción

El tratamiento de los lodos residuales trae consigo ciertas ventajas. En la digestión anaerobia se obtiene biogás que puede aprovecharse como fuente de energía en un sistema de cogeneración, de manera que la energía producida puede aprovecharse de forma eficiente en los procesos de tratamiento, tanto de agua como de lodo residual.

4.1 Cogeneración

La cogeneración es la producción simultánea de calor y electricidad a partir de una fuente primaria de energía. Su uso tiene impactos positivos en la economía y el medio ambiente, basándose en que este tipo de tecnología incrementa la eficiencia térmica del sistema al emplear el calor residual a diferencia de una planta convencional de generación eléctrica. La producción simultánea de energía supone que puede ser utilizada simultáneamente, lo que implica proximidad de la planta generadora a la fuente de consumo, reduciendo las pérdidas por transporte.

Una central termoeléctrica tradicional, normalmente quema un combustible fósil (carbón, fuel, diésel, gas natural) para producir energía térmica en forma de vapor a alta presión, ese vapor genera energía mecánica a través de una turbina que mediante un alternador se transforma en energía eléctrica, sin embargo, aún las plantas más eficientes consiguen una conversión inferior al 42 %, el resto se desperdicia en forma de gases de escape o en los sistemas de condensación (energiza, 2012). En la [figura 4.1](#) se muestra un esquema de funcionamiento.



(1) Combustión para el cambio de fase de agua que circula en la caldera a vapor. (2) El vapor hace girar una turbina generando energía mecánica que se transforma en energía eléctrica en un alternador. (3) El vapor se condensa antes de volver a entrar a la caldera. (4) El calor de la condensación es absorbido por el agua de refrigeración y se expulsa al exterior a través de torres de refrigeración (5) La energía generada en el alternador se manda a una subestación (6) Los gases de combustión se depuran antes de ser expulsado por la chimenea.

Figura 4. 1 Esquema de funcionamiento de una central térmica (fuente: EDP España, 2016).

Un sistema de cogeneración tiene mayor potencial de rendimiento ya que se aprovecha tanto el calor como la energía eléctrica, eliminando o reduciendo la necesidad de utilizar una central eléctrica convencional o una caldera para cubrir las necesidades de calor como se muestra en la figura 4.2. Este mayor rendimiento da origen a tres de sus mayores ventajas: menor dependencia de los combustibles, costo de producción menor y menor impacto ambiental a nivel nacional.

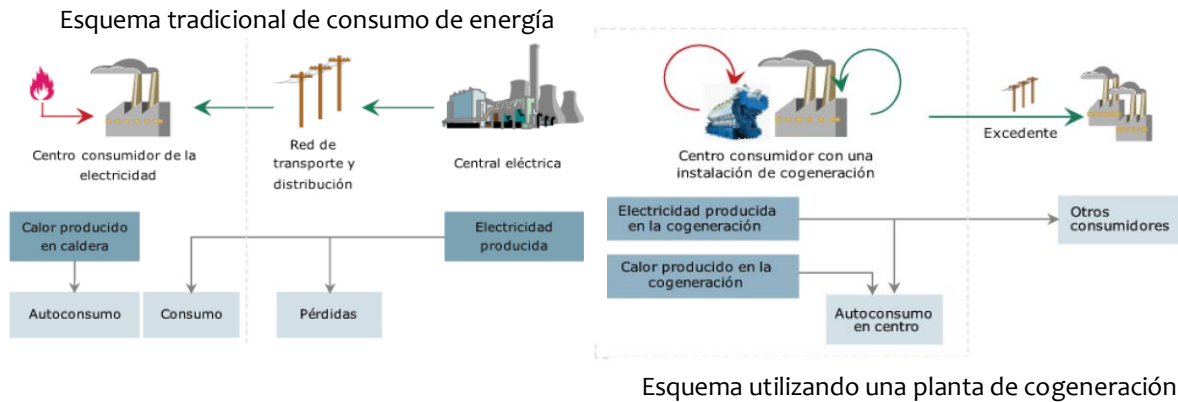


Figura 4. 2 Comparativa de un esquema de consumos tradicional de energía y usando una planta de cogeneración (fuente: Petronor, 2011).

Las plantas de cogeneración son más respetuosas con el medio ambiente a diferencia de otras plantas de generación que utilizan combustibles fósiles. Las emisiones atmosféricas son menores, considerando que emiten CO₂ en menor cantidad por kWh producido que otras centrales, ya que tienen mejor rendimiento global. Las emisiones de gases de NO_x y CO están dentro de lo permitido. En la tabla 4.1 se muestran las emisiones netas por unidad de energía eléctrica producida.

Tabla 4. 1 Emisiones de plantas de cogeneración y generación convencional en g/kWh eléctrico.

Contaminante	Turbina de Gas	Cogeneración en ciclo combinado	Motor de gas	Motor fuelóleo	Central eléctrica de ciclo combinado	Central eléctrica de carbón
NO ₂	0.20	0.20	1.2	7.2	0.24	3.4
SO ₂	-	-	-	3		15
CO ₂	245	210	284	530	350	1 000
CO	0.1	0.1	1.6	1.7	0.1	1.0

Fuente: Fraile, D., 2010.

La base de un sistema de cogeneración es el aprovechamiento del calor y para el dimensionamiento debe comenzarse por conocer las necesidades de calentamiento del proceso, tanto la cantidad como el tipo (temperatura, fluido, etc.), de igual manera es necesario conocer la energía eléctrica demandada por el proceso al cual se va a implementar el sistema de cogeneración y de ahí se parte a la selección de la tecnología más apropiada y el tamaño, de manera que cubra las necesidades de calentamiento.

4.1.1 Necesidades de calor

Un proceso puede requerir vapor, agua caliente, aire caliente o algún otro tipo de fluido. Cada fluido maneja condiciones diferentes, por lo que es necesario conocer los requerimientos de energía del proceso.

En el caso del tratamiento de lodos propuesto, se requiere calentamiento en dos partes del proceso: en la digestión; donde se eleva la temperatura del lodo de temperatura ambiente a la temperatura de alimentación al digestor, y en la pasteurización; que se eleva de la temperatura de digestión a la temperatura de pasteurización. En la [tabla 4.2](#) y [4.3](#) se muestran los requerimientos de energía, la memoria de cálculo correspondiente se encuentra en el [anexo 4](#).

La [tabla 4.2](#) indica los requerimientos de calor correspondientes a la etapa de digestión. Las necesidades de calentamiento están basadas en que existen pérdidas de calor en el digestor por los mecanismos de transferencia a través de las paredes del equipo, por lo que se propone alimentar el lodo a una mayor temperatura (37°C) y recircular un 20 % de la alimentación desde el digestor y de esta manera garantizar que no exista descenso en la temperatura dentro del equipo ya que esto ocasionaría graves problemas en la operación de este. La recirculación de lodos también garantiza un buen mezclado en el digestor, auxiliado por el mezclador mecánico propuesto. En la columna de $m_{L.E}$ se observa el flujo másico de la alimentación del lodo y en la columna 3 (m_R) la cantidad recirculada (20 %). Como se considera la recirculación de lodo y este se encuentra a una mayor temperatura, primero se calculó la temperatura de mezcla entre los lodos a temperatura ambiente (18°C) y los recirculados (35°C), y siendo que la masa es mayor (columna 4), el calor necesario (Q_D) mostrado en la 5ta columna está calculado bajo estas condiciones.

Las necesidades de calentamiento para los diferentes SSVD no varían significativamente debido a que la cantidad de lodo espesado es prácticamente el mismo, ya que las corrientes recirculadas a la PTAR contienen una concentración de sólidos baja y no influye directamente en la cantidad de lodo producido por la planta.

Tabla 4.2 Requerimiento de calor para la digestión mesofílica.

SSVD	$m_{L.E}$ (kg/s)	m_R (kg/s)	m_L (kg/s)	Q_D (kW)
40 %	10.4911	2.0982	12.5893	851.3585
45 %	10.526	2.1052	12.6312	854.1903
50 %	10.5633	2.1126	12.6759	857.2316
55 %	10.5996	2.1199	12.7195	860.1612

Elaboración propia.

En la [tabla 4.3](#) se muestran las necesidades de calentamiento para elevar la temperatura de los lodos hasta la temperatura de pasteurización (70°C). El requerimiento total se muestra en la 3er columna, sin embargo, se considera este calentamiento en dos etapas, la primera etapa es un precalentamiento de los lodos de 35°C a 55°C mediante la recuperación de energía utilizando la corriente de lodos pasteurizados, es decir un intercambio lodo-lodo, enfriándose los lodos de

70°C a 40°C, de esta manera se reduce el requerimiento de energía en esta parte del proceso. La segunda etapa es el calentamiento de los lodos de 55°C a 70°C. Los requerimientos de energía de la primera etapa se muestran en la 4ta columna y los de la segunda etapa en la última columna.

Tabla 4. 3 Requerimientos de calor para la pasteurización.

SSVD	m _{L.E.} (kg/s)	Q _{PT} (kW)	Q _{rec} (kW)	Q _p (kW)
40 %	9.6612	1 412.7709	807.2976	606.1978
45 %	9.0690	1 326.1731	757.8132	569.0401
50 %	8.4764	1 239.5142	708.2938	531.8561
55 %	7.8798	1 152.2766	658.4437	494.4238

Elaboración propia.

Como se mencionó, existen pérdidas de calor a través de las paredes del digestor, estas pérdidas se estimaron como una resistencia de pared rectangular como se muestra en la figura 4.3.

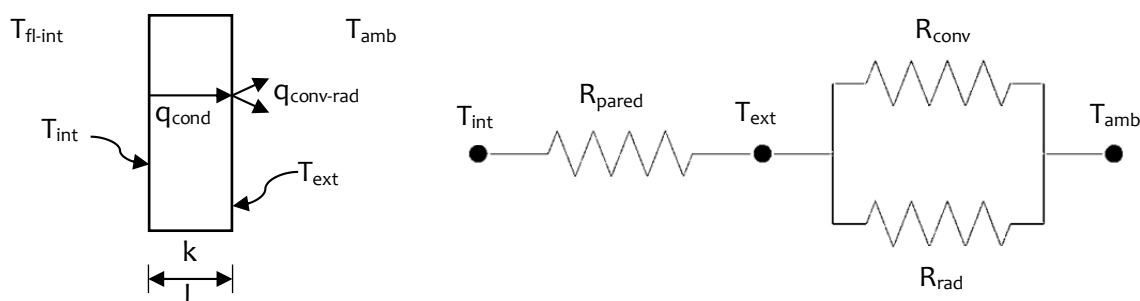


Figura 4. 3 Esquema de los mecanismos de transferencia en la pared del digestor (elaboración propia).

El cálculo se realizó mediante un proceso iterativo que se encuentra en el [anexo 4](#) para obtener el flux de calor a través de la pared del digestor y una vez conocido, dependiendo del área del equipo, se estimó la pérdida de calor. Los resultados se muestran en la [tabla 4.4](#). En la columna 2 ($q_{conv-rad}$) se encuentra el flux de calor, en la 3er columna se muestra el área del digestor ([capítulo 3](#)) y en la 4ta y 5ta columna están las pérdidas de calor por digestor (Q_{per}) y el total (Q_{Tper}), respectivamente.

Tabla 4. 4 Pérdidas de calor en el digestor.

SSVD	q _{conv-rad} (W/m ²)	A _D (m ²)	Q _{per} (kW)	Q _{Tper} (kW)
40 %	79.7440	2 048.9154	163.3887	326.7775
45 %	79.7440	2 053.4564	163.7508	327.5017
50 %	79.7440	2 058.2999	164.1370	328.2741
55 %	79.7440	2 063.0146	164.5130	329.0261

Elaboración propia.

Como se aprecia en la tabla anterior, la pérdida de calor se estimó en 164.137 kW por digestor (50 % SSVD), es decir, un total de 328.2741 kW. Este calor perdido descendería la temperatura en un día en 0.496°C si se dejase de suministrar calor al sistema, por lo que alimentar el lodo a mayor

temperatura y la recirculación son buenas medidas para contrarrestar el descenso de la temperatura.

En la [tabla 4.5](#) se encuentra el requerimiento total de energía térmica.

Tabla 4. 5 Requerimiento total de calor.

SSVD	Q _D (kW)	Q _P (kW)	Q _{per} (kW)	Q _T (kW)
40 %	851.3585	606.1978	326.7775	1 784.3338
45 %	854.1903	569.0401	327.5017	1 750.7321
50 %	857.2316	531.8561	328.2738	1 717.3615
55 %	860.1612	494.4238	329.0261	1 683.6111

Elaboración propia.

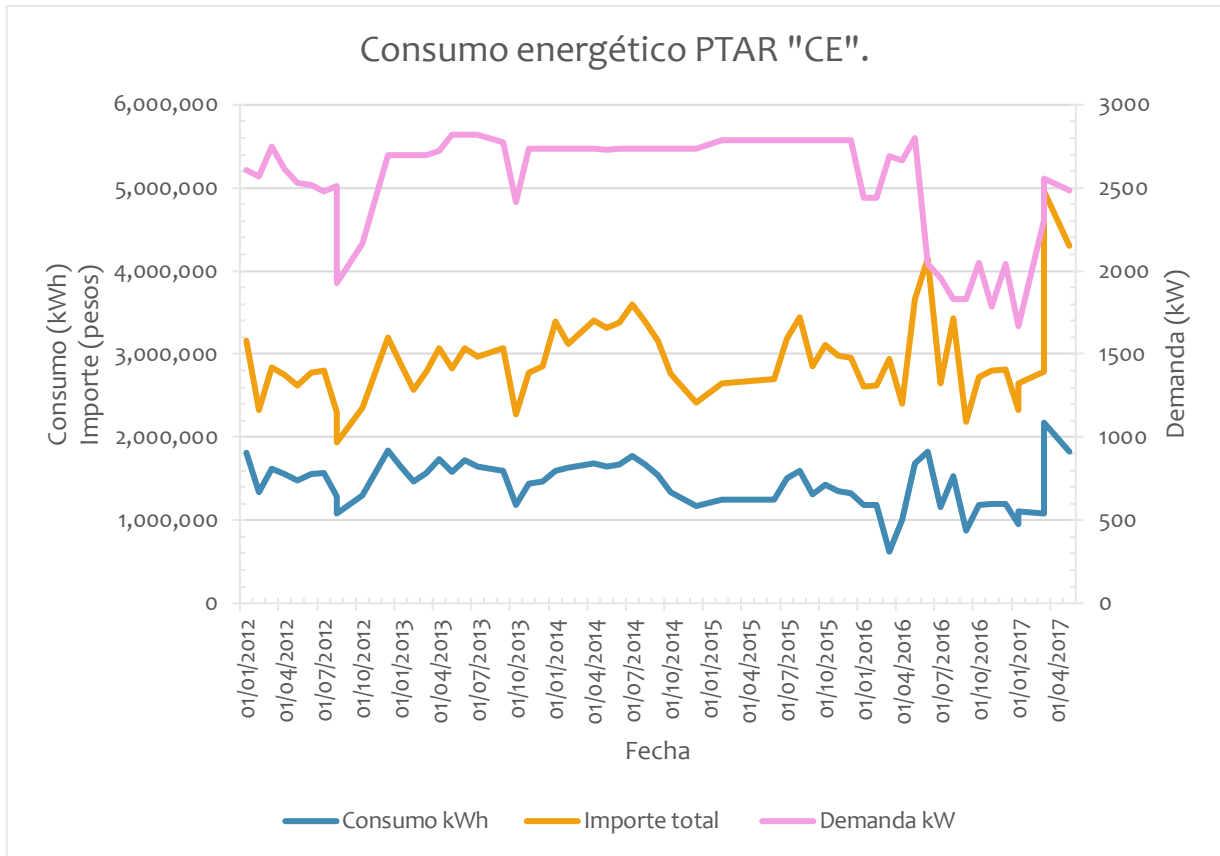
De la tabla anterior podemos deducir que el requerimiento de calor varía significativamente según los SSVD, a una menor destrucción de sólidos un mayor requerimiento de calor y a su vez una menor cantidad de combustible producido, por lo que es posible que no puedan cubrirse las necesidades de calor con la energía aportada por el sistema de cogeneración.

4.1.2 Consumos y costos energéticos en la planta

La PTAR “Cerro de la Estrella” (“CE”) demanda una cantidad de energía eléctrica necesaria para la operación de los equipos, principalmente los sopladores que inyectan el aire al reactor biológico, seguido por los equipos de bombeo para la recirculación de lodos activados y la distribución del agua tratada a la zona Lacustre y Xochimilco.

En la [gráfica 4.1](#) se presentan los consumos con los respectivos costos de la PTAR. La curva de demanda está graficada en el eje secundario (color rosa), donde se observa que la demanda se mantiene relativamente constante a lo largo del periodo de medición, que comprende de enero de 2012 a abril de 2017, este comportamiento se debe a que la PTAR mantiene en operación constante los equipos sopladores que demandan mayor energía y las bombas de distribución que se utilizan frecuentemente, sin embargo, en algunos meses la curva de la demanda tuvo variaciones que pudieron deberse principalmente al mantenimiento correctivo de los equipos, por fallos en la subestación eléctrica y a la disminución del uso de bombas de distribución por la temporada de lluvia, ya que la PTAR reduce el caudal tratado para evitar inundaciones a los diferentes puntos de distribución. En este caso se tomarán 2 550 kW de demanda promedio para el dimensionamiento del sistema de cogeneración.

En cuanto al consumo energético tiene un comportamiento similar a la demanda, cuanto mayor es el consumo y la demanda, mayor es el costo asociado a la energía eléctrica, aproximadamente el costo por kWh de la planta es de \$1.8 (por consumo) lo que genera un gasto aproximado de \$3,350,000 al mes.



Gráfica 4. 1 Consumos energéticos de la PTAR “Cerro de la Estrella” (elaborado a partir de datos proporcionados por PTAR “CE”, SACMEX).

4.1.3 Selección del sistema de cogeneración

Una vez que se conoce la cantidad de calor demandada por el proceso, debe seleccionarse el elemento motor (motor alternativo o turbina). Cada tecnología maneja un rango de potencia, tipo de combustible, eficiencia y obtención de un fluido de calentamiento que cumpla con las necesidades del proceso, por lo que, una forma de seleccionar el tipo de tecnología es mediante la relación calor-energía eléctrica (conocido como Q/E), asociado al proceso. La metodología de cálculo se encuentra en el [anexo 5](#).

En la [tabla 4.6](#) se presentan los resultados correspondientes a la relación Q/E.

Tabla 4. 6 Relación Q/E.

SSVD	Q _T (kW)	E (kW)	Q/E
40 %	1 784.3338	2 550	0.6997
45 %	1 750.7321	2 550	0.6865
50 %	1 717.3615	2 550	0.6734
55 %	1 683.6111	2 550	0.6602

Elaboración propia.

En el caso de la PTAR “CE” la energía eléctrica que se demanda es en promedio de 2 550 kW como se muestra en el apartado anterior (4.1.2) y la energía térmica se encuentra en la [tabla 4.5](#). De acuerdo con esta relación y basándose en la [tabla 4.7](#) se selecciona la mejor alternativa para el proceso.

De la [tabla 4.7](#), las mejores alternativas que se ajustan a la relación Q/E son los motores con ignición por compresión y chispa, aunque el ciclo combinado está cerca del Q/E, no sería factible económicamente pensar en un sistema que utiliza dos turbinas (turbina de gas en ciclo combinado) y por el rango de potencia requerido de 2 550 kW solo se ajusta de forma adecuada a los motores. La mejor alternativa es un motor con ignición por compresión con una relación de 0.5:1 obteniéndose vapor de baja presión y agua caliente de temperatura media. En este caso el fluido de calentamiento que se utilizará será agua caliente de temperatura media.

Una vez que se ha seleccionado el elemento motor, es posible estimar la energía eléctrica generada por esta tecnología basándose en la eficiencia eléctrica que es de 35 a 45 %, mediante la [ecuación 4.1](#).

$$\eta_{elec} = \frac{E_{elec}}{E_{comb}} \rightarrow E_{elec} = \eta_{elec} \cdot E_{comb} \quad (4.1)$$

Donde:

η_{elec} : Eficiencia eléctrica.

E_{elec} : Energía eléctrica generada (kW).

E_{comb} : Energía generada por la combustión (kW), se calcula a partir de la masa de biogás y el poder calorífico del mismo ([ecuación 4.2](#)).

$$E_{comb} = m_{biogás} \cdot PC \quad (4.2)$$

Estimando la energía eléctrica generada se selecciona una tecnología existente que se ajuste a lo antes calculado. En este caso se decidió optar por dos motores de 850 kW de la marca GE Power Jenbacher tipo 4 modelo J412. Las características de esta tecnología se muestran en la [figura 4.4](#). De la ficha técnica se obtiene el valor de eficiencia eléctrica “real” de 39.3 % y se recalcula la energía eléctrica generada, considerando que las características del generador se calculan a nivel de mar, se realiza un ajuste para la altura de la Ciudad de México del 90 %, para obtener la energía eléctrica “in situ” ([ecuación 4.3](#)).

$$E_{elecinsitu} = \eta_{aju} \cdot P_{elec} \quad (4.3)$$

El calor disponible se obtiene a partir de la [ecuación 4.4](#) con la eficiencia térmica de la tecnología que es del 45.7 %.

$$Q_{disponible} = \eta_{ter} \cdot E_{comb} \quad (4.4)$$

Y el calor perdido se estima como:

$$Q_{perdido} = E_{comb} - (E_{elec} + Q_{disponible}) \quad (4.5)$$

Tabla 4. 7 Tipos de combustible para la generación de calidad de calor.

Combustible	Accionamiento	Rango de potencia (MWe)	Ratio calor/energía	Eficiencia eléctrica	Eficiencia total	Calidad del calor
Cualquier combustible	Turbina de vapor con extracción (condensación)	1 a 600+	3:1 hasta 8:1	20 a 35 %	Hasta 90%	Vapor a múltiples niveles de presión
Cualquier combustible	Turbina de vapor con extracción (contrapresión)	0.5 a 500+	3:1 hasta 10:1	20 a 35%	Hasta 90%	Vapor a múltiples niveles de presión
GN, BG, GO, N, AL, GLP	Turbina de gas en ciclo combinado	3 a 300+	1:1 hasta 3:1	35 a 55%	70 a 90%	Vapor de media presión Agua caliente de alta temperatura
GN, BG, GO, N, AL, AP, GLP	Turbina de gas en ciclo abierto	0.25 a 80	1.5:1 hasta 5:1	25 a 42%	65 a 90%	Vapor de alta presión Agua caliente de alta temperatura
GN, BG, GO, N, AL, AP	Motores con ignición por compresión	0.2 a 20	0.5:1 hasta 3:1	35 a 45%	65 a 90%	Vapor de baja presión Agua caliente de temperatura media
GN, BG, GO, N, LHO	Motores con ignición por chispa	0.003 a 6	1:1 a 3:1	25 a 43%	70 a 90%	Agua caliente de temperatura media

Simbología: GN: Gas Natural, BG: Biogás, GO, Gasoil, N: Nafta, AL: Aceite Ligero, AP: Aceite Pesado, GLP: Gas Licuado de Petróleo, LHO: Light HeatOil.

Fuente: European Energy Manager.



Características técnicas

Característica	Descripción	Ventajas
Recuperación de calor	Una amplia gama de gases posibles y el aire de combustión se mezclan a baja presión antes de entrar en el turboalimentador	- Máximo rendimiento térmico, incluso con temperaturas de retorno altas y variables
Válvula dosificadora de gas	Válvula dosificadora de gas regulada electrónicamente, con alta precisión de regulación	- Tiempo de reacción muy corto - Ajuste rápido de la relación aire / gas - Posibilidad de regular grandes variaciones en el poder calorífico
Culata con cuatro válvulas	Diseño optimizado para mejorar turbulencias y geometría de flujos mediante los más modernos métodos de cálculos y simulación (CFD)	- Pérdidas minimizadas en el intercambio de cargas - Posición central de las bujías aporta condiciones óptimas de refrigeración y combustión
Biel tipo crack	Aplicando una tecnología de fabricación, probada y demostrada en la industria del automóvil, a nuestros motores estacionarios	- Alta estabilidad y precisión dimensionales - Reducido desgaste del cojinete de biela - Fácil mantenimiento

Datos técnicos

Configuración	V 70°	Dimensiones l x an x al (mm)			
Taladro (mm)	145	Gen-Set	J412	5.400 x 1.800 x 2.200	
Carrera (mm)	185		J416	6.200 x 1.800 x 2.200	
Cilindrada / cilindro (lit)	3,06		J420	7.100 x 1.900 x 2.200	
Velocidad nominal (rpm)	1.800 / 1.200 (60 Hz) 1.500 (50 Hz)	Módulo de cogeneración	J412	6.000 x 1.800 x 2.200	
Velocidad media del pistón (m/s)	7,4 (1.200 rpm) 9,3 (1.500 rpm)		J416	6.700 x 1.800 x 2.200	
Alcance de suministro	Gen-Set, módulo de cogeneración, Gen-Set / módulo de cogeneración en contenido		J420	7.100 x 1.800 x 2.200	
Tipos de gases utilizables	Gas natural, flare-gas, biogás, gas de vertedero, gas de depuradora. Gases especiales (p. ej., grisú, gas de coque, gas de madera, gas de pirolisis)	Contenedor	J412	12.200 x 3.000 x 2.700	
Tipo de motor	J412 J416 J420		J416	12.200 x 3.000 x 2.700	
Nº de cilindros	12 16 20		J420	12.200 x 3.000 x 2.700	
Cilindrada total (lit)	36,7 48,9 61,1	Peso seco (kg)			
		Gen-Set	J412	J416	J420
		Módulo de cogeneración	11.200	13.500	17.200
			11.800	14.100	17.800

Potencias y rendimientos

Biogás	1.500 rpm 50 Hz						1.500 rpm 50 Hz					
	Type	Pel (kW) ¹	ηel (%) ¹	Pth (kW) ²	ηth (%) ²	ηtot (%)	Pel (kW) ¹	ηel (%) ¹	Pth (kW) ²	ηth (%) ²	ηtot (%)	
500 mg/m ³ _N	J412	746	41,8	779	43,6	85,4	850	40,2	956	45,2	85,3	
	J412	901	42,3	912	42,8	85,0						
	J416	999	42,2	1.029	43,4	85,6						
	J416	1.203	42,5	1.214	42,8	85,3						
	J420	1.500	42,4	1.515	42,8	85,2						
250 mg/m ³ _N	J412	889	41,6	918	43,0	84,6	850	39,3	989	45,7	84,9	
	J416	1.191	41,8	1.223	42,9	84,8	1.141	39,5	1.319	45,7	85,2	
	J420	1.487	41,8	1.529	43,0	84,7	1.426	39,5	1.648	45,7	85,2	

Figura 4. 4 Información correspondientes al motor de cogeneración de la marca GE Power (fuente: GE Power, 2016).

De acuerdo con el calor disponible, es posible estimar la cantidad de fluido de calentamiento (agua), conociendo las características de este por medio de la [ecuación 4.6](#). Se consideró que el agua se encuentra a temperatura ambiente y se obtendrá agua caliente a 120 °C.

$$Q_{disponible} = m_A \cdot Cp \cdot \Delta T \rightarrow m_A = \frac{Q_{disponible}}{Cp \cdot \Delta T} \quad (4.6)$$

Los resultados correspondientes a los puntos descritos anteriormente se muestran en la [tabla 4.8](#). La primera columna corresponde a la masa de biogás que se obtiene a partir de la digestión mesofílica, en la 3er y 4ta columna se presentan los resultados de la energía de combustión (E_{comb}) y energía eléctrica (E_{elec}), respectivamente, de acuerdo con la masa de biogás y con respecto a la tecnología utilizada (eficiencia eléctrica del 39.3 %). En la columna correspondiente a $E_{elec\ insitu}$ se muestra la energía eléctrica “real” generada, utilizando el factor de ajuste de 90 %. La 6ta columna ($Q_{disponible}$) representa el valor del calor disponible aportado por el sistema de cogeneración y en la 7ma columna el calor perdido en el sistema ($Q_{perdido}$). Finalmente, en la última columna se presenta la masa de agua disponible para el calentamiento en el proceso en relación con el calor disponible.

Tabla 4. 8 Balance energético alrededor del sistema de cogeneración.

SSVD	$m_{biogás}$ (kg/s)	E_{comb} (kW)	E_{elec} (kW)	$E_{elec\ insitu}$ (kW)	$Q_{disponible}$ (kW)	$Q_{perdido}$ (kW)	m_A (kg/s)
40 %	0.1337	2 967.2292	1 166.1210	1 530	1 356.0237	445.0843	3.1781
45 %	0.1507	3 345.6707	1 314.8485	1 530	1 528.9715	501.8506	3.5835
50 %	0.1679	3 726.133	1 464.3702	1 530	1 702.843	558.9198	3.991
55 %	0.1851	4 108.5126	1 530	1 530	1 779.1603	583.9694	4.1699

Elaboración propia.

Conociendo la cantidad de agua caliente disponible, es posible calcular las temperaturas de salida de este servicio en los intercambiadores de calor en el proceso con la [ecuación 4.7](#), y de esta manera obtener el área de transferencia aproximada requerida para cada intercambiador a partir de la [ecuación 4.8](#).

$$T_{ACf} = T_{ACi} - \frac{Q}{m_A \cdot Cp} \quad (4.7)$$

Donde:

- T_{ACf} : Temperatura de salida del agua (°C).
- T_{ACi} : Temperatura de entrada del agua (°C).
- Q: Calor requerido en el proceso; digestión y pasteurización (kJ/s).
- Cp: Capacidad calorífica del agua (kJ/kg °C)
- m_A : Masa de agua (kg/s).

$$Q = U \cdot A \cdot LMTD_{cc} \rightarrow A = \frac{Q}{U \cdot LMTD_{cc}} \quad (4.8)$$

Donde:

- Q: Calor requerido en el proceso (kJ/s).
- LMTD_{cc}: Temperatura media logarítmica en contracorriente (°C).
- A: Área de transferencia del intercambiador (m²).

U: Coeficiente global de transferencia de calor ($\text{kJ}/\text{m}^2\text{ s }^\circ\text{C}$).

En la [tabla 4.9](#) se presentan los resultados correspondientes.

Tabla 4.9 Resultados del dimensionamiento de los intercambiadores de calor.

SSVD	T_{ACf} ($^\circ\text{C}$)		LMTDcc ($^\circ\text{C}$)		A (m^2)	
	Pasteurización	Digestión	Pasteurización	Digestión	Pasteurización	Digestión
40 %	74.4018	10.3627	32.32239	-	38.5361	-
45 %	82.0384	25.0541	37.3502	17.2409	31.3044	50.9004
50 %	88.1434	36.7989	40.9957	30.2164	26.6570	29.1456
55 %	93.1404	46.4122	43.8029	38.8779	23.1927	22.73019

Elaboración propia.

