

“ELABORACIÓN DE LAS INGENIERÍAS BÁSICAS PARA EL SANEAMIENTO DE SUBCUENCAS SAN ANDRÉS, OSORIO Y SAN GASPAR”

**PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL
(PTAR) 2550 L.P.S. SAN ANDRES-OSORIO-SAN
GASPAR**

CEA-047

**PROCESO DE TRATAMIENTO DEL TREN
DE LODO**

Fecha: Diciembre, 2025

Versión No.: 02

Contenido

1. Caracterización del proyecto para el tren de lodos	5
2. Descripción general del proceso de lodos propuesto	9
3. Arreglo general del tren de lodos	14
4. Memoria descriptiva de unidades de tratamiento del tren de lodos	17
5. Balance de materia del tren de lodos	40
6. Operación y Mantenimiento del tren de lodos	41
7. Monitoreo y Laboratorio para el tren de lodos	43
8. Conclusiones	43
9. Referencias y bibliografía.....	44
10. Anexos.....	44

Índice de Tablas

Tabla 1. Límites máximos permisibles para metales pesados en biosólidos	6
Tabla 2. Límites máximos permisibles para patógenos y parásitos en lodos y biosólidos.....	6
Tabla 3. Aprovechamiento de biosólidos	6
Tabla 4. Frecuencia de muestreo y análisis para lodos y biosólidos.....	7
Tabla 5. Volumen general de lodos	7
Tabla 6. Cotas de nivel promedio de plataforma para unidades de proceso de lodos.....	8
Tabla 7. Equipo por instalar en Sedimentadores primarios	11
Tabla 8. Equipo por instalar, tanque de sedimentación secundaria	17
Tabla 9. Dimensiones de elementos de espesado de lodos	20
Tabla 10. Equipo por instalar en espesado de lodos	21
Tabla 11. Dimensiones del tanque de lodos mixtos.....	22
Tabla 12. Equipo por instalar, Tanque de lodos mixtos	23
Tabla 13. Dimensiones Digestores de lodos.....	24
Tabla 14. Equipo por instalar en digestores anaeróbicos.....	25
Tabla 15. Dimensiones del tanque de lodos digeridos.	26
Tabla 16. Equipo por instalar, Tanque de lodos mixtos.....	27
Tabla 17. Dimensiones de los elementos para deshidratación de lodos.....	28
Tabla 18. Equipo por instalar, deshidratado de lodos.....	29

CEA-047 PROCESO DE TRATAMIENTO DEL TREN DE LODO

Tabla 19. Dimensiones edificio de pirólisis	30
Tabla 20. Equipos por instalar, pirólisis de lodos.	31
Tabla 21. Dimensiones de la membrana de almacenamiento de biogás	33
Tabla 22. Membrana de almacenamiento, equipo por instalar.	33
Tabla 23. Dimensiones de la membrana de almacenamiento de biogás.	34
Tabla 24. Lavado de biogás, equipo por instalar.	35
Tabla 25. Dimensiones del área para cogeneración con biometano.	36
Tabla 26. Cogeneración, equipo por instalar.	37
Tabla 27. Equipamiento del tren de lodo.	38
Tabla 28. Dimensiones de las unidades de proceso tren de lodo.	39
Tabla 29. Consumo de energía eléctrica línea de lodos PTAR.	42
Tabla 30. Masa de reactivos línea de lodos.	42
Tabla 31. Frecuencia de muestreo y análisis para lodos y biosólidos.	43

Índice de figuras

Figura1. Digestores anaeróbicos de lodos en PTAR	10
Figura 2. Perfil hidráulico de las unidades de tratamiento	12
Figura3. Diagrama de flujo del proceso de lodo (plano anexo)	14
Figura 4. Arreglo de unidades de la PTAR 2,550.00 L.P.S.	15
Figura 5. Sedimentador primario, infraestructura similar a la propuesta	18
Figura 6. Sedimentador primario, conceptual	18
Figura 7. Clarificador Secundario, infraestructura similar a la propuesta	19
Figura 8. Clarificador Secundario, conceptual	20
Figura 9. Equipo espesador de lodo, infraestructura similar a la propuesta.	21
Figura 10. Equipo espesador de lodos, conceptual.	22
Figura 11. Tanque de lodos mixtos, Infraestructura similar a la propuesta	23
Figura 12. Tanque de lodos mixtos, conceptual	24
Figura 13. Digestores anaeróbicos, infraestructura similar a la propuesta.	25
Figura 14. Digestores anaeróbicos, conceptual	26
Figura 15. Tanque de lodos digeridos, Infraestructura similar a la propuesta	27
Figura 16. Tanque de lodos digeridos, conceptual.	28
Figura 17. Deshidratador de lodos de tornillo, infraestructura similar a la propuesta.	29
Figura 18. Deshidratador de lodos de tornillo, conceptual	30