Una destrucción de SSV de 40 % indica que el biogás generado es insuficiente para las necesidades de calentamiento del proceso de tratamiento de lodos, por lo que se espera en la operación mantener una destrucción de SV del 45 al 55 %, preferentemente en 50 % SSVD, de esta manera se garantiza el buen funcionamiento de los equipos, cubriendo las necesidades de calentamiento y aprovechando todos los recursos.

Con el sistema de cogeneración propuesto, la electricidad generada es de 1 530 kW que serían aprovechados para cubrir las necesidades de energía eléctrica en la planta de tratamiento de lodos y lo restante en la PTAR “CE”, reduciendo así en un 45.84 % la cantidad de energía suministrada por CFE, lo que representaría un ahorro económico en la facturación eléctrica, con lo cual se pudiese recuperar la inversión y mantener el proceso de tratamiento de lodos.

4.2 Análisis económico

Para determinar si la ejecución de un proyecto es conveniente, es necesario llevar a cabo una evaluación de este, donde se deben de identificar, cuantificar y valorar los costos y beneficios asociados al proyecto. En este caso, el proceso a analizar es el de tratamiento de lodos con la obtención de biosólido y biogás, que pueden ser aprovechados provocando un beneficio económico y social.

Se debe cuantificar la inversión del proceso de tratamiento de lodos, así como los costos de operación y mantenimiento asociados al proyecto durante el horizonte de evaluación para mantener en buen funcionamiento la planta.

4.2.1 Inversión

La inversión se define como el monto de los recursos necesarios para ejecutar el proyecto. Para determinar la inversión inicial se consideraron tres rubros: activos fijos y diferidos y capital de trabajo.

Activos fijos

Se consideran como activos fijos a todos los bienes tangibles como: maquinaria, equipo, edificaciones, entre otros, que son de vital importancia para las actividades productivas.

Activos diferidos

Los activos diferidos son aquellos bienes intangibles necesarios para el funcionamiento de la planta como: gastos de ingeniería, instalación y puesta en marcha, capacitaciones, etcétera.

Capital de trabajo

Es el capital adicional con el que se debe de contar para empezar a operar, está compuesto principalmente por la compra de materia prima, mano de obra (empleados) y algunos gastos adicionales.

En la [tabla 4.10](#) se muestra la inversión inicial considerando los tres rubros mencionados anteriormente, siendo de 8 433 827.52 dólares.

Tabla 4. 10 Inversión inicial en activos fijos y diferidos y capital de trabajo.

Concepto	Costo (pesos)
Activos fijos^a	\$ 138,833,121.82
Activos diferidos^b	\$ 29,421,572.02
Capital de trabajo^c	\$ 421,856.56
Total	\$ 168,676,550.40
	\$ 8,433,827.52 US ^d

Elaboración propia. (a) Los costos asociados a este rubro se obtuvieron a partir de proveedores de equipo y obra civil. (b) Se asignó un porcentaje del costo inicial del equipo a cada una de las categorías consideradas: gastos de ingeniería, instalación, puesta en servicio e imprevistos. (c) Se consideró inventarios, salarios y servicios para 1 mes de operación. (d) Paridad cambiaria MXN a USD: \$20.00

4.2.2 Estado de resultados proforma

El análisis del estado de resultados tiene por objetivo calcular los flujos netos de efectivo (FNE), que son el beneficio real de la operación de la planta, restando a los ingresos todos los costos asociados a la misma.

Ingresos

Los ingresos del proceso de tratamiento se consideraron como: 1) el ahorro monetario correspondiente a la disminución en el consumo de energía eléctrica del proceso de tratamiento de agua al implementar el sistema de cogeneración y 2) a la venta del biosólido estable.

El sistema de cogeneración genera 1 530 kW de los cuales aproximadamente 360 kW serán demandados por el proceso de tratamiento de lodos por los equipos eléctricos y lo restante podrá ser utilizado para cubrir la demanda eléctrica de la PTAR “CE” de manera que se pueda reducir la facturación eléctrica. En la [figura 4.5](#) se muestra un esquema con el cual puede apreciarse de mejor manera la distribución de la energía eléctrica.

Si el sistema de cogeneración aporta 10 241 151 kWh por el tiempo de operación (8 760 h/año) y considerando el costo por kWh de 1.8 pesos por consumo eléctrico, el ahorro monetario es de 18,434,072 pesos/año.

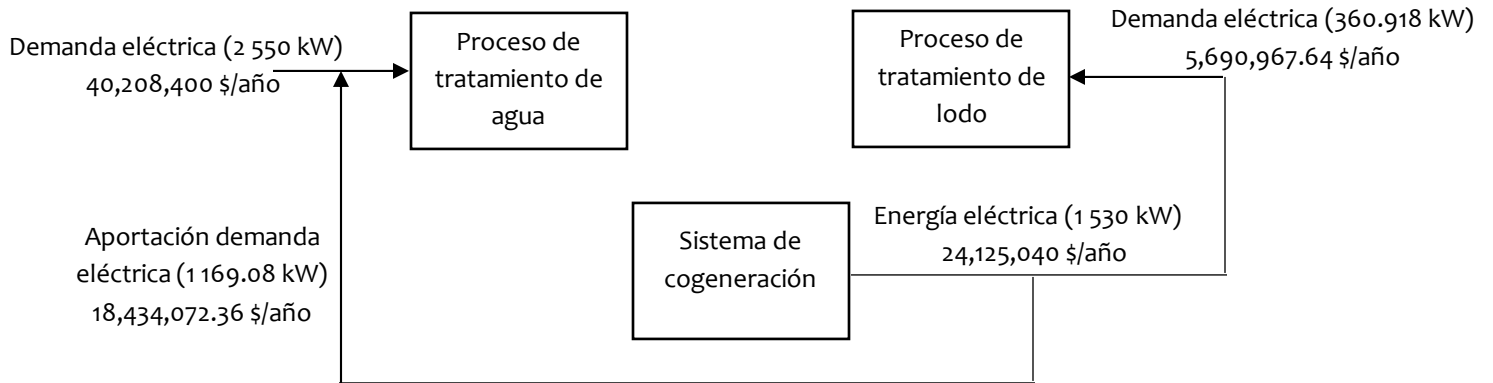


Figura 4. 5 Esquema de la distribución de la energía eléctrica (elaboración propia).

Los lodos estabilizados que se producen son 34 052 TON/año de los cuales se considera que solamente el 80 % serán vendidos a un precio de 178 pesos la tonelada (basado en los gastos operativos del tratamiento de lodos), lo cual representa ingresos por 4,815,659.83 pesos/año.

Egresos

Se consideraron como egresos a todos los gastos asociados con la operación de la planta necesarios para su buen funcionamiento, que son: operación y mantenimiento del sistema de cogeneración y el tratamiento de lodos, insumos, servicios, materia prima y gastos administrativos.

En la [tabla 4.11](#) se presenta el estado de resultados en un horizonte de 25 años, considerando un incremento de 1 % anual de O&M, 1 % al precio de venta del lodo y un 2 % al costo por kWh. La tabla se muestra en tres partes, la primera parte comprende del preoperativo (2018) al año 2026, la segunda parte del año 2027 al 2035 y la tercera parte del 2036 al año 2042. En la última fila (utilidad de operación) de las tablas puede apreciarse el flujo de efectivo correspondiente a cada año, restando a los ingresos los egresos.

4.2.3 Evaluación financiera

Para estimar si la ejecución de un proyecto es factible, se utilizan algunos parámetros económicos, principalmente el valor presente neto (VPN) y la tasa interna de retorno (TIR) los cuales toman el valor del dinero con respecto al tiempo, de esta manera es posible medir la rentabilidad del proyecto.

Valor presente neto (VPN)

El VPN es la suma de los flujos descontados en el presente, restando la inversión inicial, como se muestra en la [ecuación 4.9](#). Los flujos descontados se calculan utilizando una “tasa de descuento” que descuenta el valor del dinero en el futuro a su equivalente en el presente (Baca, 2010). La tasa de descuento propuesta para evaluar el proyecto de tratamiento de lodos es del 10 % de acuerdo con la Secretaria de Hacienda y Crédito Público (SHCP), para proyectos de interés social: tasa social de descuento (TSD).

$$VPN = -Inversión + \frac{\sum FNE}{(1+i)^n} \quad (4.9)$$

De acuerdo con la ecuación anterior, en la [tabla 4.12](#) se presentan los flujos de efectivo descontados y acumulados tomando una tasa de descuento del 10 %, obteniéndose un VPN en el horizonte de evaluación $n=25$ de 18,994,519.57 pesos (949,725.98 US), lo cual significa que el proyecto de tratamiento maximiza la inversión inicial realizada, por lo que se puede aceptar su ejecución.

Tasa interna de retorno (TIR)

La TIR permite conocer el rendimiento real de la inversión realizada utilizando la [ecuación 4.9](#), donde el VPN se iguala a 0, siendo “i” la incógnita. Cuando la TIR es mayor que la tasa mínima fijada se acepta el proyecto. La TIR calculada para el tratamiento de lodos es del 11.3 % (valor calculado por solve).

Tiempo de recuperación de la inversión (TRI)

El TRI es el periodo en el cuál la empresa recupera la inversión realizada en el proyecto. Se utiliza para evaluar la liquidez de un proyecto, ya que se espera que las inversiones realizadas se recuperen en un cierto número de años. Para determinar el TRI se emplea la [ecuación 4.10](#).

$$TRI = UPFAN + \frac{|UFAN|}{FAPS} \quad (4.10)$$

Donde:

UPFAN= Último periodo con flujo acumulado negativo.

UFAN= Valor absoluto del último flujo acumulado negativo.

FAPS= Valor del flujo acumulado en el siguiente periodo.

Siguiendo la [tabla 4.12](#), se tiene:

$$TRI = 19 + \frac{|-827,207.84|}{3,112,116.18} = 19.26 \text{ años}$$

El tiempo en recuperar la inversión sería de aproximadamente 19 años y 3 meses, lo cual es un valor aceptable considerando el enfoque social y normativo del proyecto.

Tabla 4. 11 Estado de resultados pro-forma.

Año	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026
Ahorro EE	\$ 18,434,072.36	\$ 18,802,753.81	\$ 19,178,808.89	\$ 19,562,385.06	\$ 19,953,632.76	\$ 20,352,705.42	\$ 20,759,759.53	\$ 21,174,954.72	\$ 21,598,453.81
Ventas de lodo	\$ 4,815,659.89	\$ 4,863,816.49	\$ 4,912,454.65	\$ 4,961,579.20	\$ 5,011,194.99	\$ 5,061,306.94	\$ 5,111,920.01	\$ 5,163,039.21	\$ 5,214,669.60
Total	\$ 23,249,732.25	\$ 23,666,570.30	\$ 24,091,263.54	\$ 24,523,964.26	\$ 24,964,827.75	\$ 25,414,012.36	\$ 25,871,679.54	\$ 26,337,993.93	\$ 26,813,123.41
Costos fijos y variables									
Materia prima	\$ 720,000.00	\$ 720,000.00	\$ 720,000.00	\$ 720,000.00	\$ 720,000.00	\$ 720,000.00	\$ 720,000.00	\$ 720,000.00	\$ 720,000.00
Servicios	\$ 1,680,000.00	\$ 1,680,000.00	\$ 1,680,000.00	\$ 1,680,000.00	\$ 1,680,000.00	\$ 1,680,000.00	\$ 1,680,000.00	\$ 1,680,000.00	\$ 1,680,000.00
Insumos	\$ 100,000.00	\$ 100,000.00	\$ 100,000.00	\$ 100,000.00	\$ 100,000.00	\$ 100,000.00	\$ 100,000.00	\$ 100,000.00	\$ 100,000.00
O & M	\$ 834,960.69	\$ 843,310.30	\$ 851,743.40	\$ 860,260.84	\$ 868,863.45	\$ 877,552.08	\$ 886,327.60	\$ 895,190.88	\$ 904,142.79
Gastos administrativos	\$ 2,662,278.71	\$ 2,662,278.71	\$ 2,662,278.71	\$ 2,662,278.71	\$ 2,662,278.71	\$ 2,662,278.71	\$ 2,662,278.71	\$ 2,662,278.71	\$ 2,662,278.71
Total	\$ 5,997,239.40	\$ 6,005,589.01	\$ 6,014,022.11	\$ 6,022,539.55	\$ 6,031,142.16	\$ 6,039,830.79	\$ 6,048,606.31	\$ 6,057,469.59	\$ 6,066,421.50
Utilidades									
Utilidad de operación	\$ 17,252,492.85	\$ 17,660,981.29	\$ 18,077,241.42	\$ 18,501,424.71	\$ 18,933,685.60	\$ 19,374,181.57	\$ 19,823,073.23	\$ 20,280,524.34	\$ 20,746,701.92

Año	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035
Ahorro EE	\$22,030,422.89	\$22,471,031.35	\$22,920,451.97	\$23,378,861.01	\$23,846,438.23	\$24,323,367.00	\$24,809,834.34	\$25,306,031.02	\$25,812,151.65
Ventas de lodo	\$5,266,816.30	\$5,319,484.46	\$5,372,679.31	\$5,426,406.10	\$5,480,670.16	\$5,535,476.86	\$5,590,831.63	\$5,646,739.95	\$5,703,207.35
Total	\$27,297,239.19	\$27,790,515.81	\$28,293,131.28	\$28,805,267.11	\$29,327,108.39	\$29,858,843.86	\$30,400,665.97	\$30,952,770.97	\$31,515,358.99
Costos fijos y variables									
Materia prima	\$ 720,000.00	\$ 720,000.00	\$ 720,000.00	\$ 720,000.00	\$ 720,000.00	\$ 720,000.00	\$ 720,000.00	\$ 720,000.00	\$ 720,000.00
Servicios	\$ 1,680,000.00	\$ 1,680,000.00	\$ 1,680,000.00	\$ 1,680,000.00	\$ 1,680,000.00	\$ 1,680,000.00	\$ 1,680,000.00	\$ 1,680,000.00	\$ 1,680,000.00
Insumos	\$ 100,000.00	\$ 100,000.00	\$ 100,000.00	\$ 100,000.00	\$ 100,000.00	\$ 100,000.00	\$ 100,000.00	\$ 100,000.00	\$ 100,000.00
O & M	\$913,184.21	\$922,316.06	\$931,539.22	\$940,854.61	\$950,263.15	\$959,765.79	\$969,363.44	\$979,057.08	\$988,847.65
Gastos administrativos	\$ 2,662,278.71	\$ 2,662,278.71	\$ 2,662,278.71	\$ 2,662,278.71	\$ 2,662,278.71	\$ 2,662,278.71	\$ 2,662,278.71	\$ 2,662,278.71	\$ 2,662,278.71
Total	\$6,075,462.92	\$6,084,594.77	\$6,093,817.93	\$6,103,133.32	\$6,112,541.86	\$6,122,044.50	\$6,131,642.15	\$6,141,335.79	\$6,151,126.36
Utilidades									
Utilidad de operación	\$21,221,776.26	\$21,705,921.04	\$22,199,313.35	\$22,702,133.79	\$23,214,566.53	\$23,736,799.36	\$24,269,023.81	\$24,811,435.18	\$25,364,232.63

Año	2036	2037	2038	2039	2040	2041	2042
Ahorro EE	\$26,328,394.68	\$26,854,962.57	\$27,392,061.82	\$27,939,903.06	\$28,498,701.12	\$29,068,675.14	\$29,650,048.65
Ventas de lodo	\$5,760,239.42	\$5,817,841.81	\$5,876,020.23	\$5,934,780.43	\$5,994,128.24	\$6,054,069.52	\$6,114,610.22
Total	\$32,088,634.10	\$32,672,804.38	\$33,268,082.05	\$33,874,683.49	\$34,492,829.36	\$35,122,744.66	\$35,764,658.86
Costos fijos y variables							
Materia prima	\$ 720,000.00	\$ 720,000.00	\$ 720,000.00	\$ 720,000.00	\$ 720,000.00	\$ 720,000.00	\$ 720,000.00
Servicios	\$ 1,680,000.00	\$ 1,680,000.00	\$ 1,680,000.00	\$ 1,680,000.00	\$ 1,680,000.00	\$ 1,680,000.00	\$ 1,680,000.00
Insumos	\$ 100,000.00	\$ 100,000.00	\$ 100,000.00	\$ 100,000.00	\$ 100,000.00	\$ 100,000.00	\$ 100,000.00
O & M	\$998,736.13	\$1,008,723.49	\$1,018,810.72	\$1,028,998.83	\$1,039,288.82	\$1,049,681.71	\$1,060,178.52
Gastos administrativos	\$ 2,662,278.71	\$ 2,662,278.71	\$ 2,662,278.71	\$ 2,662,278.71	\$ 2,662,278.71	\$ 2,662,278.71	\$ 2,662,278.71
Total	\$6,161,014.84	\$6,171,002.20	\$6,181,089.43	\$6,191,277.54	\$6,201,567.53	\$6,211,960.42	\$6,222,457.23
Utilidades							
Utilidad de operación	\$25,927,619.26	\$26,501,802.19	\$27,086,992.62	\$27,683,405.95	\$28,291,261.83	\$28,910,784.25	\$29,542,201.63

Elaboración propia.

Tabla 4. 12 Flujos de efectivo descontados y acumulados para la obtención del VPN.

Año	n	Flujo de efectivo	Flujo de efectivo descontado	Flujo de efectivo acumulado
Pre	0	-\$ 168,676,550.40	-\$ 168,676,550.40	-\$ 168,676,550.40
2018	1	\$ 17,252,492.85	\$ 15,684,084.41	-\$ 152,992,465.99
2019	2	\$ 17,660,981.29	\$ 14,595,852.30	-\$ 138,396,613.69
2020	3	\$ 18,077,241.42	\$ 13,581,699.04	-\$ 124,814,914.65
2021	4	\$ 18,501,424.71	\$ 12,636,722.02	-\$ 112,178,192.63
2022	5	\$ 18,933,685.60	\$ 11,756,329.11	-\$ 100,421,863.51
2023	6	\$ 19,374,181.57	\$ 10,936,220.41	-\$ 89,485,643.10
2024	7	\$ 19,823,073.23	\$ 10,172,370.95	-\$ 79,313,272.15
2025	8	\$ 20,280,524.34	\$ 9,461,014.28	-\$ 69,852,257.87
2026	9	\$ 20,746,701.92	\$ 8,798,626.87	-\$ 61,053,630.99
2027	10	\$ 21,221,776.26	\$ 8,181,913.43	-\$ 52,871,717.57
2028	11	\$ 21,705,921.04	\$ 7,607,792.91	-\$ 45,263,924.66
2029	12	\$ 22,199,313.35	\$ 7,073,385.37	-\$ 38,190,539.29
2030	13	\$ 22,702,133.79	\$ 6,575,999.50	-\$ 31,614,539.79
2031	14	\$ 23,214,566.53	\$ 6,113,120.92	-\$ 25,501,418.87
2032	15	\$ 23,736,799.36	\$ 5,682,401.05	-\$ 19,819,017.82
2033	16	\$ 24,269,023.81	\$ 5,281,646.68	-\$ 14,537,371.14
2034	17	\$ 24,811,435.18	\$ 4,908,810.18	-\$ 9,628,560.96
2035	18	\$ 25,364,232.63	\$ 4,561,980.19	-\$ 5,066,580.77
2036	19	\$ 25,927,619.26	\$ 4,239,372.93	-\$ 827,207.84
2037	20	\$ 26,501,802.19	\$ 3,939,324.03	\$ 3,112,116.18
2038	21	\$ 27,086,992.62	\$ 3,660,280.78	\$ 6,772,396.96
2039	22	\$ 27,683,405.95	\$ 3,400,794.96	\$ 10,173,191.92
2040	23	\$ 28,291,261.83	\$ 3,159,516.00	\$ 13,332,707.92
2041	24	\$ 28,910,784.25	\$ 2,935,184.66	\$ 16,267,892.58
2042	25	\$ 29,542,201.63	\$ 2,726,626.99	\$ 18,994,519.57

Elaboración propia.

4.2.4 Análisis de sensibilidad

Es un procedimiento por medio del cual se determina cuanto se afecta a el VPN, la TIR y el TRI ante cambios en determinadas variables del proyecto. En el caso del tratamiento de lodos se proponen tres escenarios: precio de la energía eléctrica, venta de lodo y generación eléctrica.

Precio de la energía eléctrica

Se propuso la parametrización del precio por kWh de -10 % a 10 % en intervalos de 2 %, obteniéndose así los resultados mostrados en la [gráfica 4.2](#). La disminución en el precio de energía eléctrica afectaría la factibilidad del proyecto al no maximizar las ganancias de acuerdo con los valores de VPN negativos, sin embargo, este es un escenario poco probable, ya que el precio de energía eléctrica ha disminuido en muy pocas ocasiones a lo largo de la historia, por lo regular el precio siempre va al alza y en este caso, es mucho más viable la ejecución del proyecto,

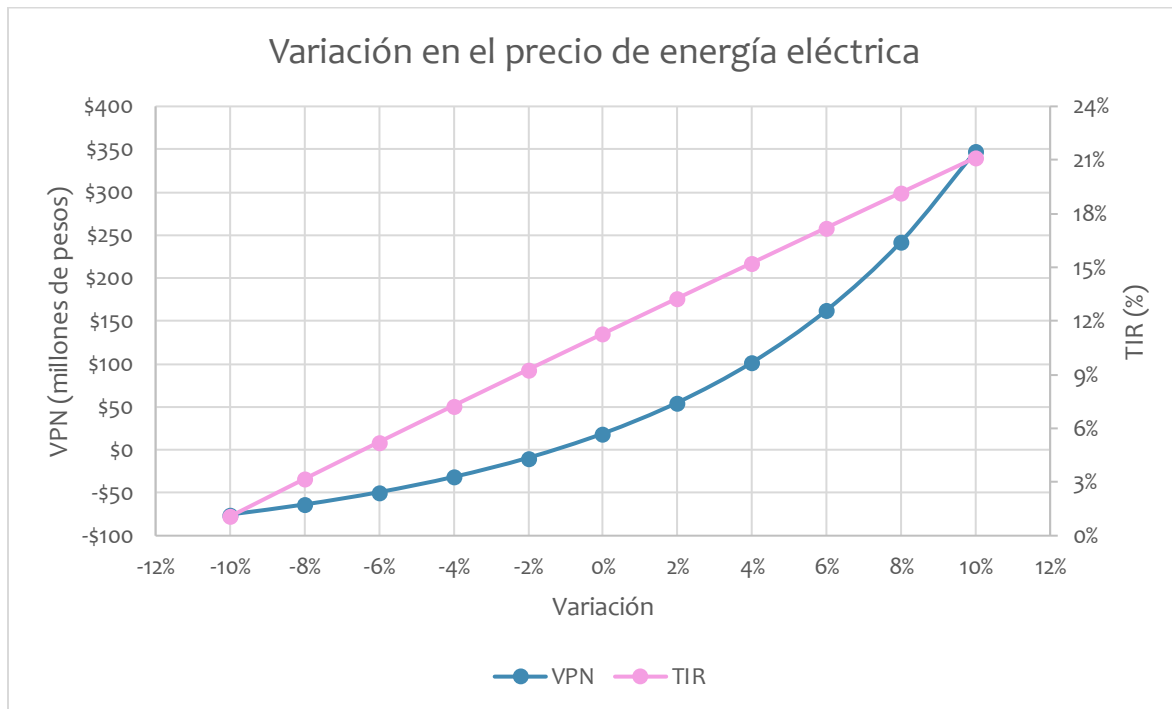
ya que se obtiene un VPN mayor a 50,000,000.00 de pesos. Lo mismo ocurre con la TIR, pues se mantiene por encima de lo establecido de 10 %. En cuanto al TRI se disminuye aprox. a 10 años con 9 meses.

Venta de lodo

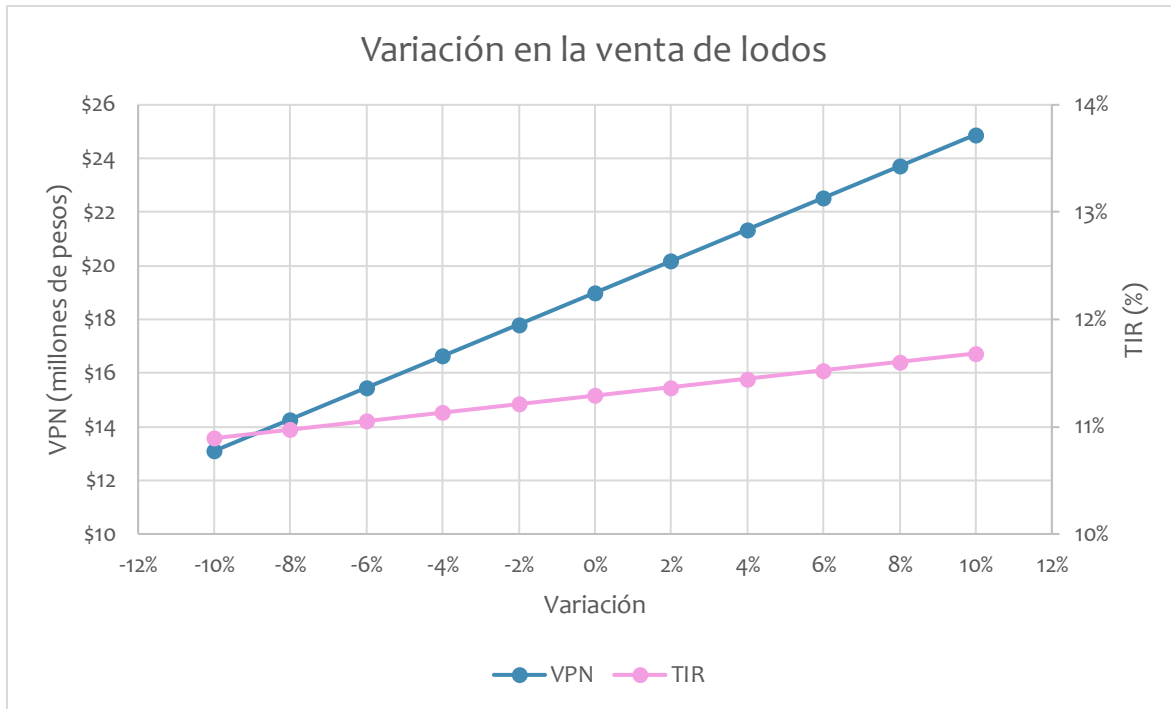
Para el análisis económico se propuso la venta del 80 % de lodos, en el segundo escenario del análisis de sensibilidad se consideró la variación de la venta del 70 % al 90 % en intervalos de 2 %, de manera que se obtuvieron los resultados mostrados en la [gráfica 4.3](#). Tanto el aumento como la disminución en la venta de lodo no afecta de manera significativa las ganancias del proyecto, ya que la venta de lodo no representa una ganancia muy grande en el estado de resultados, de manera que el VPN es positivo y la TIR se mantiene por encima de lo establecido, el TRI pasa de 19 años y 3 meses a 17 años y 11 meses en el incremento a 90 % de ventas, y de 19 años y 3 meses a 21 años y 11 meses en el descenso de ventas a 70 %.

Generación de Energía eléctrica

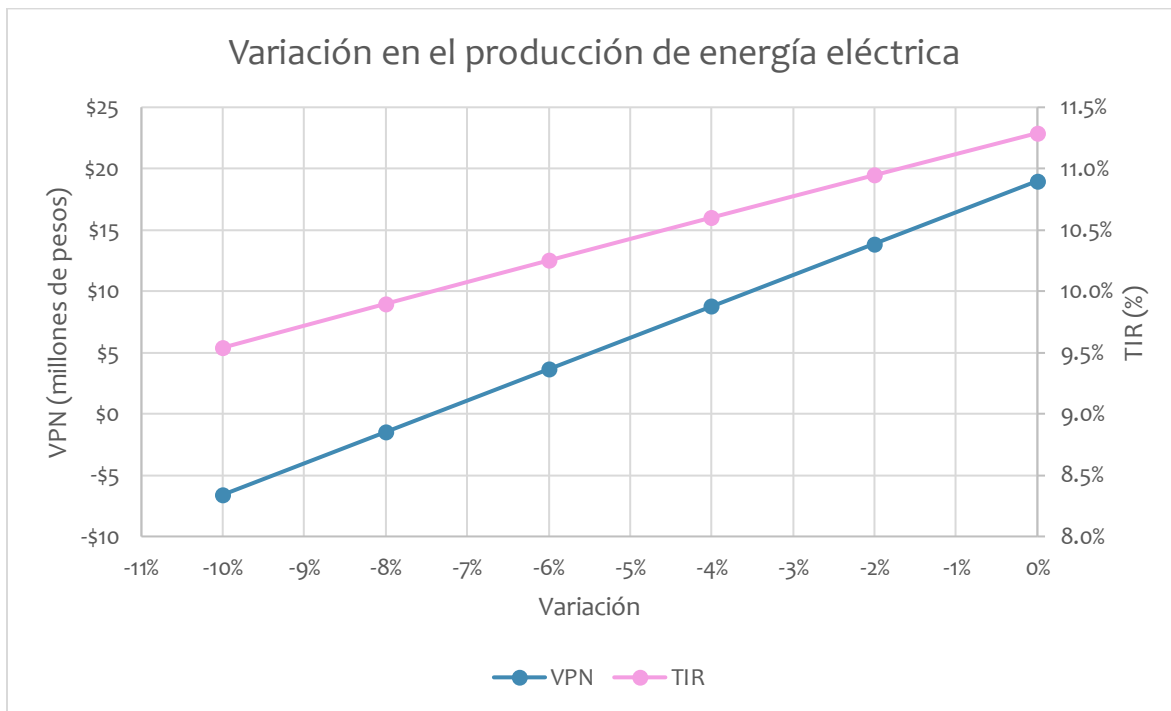
En el tercer escenario se propone la disminución en la producción de energía eléctrica, ligada a una baja en la generación de biogás que a su vez está asociada con la cantidad de lodos producidos en la PTAR. Se consideró únicamente un descenso en la producción, debido a que el sistema de cogeneración solamente alcanza un máximo de 1 530 kW. La disminución es hasta el 10 % en intervalos de 2 %, los resultados obtenidos se muestran en la [gráfica 4.4](#). Con una disminución en la producción de energía hasta un 6 % todavía se obtienen ganancias, del 8 % al 10 % la factibilidad del proyecto es cuestionable, ya que el VPN es negativo y la TIR está por debajo de lo establecido. El TRI pasa de 19 años y 3 meses a 24 años y 4 meses con un descenso del 6 %.



Gráfica 4. 2 VPN y TIR obtenidas con la variación en el precio de energía eléctrica (elaboración propia).



Gráfica 4. 3 VPN y TIR obtenidas con la variación de la venta de lodo (elaboración propia).



Gráfica 4. 4 VPN y TIR obtenidas con la variación en la producción de energía eléctrica (elaboración propia).

Disposición final de lodo



Introducción

El tratamiento de los lodos genera dos productos de gran valor, el biogás que se propone utilizarlo para generar energía eléctrica y calor y los biosólidos o lodos estabilizados, que dependiendo de su clasificación de acuerdo con la NOM-004 se le puede asignar un uso provechoso. Los lodos estabilizados (biosólidos) pueden ser dispuestos de diversas maneras en función de la cantidad y calidad del lodo generado, la normatividad aplicable en cada país, así como las opciones para la disposición y sus características.

En los capítulos anteriores, se habló de la cantidad y calidad del lodo generado en la PTAR “Cerro de la Estrella” (“CE”), así como el proceso de tratamiento para la obtención de un biosólido que cumpla con la normatividad aplicable (NOM-004), sin embargo, es necesario considerar las opciones para la disposición de manera que se lleve a cabo sin riesgos a la salud y al ambiente.

5.1 Opciones para la disposición de lodos

Los biosólidos se pueden utilizar en terrenos agrícolas, bosques, campos de pastoreo o en terrenos que necesiten recuperación sin riesgos a la salud y al ambiente siempre y cuando se ajusten a la normatividad.

La aplicación de lodos al suelo consiste en extender o esparcir lodos sobre un suelo con el fin de aprovechar su contenido de materia orgánica y nutrientes. En los últimos años, la aplicación del lodo al suelo se ha realizado con éxito debido a sus altas propiedades benéficas. Dentro de las principales características de los biosólidos se enlistan:

- 1) Reducen el potencial de degradación y recuperan la capacidad productiva de los suelos.
- 2) Reducen el consumo de fertilizantes químicos.
- 3) Incrementan el rendimiento de los cultivos.
- 4) Aumentan la retención de agua y facilitan el transporte de nutrientes.
- 5) El crecimiento de las plantas es más vigoroso y disminuye el daño causado por insectos.

5.1.1 Usos agrícolas

El uso de lodo en la agricultura es como fuente de nutrientes, fertilizantes y/o como enmienda del suelo para mejorar la producción de cultivos.

La utilización del lodo en zonas agrícolas supone la aplicación de “tasas agronómicas” que se define como la tasa anual a la cual el nitrógeno o fósforo aportado por el lodo no exceda los requerimientos de estos por tipo de cosecha, es decir que la tasa de aplicación está limitada por la cantidad de nutrientes requeridos por el cultivo.

Ventajas

La principal razón del uso de lodos en la agricultura es debido a sus macronutrientes (nitrógeno y fósforo) y cantidades significativas de micronutrientes, tales como: boro, manganeso, cobre, molibdeno y zinc. La cantidad de estos nutrientes no es la misma que la de una formulación de un fertilizante, sin embargo, la mayoría de los cultivos responden favorablemente a los

nutrientes presentes en el lodo, si es necesario la aplicación de un fertilizante adicional, la cantidad aplicada se reduce significativamente.

De igual manera, la aplicación de lodos a tasas mayores que las agronómicas proporciona un acondicionamiento del suelo. Según el tipo de suelo y textura, se puede aumentar la cantidad de espacio poroso disponible para el crecimiento de raíces y la entrada de agua y aire, así como aumentar la capacidad de retención del agua y proporcionar condiciones idóneas para el intercambio de nutrientes.

En muchos de los casos, la disposición agrícola es menos costosa que otras alternativas, además la compra de terrenos no es necesaria, y al promover la aplicación del lodo como recurso (manteniendo la producción de cultivos) puede suponer ahorros monetarios para las partes involucradas.

La aplicación de lodos se realiza mediante maquinaria convencional utilizada en la agricultura, por lo que no representa mayores costos.

En la [figura 5.1](#) se representa la aplicación de lodos en la agricultura a diferentes tasas de aplicación, observándose un mejor rendimiento y producción de la cosecha en la aplicación de lodos con respecto a no aplicarlos.



Figura 5. 1 Rendimiento de cultivos en la agricultura a diferentes tasas de aplicación (fuente: Mejía, E.).

5.1.2 Usos forestales

El lodo se utiliza en los bosques para mejorar la productividad forestal, este puede aplicarse en terrenos despejados antes de la plantación de árboles, en plantaciones jóvenes (entre 3 y 10 años) y en bosques establecidos.

Ventajas

El lodo contiene macro y micronutrientes esenciales que a menudo faltan en los suelos forestales. Existen diversos proyectos que han demostrado un crecimiento acelerado de los árboles tanto en bosques recién plantados hasta los ya establecidos. De igual manera aumenta la permeabilidad del suelo y la capacidad de retención del agua.

Dado que los árboles no son un cultivo para la alimentación, hay menos preocupaciones relacionadas con la salud pública con la incorporación de componentes de lodo. Además, algunas especies de árboles son muy tolerantes a los constituyentes en los lodos (por ejemplo, los metales) que pueden ser dañinos (fitotóxicos) para ciertos cultivos agrícolas y a diferencia del uso agrícola, la programación de las aplicaciones de lodo no es tan compleja, pues no se deben de considerar ciclos de siembra y cosecha.

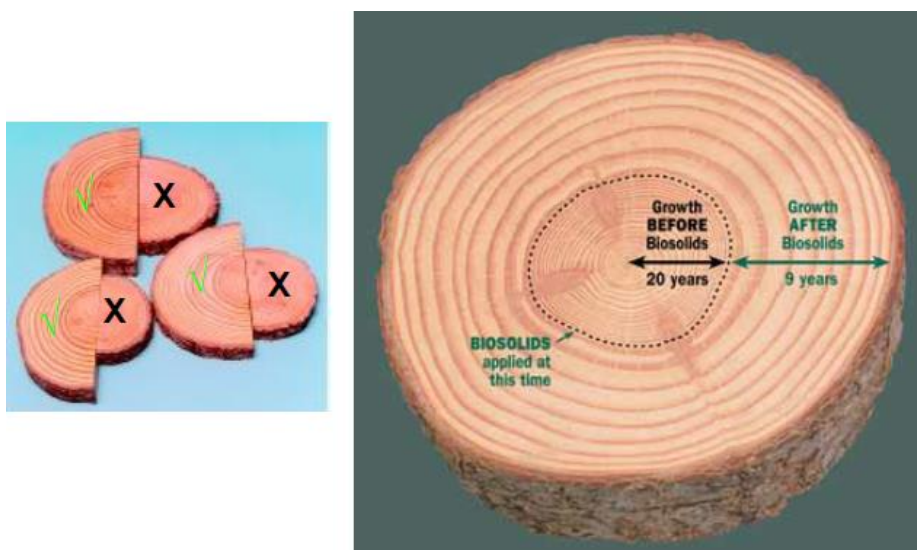


Figura 5. 2 Crecimiento de árboles con la aplicación de lodos (fuente: Barrios, J., 2009).

5.1.3 Recuperación de terrenos

Los lodos se aplican a los terrenos alterados o marginales, con el propósito de la revegetación y recuperación del sitio.

Existen muchas tierras que son incapaces de tener vegetación por las alteraciones hechas por diversas actividades, esta incapacidad es causada principalmente por la falta de nutrientes y materia orgánica, además de las características del suelo, esta falta puede cubrirse mediante la aplicación de lodo para minimizar la erosión y facilitar la revegetación y en algunos casos, las tierras recuperadas pueden utilizarse para producción agrícola, aplicando tasas agronómicas.

Ventajas

Existe un doble beneficio al aplicar los lodos en terrenos altamente alterados, 1) la disposición de los lodos y 2) la recuperación de áreas antiestéticas que en su mayoría son inútiles para llevar a cabo otras actividades.

La característica más importante del lodo es la cantidad de materia orgánica que los hacen adecuados para recuperar y mejorar los terrenos alterados a través de mejorar las propiedades físicas del suelo, incrementando su capacidad de retención de agua y el intercambio catiónico, además aporta nutrientes a las plantas y amortiguar el pH.

La aplicación reduce el potencial de escurrimientos, evitando el arrastre de componentes dañinos que pudiesen existir en el suelo. La cantidad de lodo aplicada es mucho mayor que para el uso agrícola.



Figura 5. 3 Lodos utilizados como mejoradores de suelo, antes y después de la aplicación (fuente: Barrios, J., 2009).

5.1.4 Terrenos destinados a la evacuación del lodo

Los terrenos destinados para la evacuación del lodo tienen por objetivo principal la eliminación de los lodos. La tasa de aplicación al suelo en este tipo es más alta que en zonas forestales y agrícolas y si se llega a generar vegetación es secundario.

Ventajas

Se destinan a altas tasas anuales durante muchos años requiriendo menos área que las opciones anteriores, por lo que es fácil encontrar un sitio para la disposición reduciendo costos por transporte.

La calidad de lodo es menos restrictiva con esta opción, los lodos que no tienen una muy buena calidad pueden ser dispuestos de esta manera.

Se tiene un mayor control de las tasas de aplicación y procedimientos, así como la programación, y modificaciones al terreno para una fácil disposición.

5.2 Limitaciones para la aplicación de lodos

Una limitación para las opciones de disposición de lodos es que estos pueden contener componentes que son potencialmente dañinos para las aguas superficiales y subterráneas y causar daños a la salud, por lo que para evitar este tipo de problemas la selección del sitio, diseño y la gestión de aplicación requiere especial atención.

Las características de los lodos pueden afectar su potencial como mejoradores de suelos y al diseño para su aplicación, estas características son: el contenido de [materia orgánica](#), [patógenos](#), [nutrientes](#) y [metales](#).

Contenido orgánico y patógenos

La materia orgánica degradable contenida en los lodos sin estabilizar ocasiona problemas de olores y la atracción de vectores en los lugares de aplicación. Los patógenos se concentran en el lodo y pueden propagar enfermedades al contacto con el hombre. Para evitar esta problemática es necesario reducir el contenido de materia orgánica y patógenos antes de ser aplicados al suelo según lo exigido por la NOM-004 mencionada en el [capítulo 2](#).

Nutrientes

Los principales nutrientes: nitrógeno, fósforo y potasio son consumidos por las plantas una vez que se aplican al suelo, sin embargo, un contenido excesivo causa problemas en las plantas y al medio ambiente. El exceso de nitrógeno puede ocasionar problemas en las aguas subterráneas, por lo que es un parámetro muy sensible a la hora de determinar la tasa de aplicación del lodo.

Metales

Los lodos contienen trazas de metales que quedan atrapados en el suelo y crean riesgos tóxicos para las plantas, animales y humanos. El cadmio es el metal al que más atención se debe de prestar, ya que su acumulación en las plantas resulta tóxico para animales y humanos.

5.3 Evaluación de sitio para la disposición de lodos

La aplicación de lodo al suelo está en función de un sitio adecuado, como terrenos de cultivo, bosques, etc. Las características del sitio influyen en la selección final del mismo y en la efectividad de la aplicación, así como el área requerida para aplicar los lodos al suelo.

5.3.1 Características físicas de los sitios para disposición

Las características del lodo se utilizan para determinar las tasas de aplicación adecuadas y la superficie de terreno necesaria de manera que sean eficazmente dispuestos.

La determinación final de la superficie del terreno se debe basar en las tasas de aplicación y se debe tomar en cuenta la superficie ocupada por zonas de amortiguación, que son espacios entre los límites donde se aplicó el lodo hasta otra zona. Las características que merecen atención son: la [permeabilidad del suelo y drenaje](#), la [profundidad hasta el nivel freático](#), la [topografía y la cercanía a zonas críticas](#). En la [tabla 5.1](#) se resumen los requisitos típicos a evaluar para idoneidad del suelo.

Tabla 5.1 Limitaciones para la aplicación de lodo basado en diferentes características del suelo.

Características del suelo que afectan al uso	Grado de limitación		
	Ligero	Moderado	importante
Pendiente	<6 %	6-12 %	>12 %
Profundidad a nivel freático	<1.2 m	0.6-1.2 m	<0.6 m
Inundación y encharcamiento	Ninguna	Ninguna	Ocasional a frecuente

Profundidad hasta un estrato rocoso	<1.2 m	0.6-1.2 m	<0.6 m
Permeabilidad del estrato más restrictivo (por encima de una profundidad de 1 m)	2.5-7.5 mm/h	7.5-25 mm/h 0.75-2.5 mm/h	<0.75 mm/h >25 mm/h
Capacidad de asimilación de agua disponible	>25 mm/h	12.5-25 mm/h	<12.5 mm/h

Fuente: Metcalf & Eddy, 1995.

Permeabilidad

Los suelos más apropiados para la aplicación son aquellos: de permeabilidades bajas; 0.5 a 1.5 cm/h, bien drenados, suelos alcalinos o neutros (pH>6.5) y terrenos profundos de textura fina que permitan gran capacidad de almacenamiento de la humedad y nutrientes (Metcalf & Eddy, 1995).

Profundidad al nivel freático.

Para que la aplicación del lodo no afecte las aguas subterráneas, es necesario establecer una profundidad mínima aceptable hasta el nivel freático, conocer la calidad del agua y tipo de aplicación de lodo. Cuanto mayor sea la profundidad es más aconsejable la selección de un sitio. En la [tabla 5.2](#) se muestran algunas profundidades típicas para diferentes alternativas de aplicación.

Tabla 5.2 Distancia mínima al nivel freático para la disposición de lodos.

Tipo de disposición	Acuífero de agua potable (m)	Acuífero libre (m)
Agrícola	3	1.5
Forestal	6	2
Terreno muy urbanizado	3	1.5
Terrenos destinados a la evacuación de lodo	>3	1.5

Fuente: Metcalf & Eddy, 1995.

Topografía y proximidad a zonas críticas

Para proteger las aguas superficiales y zonas aledañas de la contaminación que pudiese ocasionar la aplicación de los lodos al suelo se tienen varias recomendaciones relacionados con la pendiente del sitio y una distancia de amortiguación a zonas específicas, tales como: [urbanizaciones](#), [viviendas](#), [pozos de agua](#) y [cuerpos de agua](#). En la [tabla 5.3](#) se presentan las limitaciones de aplicación del lodo con respecto a las pendientes del terreno.

Tabla 5.3 Limitaciones de pendiente típicas para la aplicación de lodo al suelo.

Pendiente (%)	Comentarios
0-3	Ideal; sin problemas de escorrentía o erosión de lodos líquidos ni deshidratados.
3-6	Aceptable; escaso riesgo de erosión; la aplicación superficial tanto de lodos líquidos como deshidratados es aceptable.
6-12	En general, será necesario inyectar el lodo líquido. Excepciones: estanques sin posibilidad de drenaje y/o con fuertes medidas para evitar la escorrentía; la aplicación de lodos deshidratados suele ser aceptable.
12-15	No se debe aplicar lodo líquido a no ser que se adopten fuertes medidas de prevención de la escorrentía. La aplicación de lodos deshidratados es aceptable, pero se recomienda emplear técnicas de incorporación inmediata al suelo.
>15	Solo son aptas en terrenos de elevada permeabilidad en los que la longitud de la pendiente sea corta, y en los que la zona en fuerte pendiente solo represente una pequeña parte de la longitud total de la aplicación.

Fuente: Metcalf & Eddy, 1995

Aguas superficiales

La zona de amortiguamiento tiene dos propósitos: 1) Provee un factor de seguridad contra errores durante la aplicación y 2) provee de un tratamiento y filtrado y/o escurrimiento del lodo que ha sido aplicado. El tipo de suelo del área amortiguadora es un factor determinante para el tamaño apropiado, así el tamaño del área amortiguadora depende del método de aplicación del lodo, del agua superficial que está siendo protegida y las condiciones del suelo superficial. En la [tabla 5.4](#) se muestran los tamaños de las zonas amortiguadoras.

Tabla 5.4 Consideraciones requeridas por la zona amortiguadora para aguas superficiales.

Método de aplicación/ condiciones	Tipo de cuerpo de agua			
	Grande con flujo continuo	Pequeño tributario	Effímero	Zanja
Aplicación superficial (suelo sin perturbar)	6 096 m	3 048 m	1 524 m	762 m
Aplicación superficial (suelo perturbado)	6 096 m	6 096 m	3 048 m	1 524 m
Lodo inyectado	3 048 m	3 048 m	1 524 m	762 m

Fuente: MAPAS TDL, 2015.

Urbanizaciones y viviendas

Se debe prohibir la aplicación de lodo que no ha sido tratado por un proceso de reducción adicional de patógenos a 90 m de áreas utilizadas para el público, mientras que el lodo clasificado como clase A que ha sido tratado no requiere zona amortiguadora o control de acceso.

Pozos de agua

Con el fin de proveer un margen de seguridad para los pozos que abastecen de agua a zonas urbanas y agrícolas, se debe considerar una distancia mínima del sitio de aplicación al pozo más cercano de 90 a 460 m. En la [tabla 5.5](#) se presentan las distancias recomendadas del sitio de aplicación al tipo de zona crítica.

Tabla 5.5 Distancias sugeridas para las áreas de aplicación de lodos.

Zona Crítica	Distancia desde la zona crítica al sitio de aplicación				
	15 a 90 m		90 a 460 m		>460 m
	Inyección ^a	Superficie ^b	Inyección	Superficie	Inyección y superficie
Zonas residenciales	No	No	Sí	No	Sí
Viviendas habitadas	Sí	No	Sí	Sí	Sí
Estanques y lagos	Sí	No	Sí	Sí	Sí
Muelles	No	No	Sí	Sí	Sí
Nivel alto de agua de ríos y arroyos	Sí	No	Sí	Sí	Sí
Pozos de agua	No	No	Sí	Sí	Sí
Carreteras	Sí	No	Sí	Sí	Sí

Fuente: EPA, 1983. (a) Inyección de lodo líquido, (b) aplicación de lodo deshidratado.

5.3.2 Tasas de aplicación del lodo

Una vez que se conocen las características del suelo de los posibles sitios para la disposición, es necesario estimar el área de terreno requerida para cada una de las opciones de reutilización del lodo. En la [tabla 5.6](#) se encuentran algunas tasas de aplicación de lodos por tipo de disposición para una estimación previa.

Tabla 5.6 Tasas de aplicación de lodo para las diferentes opciones de disposición.

Tipo de disposición	Periodo de aplicación	Tasa de aplicación (ton/ha)	
		Intervalo	Valor típico
Agrícola	Anual	2.25-67.5	11.25
Forestal	Un único periodo de aplicación, o aplicación cada 3-5 años	9-225	45
Recuperación de suelo	Única aplicación	6.75-450	112.5
Terrenos destinados a la evacuación de lodo	Anual	225-900	337.5

Fuente: Metcalf & Eddy, 1995.

Las tasas de aplicación se basan en los límites de cargas contaminantes presentes en el lodo, o por las cargas de nutrientes necesarias para satisfacer la demanda de la vegetación, siendo el nitrógeno el nutriente de mayor importancia.

Tasas de aplicación basadas en cargas contaminantes

Los contaminantes por tomar en cuenta son los establecido en la NOM-004. Para la aplicación del lodo al suelo es necesario que se establezcan límites máximos permitidos de concentraciones anuales en el terreno.

Cuando los lodos contienen cantidades importantes de contaminantes, los límites dependen de un único constituyente, principalmente el cadmio. La [ecuación 5.1](#) se utiliza para determinar la cantidad de lodo acumulada aplicables en el suelo en base a un elemento contaminante.

$$R_m = \frac{L_m}{C_m (1\ 000)} \quad (5.1)$$

Donde:

R_m : Cantidad máxima de lodo que se puede aplicar a lo largo de la vida útil del sitio, ton secas/ha.

L_m : Cantidad máxima de contaminante que se puede aplicar a lo largo de la vida útil del sitio según normatividad aplicable, kg contaminante/ ha.

C_m : Contenido porcentual de contaminante en el lodo, expresado en tanto por uno (ej. Lodo de 50 ppm; $C_m = 0.00005$).

Tasas de aplicación basadas en las cargas de nutrientes

En la mayoría de los casos, la tasa de aplicación de lodo es función del nitrógeno que necesita la vegetación, sin embargo, en algunos casos se toma en cuenta las necesidades de fósforo.

El cálculo de las tasas de aplicación de lodo basados en los límites de nitrógeno normalmente es complejo, ya que gran parte de este está en forma orgánica que significa un proceso de mineralización lento. La cantidad anual de nitrógeno aportados por la aplicación del lodo se puede estimar utilizando la [ecuación 5.2](#).

$$N = (1\ 000)[NO_3 + k_v(NH_4) + f_u(N_0)] \quad (5.2)$$

Donde:

N : Cantidad de nitrógeno contenido en el lodo disponible anualmente para el consumo de plantas, kg nitrógeno/ton sólidos secos·año.

NO_3 : Porcentaje de nitratos presentes en el lodo.

k_v : Factor de volatilización del amoníaco; 0.5 en sistemas de aplicación de lodo líquido por riego o aspersión, 1.0 para lodo líquido incorporado o lodo deshidratado.

NH_4 : Porcentaje de amoníaco presente en el lodo.

f_u : Factor de mineralización del primer año ([tabla 5.7](#)).

N_0 : Porcentaje de nitrógeno orgánico presente en el lodo.

El nitrógeno disponible después de la mineralización del nitrógeno orgánico se calcula mediante la [ecuación 5.3](#).

$$N_{ap} = 1\,000 \sum f_2(N_0)_2 + f_3(N_0)_3 + \dots f_n(N_0)_n \tag{5.3}$$

Donde:

N_{ap} : Nitrógeno disponible para el consumo de las plantas resultante de la mineralización del nitrógeno orgánico, kg nitrógeno/ton sólidos secos·año

$(N_0)_u$: Fracción de nitrógeno orgánico presente en el lodo aplicado el n-ésimo año.

f_n : Factor de mineralización al año correspondiente (tabla 5.7).

N_o : Porcentaje de nitrógeno orgánico presente en el lodo.

Tabla 5.7 Tasas de mineralización del nitrógeno orgánico presente en el lodo.

Tiempo transcurrido desde la aplicación del lodo (años)	Tasa de mineralización (%)		
	Lodos crudos	Lodos digeridos por vía anaerobia	Lodos compostados
1	40	20	10
2	20	10	5
3	10	5	3
4	5	3	3
5	3	3	3
6	3	3	3
7	3	3	3
8	3	3	3
9	3	3	3
10	3	3	3

Fuente: Metcalf & Eddy, 1995.

La cantidad total de nitrógeno disponible en un determinado año es la cantidad disponible por la aplicación del lodo durante el año (N), más la cantidad disponible como consecuencia de la mineralización del lodo aplicado los años anteriores (N_{ap}), de manera que, la tasa anual de aplicación de lodo se calcula mediante la ecuación 5.4.

$$R_n = \frac{U_n}{N + N_{ap}} \tag{5.4}$$

Donde:

R_n : Tasa anual de aplicación durante el n-ésimo año, ton sólidos secos/ha·año.

U_n : Consumo anual de nitrógeno por parte de las plantas, kg nitrógeno/ ha·año.

En los casos en los que el parámetro limitante es el consumo de fósforo, la tasa de aplicación de lodo se calcula mediante la ecuación 5.5.

$$R_p = \frac{U_p}{C_p (1\,000)} \tag{5.5}$$

Donde:

R_p : Tasa de aplicación por carga de fósforo, ton fósforo/ha·año.

U_p : Consumo anual de fósforo por parte de las plantas, kg fósforo/ ha·año.

C_p : Contenido porcentual de fósforo en el lodo. Normalmente, se supone disponible el 50 % del contenido total de fósforo en el lodo.

En la [tabla 5.8](#) se muestran algunas necesidades de nutrientes de diversos cultivos que pueden ser plantados con biosólidos.

Tabla 5.8 Consumo de nutrientes de diversos cultivos.

Cultivo	Consumo de nutrientes (kg/ha·año)		
	Nitrógeno	Fósforo	Potasio
Cultivos de forraje			
Alfalfa	225-538	23-37	174-225
Bromus	130-225	40-56	247
Gramma	393-673	34-45	225
Espiguilla	202-269	45	202
Quack Grass	236-281	31-46	275
Carrizo	237-449	41-45	312
Raigrás	202-281	62-84	269-325
Trébol	178	18	101
Festuca	152-325	30	300
Orchard Grass	258-281	23-56	253-353
Cultivos de campo			
Cebada	71	17	23
Maíz	174-193	19-28	108
Algodón	74-112	14	39
Sorgo	135	16	70
Papas	230	23	247-323
Soja	106-144	13-1	33-54
Trigo	56-91	17	21-5
Zonas forestales			
Mezcla de arces, nogales, tecas	219		
Pinos	112		
Coníferas blancas	281		
Zonas replantadas	281		
Pino sureño	220-320		
Poblaciones híbridas	157-404		
Plantaciones de coníferas	152-247		

Fuente: Metcalf & Eddy, 1995.

5.3.3 Necesidades de superficie

Una vez que se ha establecido la tasa de aplicación del lodo en el suelo, es posible calcular la superficie de terreno necesaria mediante la [ecuación 5.6](#).

$$A = \frac{Q_s}{R_d} \quad (5.6)$$

Donde:

A: Superficie necesaria para la aplicación de lodo, ha.

Q_s : Producción total de lodo, ton sólidos secos/año.

R_d : Tasa de aplicación de lodo, ton sólidos secos/ha·año.

5.4 Ejemplos de aplicación de lodos en México

La idea de considerar al lodo como un desecho y llevarlo a un relleno sanitario ha sido gradualmente abandonada en muchos países, actualmente se ha cambiado el manejo del lodo hacia el aprovechamiento, considerándolo no como un residuo, sino como un material de recuperación para el suelo y fertilizante orgánico para vegetales (MAPAS 32, 2015).

En México, se cuenta con superficies donde pueden disponerse los lodos adecuadamente, aproximadamente el 44.9 % de los suelos del país se encuentran afectados por algún proceso de degradación (SEMARNAT, 2015). La degradación de los suelos es ocasionada por actividades humanas diversas, siendo las más importantes los cambios en el uso del suelo asociados a la agricultura mecanizada, el sobrepastoreo y el desarrollo urbano e industrial.

La experiencia de la aplicación de lodos residuales en México se ha incrementado, el lodo residual ha sido usado para la producción de chile, cebolla, alfalfa, avena, maíz, cultivos forrajeros, trigo y sorgo. A continuación, se muestran los resultados de algunos proyectos de aplicación de lodos en diferentes estados (MAPAS 32, 2015).

5.4.1 Jalisco

La Comisión Estatal del Agua (CEA) en forma conjunta con el Centro Universitario de Ciencias Biológicas y Agropecuarias (CUCBA), decidieron emplear los lodos como abono en la siembra de maíz y sorgo. El experimento se realizó en un terreno de 900 m² dividido en dos parcelas, en una se sembró el maíz, y en la otra el sorgo. Las parcelas fueron divididas para aplicar cantidades diferentes de lodo desde las 20 hasta 50 toneladas, también se instaló un tratamiento testigo, en el cual se llevó a cabo el procedimiento de siembra acostumbrado por los agricultores y otro tratamiento en donde no se aplicó ni fertilizante ni biosólidos.



Figura 5. 4 Experimento llevado a cabo con biosólidos en el cultivo de maíz y sorgo (fuente: CEA, 2012).

Los resultados obtenidos con la aplicación de lodo fueron ventajosos en altura y desarrollo de las plantas, así como económicamente hablando, el análisis de costos en el experimento del sorgo representó un ahorro monetario del 40.8 % con la aplicación del lodo vs la plantación convencional. En el caso del maíz, representó un ahorro del 39.1 %.

5.4.2 Durango

Existen programas de plantación forestal con el fin de restablecer las áreas degradadas del bosque. De igual manera, el Instituto Tecnológico Agropecuario Número 1 de Durango, propuso que el lodo residual composteado se considerará para la producción de plantas de agave. Se

realizó un experimento en el que se aplicaron tres tratamientos. El tratamiento, donde se añadió alfalfa verde, paja seca de avena y estiércol resultó el sustrato con las mejores características potenciales para la producción de planta de agave. Los microorganismos presentes en este tratamiento y la materia orgánica añadida ayudaron a la disminución de las cantidades de metales pesados.

5.4.3 Chihuahua

Se realizaron cultivos de maíz forrajero, alfalfa, avena forrajera y algodón por parte del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) obteniéndose los resultados mostrados en la [tabla 5.9](#).



Figura 5. 5 Rendimientos de los diferentes cultivos estudiados (fuente: Mejía E., s.f.).

La aplicación de biosólidos incrementó el rendimiento en un 21 a 25 % en alfalfa, 8 a 9 % en algodón y de 4 a 88 % en maíz forrajero dependiendo del tipo de suelo y dosis de fertilización aplicada por el agricultor.

La respuesta más evidente a la aplicación de biosólidos en rendimiento fue en maíz forrajero, donde se observó un incremento en la concentración de zinc y cobre de 1 354 y 402 % en el tejido del cultivo, respectivamente.

Tabla 5.9 Resultados obtenidos en los cultivos estudiados con y sin aplicación de biosólidos.

Cultivo	Tecnología del agricultor		Tecnología con uso de biosólidos	
	Rendimiento	Producción	Rendimiento	Producción
Maíz forrajero	44.9 kg/ha	64 818 ton	53.7 kg/ha	77 606 ton
Alfalfa	14 834 kh/ha	14 834 ton	17 369 kg/ha	17 369 ton
Avena forrajera	9.2 ton/ha	13 285 ton	10.9 ton/ha	15 740 ton
Algodón	6 847 kg/ha	225 951 ton	7 358 kg/ha	242 814 ton

Fuente: Mejía, E.

El análisis económico mostró en todos los cultivos, que el uso de biosólidos es la mejor alternativa de fertilización, ya que en la mayoría de las parcelas aumentó el rendimiento (7-88 %) o bien disminuyeron los costos del cultivo por el ahorro del fertilizante (0-27 %). Debido a lo anterior, el uso de biosólidos incrementó el índice de redituabilidad de todos los cultivos, llegando a ser hasta de 105 % más que la aplicación química de fertilizantes.

5.5 Disposición final de los lodos generados en la PTAR “Cerro de la Estrella”.

Como se mencionó en los apartados anteriores, los lodos pueden ser aprovechados utilizándose en la aplicación de suelos. El uso de lodo en la agricultura es importante debido a la problemática del campo en cuanto al empobrecimiento del suelo por el uso agrícola intensivo, la aplicación de lodos reduce potencialmente la degradación y recuperan su capacidad productiva. A su vez, los lodos pueden ayudar a contrarrestar la explotación de suelos forestales y por sobrepastoreo.

Los biosólidos generados en la PTAR “CE” pueden ser utilizados en la Ciudad de México y estados cercanos tales como: Estado de México, Morelos, Hidalgo y Puebla para disminuir costos por transportación. Se propone la aplicación de las 34 052 TON/año de los biosólidos generados en la agricultura, en los cultivos de maíz, alfalfa, sorgo y trigo. Si los biosólidos obtenidos fuesen clase tipo A, no tendrían ninguna restricción en su uso en cultivos, sin embargo, es recomendable seleccionar cultivos que no estén cubiertos por la tierra. De igual manera, pueden ser utilizados en las plantaciones de flores, como mejoradores de suelos en zonas afectadas y en zonas forestales. La clasificación de los biosólidos debe realizarse a partir de los resultados obtenidos con los procedimientos establecidos en la NOM-004, estos procedimientos deben realizarse en laboratorios certificados para avalar su veracidad.