Figura 19. Pirólisis de lodos, infraestructura similar a la propuesta	31
Figura 20. Pirólisis de lodos, conceptual	32
Figura 21. Membrana doble de almacenamiento de biogás, infraestructura similar a la propuesta .	33
Figura 22. Membrana doble de almacenamiento de biogás, conceptual	34
Figura 23. Lavado de biogás, infraestructura similar a la propuesta	35
Figura 24. Lavado de biogás, conceptual	36
Figura 25. Cogeneración con biometano, infraestructura similar a la propuesta	37
Figura 26. Cogeneración con biometano, conceptual.....	37
Figura 27. Balance de Materia PTAR Parque Santiago Cap. 2550LPS promedio	40
Figura 28. Organigrama del personal de operación de la PTAR	41

CEA-046 Proceso de Tratamiento del Tren de Agua, PTAR PARQUE SANTIAGO 2550 L.P.S.**1. Caracterización del proyecto**

La planta de tratamiento de aguas residuales "Parque Santiago" para 2550 litros por segundo promedio, dará servicio a la población de las cuencas San Andrés, Osorio y San Gaspar en el predio conocido como Parque Santiago, representa una infraestructura clave en el sistema de saneamiento de la zona metropolitana de Guadalajara, estará ubicada al nororiente de la zona metropolitana de Guadalajara, Jalisco, México.

El tren de lodos tendrá como objetivo la disposición segura y eficiente de los residuos sólidos de esta infraestructura, de acuerdo con la NOM-004-SEMARNAT-2002.

1.1 Introducción

En el caso de la PTAR en cuestión, con un caudal de diseño de 2550 litros por segundo, equivalente a aproximadamente 220,320 m³/día, se genera una masa diaria de sólidos base seca de 89,590 kg/d lo que después de procesos de espesado equivale a un volumen diario de lodos de 2508 m³/d.

Esto representa una concentración aproximada de sólidos en los lodos de 35.72 kg/m³, equivalente a un 3.57% de sólidos lo cual es típico de lodos espesados o estabilizados en procesos convencionales de tratamiento secundario con lodos activados.

Los lodos contienen materia orgánica (60-80%), nutrientes (nitrógeno, fósforo), pero también patógenos, metales pesados y compuestos orgánicos persistentes. Un manejo adecuado es esencial para evitar impactos ambientales, como contaminación de suelos, aguas subterráneas o riesgos a la salud pública.

1.2 Norma aplicable a los lodos

En México, la norma principal que regula el manejo, tratamiento, aprovechamiento y disposición final de lodos y biosólidos generados en PTAR es la NOM-004-SEMARNAT-2002, que detalla las especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final, publicada en 2003 y vigente hasta la fecha de este anteproyecto.

Esta norma establece:

a) Clasificación de biosólidos:

Por contenido de metales pesados:

Tipo "Excelente" con límites estrictos y Tipo "Bueno" con límites permisibles superiores.

Por carga patógena:

Clase A, bajos niveles de patógenos, uso sin restricciones y Clase B, niveles moderados, con restricciones de aplicación.

- b) Límites máximos permisibles para 9 metales pesados: arsénico, cadmio, cobre, cromo, mercurio, níquel, plomo, selenio y zinc, patógenos: helmintos, salmonella, coliformes fecales y vectores de atracción: estabilidad orgánica.
- c) Requisitos de procesos de tratamiento para reducir patógenos y estabilizar la materia orgánica como digestión anaerobia, compostaje y tratamiento térmico.