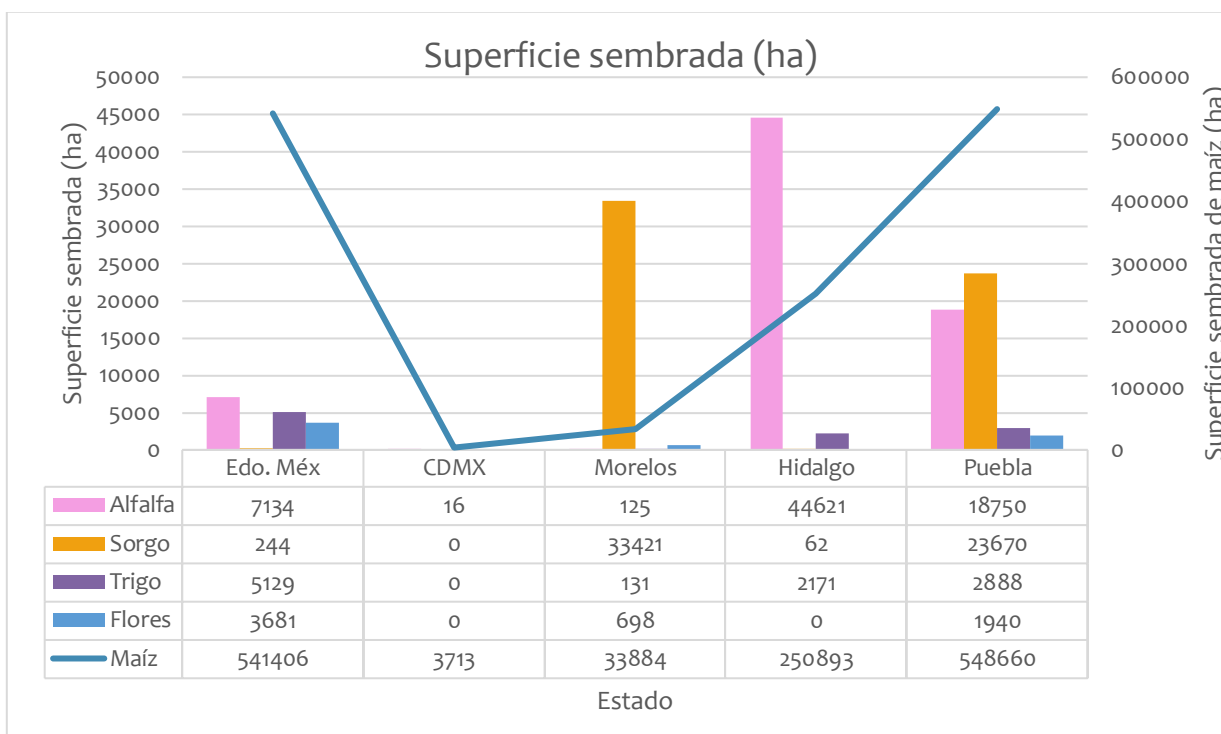
En la [tabla 5.10](#) se presentan las áreas requeridas para cada tipo de cultivo de acuerdo con los requerimientos de nitrógeno mostrados en la [tabla 5.8](#). Los cálculos se realizaron a partir de las ecuaciones [5.2](#), [5.3](#), [5.4](#) y [5.6](#). Considerando un contenido de nitrógeno orgánico del 2.0 % y nitrógeno amoniacal del 2.5 % en el lodo, se obtuvo la cantidad de nitrógeno disponible a partir del 5to año de 32.08 kg_N/Ton lodo. Además, se tomó la consideración de que siendo el maíz el cultivo más sembrado con respecto a los otros cultivos en los estados seleccionados, se aplicará el 67.16 % de los lodos producidos, seguido por un 25 % en alfalfa, 7 % en sorgo, 0.7 % en trigo y 0.14 % en flores.

Tabla 5.10 Superficie requerida para la disposición de lodos por tipo de cultivo.

Cultivo	Cantidad de lodo disponible para disposición (TON/año)	Necesidad de nitrógeno por tipo de cultivo kg _N /ha·año	Tasa anual de aplicación (TON/ha·año)	Superficie requerida (ha)
Maíz	22 869.323	184	5.735	3 987.142
Alfalfa	8 513	390	12.157	700.235
Sorgo	2 383.64	135	4.208	566.412
Trigo	238.364	75	2.337	101.954
Flores	47.6728	25	0.779	61.172

Elaboración propia.

En la [gráfica 5.1](#) se presentan las hectáreas que fueron sembradas por tipo de cultivo en el Estado de México, CDMX, Morelos, Hidalgo y Puebla en el año 2017 según el avance de siembras y cosechas emitido por el Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP).



La superficie sembrada de maíz y sorgo incluye grano y forrajero, el trigo además incluye ornamental. Las flores consideradas son crisantemos y gladiolas.

Gráfica 5.1 Superficie sembrada de los cultivos seleccionado en diferentes estados (elaboración propia a partir de datos del SIAP).

Se propone el uso del 1 % de la superficie total sembrada para la disposición de biosólidos, que cubren la superficie de terreno requerida para los lodos generados en la PTAR “CE”. Otra manera para la disposición correcta de lodos es mediante la aplicación al suelo para mejorar sus características, a nivel nacional el 44.9 % del territorio se encuentra afectado por algún tipo de

degradación, siendo la química el proceso más extendido con un 17.8 %, seguida por la erosión hídrica con 11.9 %, eólica 9.5% y, al final, la degradación física con 5.7% del territorio.

Si se consideran nuevamente el estado de México, CDMX, Morelos, Hidalgo y Puebla como posibles receptores de los biosólidos y tan solo la superficie degradada por procesos químicos, se dispondrían de grandes extensiones de tierras para disposición de lodos, tan solo en la CDMX hay 11.8 miles de ha afectadas por la degradación química. Sí se considera una necesidad de nitrógeno de 250 Kg/ha·año, se requerirían 4 369.47 ha de terreno con una tasa de aplicación anual de 7.793 TON/ha·año. Si los terrenos en la CDMX no cumplen con los requerimientos mínimos para la aplicación de lodos, se podrían disponer en las 545.7 miles de ha del Estado de México; 140.4 miles ha de Morelos, 554.1 miles ha de Hidalgo y 741.3 miles ha de Puebla.

La correcta disposición de los lodos generados en la PTAR “CE” debe basarse en estudios de campo una vez seleccionados los posibles terrenos que minimicen costos y maximicen el aprovechamiento de los biosólidos.

Conclusiones

Con base a los objetivos planteados, se propuso un proceso para el tratamiento de los lodos generados en la PTAR “Cerro de la Estrella” (“CE”) que integrara un sistema de cogeneración para generar simultáneamente energía eléctrica y térmica, con la energía eléctrica se reducirían los gastos asociados a los consumos energéticos de la PTAR, y la energía térmica podría aprovecharse para la digestión y adicional para la desinfección de los lodos, ya que se planteó la posibilidad de obtener un biosólido estable que pueda ser utilizado en la mejora de suelos sin perjudicar a el medio ambiente y la salud, esto se traduce en obtener un biosólido clase A, B o C según la NOM-004-SEMARNAT-2002, uno de los problemas de los lodos generados en la PTAR “CE” es la alta cantidad de huevos de helminto (HH) que presentan, esto según el Instituto de Ingeniería de la UNAM, considerando que los HH son parásitos que no pueden ser eliminados con una digestión anaeróbica mesofílica se propone una desinfección térmica por medio de una pasteurización de los lodos digeridos, de esta forma existe una probabilidad muy alta de que los HH sean destruidos, el no eliminar los HH dejaría a los lodos fuera de cualquier tipo de uso y sería necesario disponer de ellos de forma especial dado que no cumplirían con la normatividad.

La PTAR “CE” es la más grande en caudal tratado de la CDMX con un caudal promedio de 2 500 L/s. La cantidad de lodo producido se determinó mediante un balance de materia en base a los datos proporcionados por el laboratorio central de SACMEX, estimándose con ello una producción de lodo de 4 327 m³/día. La PTAR demanda en promedio 2 550 kW de energía eléctrica, lo cual representa un gasto de 3.35 millones de pesos mensuales de este servicio, con el aprovechamiento de los lodos este gasto mensual podría reducirse en un 45.8 %, al implementar un sistema de cogeneración con dos motores de 850 kW que serían alimentados con los 13 432 m³/día producidos en el digestor anaeróbico, dicho sistema de cogeneración aportaría 1 530 kW de energía eléctrica y 1 702 kW de energía térmica.

Aunque no debería estar en discusión el tratar o no los lodos, puede presentarse una ganancia con solo venderlos a un bajo costo, en el presente trabajo el tratamiento del lodo tiene un costo de 136 pesos/tonelada y se propone un precio de venta de 178 pesos/tonelada, dado que puede ser de gran utilidad para la agricultura y podría en algunos casos sustituir a los fertilizantes, con este precio de venta se obtienen indicadores económicos que en muchos casos no serían atractivos para inversionistas, pero si pensamos que este proyecto más que generar enormes ganancias generaría grandes beneficios a la sociedad, los indicadores podrían verse de forma distinta. Del análisis económico se obtuvo que el tratamiento de lodos requiere de una inversión de 168 millones de pesos, obteniendo un VPN de 19 millones de pesos, una TIR de 11.3% y un tiempo de recuperación de la inversión de 19 años y 3 meses, con lo cual puede ser económicamente factible la implementación del proyecto al maximizar la inversión inicial realizada.

El generar biosólidos estables que puedan ser empleados en la mejora de los suelos implementando un sistema de cogeneración, tendrá beneficios al medio ambiente, a la sociedad

y a la economía, y será un pequeño paso para emprender hacia una economía circular, modelo que Europa intenta adoptar por los beneficios y ventajas que representa.

Bibliografía

- Abassi, T. (2012). *Biogas Energy*. U.S.A.: Springer.
- Acosta, L. (2005). La digestión anaerobia. Aspectos teóricos. Parte I. *ICIDCA. Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar*, XXXIX (1), 35-48.
- Andreoli, C. (2007). *Biological Wastewater treatment series. Vol. 6: Sludge treatment and disposal*. London, U.K.: IWA-Publishing.
- Aranowski R. (2010). Changes in rheological properties during anaerobic digestion of activated sludge. *Physicochemical Problems of Mineral Processing*, (44), 13-22.
- Argemí J. (s.f.). Filtros de banda de presión. *Técnicas de filtración (TEFSA)*. Recuperado de http://www.gruptefsa.com/filtro_de_banda_de_presion/06-Filtro%20de%20Banda%20de%20Presio%CC%81n.pdf
- Atenodoro J. (2015). Mejoramiento de la degradabilidad anaerobia y parámetros cinéticos de la inactivación de patógenos de lodos residuales usando pre- y post tratamiento térmico parte 2. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, (14), 311-319.
- Bachmann N. (2015). *Sustainable biogas production in municipal wastewater treatment plants*. Recuperado de http://task37.ieabioenergy.com/files/daten-redaktion/download/Technical%20Brochures/Wastewater_biogas_grey_web-1.pdf
- Barrios, J. (2009). *Aspectos generales del manejo de lodos*. Recuperado de <http://www.ai.org.mx/ai/archivos/talleres/aprovechamiento-lodos/Aspectos%20Generales%20del%20Manejo%20de%20Lodos.pdf>
- Bjorn A. (2012). *Rheological Characterization*. Recuperado de <http://cdn.intechopen.com/pdfs/31320.pdf>
- Campos, E. (2009). Análisis Básico del Reúso de Lodos Residuales de una Planta de Tratamiento de Aguas Residuales en Suelos de Pradera del Parque Nacional Nevado de Toluca. *Quivera*, 11 (2), 35-51.
- Cao, X. (2016). Rheological Properties of Municipal Sewage Sludge: Dependency on Solid Concentration and Temperature. *ScienceDirect*. Recuperado de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1878029616000177>
- Caye, M. (2008). *Biofuels Engineering Process Technology*. New York: McGraw-Hill.
- CEA (2012). *Los biosólidos, una oportunidad en la agricultura*. Recuperado de https://www.ceajalisco.gob.mx/notas/documentos/biosolidos_raul_lopez_cea.pdf
- Chernicharo, C. (2007). *Biological Wastewater treatment series. Vol. 4: Anaerobic reactors*. London, U.K.: IWA-Publishing.
- CIDTA (2017). *Curso interactivo: tratamiento de aguas residuales*. Recuperado de <http://cidta.usal.es/cursos/EDAR/modulos/Edar/unidades/PRINCIPAL/principal.htm>
- CONAGUA (2011). *Agenda del agua 2030*. México: Conagua.

- CONAGUA (2015). *Mapas 25: Introducción al tratamiento de aguas residuales municipales*. México: Conagua.
- CONAGUA (2015). *Mapas 32: Diseño de plantas de tratamiento de aguas residuales municipales. Tratamiento y disposición de lodos*. México: Conagua.
- CONAGUA (2015). *Mapas 35: Saneamiento básico*. México: Conagua.
- CONAGUA (2015). *Mapas 38: Alternativas tecnológicas de tratamiento de aguas residuales para la recarga artificial de acuíferos*. México: Conagua.
- CONAGUA (2015). *Mapas 41: Eficiencia energética, uso eficiente y ahorro de la energía*. México: Conagua.
- CONAGUA (2015). *Mapas 41: Operación y mantenimiento de plantas de tratamiento de aguas residuales municipales. Pretratamiento y tratamiento primario*. México: Conagua.
- CONAGUA (2015). *Mapas 49: Operación y mantenimiento de plantas de tratamiento de aguas residuales municipales. Procesos anaerobios*. México: Conagua
- CONAGUA (2015). *Mapas 50: Operación y mantenimiento de plantas de tratamiento de aguas residuales municipales. Tratamiento y disposición de lodos*. México: Conagua
- CONAGUA (2015). *Mapas 51: Operación y mantenimiento de plantas de tratamiento de aguas residuales municipales. Lodos activados*. México: Conagua
- CONAGUA (2016). *Inventario nacional de plantas municipales de potabilización y de tratamiento de aguas residuales en operación. Diciembre 2016*. México: Conagua.
- CONAGUA (2017). *Atlas del Agua en México 2017*. México: Conagua.
- CONAGUA (2017). *Estadísticas del agua en México 2017*. México: Conagua.
- CONAGUA (2017). *Ley de aguas nacionales y su reglamento*. México: Conagua.
- CONAGUA (2017). *Numeragua. México 2017*. México: Conagua.
- Degremont (2012, noviembre). *Dehydris twist. Fichas técnicas manual técnico del agua*, No. 6. Recuperado de <http://www.degremont.es/es/images/pdf/06-feuillet-memento-degremont-es-n-6%20-dehydris%20twist.pdf>
- Deublein, D. & Steinhäuser, A. (2011). *Biogas from waste and renewable resources*. Alemania: Wiley-VCH.
- Díaz, A. (2015). *Tratamiento de lodos, generalidades y aplicaciones*. CETIC, (46), 1-10.
- EPA (1978). *Sludge treatment and disposal. Vol 1*. Cincinnati, Ohio: EPA.
- EPA (1978). *Sludge treatment and disposal. Vol 2*. Cincinnati, Ohio: EPA.
- EPA (1979). *Process design manual for sludge treatment and disposal*. Cincinnati, Ohio: EPA.
- EPA (1982). *Process design manual for dewatering municipal wastewater sludges*. Cincinnati, Ohio: EPA.
- EPA (1983). *Process design manual for land application of municipal sludge*. Cincinnati, Ohio: EPA.

- EPA (1987). *Design manual: Dewatering municipal wastewater sludges*. Cincinnati, Ohio: EPA.
- EPA (2011). *Principles of design and operations of wastewater treatment pond systems for plant operators engineers, and managers*. Cincinnati, Ohio: EPA
- FAEN (s.f.). *Cogeneración de pequeña potencia*. Recuperado de http://www.faen.es/wp-content/uploads/2016/07/FAEN_GUIA_COGENERACION.pdf
- FAO (2011). *Manual de biogás*. Recuperado de <http://www.fao.org/docrep/019/as400s/as400s.pdf>
- Fenercom (2010). *Guía de la cogeneración*. Madrid, España.
- Feres, R. (2015). *Estudio de factibilidad técnico-económica de las alternativas para un sistema de tratamiento de lodos generados en una planta de tratamiento de aguas residuales municipales*. (Tesis de pregrado). Facultad de Química, UNAM. México.
- Figueroa, W. (2015). *Prefactibilidad de una planta de tratamiento de digestión anaerobia para el tratamiento de residuos sólidos orgánicos municipales para la obtención de biogás*. (Tesis de pregrado). Facultad de química, UNAM. México.
- Fraile, D. (2008). *Cogeneración Aspectos tecnológicos*. España: EOI.
- García, A. (2015). *Evaluación de dos alternativas de aprovechamiento del biogás generado en un sistema de digestión anaerobia de residuos sólidos orgánicos urbanos*. (Tesis de pregrado). Facultad de Química, UNAM. México.
- Gómez, B. % Saldaña F. (s.f.). *Valuación económica del impacto ambiental de las descargas de aguas residuales municipales*. México: IMTA.
- Guebitz, G. & Bauer, A. (2015). *Biogas science and technology*. Tulln, Austria: Springer.
- Hicks, T.G. (2006). *Handbook of mechanical engineering calculations* (2 ed.). Chicago, U.S.A: McGraw-Hill.
- Hidrometalica (s.f.). *Espesador de fangos*. Recuperado de <http://hidrometalica.com/espesador-de-fangos/>
- HRS Heat exchangers (2018). *Sistemas de procesamiento térmico para la industria medioambiental*. Recuperado de <https://www.hrs-heatexchangers.com/es/sistemas/sistemas-de-procesamiento-termico-para-la-industria-medioambiental/>
- Huber technology (2018). *Espesador de tornillo S-DRUM. Waste water solutions*. Recuperado de <http://www.huber.mx/es/productos/tratamiento-de-fangos/espesamiento/huber-espesador-de-tornillo-s-drum.html>
- IDEA (2007). *Biomasa. Digestores anaerobios*. Madrid, España: BESEL.
- IEA (2017). *Technology roadmap. Delivering sustainable bioenergy*. Recuperado de http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/Technology_Roadmap_Delivering_Sustainable_Bioenergy.pdf

- Kumar, S. (2008). *Anaerobic biotechnology for bioenergy production. Principles and applications*. Iowa, U.S.A: Wiley-Blackwell.
- Kumar, S. (2012). *Biogas*. Croacia: Intech.
- Lang, N. & Smith, S. (2008). Time and temperature inactivation kinetics of enteric bacteria relevant to sewage sludge treatment processes for agricultural use. *ScienceDirect*, (42), 2229-2241.
- Lee, C. (2007). *Handbook of Environmental Engineering Calculations*. (2da ed.). New York: McGraw-Hill
- Lenntech (2018). *Water treatment*. Recuperado de <https://www.lenntech.es/>
- Lieberman N. (2014). *Working guide to process equipment* (4ta ed). Nueva York, U.S.A: McGraw-Hill.
- Limón, J. (2013). *Los lodos de las plantas de tratamiento de aguas residuales, ¿problema o recurso?* México.
- Lin, S. (2014). *Water and Wastewater Calculations Manual*. (3ra ed.). New York: McGraw-Hill Professional.
- Llanea, H. (2010). *Estudio de viabilidad de sistemas de purificación y aprovechamiento de biogás*. España: Probiogás.
- López, C. (2017). *Tratamiento biológico de aguas residuales. Principios, modelación y diseño*. London, U.K.: IWA-Publishing.
- López, M. (2010). Tratamiento de lodos. Una etapa necesaria dentro del proceso tecnológico. *CETIC*, (41), 1-5.
- Lozano, S. (1998). *Cogeneración*. Universidad de Zaragoza.
- Lozano, S. (2003). *Síntesis de sistemas de cogeneración. Fundamentos*. Universidad de Zaragoza.
- Mantila M. & Sandoval L. (2017). *Energía limpia del agua sucia: aprovechamiento de lodos residuales*. CDMX, México: IMTA.
- Martínez, E. (2009). *Pretratamiento térmico y digestión mesofílica de lodos residuales para la producción de un biosólidos de clase A*. (Tesis de maestría). Instituto de Ingeniería, UNAM. México.
- McFarland, M. (2001). *Biosolids Engineering*. New York; McGraw-Hill.
- Mejía, E. (s.f.). *Aspectos técnicos y legales del manejo de lodos en México*. Recuperado de <http://www.ai.org.mx/ai/archivos/talleres/aprovechamiento-lodos/Aspectos%20tecnicos%20y%20legales%20del%20manejo%20de%20lodos%20en%20M%20exico.pdf>
- Méndez, G. (1985). *Cinética del tratamiento biológico de aguas residuales para reúso en irrigación de áreas verdes de ciudad universitaria* (Tesis de maestría). Universidad Autónoma de Nuevo León, México.

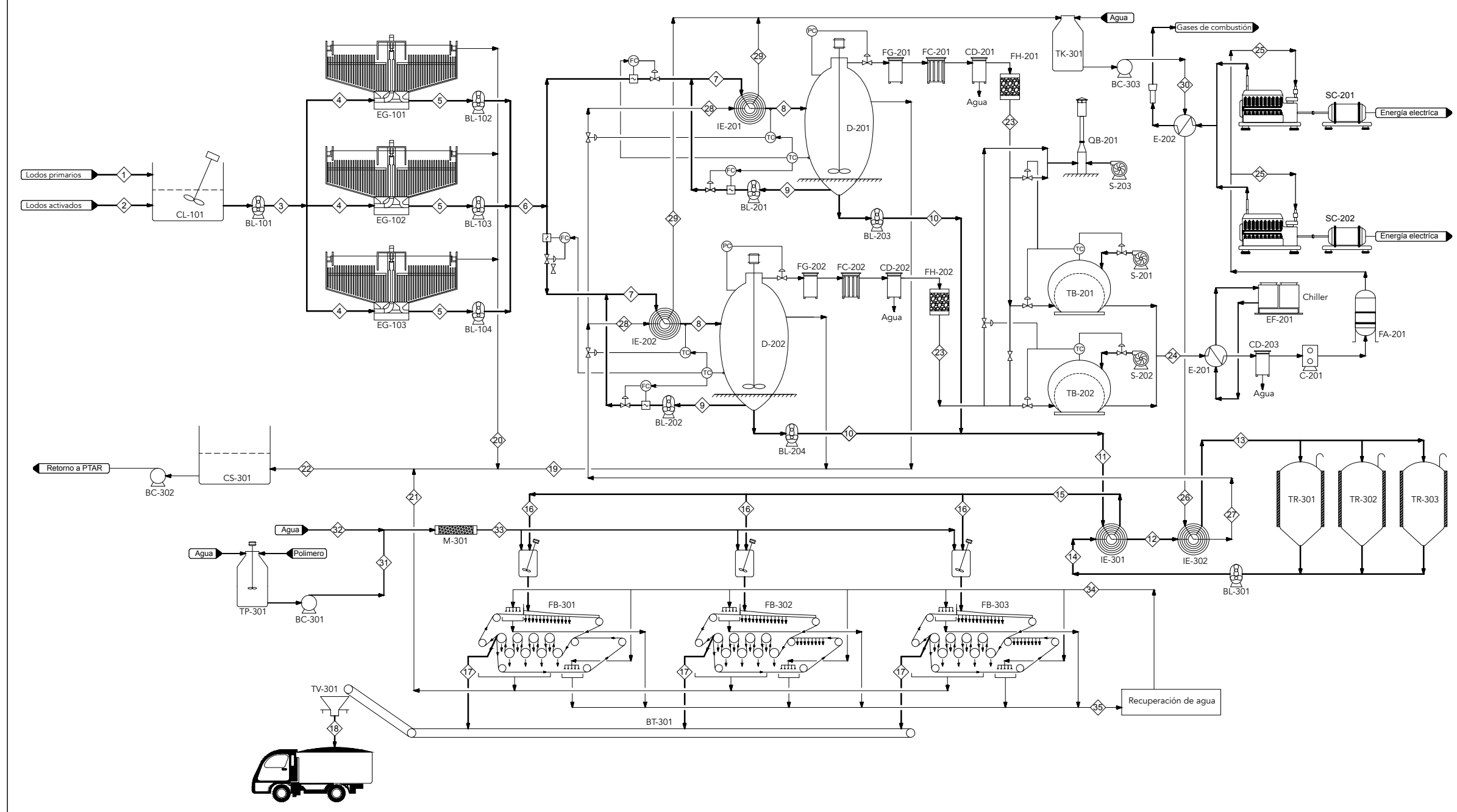
- Metcalf & Eddy (1995). *Ingeniería de aguas residuales. Tratamiento, vertido y reutilización*. España.: McGraw Hill.
- Metcalf & Eddy (2003). *Wastewater engineering. Treatment and reuse*. (4ta ed.). U.S.A.: McGraw Hill.
- Miranda, I. (2010). *Potencial de cogeneración en México y su posible desarrollo* (Tesis de pregrado). Facultad de ingeniería, UNAM. México.
- Montgomery, L. (2014). Pretreatment of feedstock for enhanced biogas production. Recuperado de https://www.nachhaltigwirtschaften.at/resources/iea_pdf/reports/iea_bioenergy_task3_7_study_pretreatment.pdf
- Morero B. (2010). Revisión de las principales tecnologías de purificación de biogás. *Ciencia y tecnología*, (10), 187-201.
- Mudhoo A. (2012). *Biogas production. Pretreatment methods in anaerobic digestion*. Massachussets: Wiley.
- Muskiz M. (2011). Otros procesos sostenibles de generación de energía: Plantas de cogeneración. Recuperado de http://www.somorrostro.com/pdf/plantas_de_cogeneracion.pdf
- Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT. Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales. Diario Oficial de la Federación, México, México, 6 de enero de 1997.
- Norma Oficial Mexicana NOM-002-SEMARNAT. Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal. Diario Oficial de la Federación, México, México, 3 de junio de 1998.
- Norma Oficial Mexicana NOM-003-SEMARNAT. Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas para las aguas residuales tratadas que se reúsen en servicios al público. Diario Oficial de la Federación, México, México, 21 de septiembre de 1998.
- Norma Oficial Mexicana NOM-052-SEMARNAT. Que establece las características, el procedimiento de identificación, clasificación y los listados de los residuos peligrosos. Diario Oficial de la Federación, México, México, 23 de junio de 2006.
- Norma Oficial Mexicana NOM-083-SEMARNAT. Especificaciones de protección ambiental para la selección del sitio, diseño, construcción, operación, monitoreo, clausura y obras complementarias de un sitio de disposición final de residuos urbanos y de manejo especial. Diario Oficial de la Federación, México, México, 20 de octubre de 2004.

- Novarino D. (2010). Rheological Characterization of Sludge Coming from a Wastewater Treatment Plant. *American Journal of Environmental Sciences*. Recuperado de <http://thescipub.com/pdf/10.3844/ajessp.2010.329.337>
- Noyola, A. (2010). *El impacto que ha sufrido el medio ambiente por el vertido de aguas residuales sin tratar*. Recuperado de http://info.ceajalisco.gob.mx/notas/documentos/noyola_cea_jalisco.pdf
- Noyola, A. (2013). *Selección de tecnologías para el tratamiento de aguas residuales municipales. Guía de apoyo para ciudades pequeñas y medianas*. México: instituto de ingeniería, UNAM.
- Ovivo (2017). *Eco-Mat Membrane thickener*. Recuperado de <http://www.ovivowater.com/product/municipal/municipal-wastewater/sludge-treatment-aerobic-digestion/aerobic-digestion/ovivo-eco-mat-membrane-thickener/>
- PWTech (2012). *Volute thickener*. *Engineering Healthy Waterways*. Recuperado de http://pwtech.us/HTML/volute_thickner.html
- Ramalho, R. (1996). *Tratamiento de aguas residuales*. México: Reverté.
- Renovetec (2012). Especial. Plantas de cogeneración (1º parte). *Energiza*.
- SEMARNAT (2010). *Especificaciones técnicas para el diseño y construcción de biodigestores en México*. Recuperado de <http://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/libros2009/CD001057.pdf>
- SEMARNAT (2015). *Informe de la situación del medioambiente en México*. Recuperado de http://apps1.semarnat.gob.mx/dgeia/informe15/tema/pdf/Informe15_completo.pdf
- SENER (2017). *Guía técnica para el manejo y aprovechamiento de biogás en plantas de tratamiento de aguas residuales*. Recuperado de <http://aneas.com.mx/wp-content/uploads/2017/10/guia-lodos2017-dig.pdf>
- SIAP (2018). *Atlas agroalimentario 2012-2018*. Recuperado de https://nube.siap.gob.mx/gobmx_publicaciones_siap/pag/2018/Atlas-Agroalimentario-2018
- Spellman, F. (2003). *Handbook of water and wastewater treatment plant operations*. New York, U.S.A.: Lewis publishers.
- Sperling, M. (2005). *Biological wastewater treatment in warm climate regions*. London, U.K.: IWA Publishing.
- Stamatelatou, K. (2015). *Sewage treatment plants: economic evaluation of innovative technologies for energy efficiency*. London, U.K.: IWA-Publishing.
- Torres E. (s.f.). *Reutilización de aguas y lodos residuales*. Recuperado de <http://www.bvsde.paho.org/bvsaar/e/fulltext/gestion/lodos.pdf>
- UNEP (2010). *Sick Water? The central role of wastewater management in sustainable development*. Norway: UNHABITAT.

- UNESCO (2017). *Aguas residuales. El recurso desaprovechado*. Recuperado de <http://unesdoc.unesco.org/images/0024/002476/247647s.pdf>
- Valdez, E. & Vázquez A. (2003). *Ingeniería de los sistemas de tratamiento y disposición de aguas residuales*. México: ICA.
- Varnero, M. (2012). Tecnologías disponibles para la purificación de biogás usado en la generación eléctrica. *Información Tecnológica*, (23), 31-40.
- Wellinger, A. (2013). *The biogas handbook. Science, production and applications*. Cambridge: Woodhead publishing.
- World Energy Council. (2016). *World Energy Resources: Bioenergy*. Recuperado de https://www.worldenergy.org/wp-content/uploads/2017/03/WEResources_Bioenergy_2016.pdf
- WEF (2008). *Operation of Municipal Wastewater Treatment Plants: MoP No. 11*. (6ta ed.). New York: McGraw-Hill.
- WEF (2010). *Design of Municipal Wastewater Treatment Plants: WEF Manual of Practice No. 8 ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice No. 76*. (5ta ed.). New York: McGraw-Hill.
- WEF (2017): *Operation of Water Resource Recovery Facilities, Manual of Practice No. 11*, (7ma ed.). New York: McGraw-Hill.
- WEF (2018): *Design of Water Resource Recovery Facilities*. (6ta ed.). New York: McGraw-Hill.