Tabla 1. Límites máximos permisibles para metales pesados en biosólidos

CONTAMINANTE (determinados en forma total)	EXCELENTES mg/kg en base seca	BUENOS mg/kg en base seca
Arsénico	41	75
Cadmio	39	85
Cromo	1200	3000
Cobre	1500	4300
Plomo	300	840
Mercurio	17	57
Níquel	420	420
Zinc	800	7500

Fuente: NOM-004-SEMARNAT-2022

Tabla 2. Límites máximos permisibles para patógenos y parásitos en lodos y biosólidos

CLASE	INDICADOR BACTERIOLOGICO DE CONTAMINACION	PATOGENOS	PARASITOS
	Coliformes fecales NMP/g en base seca	Salmonella spp. NMP/g en base seca	Huevos de helmintos/g en base seca
A	Menor de 1 000	Menor de 3	Menor de 1(a)
B	Menor de 1 000	Menor de 3	Menor de 10
C	Menor de 2 000 000	Menor de 300	Menor de 35

Fuente: NOM-004-SEMARNAT-2022

Tabla 3. 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
		Mejoramientos de suelos
		Usos agrícolas

Fuente: NOM-004-SEMARNAT-2022

Tabla 4. Frecuencia de muestreo y análisis para lodos y biosólidos

Volumen generado por año (Ton/Año) en base seca	Frecuencia de muestreo y análisis	Parámetros a determinar
Hasta 1,500	Una vez al año	Metales pesados, indicador bacteriológico de contaminación, patógenos y parásitos
Mayor de 1,500 hasta 15,000	Una vez por semestre	Metales pesados, indicador bacteriológico de contaminación, patógenos y parásitos
Mayor de 15,000	Una vez por trimestre	Metales pesados, indicador bacteriológico de contaminación, patógenos y parásitos

1.3 Volumen general de lodos

Tabla 5. Volumen general de lodos

Parámetro	Valor diario	Unidad
Caudal de agua cruda	220,320	m ³ /d
Sólidos base seca	89,590	kg/d
Concentración de sólidos después de espesamiento	35.72	kg/m ³
Volumen de lodos generados	2508	m ³ /d
Producción específica	0.407	kg sólidos/m ³ tratado

1.4 Destino de los lodos

Disposición final controlada:

- Mono relleno sanitario, confinamiento en sitio autorizados como residuos no peligrosos.
- Co procesamiento en hornos de cemento como combustible alternativo
- Incineración
- Pirólisis para secado autotérmico

En este proyecto, se propone un esquema de tratamiento que incluye estabilización anaerobia para reducir patógenos y generar biogás, espesamiento y deshidratación mecánica, con el objetivo de obtener biosólidos Clase A para aprovechamiento agrícola, maximizando la sostenibilidad.

Si la caracterización inicial revela altos contaminantes, se priorizará disposición en relleno sanitario.

Se requerirá un plan de muestreo y análisis para definir el destino definitivo, alineado con la normatividad ambiental.

2. Descripción general del proceso propuesto

2.1 Descripción narrativa del tren de lodo completo.

- El proceso de manejo y tratamiento de lodos propuesto para la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales inicia con la recolección separada de los diferentes tipos de lodos generados.
- Las natas, espumas y flotantes y los lodos primarios, colectadas provenientes de la sedimentación primaria, se dirigirán a un tanque de lodos mixtos donde se homogenizan.
- Paralelamente, los lodos secundarios o biológicos, producidos en el tratamiento secundario por lodos activados, pasarán primero por equipos espesadores que concentran los sólidos mediante separación mecánica, reduciendo significativamente el volumen antes de incorporarse al mismo tanque de lodos mixtos.
- En este tanque se logra una mezcla uniforme de todos los lodos generados en la planta, preparando una corriente única y consistente para las etapas posteriores de tratamiento.
- Desde el tanque de lodos mixtos, la mezcla se envía a los digestores anaeróbicos mesofílicos, donde se lleva a cabo la estabilización biológica del material.
- Estos digestores operan a una temperatura controlada de aproximadamente 35 °C, mantenida mediante intercambiadores de calor que utilizan agua caliente recirculada, y cuentan con sistemas de mezcla interna por biogás comprimido que aseguran un contacto óptimo entre la biomasa y los microorganismos anaeróbicos.
- Durante este proceso de digestión anaeróbica mesofílica, que se desarrolla por 22 días, se degrada la materia orgánica volátil, se reducen patógenos y se genera biogás rico en metano como subproducto valioso.
- Una vez completada la digestión, los lodos estabilizados salen de los digestores y se almacenan temporalmente en un tanque de lodos digeridos, que actúa como buffer para regular el flujo hacia las etapas de deshidratación y asegura una alimentación constante a los equipos posteriores.
- A continuación, los lodos digeridos se someten a deshidratación mecánica mediante prensas tornillo volute, una tecnología eficiente y de bajo consumo energético que logra concentraciones de sólidos superiores al 20%, transformando el lodo en un material pastoso de fácil manejo y menor volumen.
- Posteriormente, este lodo deshidratado pasa por un secado térmico previo que reduce aún más el contenido de humedad, preparando el material para la etapa final de valorización: la pirólisis autotérmica.
- En este reactor de pirólisis, el lodo se somete a altas temperaturas en ausencia de oxígeno, logrando una descomposición termoquímica que produce biochar, un producto carbonoso estable y de alto valor como enmienda de suelos, secuestrador de carbono o material adsorbente.
- El biochar generado se enfría, se almacena en silos o áreas dedicadas y finalmente se retira del sitio en camiones góndola para su comercialización o uso externo.
- De manera paralela y complementaria, el biogás producido en la digestión anaeróbica se captura en un sistema de membrana doble ventilada y conduce a un sistema de tratamiento

que incluye lavado para eliminar impurezas como ácido sulfhídrico, dióxido de carbono y siloxanos, elevando su calidad hasta obtener biometano.

- Este biometano se almacena temporalmente en tanques a alta presión y se utiliza en un sistema de cogeneración que genera electricidad y calor, cubriendo parte de las necesidades energéticas de la propia planta y contribuyendo a la sostenibilidad del proceso global.
- Este esquema integrado no solo estabiliza y reduce el volumen de los lodos, cumpliendo con la NOM-004-SEMARNAT-2002, sino que transforma un residuo en recursos valiosos: biochar como producto comercial o residuo sólido de fácil manejo y biometano como fuente de energía renovable, logrando un enfoque circular y ambientalmente responsable.

Figura1. Digestores anaeróbicos de lodos en PTAR



2.2 Topografía del terreno

Tabla6. Cotas de nivel promedio de plataforma para unidades de proceso de lodos

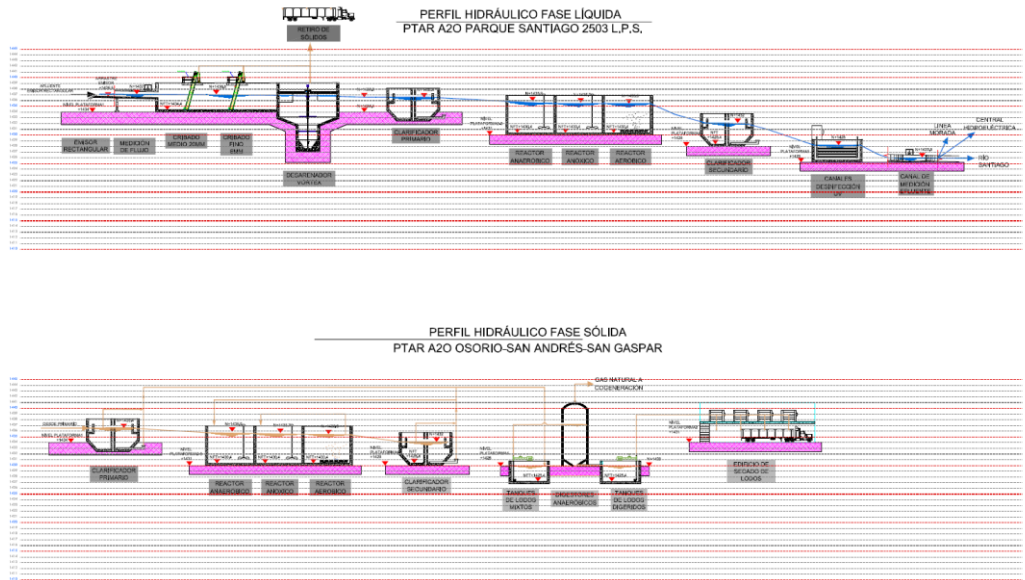
COTAS DE NIVEL PROMEDIO, PLATAFORMAS DE CIMENTACIÓN		
Abreviatura	Nombre completo	COTA PLATAFORMA (MSNM)
TSS	Tanque de Sedimentación Secundaria	1429
EL	Espesadores de lodos	1429
TL	Tanque de lodos secundarios	1429
LM	Tanque de lodos mixtos	1431
D	Digestores anaeróbicos	1431
LD	Tanque de lodos digeridos	1431
MAG	Membrana de Almacenamiento de Biogás	1434
LG	Lavado de Gases	1434
ESL	Edificio de deshidratado de lodos	1434
PIR	Edificio de pirólisis	1434
PM	Patio de Maniobras	1431
CG	Cogeneración con biogás	1434