ANEXO 1. Diagramas

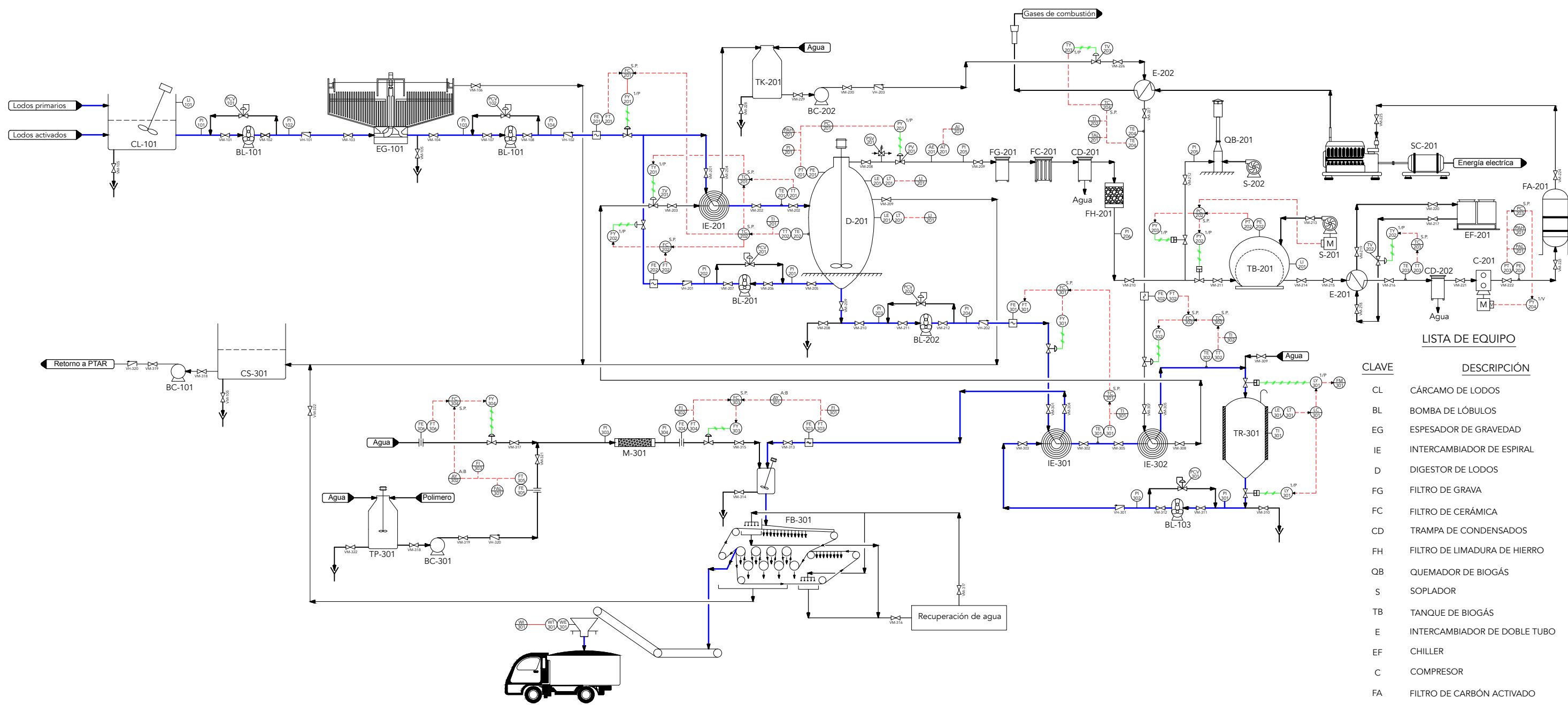
CORRIENTE	CARACTERÍSTICAS																																						
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35				
SÓLIDOS	5.0	0.7	1.0	1.0	4.0	3.7	3.7	2.4	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	22.0	22.0	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2		
AGUA	95.0	99.3	99.0	99.0	96.0	96.0	96.3	96.3	97.6	97.0	97.0	97.0	97.0	97.0	97.0	97.0	78.0	78.0	99.8	99.8	99.8	99.8	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0		
BIÓGAS	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
TOTAL	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0		
FLUJO m ³ /día	277.14	4050.77	4327.91	1442.64	295.36	886.09	531.65	531.65	88.61	355.52	711.04	711.04	711.04	711.04	711.04	237.01	29.34	88.01	160.97	3441.82	820.37	4423.16	6716.33	14367.49	6716.33	344.84	344.84	172.42	172.42	344.84	19.39	177.97	197.35	355.52	355.52	355.52			
FLUJO T/día	282.69	4175.06	4457.75	1485.92	304.22	912.67	547.60	547.60	91.27	366.18	732.37	732.37	732.37	732.37	732.37	244.12	29.34	93.30	165.8	3545.07	836.78	4552.38	7.25	14.51	7.25	344.84	344.84	172.42	172.42	344.84	19.77	177.97	197.35	355.52	355.52	355.52			
SST kg/día	14134.27	28814.89	42949.15	14316.38	12168.93	36506.78	20450.49	20450.49	2197.10	10985.51	21971.01	21971.01	21971.01	21971.01	21971.01	7323.67	6814.66	20524.99	824.98	6442.37	1537.97	8809.32	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---		
SSV kg/día	7733.34	24517.94	32251.28	10750.43	9137.86	27413.59	15077.47	15077.47	1370.68	6853.40	13706.79	13706.79	13706.79	13706.79	13706.79	4568.93	4789.16	14367.49	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	
SST mg/L	51000.00	7133.44	9923.76	9923.76	41200.00	41200.00	38465.92	38465.92	24795.55	30900.00	30900.00	30900.00	30900.00	30900.00	30900.00	30900.00	233200.00	233200.00	5150.00	1871.79	1874.72	1991.63	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	
SSV mg/L	27903.82	6052.67	7451.93	7451.93	30937.81	30937.81	28359.66	28359.66	15468.90	19277.22	19277.22	19277.22	19277.22	19277.22	19277.22	19277.22	163240.00	163240.00	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
DBO mg/L	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
TEMPERATURA °C	18.0	18.0	18.0	18.0	18.0	18.0	20.8	37.0	35.0	35.0	35.0	55.0	70.0	70.0	40.0	35.0	30.0	30.0	18.0	18.0	18.0	18.0	35.0	25.0	25.0	120.0	88.1	88.1	36.8	36.8	18.0	18.0	18.0	18.0	18.0	18.0			



LISTA DE EQUIPO

CLAVE	DESCRIPCIÓN	CARACTERÍSTICAS
CL-101	CÁRCAMO DE LODOS	L: 18 m A: 16 m H: 10 m
BL-101	BOMBA DE LÓBULOS	P: 50 hp
EG-101,2,3	ESPASADOR DE GRAVEDAD	D: 17.6 m H: 4 m
BL-102,3,4	BOMBA DE LÓBULOS	P: 50 hp
IE-201,2	INTERCAMBIADOR DE ESPIRAL	L: 0.914 m D: 0.739 m Q: 428.61 kW
BL-201,2	BOMBE DE LÓBULOS	
D-201,2	DIGESTOR DE LODOS	D: 20 m H: 38 P: 50 hp
BL-203,4	BOMBA DE LÓBULOS	P: 3 hp
FG-201,2	FILTRO DE GRAVA	
FC-201,2	FILTRO DE CERÁMICA	
CD-201,2	CONDENSADOR	
FH-201,2	FILTRO DE LIMADURA DE HIERRO	D: 0.75 m L: 1.5 m
TB-201,2	TANQUE DE BIÓGAS	
E-201,2	INTERCAMBIADOR DE DOBLE TUBO	Q: 851.46 kW
EF-201	CHILLER	
C-201	COMPRESOR DE LOBÓLOS	
FA-201	FILTRO DE CARBÓN ACTIVADO	
SC-201,2	SISTEMA DE COGENERACIÓN	L: 6 m A: 1.8 m H: 2.2 m P: 850 kW
EI-301	INTERCAMBIADOR DE CALOR EN ESPIRAL	L: 1.8 m D: 1.3 m Q: 708.3 kW
EI-302	INTERCAMBIADOR DE CALOR EN ESPIRAL	L: 0.9 m D: 0.7 m Q: 531.8 kW
TR-301,2,3	TANQUE DE RETENCIÓN DE LODOS	D: 2.14 m H: 4.9
BL-301	BOMBA DE LÓBULOS	P: 10 hp
FB-301,2,3	FILTRO BANDA	L: 3.4 m A: 3.9 m H: 1.95 m P: 2.5 kW
BT-301	BANDA TRANSPORTADORA	
TV-301	TOLVA DE ALMACENAMIENTO	V: 30 m ³ P: 0.74 kW
TP-301	TANQUE DE PREPARACIÓN DE POLIMERO	D: 3.2 m H: 3.3 m
BC-301	BOMBA CENTRÍFUGA	
BC-302	BOMBA CENTRÍFUGA	
BC-303	BOMBA CENTRÍFUGA	
M-301	MEZCLADOR ESTÁTICO	
CS-301	CÁRCAMO DE SOBRENADANTE	L: 12 m A: 10 m H: 6 m
TK-301	TANQUE DE AGUA	

No.	DESCRIPCIÓN	FECHA	POR	Vo. Bo.	DIBUJOS DE REFERENCIA	APROBADO POR:				DIB.	A. PIMENTEL, S. SALCEDO			DIAGRAMA DE TUBERÍA E INSTRUMENTACIÓN TRATAMIENTO DE LODOS RESIDUALES	PROYECTO No. _____ PLANO No. A-001 REV. A
A	PARA REVISIÓN Y/O COMENTARIOS	15/06/18	A.P.P.	A.P.P.		DR. RODOLFO A. HERRERA TOLEDO				PROY.	A. PIMENTEL, S. SALCEDO				
A	PARA REVISIÓN Y/O COMENTARIOS	15/06/18	S.H.S.R	S.H.S.R						REV.	DR. RODOLFO A. HERRERA TOLEDO				
										CORD.					
										APROB.					
							DIBUJO ELABORADO EN: CDMX JUNIO /2018			ESC.	S/N	ACOT. EN:	S/N		



LISTA DE EQUIPO

CLAVE	DESCRIPCIÓN
CL	CÁRCAMO DE LODOS
BL	BOMBA DE LÓBULOS
EG	ESPESADOR DE GRAVEDAD
IE	INTERCAMBIADOR DE ESPIRAL
D	DIGESTOR DE LODOS
FG	FILTRO DE GRAVA
FC	FILTRO DE CERÁMICA
CD	TRAMPA DE CONDENSADOS
FH	FILTRO DE LIMADURA DE HIERRO
QB	QUEMADOR DE BIOGÁS
S	SOPLADOR
TB	TANQUE DE BIOGÁS
E	INTERCAMBIADOR DE DOBLE TUBO
EF	CHILLER
C	COMPRESOR
FA	FILTRO DE CARBÓN ACTIVADO
SC	SISTEMA DE COGENERACIÓN
TR	TANQUE DE RETENCIÓN DE LODOS
FB	FILTRO BANDA
BT	BANDA TRANSPORTADORA
TV	TOLVA DE ALMACENAMIENTO
TP	TANQUE DE PREPARACIÓN DE POLIMERO
BC	BOMBA CENTRÍFUGA
M	MEZCLADOR ESTÁTICO
CS	CÁRCAMO DE SOBRENADANTE
TK	TANQUE DE AGUA

EG-101
ESPESADOR DE GRAVEDAD
D.I. = 17.6 m
H = 4 m

IE-201
INTERCAMBIADOR DE CALOR EN ESPIRAL
L = 0.9 m
D = 0.7 m
Q = 428.61 kW

D-201
DIGESTOR ANAEROBIO
D.I. = 20 m
H = 38 m
POTENCIA DEL MEZCLADOR = 49.4 kW

IE-301
INTERCAMBIADOR DE CALOR ES ESPIRAL
L = 1.8 m
D = 1.3 m
Q = 708.3 kW

IE-302
INTERCAMBIADOR DE CALOR ES ESPIRAL
L = 1.8 m
D = 1.3 m
Q = 708.3 kW

TR-301
INTERCAMBIADOR DE CALOR ES ESPIRAL
L = 1.8 m
D = 1.3 m
Q = 708.3 kW

FB-301
INTERCAMBIADOR DE CALOR ES ESPIRAL
L = 1.8 m
D = 1.3 m
Q = 708.3 kW

TB-201
INTERCAMBIADOR DE CALOR ES ESPIRAL
L = 1.8 m
D = 1.3 m
Q = 708.3 kW

SC-201
INTERCAMBIADOR DE CALOR ES ESPIRAL
L = 1.8 m
D = 1.3 m
Q = 708.3 kW

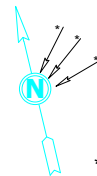
No.	DESCRIPCIÓN	FECHA	POR	Vo. Bo.	DIBUJOS DE REFERENCIA	APROBADO POR:
A	PARA REVISIÓN Y/O COMENTARIOS	15/06/18	A.P.P.	A.P.P.		DR. RODOLFO A. HERRERA TOLEDO
A	PARA REVISIÓN Y/O COMENTARIOS	15/06/18	S.H.S.R	S.H.S.R		



DIB.	A. PIMENTEL, S. SALCEDO
PROY.	A. PIMENTEL, S. SALCEDO
REV.	DR. RODOLFO A. HERRERA TOLEDO
CORD.	
APROB.	
ESC.	S/N
ACOT. EN:	S/N

DIAGRAMA DE TUBERÍA E INSTRUMENTACIÓN TRATAMIENTO DE LODOS RESIDUALES	
PROYECTO No.	PLANO No.
LUGAR	K-001
	REV. A

DIBUJO ELABORADO EN: CDMX JUNIO /2018

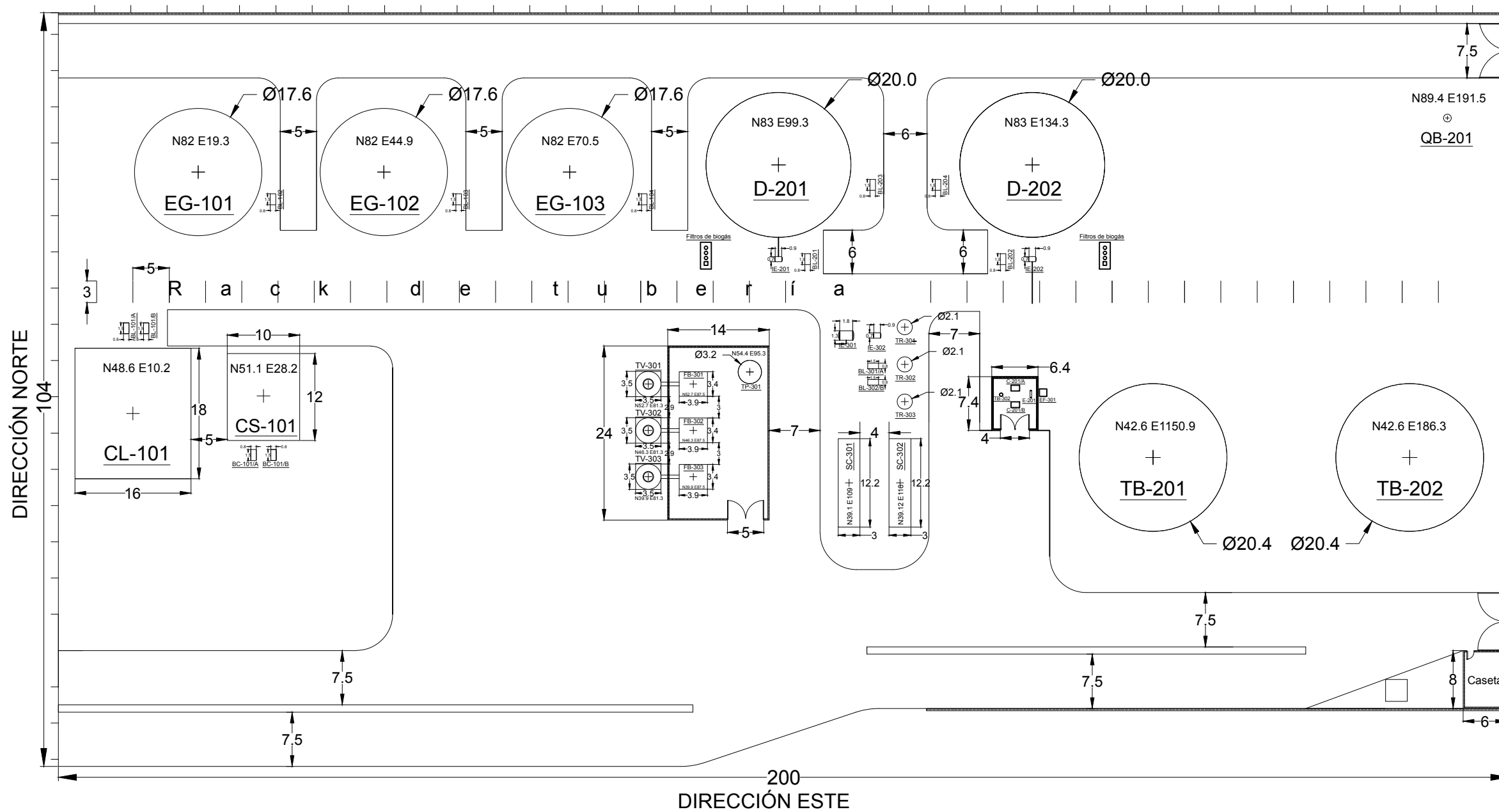


*VIENTOS REINANTES

NORTE GEOGRAFICO

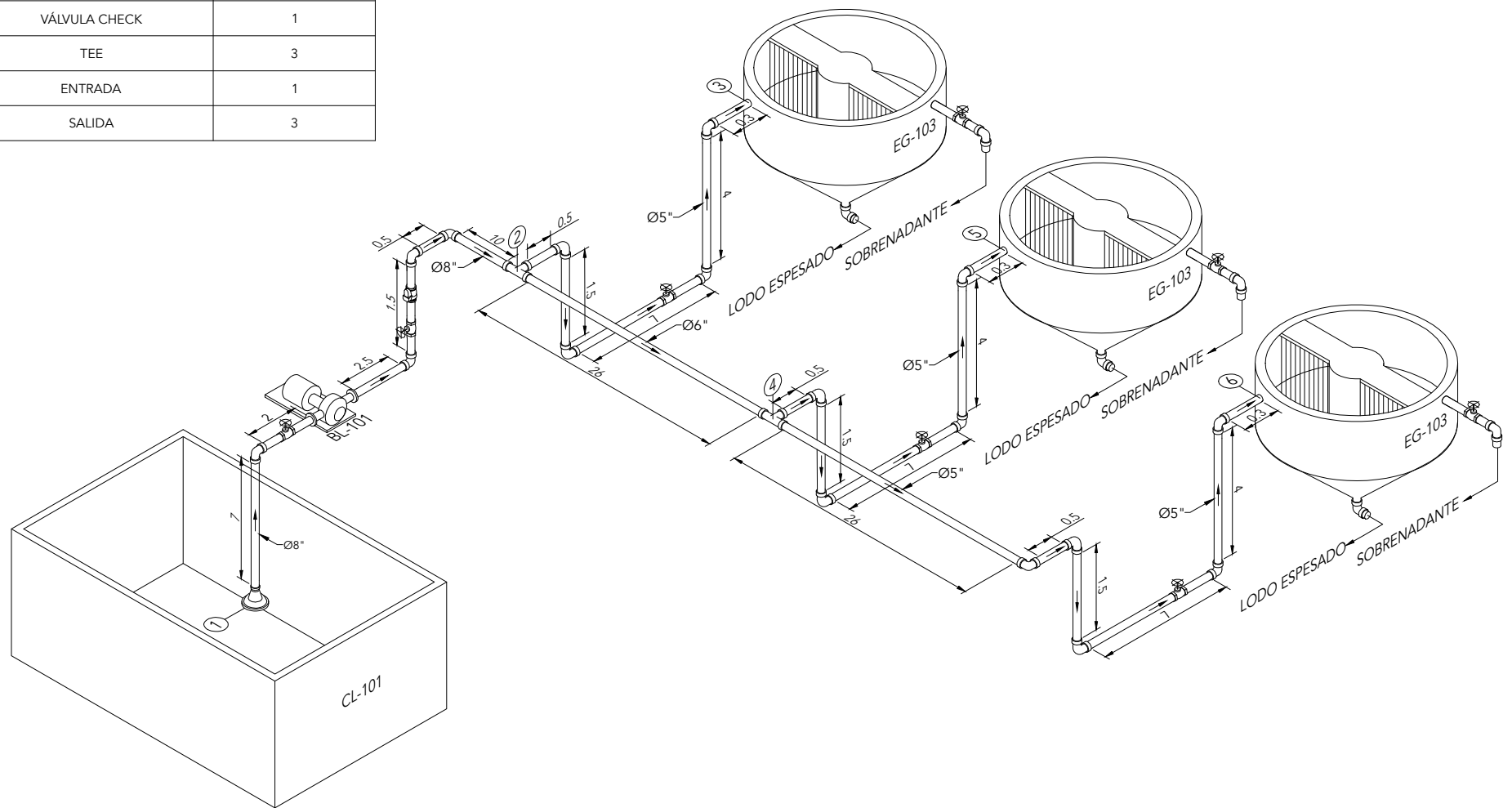
LISTA DE EQUIPO

CLAVE	DESCRIPCIÓN	CARACTERÍSTICAS
CL-101	CÁRCAMO DE LODOS	L: 18 m A: 16 m H: 10 m
BL-101	BOMBA DE LÓBULOS	P: 50 hp
EG-101,2,3	ESPESADOR DE GRAVEDAD	D: 17.6 m H: 4 m
BL-102,3,4	BOMBA DE LÓBULOS	P: 50 hp
IE-201,2	INTERCAMBIADOR DE ESPIRAL	L: 0.914 m D: 0.739 m Q: 428.61 kW
BL-201,2	BOMBE DE LÓBULOS	
D-201,2	DIGESTOR DE LODOS	D: 20 m H: 38 P: 50 hp
BL-203,4	BOMBA DE LÓBULOS	P: 3 hp
FG-201,2	FILTRO DE GRAVA	
FC-201,2	FILTRO DE CERÁMICA	
CD-201,2	CONDENSADOR	
FH-201,2	FILTRO DE LIMADURA DE HIERRO	D: 0.75 m L: 1.5 m
TB-201,2	TANQUE DE BIÓGAS	
E-201,2	INTERCAMBIADOR DE DOBLE TUBO	Q: 851.46 kW
EF-201	CHILLER	
C-201	COMPRESOR DE LOBÓLOS	
FA-201	FILTRO DE CARBÓN ACTIVADO	
SC-201,2	SISTEMA DE COGENERACIÓN	L: 6 m A: 1.8 m H: 2.2 m P: 850 kW
EI-301	INTERCAMBIADOR DE CALOR EN ESPIRAL	L: 1.8 m D: 1.3 m Q: 708.3 kW
EI-302	INTERCAMBIADOR DE CALOR EN ESPIRAL	L: 0.9 m D: 0.7 m Q: 531.8 kW
TR-301,2,3	TANQUE DE RETENCIÓN DE LODOS	D: 2.14 m H: 4.9
BL-301	BOMBA DE LÓBULOS	P: 10 hp
FB-301,2,3	FILTRO BANDA	L: 3.4 m A: 3.9 m H: 1.95 m P: 2.5 kW
BT-301	BANDA TRANSPORTADORA	
TV-301	TOLVA DE ALMACENAMIENTO	V: 30 m³ P: 0.74 kW
TP-301	TANQUE DE PREPARACIÓN DE POLIMERO	D: 3.2 m H: 3.3 m
BC-301	BOMBA CENTRÍFUGA	
BC-302	BOMBA CENTRÍFUGA	
BC-303	BOMBA CENTRÍFUGA	
M-301	MEZCLADOR ESTÁTICO	
CS-301	CÁRCAMO DE SOBRENADANTE	L: 12 m A: 10 m H: 6 m
TK-301	TANQUE DE AGUA	



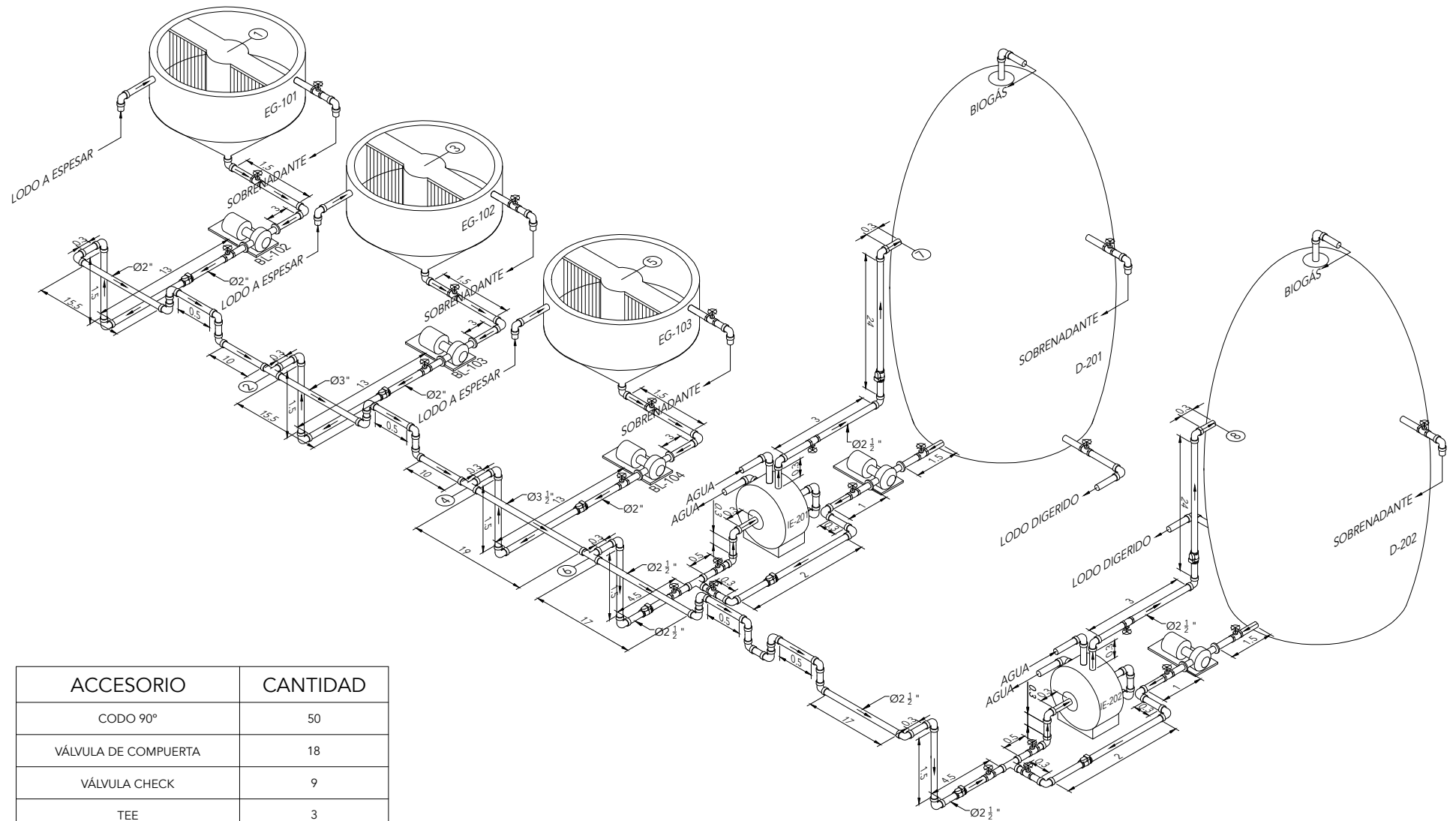
No.	DESCRIPCIÓN	FECHA	POR	Vo. Bo.	DIBUJOS DE REFERENCIA	APROBADO POR:	UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO		FES ZARAGOZA		DIBUJO ELABORADO EN: CDMX JUNIO /2018		DIB. A. PIMENTEL, S. SALCEDO		PROY. A. PIMENTEL, S. SALCEDO		REV. DR. RODOLFO A. HERRERA TOLEDO		CORD.		APROB.		ESC. 1:5:1 ACOT. EN: m		LUGAR IZTAPALAPA CDMX "CERRO DE LA ESTRELLA"		PROYECTO No.		PLANO No.		REV
A	PARA REVISIÓN Y/O COMENTARIOS	15/06/18	A.P.P.	A.P.P.		DR. RODOLFO A. HERRERA TOLEDO	UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO		FES ZARAGOZA		DIBUJO ELABORADO EN: CDMX JUNIO /2018		DIB. A. PIMENTEL, S. SALCEDO		PROY. A. PIMENTEL, S. SALCEDO		REV. DR. RODOLFO A. HERRERA TOLEDO		CORD.		APROB.		ESC. 1:5:1 ACOT. EN: m		LUGAR IZTAPALAPA CDMX "CERRO DE LA ESTRELLA"		E-001		A		
A	PARA REVISIÓN Y/O COMENTARIOS	15/06/18	S.H.S.R	S.H.S.R			UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO		FES ZARAGOZA		DIBUJO ELABORADO EN: CDMX JUNIO /2018		DIB. A. PIMENTEL, S. SALCEDO		PROY. A. PIMENTEL, S. SALCEDO		REV. DR. RODOLFO A. HERRERA TOLEDO		CORD.		APROB.		ESC. 1:5:1 ACOT. EN: m		LUGAR IZTAPALAPA CDMX "CERRO DE LA ESTRELLA"		E-001		A		

ACCESORIO	CANTIDAD
CODO 90°	17
VÁLVULA DE COMPUERTA	5
VÁLVULA CHECK	1
TEE	3
ENTRADA	1
SALIDA	3



No.	DESCRIPCIÓN	FECHA	POR	Vo. Bo.	DIB.	ISOMÉTRICO DE TUBERÍAS PLANTA DE TRATAMIENTO DE LODOS			
A	PARA REVISIÓN Y/O COMENTARIOS	15/06/18	A.P.P.	A.P.P.	PROY.	A. PIMENTEL, S. SALCEDO			
A	PARA REVISIÓN Y/O COMENTARIOS	15/06/18	S.H.S.R	S.H.S.R	REV.	DR. RODOLFO A. HERRERA TOLEDO			
					CORD.				
					APROB.				
					PROYECTO No.			PLANO No.	REV
					LUGAR			I-001	A
DIBUJO ELABORADO EN: CDMX					JUNIO /2018	ESC. S/N	ACOT. EN: m		





ACCESORIO	CANTIDAD
CODO 90°	50
VÁLVULA DE COMPUERTA	18
VÁLVULA CHECK	9
TEE	3
ENTRADA	3
SALIDA	2

No.	DESCRIPCIÓN	FECHA	POR	Vo. Bo.
A	PARA REVISIÓN Y/O COMENTARIOS	15/06/18	A.P.P.	A.P.P.
A	PARA REVISIÓN Y/O COMENTARIOS	15/06/18	S.H.S.R	S.H.S.R



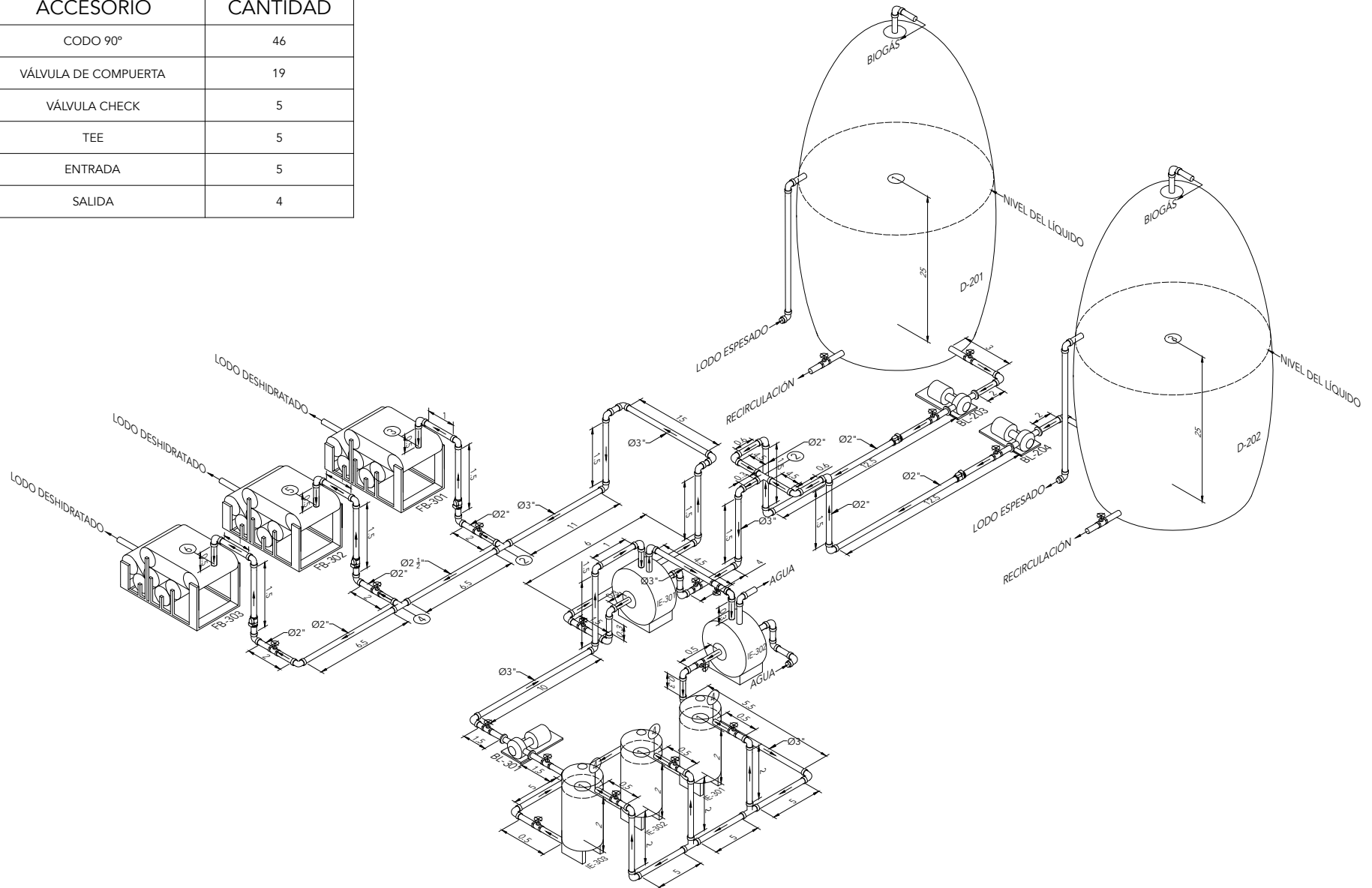
DIBUJO ELABORADO EN: CDMX

DIB.	A. PIMENTEL, S. SALCEDO
PROY.	A. PIMENTEL, S. SALCEDO
REV.	DR. RODOLFO A. HERRERA TOLEDO
CORD.	
APROB.	
JUNIO /2018	ESC. S/N
ACOT. EN: m	

ISOMETRICO DE TUBERIAS PLANTA DE TRATAMIENTO DE LODOS

PROYECTO No.	PLANO No.	REV
LUGAR	I-002	A

ACCESORIO	CANTIDAD
CODO 90°	46
VÁLVULA DE COMPUERTA	19
VÁLVULA CHECK	5
TEE	5
ENTRADA	5
SALIDA	4



No.	DESCRIPCIÓN	FECHA	POR	Vo. Bo.	DIB.	ISOMETRICO DE TUBERIAS PLANTA DE TRATAMIENTO DE LODOS	
A	PARA REVISIÓN Y/O COMENTARIOS	15/06/18	A.P.P.	A.P.P.	A. PIMENTEL, S. SALCEDO	PROYECTO No.	PLANO No.
A	PARA REVISIÓN Y/O COMENTARIOS	15/06/18	S.H.S.R	S.H.S.R	A. PIMENTEL, S. SALCEDO	LUGAR	I-003
					DR. RODOLFO A. HERRERA TOLEDO		
					CORD.		
					APROB.		
					DIBUJO ELABORADO EN: CDMX	JUNIO /2018	ESC. S/N
						ACOT. EN: m	
							REV
							A



DIB. A. PIMENTEL, S. SALCEDO
 PROY. A. PIMENTEL, S. SALCEDO
 REV. DR. RODOLFO A. HERRERA TOLEDO
 CORD.
 APROB.

PROYECTO No. PLANO No. I-003
 LUGAR REV A

ANEXO 2. Balance de masa

Para el balance de masa es necesario conocer las características del agua residual y del agua tratada. Los datos necesarios para el balance se presentan a continuación.

Parámetro	Influente	Efluente
Caudal (m ³ /d)	209 433.6	209 433.6
DBO (mg/L)	225	4
DBO _{soluble} (mg/L)	86	2
DQO (mg/L)	619.6	139.7
DQO _{soluble} (mg/L)	226.8	84.9
SST (mg/L)	183	15
SSV (mg/L)	133	5
SSV _{Bio} (%)	78.662	14.808
SSLM		2 500
SSVLM		2 000
SSr		6 250
SSVr		3 750

Elaborado a partir de datos proporcionados por PTAR CE, SACMEX

Paso 1. Se debe determinar la masa en el influente y el efluente de DBO, SST y SSV

$$\text{Si: } m = \dot{Q} \cdot c$$

DBO:

$$m_{DBO_i} = \dot{Q}_i \cdot DBO_i = 209433.6 \frac{m^3}{d} \cdot 225 \frac{g}{m^3} = 47122560 \frac{g}{d} \left(\frac{1 \text{ kg}}{1000 \text{ g}} \right) = 47\,122.56 \frac{kg}{d}$$

$$m_{DBO_e} = \dot{Q}_e \cdot DBO_e = 209433.6 \frac{m^3}{d} \cdot 4 \frac{g}{m^3} = 837734.4 \frac{g}{d} \left(\frac{1 \text{ kg}}{1000 \text{ g}} \right) = 837.734 \frac{kg}{d}$$

SST:

$$m_{SST_i} = \dot{Q}_i \cdot SST_i = 209433.6 \frac{m^3}{d} \cdot 183 \frac{g}{m^3} = 38326348.8 \frac{g}{d} \left(\frac{1 \text{ kg}}{1000 \text{ g}} \right) = 38\,326.34 \frac{kg}{d}$$

$$m_{SST_e} = \dot{Q}_e \cdot SST_e = 209433.6 \frac{m^3}{d} \cdot 15 \frac{g}{m^3} = 3141504 \frac{g}{d} \left(\frac{1 \text{ kg}}{1000 \text{ g}} \right) = 3\,141.504 \frac{kg}{d}$$

SSV:

$$m_{SSV_i} = \dot{Q}_i \cdot SSV_i = 209433.6 \frac{m^3}{d} \cdot 133 \frac{g}{m^3} = 27854668.8 \frac{g}{d} \left(\frac{1 \text{ kg}}{1000 \text{ g}} \right) = 27\,854.66 \frac{kg}{d}$$

$$m_{SSV_e} = \dot{Q}_e \cdot SSV_e = 209433.6 \frac{m^3}{d} \cdot 5 \frac{g}{m^3} = 1047168 \frac{g}{d} \left(\frac{1 \text{ kg}}{1000 \text{ g}} \right) = 1\,047.168 \frac{kg}{d}$$

Paso 2. Estimar la cantidad de masa y el caudal de lodo a purgar en el sedimentador primario.

Primero se debe calcular la DBO y SST eliminados en el sedimentador primario de acuerdo con las eficiencias de remoción planteadas.

Parámetro	Eficiencia de remoción
DBO	8 %
SST	30 %

Elaborado a partir de datos proporcionados por PTAR CE, SACMEX.

$$m_{DBO_{eliminado}} = m_{DBO_i} \cdot \% E_{remoción} = 47\,122.56 \frac{kg}{d} \cdot 8\% = 3\,769.805 \frac{kg}{d}$$

$$m_{SST_{eliminado}} = m_{SST_i} \cdot \% E_{remoción} = 38\,326.349 \frac{kg}{d} \cdot 30\% = 11\,497.9 \frac{kg}{d}$$

Calcular DBO y SST que entraran en el reactor aerobio

$$m_{DBO_{ent.rea}} = m_{DBO_i} - m_{DBO_{eliminado}} = 47\,122.56 \frac{kg}{d} - 3\,769.805 \frac{kg}{d} = 43\,352.76 \frac{kg}{d}$$

$$m_{SST_{ent.rea}} = m_{SST_i} - m_{SST_{eliminado}} = 38\,326.349 \frac{kg}{d} - 11\,497.9 \frac{kg}{d} = 26\,828.45 \frac{kg}{d}$$

La masa de SSV que entra al reactor se determina a partir de la fracción volátil del lodo primario de los SST que entran al reactor, que oscila entre 60-80 % (EPA,1979), para este caso se consideró una fracción del 75 %. La masa de SSV eliminados en la sedimentación primaria se estima a partir de la masa de SSV en el influente y los SSV que entran al reactor.

$$m_{SSV_{ent.rea}} = m_{SST_{ent.rea}} \cdot F.V.SST.SP = 26\,828.45 \frac{kg}{d} \cdot 75\% = 20\,121.34 \frac{kg}{d}$$

$$m_{SSV_{eliminado}} = m_{SSV_i} - m_{SSV_{ent.rea}} = 27\,854.66 \frac{kg}{d} - 20\,121.34 = 7\,733.32 \frac{kg}{d}$$

Para determinar el caudal de lodos primarios eliminados en el sedimentador primario se requiere de las características del lodo.

Parámetro	Valor
Densidad relativa del lodo	1.02
Densidad del agua (kg/m ³)	1000
Conc. Sólidos (%)	5

Fuente: Metcalf & Eddy, 1995.

$$\dot{Q}_{L.P.} = \frac{m_{SST_{eliminado}}}{\rho_A \cdot dr_L \cdot \% sol} = \frac{11\,497.9 \frac{kg}{d}}{1000 \frac{kg}{m^3} \cdot 1.02 \cdot 0.05} = 225.449 \frac{m^3}{d}$$

Paso 3. Determinar la masa y el caudal de los lodos a purgar en el sedimentador secundario.

Establecer los coeficientes cinéticos en función de las características del agua residual

Coeficientes cinéticos	Simbología	Valor	Unidades
Coeficiente de producción	Y	0.65	KgSSV/kgDBO
Coeficiente de descomposición endógena	k_d	0.056	d^{-1}
Coeficiente de producción observada	$Y_{abs} = Y / (1 + k_d \cdot \theta_c) = 0.52385$		KgSSV/kgDBO
Tiempo medio de retención celular	θ_c	4.3	d
Volumen del reactor ^a	V	48 355.987	m^3

Elaborado a partir de datos proporcionados por PTAR CE, SACMEX. (a) Dato calculado.

Estimar la concentración de DBO a la entrada del reactor

$$\text{Si: } m = \dot{Q} \cdot c \quad \rightarrow \quad c = \frac{m}{\dot{Q}}$$

$$DBO_{ent.rea} = \frac{m_{DBO_{ent.rea}}}{\dot{Q}} = \frac{43\,352.72 \frac{kg}{d}}{209\,433.6 \frac{m^3}{d}} = 0.20699 \frac{kg}{m^3} \left(\frac{1000\,g}{1\,kg} \right) = 207 \frac{g}{m^3}$$

Estimar la masa de sólidos volátiles

$$\begin{aligned} m_{SSV_{rea}} &= Y_{abs} \cdot \dot{Q}_{ent.rea} \cdot \frac{(DBO_{ent.rea} - DBO_{sol_e})}{1000 \frac{g}{kg}} \\ &= 0.52385 \frac{kgSSV}{kgDBO} \cdot (209\,433.6 - 225.449) \frac{m^3}{d} \cdot \frac{(207 - 2) \frac{g}{m^3}}{1000 \frac{g}{kg}} \\ &= 22\,466.71 \frac{kg}{d} \end{aligned}$$

Estimar la masa de sólidos suspendidos si SSV/SST= 80 %

$$m_{SST_{rea}} = \frac{m_{SSV_{rea}}}{80\%} = \frac{22\,466.71 \frac{kg}{d}}{0.8} = 28\,083.39 \frac{kg}{d}$$

Considerando los sólidos que escapan por el efluente, la cantidad de lodo purgado sería:

$$m_{SST_{purga}} = m_{SST_{rea}} - m_{SST_e} = 28\,083.39 \frac{kg}{d} - 3\,141.504 \frac{kg}{d} = 24\,941.89 \frac{kg}{d}$$

$$m_{SSV_{purga}} = m_{SSV_{rea}} - m_{SSV_e} = 22\,466.71 \frac{kg}{d} - 1\,047.168 \frac{kg}{d} = 21\,419.54 \frac{kg}{d}$$

Determinar el caudal de acuerdo con la concentración de SSr = 6250 mg/L

$$\dot{Q}_{L.S.} = \frac{m_{SST_{purga}}}{SS_r} = \frac{24\,941.89 \frac{kg}{d}}{6.250 \frac{kg}{m^3}} = 3\,990.702 \frac{m^3}{d}$$

La PTAR mezcla los lodos primarios y secundarios, por lo tanto:

$$m_{SST_{mezcla}} = m_{SST_{purga}} + m_{SST_{eliminado}} = 24\,941.89 \frac{kg}{d} + 11\,497.9 \frac{kg}{d} = 36\,439.79 \frac{kg}{d}$$

$$m_{SSV_{mezcla}} = m_{SSV_{purga}} + m_{SSV_{eliminado}} = 21\,419.54 \frac{kg}{d} + 7\,733.32 \frac{kg}{d} = 29\,152.86 \frac{kg}{d}$$

Paso 4. Calcular el flujo de alimentación al digestor después del espesamiento por gravedad y el caudal recirculado al proceso de tratamiento de agua.

Parámetro	Valor
Conc. Lodo (%)	4
Recuperación de sólidos (%)	85
Densidad relativa del lodo	1.03

Fuente: Metcalf & Eddy, 1995.

Calcular el caudal del lodo espesado:

$$\dot{Q}_{L.E.} = \frac{m_{SST_{mezcla}} \cdot \% \text{ rec. sólidos}}{\rho_L \cdot \% \text{ conc. sólidos}} = \frac{36\,439.79 \frac{kg}{d} \cdot 0.85}{1030 \frac{kg}{m^3} \cdot 0.04} = 751.791 \frac{m^3}{d}$$

$$\dot{m}_{L.E.} = \dot{Q}_{L.E.} \cdot \rho_{L.E.} = 751.791 \frac{m^3}{d} \cdot 1030 \frac{kg}{m^3} = 774\,344.7 \frac{kg}{d}$$

Calcular el caudal recirculado a la PTAR:

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{L.E.R.} &= (\dot{Q}_{L.P.} + \dot{Q}_{L.S.}) - \dot{Q}_{L.E.} = \left(225.449 \frac{m^3}{d} + 3\,990.702 \frac{m^3}{d} \right) - 751.791 \frac{m^3}{d} \\ &= 3\,464.36 \frac{m^3}{d} \end{aligned}$$

Estimar la masa de SST y SSV del caudal del lodo espesado que será alimentado al digestor.

$$m_{SST_{L.E.}} = m_{SST_{mezcla}} \cdot \% \text{ rec. sólidos} = 36\,439.79 \frac{kg}{d} \cdot 0.85 = 30\,973.82 \frac{kg}{d}$$

Si SSV/SST=80%

$$m_{SSV_{L.E.}} = m_{SST_{L.E.}} \cdot 80 \% = 2\,944.706 \frac{kg}{d} \cdot 0.80 = 24\,779.06 \frac{kg}{d}$$

Determinar la masa y concentraciones del caudal recirculado a planta

$$m_{SST_{L.E.R}} = m_{SST_{mezcla}} - m_{SST_{L.E.}} = 36\,439.79 \frac{kg}{d} - 30\,973.82 \frac{kg}{d} = 5\,465.97 \frac{kg}{d}$$

$$SST_{L.E.R} = \frac{m_{SST_{L.E.R}}}{Q_{L.E.R}} = \frac{5\,465.97 \frac{kg}{d}}{3\,464.36 \frac{m^3}{d}} = 1.5777 \frac{kg}{m^3} \left(\frac{1000\,g}{1\,kg} \right) = 1577.77 \frac{g}{m^3}$$

Si se considera que la fracción biodegradable de sólidos volátiles (%SSV_{Bio}) representa un 78.662 % (Tabla A), una relación de DBO con DBO última del 68 % y 1.42 de oxígeno consumido por DBO (Metcalf & Eddy, 2003), es posible estimar la DBO de los sólidos suspendidos que se recirculan a planta de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} DBO_{SST.R} &= (\%SSV_{Bio} \cdot SST_{L.E.R}) \cdot O_{2Consumido} \cdot \% \frac{DBO}{DBO_L} \\ &= 0.78662 \cdot 1577.77 \frac{mg}{L} \cdot 1.42 \frac{mg O_{2Consumido}}{mg\,DBO} \cdot 0.68 = 1\,198.411 \frac{mg}{L} \end{aligned}$$

Considerando que la DBO₅ total del sistema es la suma de la DBO soluble y la DBO de los sólidos suspendidos, la DBO₅ total del sistema es:

$$DBO_{5.R} = DBO_{SST.R} + DBO_{sol_e} = 1\,198.411 \frac{mg}{L} + 2 \frac{mg}{L} = 1\,200.471 \frac{mg}{L}$$

Si $m = \dot{Q} \cdot c$

$$\begin{aligned} m_{DBO.R} &= \dot{Q}_{L.E.R} \cdot DBO_{5.R} = 3\,464.36 \frac{m^3}{d} \cdot 1\,200.471 \frac{g}{m^3} = 4\,158\,876.064 \frac{g}{d} \left(\frac{1\,kg}{1000\,g} \right) \\ &= 4\,158.876 \frac{kg}{d} \end{aligned}$$

Paso 5. Determinar el flujo de alimentación al deshidratador después de la digestión anaerobia y el caudal recirculado al proceso de tratamiento de agua. En este paso se estima la cantidad de producción de biogás.

Parámetro	Valor
Destrucción de SSV (%)^a	40-55
Producción de biogás (m³/kg SSVD)^a	0.98
Concentración de DBO en el sobrenadante (mg/L)^b	4 000
Concentración de sólidos en el lodo digerido (%)^b	3
Concentración de sólidos en el sobrenadante (%)^b	0.5

Fuente: (a) WEF, 2012 & (b) Metcalf & Eddy, 1995.

Calcular los sólidos volátiles destruidos presentes en el lodo:

$$m_{SSV_D} = m_{SSV_{L.E.}} \cdot \% SSVD = 24\,779.06 \frac{kg}{d} \cdot 0.5 = 12\,389.53 \frac{kg}{d}$$

Calcular la cantidad de sólidos suspendidos totales en el lodo una vez digerido (no se considera todavía la distribución entre el sobrenadante y lo que realmente sale del digestor):

$$m_{SST_{L.Estabile}} = m_{SST_{L.E.}} - m_{SSV_D} = 30\,973.82 \frac{kg}{d} - 12\,389.53 \frac{kg}{d} = 18\,584.29 \frac{kg}{d}$$

Estimar la cantidad de biogás a partir de los SSV_D

$$\dot{Q}_{Biogás} = m_{SSV_D} \cdot Prod_{Biogás} = 12\,389.53 \frac{kg}{d} \cdot 0.98 \frac{m^3}{kgSSV_D} = 12\,141.7 \frac{m^3}{d}$$

De acuerdo con la densidad del biogás de 1.08 (WEF, 2018) tenemos:

$$\dot{m}_{Biogás} = \dot{Q}_{Biogás} \cdot \rho_{Biogás} = 12\,141.74 \frac{m^3}{d} \cdot 1.08 \frac{kg}{m^3} = 13\,113.08 \frac{kg}{d}$$

Haciendo un balance alrededor del digestor en función de los caudales másicos, el caudal de salida de los lodos digeridos sería:

$$\dot{m}_{L.D.} = \dot{m}_{L.E.} - \dot{m}_{Biogás} = 774\,344.7 \frac{kg}{d} - 13\,113.08 \frac{kg}{d} = 761\,231.6 \frac{kg}{d}$$

Estimar la cantidad de SST tanto en el lodo digerido como en el sobrenadante planteando lo siguiente:

$$\dot{m}_{L.D.} = \frac{m_{SST_{L.D.}}}{\% Conc_{L.D.}} + \frac{m_{SST_S}}{\% Conc_S}$$

$$m_{SST_{L.D.}} = m_{SST_{L.Estabile}} - m_{SST_S} \quad \text{ó} \quad m_{SST_S} = m_{SST_{L.Estabile}} - m_{SST_{L.D.}}$$

Resolviendo para $m_{SST_{L.D.}}$

$$761\,231.6 \frac{kg}{d} = \frac{m_{SST_{L.D.}}}{0.03} + \frac{18\,584.29 \frac{kg}{d} - m_{SST_{L.D.}}}{0.005}$$

$$m_{SST_{L.D.}} = 17\,733.76 \frac{kg}{d}$$

$$m_{SST_S} = m_{SST_{L.Estabile}} - m_{SST_{L.D.}} = 18\,584.29 \frac{kg}{d} - 17\,733.76 \frac{kg}{d} = 850.53 \frac{kg}{d}$$

Calcular el caudal del sobrenadante y lodo digerido considerando una densidad de 1030 kg/m³

$$\dot{Q}_S = \frac{m_{SST_S}}{\rho_L \cdot \% \text{ conc. sólidos}} = \frac{850.53 \frac{kg}{d}}{1030 \frac{kg}{m^3} \cdot 0.005} = 165.1515 \frac{m^3}{d}$$

$$\dot{m}_S = \dot{Q}_S \cdot \rho_L = 165.1515 \frac{m^3}{d} \cdot 1030 \frac{kg}{m^3} = 170\,106.045 \frac{kg}{d}$$

$$\dot{Q}_{L.D.} = \frac{m_{SST_{L.D.}}}{\rho_L \cdot \% \text{ conc. sólidos}} = \frac{17\,733.76 \frac{kg}{d}}{1030 \frac{kg}{m^3} \cdot 0.03} = 573.908 \frac{m^3}{d}$$

$$\dot{m}_{L.D.} = \dot{Q}_{L.D.} \cdot \rho_L = 573.908 \frac{m^3}{d} \cdot 1030 \frac{kg}{m^3} = 591\,125.2 \frac{kg}{d}$$

Estimar DBO del caudal de recirculación (sobrenadante) al proceso de tratamiento de agua.

$$m_{DBO.RD} = \dot{Q}_S \cdot DBO_{S.R} = 165.1515 \frac{m^3}{d} \cdot 4\,000 \frac{g}{m^3} = 660\,606 \frac{g}{d} \left(\frac{1\,kg}{1000\,g} \right) = 660.606 \frac{kg}{d}$$

Paso 6. Determinar el flujo de biosólidos obtenidos en el deshidratador y el caudal recirculado al proceso de tratamiento de agua.

Parámetro	Valor
Concentración de sólidos en la torta (%)	22
Densidad relativa del lodo	1.06
Captura de sólidos (%)	93
Concentración de DBO en el filtrado (mg/L)	1500
Polímero adicionado (kg-polímero/ton-lodoseco)	4.5

Fuente: Metcalf & Eddy, 1995.

Calcular la cantidad de polímero a adicionar para el acondicionamiento de los lodos estabilizados:

$$m_{polímero} = m_{SST_{L.D.}} \cdot P_{adicionado} = 17\,733.76 \frac{kg}{d} \left(\frac{1\,ton}{1000\,kg} \right) \cdot 4.5 \frac{kgpol}{tonlodoseco} = 79.8019 \frac{kg}{d}$$

Determinar las características de la torta

$$\begin{aligned} m_{SST_{L.Des.}} &= (m_{SST_{L.D.}} + m_{polímero}) \cdot \% \text{ captura} = \left(17\,733.76 \frac{kg}{d} + 79.8019 \frac{kg}{d} \right) \cdot 0.93 \\ &= 16\,566.61 \frac{kg}{d} \end{aligned}$$

$$\dot{Q}_{L.Des.} = \frac{m_{SST_{L.Des.}}}{\rho_L \cdot \% \text{ conc. sólidos}} = \frac{16\,566.61 \frac{kg}{d}}{1060 \frac{kg}{m^3} \cdot 0.22} = 71.0403 \frac{m^3}{d}$$

Determinar las características del filtrado

$$\dot{Q}_F = \dot{Q}_{L.D.} - \dot{Q}_{L.Des.} = 573.908 \frac{m^3}{d} - 71.0403 \frac{m^3}{d} = 502.8677 \frac{m^3}{d}$$

$$m_{DBO.FR} = \dot{Q}_F \cdot DBO_{F.R} = 502.8677 \frac{m^3}{d} \cdot 1500 \frac{g}{m^3} = 754\,301.55 \frac{g}{d} \left(\frac{1\,kg}{1000\,g} \right) = 754.3016 \frac{kg}{d}$$

$$m_{SST.FR} = m_{SST.L.D.} \cdot (1 - \% \text{ captura}) = 17\,733.76 \frac{kg}{d} \cdot (1 - 0.93) = 1\,241.363 \frac{kg}{d}$$

Paso 7. Elaborar una tabla con las características de los flujos de recirculación

Operación	Caudal (m ³ /d)	DBO (kg/d)	SST (kg/d)
Espesador	3 464.36	4 158.876	5 465.97
Digestor	165.1515	660.606	850.53
Deshidratador	502.8677	754.3016	1 241.363
Total	4 132.379	5 573.784	7 557.863

Elaboración propia.

Paso 8. Preparar la segunda iteración comenzando con recalculando la masa en el influente considerando la masa calculada en el paso 1 y la masa total recirculada.

$$m_{DBO_{i2}} = m_{DBO_i} + m_{DBO_{T,R}} = 47\,122.56 \frac{kg}{d} + 5\,573.784 \frac{kg}{d} = 52\,696.34 \frac{kg}{d}$$

SST:

$$m_{SST_{i2}} = m_{SST_i} + m_{SST_{T,R}} = 38\,326.34 \frac{kg}{d} + 7\,557.863 \frac{kg}{d} = 45\,884.2 \frac{kg}{d}$$

SSV:

Como la fracción volátil en el caudal de retorno es mayor al 50 % puede considerarse la misma que en la primera iteración, si fuese menor al 50 %, tendría que incluirse en el nuevo cálculo.

Paso 9. Recalculando desde el paso 2

$$m_{DBO_{eliminado\,2}} = m_{DBO_{i2}} \cdot \% E_{remoción} = 52\,696.34 \frac{kg}{d} \cdot 8\% = 4\,215.708 \frac{kg}{d}$$

$$m_{SST_{eliminado\,2}} = m_{SST_{i2}} \cdot \% E_{remoción} = 45\,884.2 \frac{kg}{d} \cdot 30\% = 13\,765.26 \frac{kg}{d}$$

Calcular DBO y SST que entraran en el reactor aerobio

$$m_{DBO_{ent.rea2}} = m_{DBO_{i2}} - m_{DBO_{eliminado\,2}} = 52\,696.34 \frac{kg}{d} - 4\,215.708 \frac{kg}{d}$$

$$= 48\,480.64 \frac{kg}{d}$$

$$m_{SST_{ent.rea2}} = m_{SST_{i2}} - m_{SST_{eliminado\ 2}} = 45\,884.2 \frac{kg}{d} - 13\,765.26 \frac{kg}{d} = 32\,118.94 \frac{kg}{d}$$

$$\dot{Q}_{L.P.2} = \frac{m_{SST_{eliminado\ 2}}}{\rho_A \cdot dr_L \cdot \% \text{ sol}} = \frac{13\,765.26 \frac{kg}{d}}{1000 \frac{kg}{m^3} \cdot 1.02 \cdot 0.05} = 269.9071 \frac{m^3}{d}$$

Para el reactor aerobio

$$DBO_{ent.rea2} = \frac{m_{DBO_{ent.rea2}}}{(\dot{Q}_i + \dot{Q}_{T.R})} = \frac{48\,480.64 \frac{kg}{d}}{\left(209\,433.6 \frac{m^3}{d} + 4\,132.379 \frac{m^3}{d}\right)} = 0.227 \frac{kg}{m^3} \left(\frac{1000\ g}{1\ kg}\right)$$

$$= 227 \frac{g}{m^3}$$

$$m_{SSV_{rea2}} = Y_{abs} \cdot \dot{Q}_{ent.rea} \cdot \frac{(DBO_{ent.rea2} - DBO_{sol_e})}{1000 \frac{g}{kg}}$$

$$= 0.52385 \frac{kgSSV}{kgDBO} \cdot ((209\,433.6 + 4\,132.379) - 269.9071) \frac{m^3}{d}$$

$$\cdot \frac{\left(227 \frac{g}{m^3} - 2\right) \frac{g}{m^3}}{1000 \frac{g}{kg}} = 25\,140.43 \frac{kg}{d}$$

Estimar la masa de sólidos suspendidos si SSV/SST= 80 %

$$m_{SST_{rea2}} = \frac{m_{SSV_{rea2}}}{80\ \%} = \frac{25\,140.43 \frac{kg}{d}}{0.8} = 31\,425.54 \frac{kg}{d}$$

Considerando los sólidos que escapan por el efluente, la cantidad de lodo purgado sería:

$$m_{SST_{purga2}} = m_{SST_{rea2}} - m_{SST_e} = 31\,425.54 \frac{kg}{d} - 3\,141.504 \frac{kg}{d} = 28\,284.04 \frac{kg}{d}$$

$$m_{SSV_{purga2}} = m_{SSV_{rea2}} - m_{SSV_e} = 25\,140.43 \frac{kg}{d} - 1\,047.168 \frac{kg}{d} = 24\,093.26 \frac{kg}{d}$$

Determinar el caudal de acuerdo con la concentración de SSr.

Primero se debe de calcular la concentración de SSVLM a partir de la siguiente ecuación:

$$SSVLM = \frac{\theta_c \cdot Q_T \cdot Y \cdot (DBO_{ent. rea_2} - DBO_{sol_e})}{V \cdot (1 + K_d \cdot \theta_c)}$$

$$= \frac{4.3 \text{ d} \cdot 213 \, 556.7 \frac{\text{m}^3}{\text{d}} \cdot 0.65 \frac{\text{kgSSV}}{\text{kgDBO}} \cdot (227 - 2) \frac{\text{g}}{\text{m}^3}}{48 \, 355.987 \text{ m}^3 (1 + 0.056 \text{d}^{-1} (4.3 \text{d}))} = 2 \, 238.337 \frac{\text{mg}}{\text{L}}$$

$$SSLM = \frac{SSVLM}{0.8} = \frac{2 \, 238.337 \frac{\text{mg}}{\text{L}}}{0.8} = 2 \, 797.921 \frac{\text{mg}}{\text{L}}$$

Relacionado SSLM y SSr tenemos SSr=6 995.2 mg/L

$$\dot{Q}_{L.S.2} = \frac{m_{SST_{purg a_2}}}{SS_r} = \frac{28 \, 284.04 \frac{\text{kg}}{\text{d}}}{6.9952 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} = 4 \, 043.35 \frac{\text{m}^3}{\text{d}}$$

$$m_{SST_{mezcla_2}} = m_{SST_{purg a_2}} + m_{SST_{eliminado_2}} = 28 \, 284.04 \frac{\text{kg}}{\text{d}} + 13 \, 765.26 \frac{\text{kg}}{\text{d}} = 42 \, 049.3 \frac{\text{kg}}{\text{d}}$$

$$m_{SSV_{mezcla_2}} = m_{SSV_{purg a_2}} + m_{SSV_{eliminado}} = 24 \, 093.26 \text{ kg/d} + 7 \, 733.32 \frac{\text{kg}}{\text{d}} = 31 \, 826.58 \frac{\text{kg}}{\text{d}}$$

Completar el resto del cálculo de la misma manera que la primera iteración hasta elaborar la tabla resumen con los caudales recirculados. A continuación, se muestra la tabla resumen:

Operación	Caudal (m ³ /d)	DBO (kg/d)	SST (kg/d)
Espesador	3 445.82	4 797.872	6 307.549
Digestor	161.609	646.438	832.290
Deshidratador	606.371	909.557	1 496.869
Total	4 213.80	6 353.867	8 636.708

Elaboración propia.

Sacar el porcentaje del incremento absoluto entre la primera y segunda iteración.

Operación	Variación			% Variación		
	Caudal	DBO	SST	Caudal	DBO	SST
Espesador	18.54	638.996	841.579	0.535%	15.265%	15.397%
Digestor	3.542	14.168	18.24	2.145%	2.145%	2.145%
Deshidratador	103.50	155.255	255.506	20.583%	20.583%	20.583%
Total	81.42	780.083	1 078.845	1.97%	13.996%	14.274%

Elaboración propia.

Paso 9. Realizar las iteraciones que sean necesarias hasta que el incremento entre la iteración anterior y la última calculada sea menor a 0.5 %.

A continuación, se muestran los resultados de las iteraciones siguientes:

Operación	Caudal (m ³ /d)	DBO (kg/d)	SST (kg/d)
Espesador	3 442.303	4 888.101	6 426.350
Digestor	161.062	644.248	829.469
Deshidratador	621.025	931.538	1 533.043
Total	4 224.390	6 463.887	8 788.862

Elaboración propia.

Operación	Variación			% Variación		
	Caudal	DBO	SST	Caudal	DBO	SST
Espesador	3.517	90.22	118.8	0.102%	1.88%	1.883%
Digestor	0.547	2.191	2.821	0.339%	0.339%	0.339%
Deshidratador	14.653	21.98	36.174	2.416%	2.416%	2.416%
Total	10.588	110.018	152.152	0.251%	1.731%	1.761%

Elaboración propia.

Operación	Caudal (m ³ /d)	DBO (kg/d)	SST (kg/d)
Espesador	3 441.791	4 900.826	6 443.104
Digestor	160.985	643.938	829.070
Deshidratador	623.092	934.638	1 538.145
Total	4 225.868	6 479.402	8 810.319

Elaboración propia.

Operación	Variación			% Variación		
	Caudal	DBO	SST	Caudal	DBO	SST
Espesador	0.511	12.724	16.753	0.015%	0.261%	0.261%
Digestor	0.077	0.309	0.398	0.048%	0.048%	0.048%
Deshidratador	2.066	3.099	5.101	0.332%	0.333%	0.333%
Total	1.477	15.515	21.457	0.034%	0.240%	0.244%

Elaboración propia.

Como se observa, el porcentaje de variación es menor al 0.5 % en la cuarta iteración. Los datos que se tomarán para los siguientes cálculos serán a partir de los obtenidos en la cuarta iteración. Se plantea también observar el comportamiento de la producción de biogás al variar la cantidad de sólidos volátiles destruidos de 40-55 %. En esta memoria de cálculo se desarrolló la metodología para una destrucción de 50 % SSV. Los resultados para 45, 50 y 55 % solo se muestran en tablas del [capítulo 3](#).

ANEXO 3. Dimensionamiento de equipos

Espesador

Paso 1. Establecer el flujo y la carga de sólidos, así como los parámetros de operación.

Parámetro	Simbología	Valor
Flujo de lodo (m ³ /d)	Q _{L.M.}	4 327.909
Carga de sólidos (SST _{L.M.}) (kg/d)	CS _{L.M.}	42 949.153
Densidad del lodo mezcla (kg/m ³)	ρ _{L.M.}	1030
Carga superficial de sólidos (kg/m ² d) ^a	C _{SS}	25-70

Elaboración propia. (a) Metcalf & Eddy, 2003.

Paso 2. Calcular la concentración de sólidos de la mezcla de lodos de la siguiente manera:

$$\% \text{ Sólidos}_{L.M.} = \frac{CS_{L.M.}}{Q_{L.M.} \cdot \rho_{L.M.}} = \frac{42\,949.153 \frac{kg}{d}}{4\,327.909 \frac{m^3}{d} \cdot 1030 \frac{kg}{m^3}} \cdot 100 = 0.9635 \%$$

Paso 3. Calcular el área de la superficie requerida basada en la carga superficial de lodos. La carga superficial de lodos se selecciona a partir de la concentración de sólidos, seleccionamos 60 kg/m²d.

$$A_S = \frac{CS_{L.M.}}{C_{SS}} = \frac{42\,949.153 \frac{kg}{d}}{60 \frac{kg}{m^2 d}} = 715.8192 \text{ m}^2$$

Paso 4. Calcular la carga hidráulica.

$$C_H = \frac{Q_{L.M.}}{A_S} = \frac{4\,327.909 \frac{m^3}{d}}{715.8192 \text{ m}^2} = 6.0461 \text{ m}^3/\text{m}^2 \text{ d}$$

Este factor debe de estar entre 6 y 12 m³/m²d para una mezcla de lodo primario y secundario (Metcalf & Eddy, 2003). Si la carga hidráulica es demasiado alta, el arrastre de sólidos puede ser excesivo, si por el contrario la carga hidráulica fuese demasiado baja, los tiempos de retención se alargan y pueden ocurrir condiciones sépticas y ocasionar sólidos flotantes y malos olores.

Paso 5. Determinar el diámetro del espesador.

Para un cilindro:

$$A_S = \pi r^2 \rightarrow D = \sqrt{\frac{4 \cdot A_S}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 715.8192 \text{ m}^2}{\pi}} = 30.18956 \text{ m}$$

Considerando que el diámetro recomendado típico para unidades de espesamiento es de 20 metros, se consideran tres unidades de espesamiento, de esta manera no aumenta el tiempo de retención. Entonces:

$$D = \sqrt{\frac{4 \cdot A_S}{3 \cdot \pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 715.8192 \text{ m}^2}{3 \cdot \pi}} = 17.42995 \text{ m} \rightarrow 17.6 \text{ m}$$

Finalmente, los tanques circulares se diseñan con una profundidad de 3 a 4 m. Con una altura de 4 m el tiempo de retención por unidad se obtiene como:

$$TRH = \frac{H}{C_H} = \frac{4 \text{ m}}{6.0461 \frac{\text{m}^3}{\text{d}}} = 0.66158 \text{ d} \left(\frac{24 \text{ h}}{1 \text{ d}} \right) = 15.878 \text{ h}$$

Por lo general, dependiendo de la temperatura, se recomiendan tiempos de retención de 1 a 2 días para sólidos primarios y menores a 18 h para lodos activados (WEF, 2018), por lo que el tiempo de retención calculado está dentro de lo recomendado.

Digestor

Paso 1. Establecer los parámetros de operación

Parámetro	Simbología	Valor
Flujo de lodo (m ³ /d)	Q _{L.E.}	886.086
SST _{L.M.} (kg/d)	CS _{L.M.}	36 506.780
Densidad del lodo espesado (kg/m ³)	ρ _{L.E.}	1030
Tiempo de retención (d) ^a	TRH	15
Potencia disipada por unidad (W/m ³)	P _{unidad}	6.2

Elaboración propia. (a) WEF, 2012.

Paso 2. Calcular el volumen del digestor

El flujo de lodo (Q_L) de 886.086 m³/d se divide en 2 para calcular el volumen de cada digestor.

$$V = Q_L \cdot TRH = 4433.043 \frac{\text{m}^3}{\text{d}} (15 \text{ d}) = 6 645.651 \text{ m}^3$$

Se recomienda añadir un 20% del volumen calculado anteriormente para el biogás generado.

$$V_T = V \cdot 1.2 = 6 645.651 \text{ m}^3 \cdot 1.2 = 7 974.781 \text{ m}^3$$

Paso 3. Calcular las dimensiones del digestor tipo huevo.

Dado que el digestor tiene una geometría en forma de huevo se calculará como un esferoide, ya que es la geometría más semejante.

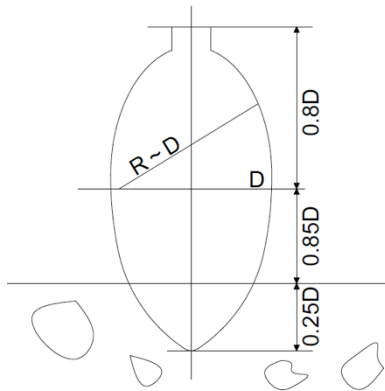
El volumen de un esferoide se calcula mediante la siguiente ecuación

$$V = \frac{4}{3}\pi a^2 b$$

Siendo a y b los semiejes, estando situado b en el eje de coordenadas z , para nuestro caso $a =$ radio y $b =$ altura/2

$$V = \frac{2}{3}\pi r^2 h$$

Según Deublein and Steinhauser, el diámetro y la altura de un digestor tipo huevo está relacionado en $h = 1.9(D)$, como se puede apreciar en la siguiente imagen.



$$h = 1.9(D)$$

$$D = 2r$$

$$h = 1.9(2r)$$

$$b = \frac{h}{2} = \frac{1.9(2r)}{2} = 1.9r$$

$$V = \frac{2}{3}\pi r^2 1.9r = \frac{19}{15}\pi r^3$$

Se despeja el radio ya que se conoce el volumen.

$$r = \sqrt[3]{\frac{15(V)}{38(\pi)}} = \sqrt[3]{\frac{15(7974.781 \text{ m}^3)}{38(\pi)}} = 10.0067 \text{ m}$$

$$D = 2r = 2(10.0067) = 20.0134 \text{ m}$$

$$h = 1.9(20.0134 \text{ m}) = 38.0254 \text{ m}$$

Paso 4. Calcular el área del digestor

$$A = 2\pi a \frac{\left[b^2 \text{Arctg} \left(\frac{\sqrt{b^2 - a^2}}{a} \right) + a\sqrt{b^2 - a^2} \right]}{\sqrt{b^2 - a^2}}, b > a$$

$$a = 10.0067 \text{ m}$$

$$b = 1.9(r) = 1.9(10.0067 \text{ m}) = 19.0127 \text{ m}$$

$$A = 2\pi(10.00) \frac{\left[10.00^2 \text{Arctg} \left(\frac{\sqrt{10.00^2 - 19.01^2}}{10.00} \right) + (10.00)\sqrt{10.00^2 - 19.01^2} \right]}{\sqrt{10.00^2 - 19.01^2}}$$

$$= 2058.30 \text{ m}^2$$

Paso 5. Estimar los requerimientos de mezcla

A partir de la potencia disipada por unidad que va desde los 5.2 a 40 W/m³ (WEF, 2010) es posible determinar la potencia requerida a partir de la siguiente ecuación.

$$P_{unidad} = \frac{P}{V} \rightarrow P = P_{unidad} \cdot V = 6.2 \frac{W}{m^3} \cdot 7\,974.781 \, m^3 = 49\,425.04 \, W \left(\frac{1 \, kW}{1000 \, W} \right)$$

$$= 49.425 \, kW \left(\frac{1 \, HP}{0.7457 \, kW} \right) = 66.28 \, HP$$

Se selecciona un motor de 75 HP.

Tanques de retención (pasteurización)

Paso 1. Establecer los parámetros de operación

Parámetro	Simbología	Valor
Flujo de lodo (m ³ /d)	Q _{L.E.}	711.035
Sobrediseño (%)	% S	15
Relación longitud-diámetro	L/D	2
Tiempo de retención (h)	TRH	0.5

Elaboración propia.

Paso 2. Calcular el volumen del tanque en función del caudal y el tiempo de retención.

$$V_{T.R.} = Q_L \cdot TRH = 711.035 \frac{m^3}{d} \left(\frac{1 \, d}{24 \, h} \right) \cdot 0.5 \, h = 14.81323 \, m^3$$

Paso 3. Considerar el 15 % de sobrediseño en el volumen del tanque

$$V_T = V_{T.R.} \cdot (1 + 0.15) = 14.81323 \, m^3 (1 + 0.15) = 17.03521 \, m^3$$

Paso 4. Calcular el diámetro de acuerdo con la L/D establecida.

$$D = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot V_T}{2 \cdot \pi}} = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot 17.03521 \, m^3}{2 \cdot \pi}} = 2.21348 \, m$$

Paso 5. Calcular la altura del tanque:

$$L = 2 \cdot D = 2 \cdot 2.21348 \, m = 4.42695 \, m$$

Paso 6. Establecer el diámetro y la altura a placas comerciales.

$$D = 2.1336 \, m$$

$$L = 4.877 \, m$$

Paso 7. Calcular el área y el volumen para rectificar que sea suficiente al calculado en el paso 3.

$$A_T = \pi \cdot r^2 = \pi \cdot \left(\frac{2.1336 \text{ m}}{2}\right)^2 = 3.57532 \text{ m}^2$$

$$V_T = L \cdot \pi \cdot r^2 = 4.877 \text{ m} \cdot \pi \cdot \left(\frac{2.1336 \text{ m}}{2}\right)^2 = 17.43687 \text{ m}^3$$

El volumen es ligeramente mayor que el calculado en el paso 3, por lo que las medidas seleccionadas son correctas. Para comprobar el resultado se puede recalcular la L/D

$$L/D = 4.877 \text{ m} / 2.1336 \text{ m} = 2.2858$$

Este valor está dentro de los recomendados de L/D = 2 a 3

Deshidratador

Paso 1. Establecer los parámetros de operación

Parámetro	Simbología	Valor
Flujo de lodo (m ³ /d)	Q _{L.E.}	711.035
SST _{L.D.} (kg/d)	CS _{L.M.}	21 971.010
Densidad del biosólido (kg/m ³)	ρ _{L.T.}	1030
Días de operación (d/sem)	D _{op}	7
Tiempo de operación (h/d)	t _{op}	8
Carga por metro de ancho de banda (kg/h) ^a	C _B	180-320
Agua de lavado (% del caudal de alimentación) ^b	A _L	50
Número de bandas	#B	2

Elaboración propia. (a) Metcalf & Eddy, 2003 (b) WEF, 2012.

Paso 2. Calcular la cantidad de lodo que se procesaría por el tiempo de operación establecido de 8 horas:

$$t_{H.L.} = \frac{SST_{L.D.}}{t_{op}} = \frac{21\,971.010 \frac{\text{kg}}{\text{d}_{op}}}{8 \frac{\text{h}}{\text{semana}}} = 2\,746.376 \frac{\text{kg}}{\text{h}_{op}}$$

Paso 3. Calcular el ancho de la banda del filtro.

$$W_B = \frac{t_{H.L.}}{C_B} = \frac{2\,746.376 \frac{\text{kg}}{\text{h}_{op}}}{300 \frac{\text{kg}}{\text{h}}} = 9.1546 \text{ m}$$

Los filtros banda comerciales solo se manejan con un ancho de 2-3 m, por lo que se debe de ajustar el ancho de banda calculado con más equipos:

$$\#eq = \frac{W_B}{W_{st}} = \frac{9.1546 \text{ m}}{3 \text{ m}} = 3.051 \text{ equipos} \rightarrow 3 \text{ equipos}$$

Paso 4. Calcular el flujo de agua de lavado. Se considera que el equipo tiene recuperación del agua de lavado. El agua de lavado representa entre el 25 % y el 50 % de la alimentación del equipo (WEF, 2012), por lo tanto:

$$Q_{A.L.} = 711.035 * 0.5 = 355.517 \frac{m^3}{d} \text{ (por los 3 equipos)}$$

Acondicionamiento

En el balance de materia se calcularon las cantidades de polímero seco por kg de lodo seco, como el polímero se adiciona como disolución, a continuación, se muestran los cálculos correspondientes al dimensionamiento del tanque de dilución para preparar la solución stock.

Paso 1. Establecer los parámetros de operación.

Parámetro	Simbología	Valor
Masa de polímero	$m_{polímero}$	98.869
% Peso de la disolución stock^a	$\% P/P_{Stock}$	0.5 %
% Peso de la disolución stock^a	$\% P/P_{Stock}$	0.05 %
Densidad del agua (kg/m³)	ρ_A	1000

Elaboración propia. (a) CONAGUA MAPAS, 2015.

Paso 2. Calcular la masa adicionada de agua para el %P/P establecido.

$$\begin{aligned} \% \frac{P}{P} &= \frac{m_{polímero}}{m_{AStock} + m_{polímero}} \cdot 100 \rightarrow m_{AStock} = \frac{m_{polímero} - \% \frac{P}{P} \cdot m_{polímero}}{\% \frac{P}{P}} \\ &= \frac{98.869 \frac{kg}{d} - \left(0.005 \cdot 98.869 \frac{kg}{d}\right)}{0.005} = 19\,674.93 \frac{kg}{d} \end{aligned}$$

Paso 3. Calcular la masa adicionada de dilución de agua para el %P/P establecido.

La solución stock de 0.5 % en peso debe ser diluida a 0.05 % en peso para adicionarse al lodo, el agua será agregada en línea y pasará por un mezclador estático.

$$\begin{aligned} \% \frac{P}{P} &= \frac{m_{polímero}}{m_A + m_{polímero}} \cdot 100 \rightarrow m_A = \frac{m_{polímero} - \% \frac{P}{P} \cdot m_{polímero}}{\% \frac{P}{P}} \\ &= \frac{98.869 \frac{kg}{d} - \left(0.0005 \cdot 98.869 \frac{kg}{d}\right)}{0.0005} = 197\,639.1 \frac{kg}{d} \end{aligned}$$

El cálculo anterior nos da la masa de agua que se tendría que agregar si se quisiera preparar la solución a 0.05 % peso, sin embargo, la solución primero se prepara a 0.5 % y luego se diluye a 0.05 %, por lo que la masa adicionada es una diferencia:

$$m_{Adilución} = m_A - m_{AStock} = 197\,639.1 \frac{kg}{d} - 19\,674.93 \frac{kg}{d} = 177\,964.2 \frac{kg}{d}$$

Paso 4. Calcular el volumen del tanque mezclador.

El volumen del tanque esta dado por el volumen de agua y polímero. Se considera que la densidad es de 1 000 kg/m³

$$V_T = \frac{m_{polímero} + m_{AStock}}{\rho_A} = \frac{98.869 \frac{kg}{d} + 19\,674.93 \frac{kg}{d}}{1000 \frac{kg}{m^3}} = 19.7738 m^3$$

Los tanques se fabrican de plástico o de fibra de vidrio, por lo que se selecciona un tanque comercial.

Cálculo de tuberías y bombas

Se calcularon las tuberías y equipos de bombeo para el desplazamiento del lodo a las diferentes etapas del tratamiento, considerando las distancias propuestas en el plano de localización general (PLG), los planos isométricos, las válvulas requeridas en el DTI y caídas de presión en los intercambiadores de calor. Las tuberías fueron calculadas por tramos, ya que en algunos casos el flujo converge en un punto y posteriormente se derivan las líneas a los equipos correspondientes.

Se presenta la memoria de cálculo de la bomba BL-101, las otras bombas fueron calculadas de la misma forma tomando en consideración sus alturas, perdidas de fricción, energía cinética y de flujo correspondientes a los accesorios y distancias presentadas en los isométricos.

Para el cálculo de las tuberías se tomó como referencia las velocidades recomendadas para lodos que va de 1 a 3 m/s. Las potencias de las bombas se calcularon como una red de tubería.

Cálculo para bomba de cárcamo de lodos a espesadores (BL-101)

Establecer los datos del fluido

Parámetro	Valor
Caudal (Q)	180.329 m ³ /h = 0.050 m ³ /s
Temperatura (T)	18°C
Concentración (SST)	<1%
Densidad (ρ)	1030 kg/m ³
Viscosidad (μ)	1.05E-03 Kg/ m·s

Elaboración propia.

Salidas	Z (m)	Q m ³ /s	P (psig)	P abs (kgf/m ²)	DN (in)	DI (m)	S (m ²)	v (m/s)
EG-101(3)	4	0.017	0	7953.11	5	0.128	0.0129	1.294
EG-102 (5)	4	0.017	0	7953.11	5	0.128	0.0129	1.294
EG-103 (6)	4	0.017	0	7953.11	5	0.128	0.0129	1.294
CI-101 (1)	-7	0.050	0	7953.11	8	0.203	0.0323	1.552

Elaboración propia.

Cálculo del ramal 4 → 6

Calcular la tubería.

$$Q_{4 \rightarrow 6} = 0.017 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$\text{Velocidad recomendada} = 1.5 \text{ m/s}$$

Se calcula el área y el diámetro con la velocidad recomendada.

$$S = \frac{Q}{v} = \frac{0.017 \text{ m}^3/\text{s}}{1.5 \text{ m/s}} = 0.011 \text{ m}^2$$

$$D = \sqrt{\frac{4 * S}{\pi}} = \sqrt{\frac{4(0.011 \text{ m}^2)}{\pi}} = 0.119 \text{ m} = 4.687 \text{ in}$$

Se elige el diámetro de 5 in dado que es el más próximo.

Todas las tuberías son cédula 40 y los diámetros internos se tomaron del apéndice B-16 del libro “flujo de fluidos en válvulas, accesorios y tuberías” CRANE.

Diámetro nominal =	5 in
Diámetro interno =	0.128 m

Se recalcula el área y la velocidad

$$S = \frac{\pi}{4} * D^2 = \frac{\pi}{4} (0.128 \text{ m})^2 = 0.013 \text{ m}^2$$

$$v = \frac{Q}{S} = \frac{0.017 \text{ m}^3/\text{s}}{0.013 \text{ m}^2} = 1.294 \text{ m/s}$$

$$Re = \frac{D * v * \rho}{\mu} = \frac{(0.128 \text{ m})(1.294 \text{ m/s})(1030 \text{ kg/m}^3)}{1.05E - 03 \text{ kg/m} \cdot \text{s}} = 1.62E + 05$$

Se eligió una rugosidad de 4.5E-05 m, correspondiente al acero comercial

Se calcula la aspereza relativa

$$\frac{\epsilon}{D} = \frac{4.5E - 05 \text{ m}}{0.128 \text{ m}} = 0.00035$$

Se lee de la gráfica de Moody el factor de fricción f

$$f = 0.018$$

Cálculo de la energía potencial

$$EP = Z_6 \frac{g}{gc} = 4 \frac{kgf \cdot m}{kg}$$

Cálculo de la energía cinética

$$EC = \frac{u_6^2}{2gc} = \frac{(1.294 \frac{m}{s})^2}{2(9.81 \frac{kg \cdot m}{kgf \cdot s^2})} = 0.085 \frac{kgf \cdot m}{kg}$$

Cálculo de la energía de flujo

$$EF = \frac{P_6}{\rho} = \frac{7953.11 \text{ kgf} \cdot \text{m}^2}{1030 \text{ kg/m}^3} = 7.721 \frac{kgf \cdot m}{kg}$$

Cálculo de las pérdidas por fricción

$$H_{fs\ 4 \rightarrow 6} = \frac{K_{T\ 4 \rightarrow 6} \cdot u_6^2}{2gc}$$

Accesorios	Cantidad	L/D	Ki	K
Codo 90°	5	30	0.48	2.4
Válvula de compuerta totalmente abierta	1	13	0.2	0.2
Tee	1/3	60	0.95	0.317
Salida	1			1
K accesorios =				3.917

Elaboración propia con datos del CRANE.

Tramo recto = 39.3 m

$$\frac{L}{D} = \frac{39.3 \text{ m}}{0.128 \text{ m}} = 306.567$$

K de la tubería

$$K_{tubería} = \frac{L}{D} * f = 306.567(0.018) = 5.518$$

$$K_{T\ 4 \rightarrow 6} = K_{tubería} + K_{accesorios} = 3.917 + 5.518 = 9.435$$

$$H_{fs\ 4 \rightarrow 6} = \frac{K_{T\ 4 \rightarrow 6} \cdot u_6^2}{2gc} = \frac{9.435(1.294 \text{ m/s})^2}{2(9.81 \frac{kg \cdot m}{kgf \cdot s^2})} = 0.805 \frac{kgf \cdot m}{kg}$$

Energía total del ramal 4 → 6

$$\begin{aligned}
 E_{T\ 4 \rightarrow 6} &= EP + EC + EF + H_{fs\ 4 \rightarrow 6} = (4 + 0.085 + 7.721 + 0.805) \frac{kgf \cdot m}{kg} \\
 &= 12.612 \frac{kgf \cdot m}{kg}
 \end{aligned}$$

Para los siguientes ramales solo se presentan los datos de las energías.

Cálculo del ramal 4 → 5

$$\begin{aligned}
 EP &= 4 \frac{kgf \cdot m}{kg} \\
 EC &= 0.085 \frac{kgf \cdot m}{kg} \\
 EF &= 7.721 \frac{kgf \cdot m}{kg} \\
 H_{fs\ 4 \rightarrow 5} &= 0.452 \frac{kgf \cdot m}{kg} \\
 E_{T\ 4 \rightarrow 5} &= 12.259 \frac{kgf \cdot m}{kg}
 \end{aligned}$$

Energía total en el punto 4

$$E_{T\ 4} = E_{T\ 4 \rightarrow 5} + E_{T\ 4 \rightarrow 6} = (12.612 + 12.259) \frac{kgf \cdot m}{kg} = 24.871 \frac{kgf \cdot m}{kg}$$

Cálculo del ramal 2 → 3

El ramal 2 → 3 es exactamente igual que el ramal 4 → 5

$$E_{T\ 2 \rightarrow 3} = 12.259 \frac{kgf \cdot m}{kg}$$

Cálculo del ramal 2 → 4

Este ramal es solo un tramo de tubería horizontal, si se realiza el balance de energía, la energía potencial, cinética y de flujo serán cero, se realiza el cálculo de las pérdidas por fricción y se suma la energía en el punto 4

Pérdidas por fricción

$$\begin{aligned}
 H_{fs\ 2 \rightarrow 4} &= 1.019 \frac{kgf \cdot m}{kg} \\
 E_{T\ 2 \rightarrow 4} &= H_{fs\ 2 \rightarrow 4} + E_{T\ 4} = (1.019 + 24.871) \frac{kgf \cdot m}{kg} = 25.89 \frac{kgf \cdot m}{kg}
 \end{aligned}$$

Energía total en el punto 2

$$E_{T\ 2} = E_{T\ 2 \rightarrow 4} + E_{T\ 2 \rightarrow 3} = (25.89 + 12.259) \frac{\text{kgf} \cdot \text{m}}{\text{kg}} = 38.149 \frac{\text{kgf} \cdot \text{m}}{\text{kg}}$$

Realizando un balance de energía 1 → 2

$$Z_1 \frac{g}{gc} + \frac{P_1}{\rho} + \frac{u_1^2}{2gc} = Z_2 \frac{g}{gc} + \frac{P_2}{\rho} + \frac{u_2^2}{2gc} + H_{fs\ 1 \rightarrow 2}$$

$$Z_1 \frac{g}{gc} = -7 \frac{\text{kgf} \cdot \text{m}}{\text{kg}}$$

$$\frac{P_1}{\rho} = \frac{7953.11 \text{ kgf} \cdot \text{m}^2}{1030 \text{ kg/m}^3} = 7.721 \frac{\text{kgf} \cdot \text{m}}{\text{kg}}$$

$$\frac{u_1^2}{2gc} = 0$$

$$Z_2 \frac{g}{gc} = 0$$

$$\frac{P_2}{\rho} = 38.149 \frac{\text{kgf} \cdot \text{m}}{\text{kg}}$$

$$\frac{u_2^2}{2gc} = \frac{1.552 \text{ m/s}}{2(9.81 \frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{kgf} \cdot \text{s}^2})} = 0.123 \frac{\text{kgf} \cdot \text{m}}{\text{kg}}$$

$$H_{fs\ 1 \rightarrow 2} = 0.818 \frac{\text{kgf} \cdot \text{m}}{\text{kg}}$$

$$-W_f = (Z_2 - Z_1) \frac{g}{gc} + \frac{P_2 - P_1}{\rho} + \frac{u_2^2 - u_1^2}{2gc} + H_{fs\ 1 \rightarrow 2}$$

$$-W_f = (7 + 30.428 + 0.123 + 0.818) \frac{\text{kgf} \cdot \text{m}}{\text{kg}} = 38.368 \frac{\text{kgf} \cdot \text{m}}{\text{kg}}$$

Cálculo de la potencia hidráulica

$$PH = (-W_f) \cdot Q \cdot \rho = 38.368 \frac{\text{kgf} \cdot \text{m}}{\text{kg}} * 0.050 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} * 1030 \frac{\text{kg}^3}{\text{m}} = 1975.952 \frac{\text{kgf} \cdot \text{m}}{\text{s}}$$

$$PH = 25.985 \text{ HP}$$

Las eficiencias de las bombas de desplazamiento positivo pueden variar de 50 a 70 %, se toma una eficiencia del 60 %

$$P_R = \frac{25.985 \text{ HP}}{0.6} = 43.309 \text{ HP}$$

Se elige un motor de 50 HP para la bomba BL-101

Las bombas BL-102, BL-103, BL-104, BL-203, BL-204 y BL-301 fueron calculadas de la misma forma, pero al ser el lodo un fluido no newtoniano se tomó la metodología del Metcalf, tercera edición, página 895, calculando el número de Hedstrom y el número de Reynolds para obtener un factor de fricción, tomándose el esfuerzo producido (S_y); N/m², y el coeficiente de rigidez (η); Kg/m-s de las correlaciones presentadas en la misma referencia.

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot D}{\eta}$$

$$He = \frac{D^2 \cdot S_y \cdot \rho}{\eta^2}$$

Se presentan las potencias de las bombas antes mencionadas, considerando una eficiencia del 60 %

Bomba	Potencia hidráulica (HP)	Potencia real (BHP)	Potencia nominal (PH)
BL-102	2.047	3.411	5
BL-103	2.047	3.411	5
BL-104	2.047	3.411	5
BL-203	1.677	2.795	3
BL-204	1.677	2.795	3
BL-301	5.062	9.203	10

Elaboración propia.

ANEXO 4. Requerimiento de calor en el tratamiento de lodos.

Para obtener los requerimientos de calor en el proceso de tratamiento de lodos, es necesario identificar en que etapas del proceso se demanda. En el tratamiento propuesto se requiere calentamiento en la etapa de digestión y pasteurización.

Digestión mesofílica

Paso 1. Para determinar las necesidades de calentamiento en la digestión, se deben establecer las condiciones de temperatura del lodo y la temperatura de trabajo de digestor, así como los flujos de alimentación al digestor, obtenidos en el balance de masa (etapa de espesamiento). En el cálculo se consideró el calentamiento de todo el flujo másico, sin embargo, se debe recordar que el flujo se divide en 2 digestores, por lo que el resultado final se divide en 2 para determinar el requerimiento en cada digestor.

Parámetro	Simbología	Valor
Flujo másico (kg/d)	$m_{L.E.}$	912 669.519
Calor específico del lodo @ 18°C (kJ/kg°C)	C_{pL}	4.183
Temperatura del lodo (°C)	$T_{L.E.}$	18
Temperatura de alimentación (°C) ^a	T_A	37
Temperatura de recirculación (°C)	T_R	35
Recirculación (%)	% R	20

Elaboración propia. (a) La temperatura mesofílica que se propone es de 35°C, sin embargo, para contrarrestar las pérdidas de calor y garantizar que la temperatura no bajará de la establecida, se decidió alimentar el lodo a una temperatura más alta.

Paso 2. Calcular la cantidad de calor requerido para elevar la temperatura del lodo de 18°C a 37°C de la siguiente manera:

$$Q_D = m_L \cdot C_p \cdot \Delta T$$

Debido a que en la digestión de alta tasa debe de existir un buen mezclado, uno de los métodos para conseguirlo es mediante la recirculación de lodo del digestor, por lo cual, se establece un porcentaje de recirculación del 20 %.

$$m_R = m_{L.E.} \cdot \%R = 912\,669.519 \frac{kg}{d} \left(\frac{1\,d}{86400\,s} \right) \cdot 0.20 = 2.11266 \frac{kg}{s}$$

$$m_L = m_{L.E.} + m_R = 10.5633 \frac{kg}{s} + 2.11266 \frac{kg}{s} = 12.67596 \frac{kg}{s}$$

Como sabemos, se espera que el lodo se encuentre a una temperatura de 35°C a lo largo del digestor por lo que, el lodo recirculado se encontrará a esta temperatura (T_R), de manera que la masa recirculada tendrá cierto efecto en la temperatura del lodo alimentado a 18 °C ($T_{L.E.}$).

Si:

$$Q_{L.E.} = Q_R \rightarrow m_{L.E.} \cdot \Delta T_{L.E.} \cdot C_{p_{L.E.}} = m_R \cdot \Delta T_R \cdot C_{p_R}$$

$$\Delta T_{L.E.} = T_M - T_{L.E.} \text{ y } \Delta T_R = T_R - T_M$$

Despejando la temperatura de la mezcla (T_M):

$$T_M = \frac{(m_R \cdot T_R) + (m_{L.E.} \cdot T_{L.E.})}{m_R + m_{L.E.}} = \frac{\left(2.11266 \frac{kg}{s} \cdot 35^\circ C\right) + \left(10.5633 \frac{kg}{s} \cdot 18^\circ C\right)}{2.11266 \frac{kg}{s} + 10.5633 \frac{kg}{s}} = 20.833^\circ C$$

Entonces, el calor requerido queda como:

$$Q_D = m_L \cdot Cp \cdot \Delta T = 12.67596 \frac{kg}{s} \cdot 4.183 \frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C} \cdot (37^\circ C - 20.833^\circ C) = 857.2316 \frac{kJ}{s} \\ = 857.2316 kW$$

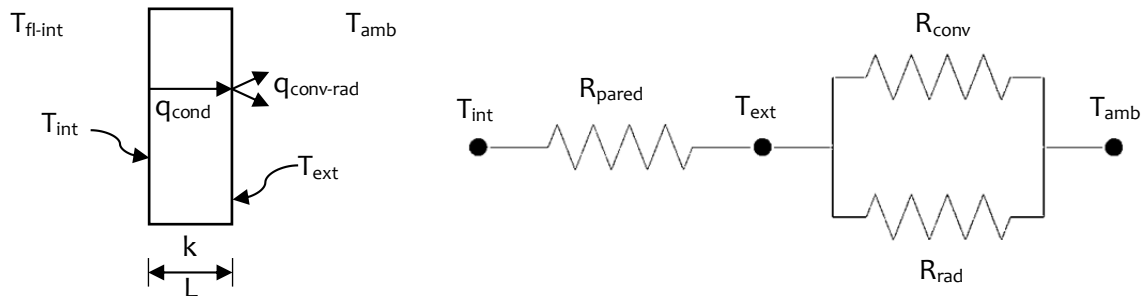
Para cada digestor:

$$\frac{857.2316 kW}{2} = 428.6158 kW$$

Pérdidas de calor en el digestor

Debido a que existen pérdidas de calor por conducción, convección y radiación por las paredes del digestor, se deben estimar estas pérdidas para evitar el descenso de temperatura dentro del digestor.

Las pérdidas se estimaron como una resistencia de pared rectangular de la siguiente manera:



Elaboración propia.

Se considera que la temperatura interior es igual a la temperatura del fluido dentro del digestor.

Paso 1. Establecer los parámetros de operación

Parámetro	Simbología	Valor
Área del digestor (m)	A_D	2 058.299
Temperatura ambiente ($^\circ C$)	T_{amb}	18
Temperatura del fluido interior ($^\circ C$)	T_{int}	35
Velocidad del viento (km/h) ^a	V	11
Espesor del digestor (m)	L	0.20
Constante de Stefan Boltzmann ($W/m^2 K^4$) ^b	σ	5.67×10^{-8}

Emisividad de la superficie (adimensional)^c	e	0.94
Conductividad térmica (W/m K)^d	k	1.4

Elaboración propia. (a) Correspondiente a una brisa ligera escala de Beaufort 2. (b) Perry, R., 2008. (c y d) Cengel, Y, 2007. Valores correspondientes al concreto.

Paso 2. Suponer una temperatura exterior, esta corresponde a la temperatura de la pared exterior del digestor y debe ser mayor a la temperatura ambiente.

$$T_{exts} = 21^{\circ}\text{C}$$

Paso 3. Calcular el flux de calor de convección-radiación:

$$q_{conv-rad} = (h_{conv} + h_{rad}) \cdot (T_{exts} - T_{amb})$$

El coeficiente de transferencia de calor por radiación (h_{rad}) se calcula a partir de la siguiente ecuación:

$$\begin{aligned} h_{rad} &= \frac{\sigma \cdot e \cdot [(T_{exts} + 273.15)^4 - (T_{amb} + 273.15)^4]}{T_{exts} - T_{amb}} \\ &= \frac{5.67 \times 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}^4} \cdot 0.94 [(21^{\circ}\text{C} + 273.15)^4 - (18^{\circ}\text{C} + 273.15)^4]}{21^{\circ}\text{C} - 18^{\circ}\text{C}} \\ &= 5.3435 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{C}} \end{aligned}$$

Para calcular el coeficiente de transferencia de calor por convección natural (h_{conv}) se empleó una forma simplificada para la convección natural al aire de una placa vertical de más de 2 ft (0.6096 m) de alto corregida por el factor de velocidad del viento (w).

$$w = \sqrt{(0.87586V + 1)} = \sqrt{0.87586 \left(11 \frac{\text{km}}{\text{h}} \left(\frac{0.91134 \frac{\text{ft}}{\text{s}}}{1 \frac{\text{km}}{\text{h}}} \right) \right) + 1} = 3.12734$$

$$\begin{aligned} h_{conv} &= 0.3 \cdot (T_{exts} - T_{amb})^{0.25} \cdot w = 0.3 \cdot (69.8^{\circ}\text{F} - 64.4^{\circ}\text{F})^{0.25} \cdot 3.12734 \\ &= 1.43019 \frac{\text{Btu}}{\text{h ft}^2 \text{ }^{\circ}\text{F}} \left(\frac{5.678263 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{ }^{\circ}\text{C}}}{1 \frac{\text{Btu}}{\text{h ft}^2 \text{ }^{\circ}\text{F}}} \right) = 8.1210 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{ }^{\circ}\text{C}} \end{aligned}$$

El flux de calor por conv-rad queda como:

$$\begin{aligned} q_{conv-rad} &= (h_{conv} + h_{rad}) \cdot (T_{exts} - T_{amb}) \\ &= \left(8.1210 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{ }^{\circ}\text{C}} + 5.3435 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{ }^{\circ}\text{C}} \right) \cdot (21^{\circ}\text{C} - 18^{\circ}\text{C}) = 40.3935 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \end{aligned}$$

Paso 4. Calcular el flux de calor por conducción

$$q_{cond} = \frac{T_{int} - T_{exts}}{\frac{L}{k}} = \frac{35^{\circ}C - 21^{\circ}C}{\frac{0.20 \text{ m}}{1.40 \frac{W}{m^{\circ}C}}} = 98 \frac{W}{m^2}$$

Paso 5. Igualar el flux de conducción con el de convección-radiación

$$q_{cond} = q_{conv-rad}$$

Paso 6. Determinar una nueva temperatura exterior (T_{ext}) para la cual las ecuaciones de convección-radiación den como resultado el flux de calor del paso 4.

$$q_{conv-rad} = (h_{conv} + h_{rad}) \cdot (T_{exts} - T_{amb})$$

$$q_{conv-rad} = \left\{ \left[(0.3 \cdot ((T_{ext} \cdot 1.8 + 32) - (T_{amb} \cdot 1.8 + 32))^{0.25} \cdot w) \cdot 5.678267 \right] \cdot \left(\frac{\sigma \cdot e \cdot [(T_{ext} + 273.15)^4 - (T_{amb} + 273.15)^4]}{T_{ext} - T_{amb}} \right) \right\} \cdot (T_{ext} - T_{amb})$$

$$98 \frac{W}{m^2} = \left\{ \left[(0.3 \cdot ((T_{ext} \cdot 1.8 + 32) - (18^{\circ}C \cdot 1.8 + 32))^{0.25} \cdot 3.12734) \cdot 5.678267 \frac{W}{m^2 \cdot ^{\circ}C} \right] \cdot \left(\frac{5.67 \times 10^{-8} \frac{W}{m^2 \cdot K^4} \cdot 0.94 [(T_{ext} + 273.15)^4 - (18^{\circ}C + 273.15)^4]}{T_{ext} - 18^{\circ}C} \right) \right\} \cdot (T_{ext} - 18^{\circ}C)$$

Para encontrar la temperatura exterior se utilizó la herramienta solve dando como resultado 24.4215°C.

Paso 7. Comparar la temperatura exterior supuesta (T_{exts}) con la temperatura calculada en el paso anterior:

$$|T_{ext(cal)} - T_{exts}| < 0.5^{\circ}C$$

Si el valor absoluto de la diferencia entre las temperaturas es menor a 0.5 °C se termina el cálculo, de lo contrario la T_{ext} calculada en el paso 6 se toma como la nueva temperatura exterior y se regresa al paso 3.

$$|24.4215^{\circ}C - 21^{\circ}C| = 3.4315^{\circ}C > 0.5^{\circ}C$$

Por lo tanto:

$$h_{rad} = \frac{5.67 \times 10^{-8} \frac{W}{m^2 \cdot K^4} \cdot 0.94 [(24.4215^{\circ}C + 273.15)^4 - (18^{\circ}C + 273.15)^4]}{24.4215^{\circ}C - 18^{\circ}C}$$

$$= 5.43828 \frac{W}{m^2 \cdot ^{\circ}C}$$

$$h_{conv} = 0.3 \cdot (75.9587^\circ F - 64.4^\circ F)^{0.25} \cdot 3.12734 = 1.7299 \frac{Btu}{h \text{ ft}^2 \text{ }^\circ F} \left(\frac{5.678263 \frac{W}{m^2 \text{ }^\circ C}}{1 \frac{Btu}{h \text{ ft}^2 \text{ }^\circ F}} \right)$$

$$= 9.8228 \frac{W}{m^2 \text{ }^\circ C}$$

$$q_{conv-rad} = \left(9.8228 \frac{W}{m^2 \text{ }^\circ C} + 5.43828 \frac{W}{m^2 \text{ }^\circ C} \right) \cdot (24.4215^\circ C - 18^\circ C) = 97.9990 \frac{W}{m^2}$$

$$q_{cond} = \frac{35^\circ C - 24.4215^\circ C}{\frac{0.20 \text{ m}}{1.40 \frac{W}{m \text{ }^\circ C}}} = 74.0495 \frac{W}{m^2}$$

$$74.0495 \frac{W}{m^2} = \left\{ \left[\left(0.3 \cdot ((T_{ext} \cdot 1.8 + 32) - (18^\circ C \cdot 1.8 + 32))^{0.25} \cdot 3.12734 \right) \cdot 5.678267 \frac{W}{m^2 \text{ }^\circ C} \right] \cdot \left(\frac{5.67 \times 10^{-8} \frac{W}{m^2 \text{ K}^4} \cdot 0.94 [(T_{ext} + 273.15)^4 - (18^\circ C + 273.15)^4]}{T_{ext} - 18^\circ C} \right) \right\} \cdot (T_{ext} - 18^\circ C)$$

$$T_{ext} = 23.0537^\circ C$$

$$|23.0537^\circ C - 24.4215^\circ C| = 1.3678^\circ C > 0.5^\circ C$$

Se realizaron dos iteraciones más para igualar el flux de calor por convección-radiación con el de conducción. En la siguiente tabla se muestran los resultados:

Iteración	T _{ext-sup} (°C)	h _{conv} (W/m ² K)	h _{rad} (W/m ² K)	q _{conv-rad} (W/m ²)	q _{cond} (W/m ²)	T _{ext-cal} (°C)	q _{conv-rad} (W/m ²)	T _{exts} -T _{ext-cal} (°C)
1	21	8.1210	5.3435	40.3936	98	24.4215	97.9999	3.4215
2	24.4215	9.8229	5.4382	97.9990	74.0495	23.0537	74.0493	1.3677
3	23.0537	9.2519	5.4002	74.0493	83.6234	23.6079	83.6234	0.5542
4	23.6079	9.4958	5.4156	83.6234	79.7440	23.3847	79.7440	0.2232

Elaboración propia.

El flux de calor se multiplica por el área del digestor para obtener la cantidad de calor perdido por los mecanismos de transferencia en cada digestor.

$$Q_{per} = q_{cond} \cdot A_D = 79.7440 \frac{W}{m^2} \cdot 2058.2999 = 164137.067W = 164.1370 \text{ kW}$$

$$Q_{Tper} = Q_P \cdot 2 = 164.1370 \cdot 2 = 328.274 \text{ kW}$$

Descenso de la temperatura en el digestor

Las pérdidas de calor por las paredes del equipo afectan directamente la temperatura del digestor y se tendría un efecto negativo en la operación de este, por esta razón se calcula el descenso de temperatura en dado caso que no se recupere de alguna manera este calor.

Paso 1. Establecer los parámetros de operación

Parámetro	Simbología	Valor
Flujo másico por digestor(kg/d)	$m_{L.E.}$	456 334.76
Calor perdido (kW)	Q_{per}	164.1369
Calor específico del lodo (kJ/kg°C)	C_p	4.178
Tiempo de retención (d)	TRH	15

Elaboración propia.

Paso 2. Calcular el descenso de la temperatura al día en el digestor por las pérdidas de calor

Calcular la masa contenida en el digestor por el tiempo de retención

$$m = m_{L.E.} \cdot TRH = 456\,334.76 \frac{kg}{d} \cdot 15\,d = 6\,845\,021.4\,kg$$

Calcular el calor que se perdería en un día

$$Q_{per} = 164.1369 \frac{kJ}{s} \left(\frac{86\,400\,s}{1\,d} \right) = 1.418143 \times 10^7 \frac{kJ}{d}$$

El descenso de la temperatura por digestor queda como:

$$Q_{per} = m \cdot C_p \cdot \Delta T \rightarrow \Delta T = \frac{Q_{per}}{m \cdot C_p} = \frac{1.418143 \times 10^7 \frac{kJ}{d}}{6\,845\,021.4\,kg \cdot 4.178 \frac{kJ}{kg^\circ C}} = 0.4958^\circ C$$

Este descenso de temperatura indica que la precaución de alimentar los lodos a mayor temperatura (37 °C) garantiza una temperatura adecuada dentro del digestor.

Pasteurización

En la etapa de pasteurización se requiere elevar la temperatura del lodo digerido de 35°C a la temperatura de pasteurización de 70°C para inactivar los agentes patógenos del lodo residual.

Paso 1. Establecer los parámetros de operación.

Parámetro	Simbología	Valor
Flujo másico (kg/d)	$m_{L.D.}$	732 367.031
Calor específico del lodo @ 35°C (kJ/kg°C)	C_{pL}	4.178
Calor específico del lodo @ 55°C (kJ/kg°C)	C_{pL}	4.183
Temperatura de digestión (°C)	T_D	35
Recirculación (%)	% R	20

Elaboración propia.

Paso 2. Calcular el requerimiento de calor

$$\begin{aligned} Q_{PT} &= m_{L.D.} \cdot Cp \cdot \Delta T = 732\,367.031 \frac{\text{kg}}{\text{d}} \left(\frac{1 \text{ d}}{86400 \text{ s}} \right) \cdot 4.178 \frac{\text{kJ}}{\text{kg } ^\circ\text{C}} \cdot (70^\circ\text{C} - 35^\circ\text{C}) \\ &= 1\,239.514 \text{ kW} \end{aligned}$$

Si se considera la recuperación de calor en la salida de los lodos pasteurizados, el requerimiento de energía quedaría como:

$$Q_P = m_{L.D.} \cdot Cp \cdot \Delta T = 8.47647 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot 4.183 \frac{\text{kJ}}{\text{kg } ^\circ\text{C}} \cdot (70^\circ\text{C} - 55^\circ\text{C}) = 531.8561 \text{ kW}$$

Y el calor recuperado:

$$Q_{rec} = m_{L.D.} \cdot Cp \cdot \Delta T = 8.47647 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot 4.178 \frac{\text{kJ}}{\text{kg } ^\circ\text{C}} \cdot (55^\circ\text{C} - 35^\circ\text{C}) = 708.2938 \text{ kW}$$

ANEXO 5. Dimensionamiento del sistema de cogeneración.

El tamaño de una planta de cogeneración está definido por la demanda de calor del proceso. El requerimiento de calor se encuentra en el [anexo 4](#). Para el dimensionamiento del sistema de cogeneración es necesario definir el potencial de cogeneración.

Paso 1. Establecer los parámetros de operación.

Parámetro	Simbología	Valor
Demanda de energía eléctrica en la PTAR CE (kW)	E	2 550
Demanda de calor del tratamiento de lodos (kW)	Q_T	1 717.3615
Masa del biogás (kg/s)	$m_{\text{biogás}}$	0.1679
Poder calorífico del biogás (kJ/kg)^a	PC	22 192.57324

Elaboración propia. (a) WEF, 2018.

Paso 2. Seleccionar la tecnología a partir de la relación de demanda eléctrica y calórica.

$$\frac{Q_T}{E} = \frac{1\,717.3615\text{ kW}}{2\,550\text{ kW}} = 0.6734$$

A partir de la [tabla 4.7](#) del [capítulo 4](#) puede seleccionarse la tecnología más adecuado de acuerdo con la relación calor/energía. Las tecnologías que se adaptan a nuestras necesidades son la siguientes:

Combustible	Accionamiento	Rango de potencia (MWe)	Ratio calor/energía	Eficiencia eléctrica	Eficiencia total	Calidad del calor
GN, BG, GO, N, AL, GLP	Turbina de gas en ciclo combinado	3 a 300+	1:1 hasta 3:1	35 a 55%	70 a 90%	Vapor de media presión Agua caliente de alta temperatura
GN, BG, GO, N, AL, AP	Motores con ignición por compresión	0.2 a 20	0.5:1 hasta 3:1	35 a 45%	65 a 90%	Vapor de baja presión Agua caliente de temperatura media
GN, BG, GO, N, LHO	Motores con ignición por chispa	0.003 a 6	1:1 a 3:1	25 a 43%	70 a 90%	Agua caliente de temperatura media

El rango de potencia de la turbina de gas en ciclo combinado está por encima del requerido (2.55 MW), por lo que los motores son la mejor alternativa.

Paso 3. Una vez seleccionada la tecnología, se establece una eficiencia eléctrica preliminar del 37 % y se procede al cálculo de la cantidad de energía eléctrica que se produciría.

$$\eta_{elec} = \frac{E_{elec}}{E_{comb}} \rightarrow E_{elec} = \eta_{elec} \cdot E_{comb}$$

$$E_{comb} = m_{biogás} \cdot PC = 0.1679 \frac{kg}{s} \cdot 22\,192.57324 \frac{kJ}{kg} = 3\,726.133 \frac{kJ}{s} = 3\,726.133 \text{ kW}$$

$$E_{elec} = \eta_{elec} \cdot E_{comb} = 0.37 \cdot 3\,726.133 \text{ kW} = 1\,378.669 \text{ kW}$$

Conociendo el dato de la energía generada, se procede a buscar una tecnología que se ajuste a los requerimientos. En este caso se decidió optar por dos motores de 850 kW de la marca GE Power. Las características de esta tecnología se muestran en la [figura 4.4](#). De la ficha técnica se obtiene el valor de eficiencia eléctrica “real” de 39.3% y se recalcula la energía eléctrica generada.

$$E_{elec} = \eta_{elec} \cdot E_{comb} = 0.393 \cdot 3\,726.133 \text{ kW} = 1\,464.3702 \text{ kW}$$

Considerando que las eficiencias de la tecnología son a presión atmosférica, se considera un factor de ajuste del 90 % sobre la potencia de energía eléctrica, de manera que este valor sea la cantidad máxima de energía a generar y no los 1 700 kW aportada por los dos motores.

$$E_{elecinsitu} = \eta_{aju} \cdot P_{elec} = 0.90 \cdot 850 \text{ kW} = 765 \text{ kW} \cdot 2 = 1\,530 \text{ kW}$$

Calcular el factor de utilización

$$\frac{E_{elec}}{E_{elecinsitu}} = \frac{1\,464.3702 \text{ kW}}{1\,530 \text{ kW}} = 0.957$$

De esta manera se comprueba que la tecnología sigue siendo energéticamente eficiente.

Para calcular el calor disponible se emplea la eficiencia térmica dado por la tecnología del sistema de cogeneración que es de 45.7 %.

$$Q_{disponible} = \eta_{ter} \cdot E_{comb} = 0.457 \cdot 3\,726.133 \text{ kW} = 1\,702.843 \text{ kW}$$

Y el calor perdido:

$$Q_{perdido} = E_{comb} - (E_{elec} + Q_{disponible}) = 3\,726.133 \text{ kW} - (1\,464.3702 \text{ kW} + 1\,702.843 \text{ kW}) = 558.9198 \text{ kW}$$

Conociendo el calor disponible (gases de escape) es posible estimar la cantidad de agua que se calentará y podrá ser aprovechada en el proceso de tratamiento de lodos.

$$Q_{disponible} = m_A \cdot Cp \cdot \Delta T \rightarrow m_A = \frac{Q_{disponible}}{Cp \cdot \Delta T}$$

Se consideró que el agua se encuentra a temperatura ambiente y se obtendrá agua caliente de mediana temperatura (120 °C).

$$m_A = \frac{Q_{disponible}}{C_p \cdot \Delta T} = \frac{1\,702.843 \frac{kJ}{s}}{4.183 \frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C} \cdot (120^\circ C - 18^\circ C)} = 3.991 \frac{kg}{s}$$

Con la masa disponible de agua caliente es posible calcular las temperaturas de salida de este servicio en los intercambiadores de calor en el proceso y a su vez dimensionarlos.

Intercambiador de pasteurización (IE-302).

Paso 1. Establecer los parámetros de operación en el intercambiador.

Parámetro	Simbología	Valor
Calor requerido (kW)	Q_P	531.8561
Temperatura de pasteurización ($^\circ C$)	T_P	70
Temperatura de precalentamiento ($^\circ C$)	T_{pre}	55
Temperatura inicial del servicio ($^\circ C$)	T_{ACi}	120
Calor específico del agua ($kJ/kg^\circ C$) ^a	C_{pL}	4.183
Coefficiente global de transferencia de calor ($kJ/m^2 s^\circ C$) ^b	U_c	0.8517
Factor de obstrucción ($m^2 s^\circ C/kJ$) ^c	R_d	0.8806

Elaboración propia. (a) Se considera el mismo C_p del agua en todos los cálculos pues no varía significativamente el resultado. (b) McFarland, 2001. (c) Curso de Transferencia de Calor. Lagos, C., 2015.

Paso 2. Determinar la temperatura de salida de servicio (agua de calentamiento).

$$\text{Si } Q_P = Q_A = m_A \cdot C_p \cdot \Delta T \rightarrow T_{ACf} = T_{ACi} - \frac{Q_P}{m_A \cdot C_p}$$

$$T_{ACf} = T_{ACi} - \frac{Q_P}{m_A \cdot C_p} = 120^\circ C - \frac{531.8561 \text{ kW}}{3.991 \frac{kg}{s} \cdot 4.183 \frac{kJ}{kg^\circ C}} = 88.1415^\circ C$$

Paso 3. Estimar el área de transferencia de calor

Calcular la temperatura logarítmica media a contracorriente (LMTD_{cc})

$$LMTD_{cc} = \frac{(T_{ACi} - T_P) - (T_{ACf} - T_{pre})}{\ln\left(\frac{T_{ACi} - T_P}{T_{ACf} - T_{pre}}\right)} = \frac{(120^\circ C - 70^\circ C) - (88.14^\circ C - 55^\circ C)}{\ln\left(\frac{120^\circ C - 70^\circ C}{88.14^\circ C - 55^\circ C}\right)} = 40.9937^\circ C$$

Calcular el área de transferencia de calor

$$Q = U \cdot A \cdot LMTD_{cc} \rightarrow A = \frac{Q}{U \cdot LMTD_{cc}}$$

$$U = \left[\frac{1}{U_c} + R_d \right]^{-1} = \left[\frac{1}{0.8517 \frac{kJ}{m^2 s^\circ C}} + 0.8806 \frac{m^2 s^\circ C}{kJ} \right]^{-1} = 0.48667 \frac{kJ}{m^2 s^\circ C}$$

$$A = \frac{Q}{U \cdot LMTD_{cc}} = \frac{531.8561 \text{ kW}}{0.48667 \frac{\text{kW}}{\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}} \cdot 40.9937^\circ\text{C}} = 26.6589 \text{ m}^2$$

Intercambiador de digestión (IE-201 y IE-202).

Paso 1. Establecer los parámetros de operación en el intercambiador.

Parámetro	Simbología	Valor
Calor requerido por unidad (kW)	Q_D	428.6158
Temperatura de alimentación ($^\circ\text{C}$)	T_A	37
Temperatura de mezcla ($^\circ\text{C}$)	T_M	20.833
Temperatura inicial del servicio ($^\circ\text{C}$)	T_{ACi}	88.1415

Elaboración propia.

Paso 2. Determinar la temperatura de salida de servicio (agua de calentamiento).

$$\text{Si } Q_P = Q_A = m_A \cdot C_p \cdot \Delta T \rightarrow T_{ACf} = T_{ACi} - \frac{Q_P}{m_A \cdot C_p}$$

$$T_{ACf} = T_{ACi} - \frac{Q_D}{m_A \cdot C_p} = 88.1415^\circ\text{C} - \frac{428.6158 \text{ kW}}{1.9955 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot 4.183 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}}} = 36.7929^\circ\text{C}$$

Paso 3. Estimar el área de transferencia de calor

Calcular la temperatura logarítmica media a contracorriente (LMTD_{cc})

$$LMTD_{cc} = \frac{(T_{ACi} - T_A) - (T_{ACf} - T_M)}{\ln\left(\frac{T_{ACi} - T_A}{T_{ACf} - T_M}\right)} = \frac{(88.1415^\circ\text{C} - 37^\circ\text{C}) - (36.7929^\circ\text{C} - 20.833^\circ\text{C})}{\ln\left(\frac{88.1415^\circ\text{C} - 37^\circ\text{C}}{36.7929^\circ\text{C} - 20.833^\circ\text{C}}\right)} = 30.2113^\circ\text{C}$$

Calcular el área de transferencia de calor por unidad. (2 unidades)

$$A = \frac{Q}{U \cdot LMTD_{cc}} = \frac{428.6158 \text{ kW}}{0.48667 \frac{\text{kW}}{\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}} \cdot 30.2113^\circ\text{C}} = 29.1517 \text{ m}^2$$

Intercambiador de recuperación de calor (IE-301)

Paso 1. Establecer los parámetros de operación en el intercambiador.

Parámetro	Simbología	Valor
Calor requerido (kW)	Q_{rec}	708.2938
Temperatura de precalentamiento ($^\circ\text{C}$)	T_{pre}	55
Temperatura de digestión ($^\circ\text{C}$)	T_D	35
Temperatura lodo pasteurizado ($^\circ\text{C}$)	T_{ACi}	69.956
Temperatura final ($^\circ\text{C}$)	T_{ACf}	40

Elaboración propia.

Paso 2. Estimar el área de transferencia de calor considerándose un intercambio lodo-lodo. Los lodos calientes de la pasteurización precalentarán los lodos que ingresarán a la pasteurización.

Para el precalentamiento de los lodos digeridos y el enfriamiento de los lodos pasteurizados se procede a calcular la temperatura logarítmica media a contracorriente (LMTDcc)

$$LMTD_{cc} = \frac{(T_{ACi} - T_{pre}) - (T_{ACf} - T_D)}{\ln\left(\frac{T_{ACi} - T_{pre}}{T_{ACf} - T_D}\right)} = \frac{(69.956^\circ\text{C} - 55^\circ\text{C}) - (40^\circ\text{C} - 35^\circ\text{C})}{\ln\left(\frac{69.956^\circ\text{C} - 55^\circ\text{C}}{40^\circ\text{C} - 35^\circ\text{C}}\right)} = 9.086^\circ\text{C}$$

Calcular el área de transferencia de calor.

$$A = \frac{Q}{U \cdot LMTD_{cc}} = \frac{708.2938 \text{ kW}}{0.48667 \frac{\text{kW}}{\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}} \cdot 9.086^\circ\text{C}} = 160.1792 \text{ m}^2$$