**“ELABORACIÓN DE LAS INGENIERÍAS BÁSICAS PARA EL SANEAMIENTO DE
SUBCUENCAS SAN ANDRÉS, OSORIO Y SAN GASPAR”
PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL (PTAR) 2550 L.P.S. SAN ANDRES-OSORIO-SAN
GASPAR**

**GOBIERNO DEL
ESTADO DE JALISCO**

CEA-047 PROCESO DE TRATAMIENTO DEL TREN DE LODO

Figura 2. Perfil hidráulico de las unidades de tratamiento



2.3 Diagrama de flujo general del proceso de tratamiento del tren de lodo



"ELABORACIÓN DE LAS INGENIERÍAS BÁSICAS PARA EL SANEAMIENTO DE
SUBCUENCAS SAN ANDRÉS, OSORIO Y SAN GASPAR"
PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL (PTAR) 2550 L.P.S. SAN ANDRÉS-OSORIO-SAN
GASPAR

**GOBIERNO DEL
ESTADO DE JALISCO**

CEA-047 PROCESO DE TRATAMIENTO DEL TREN DE LODO

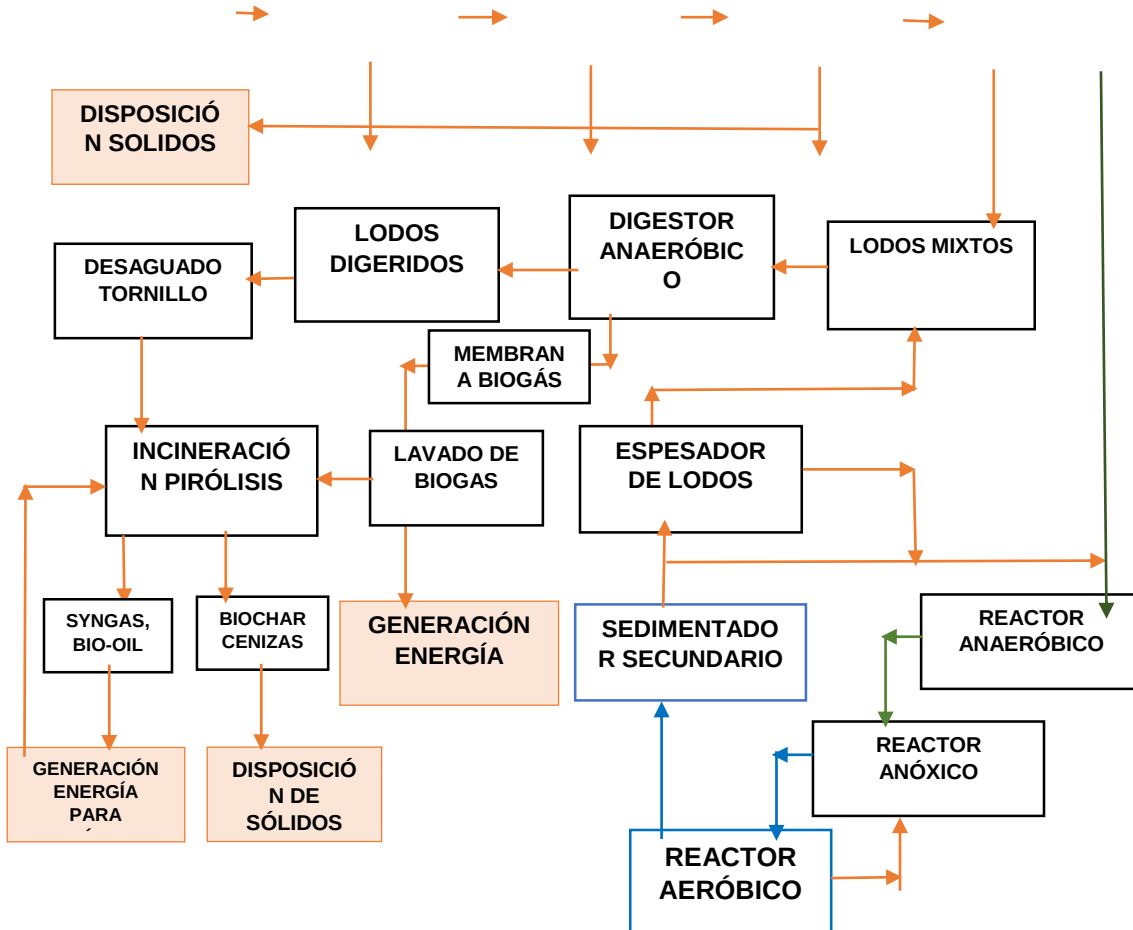
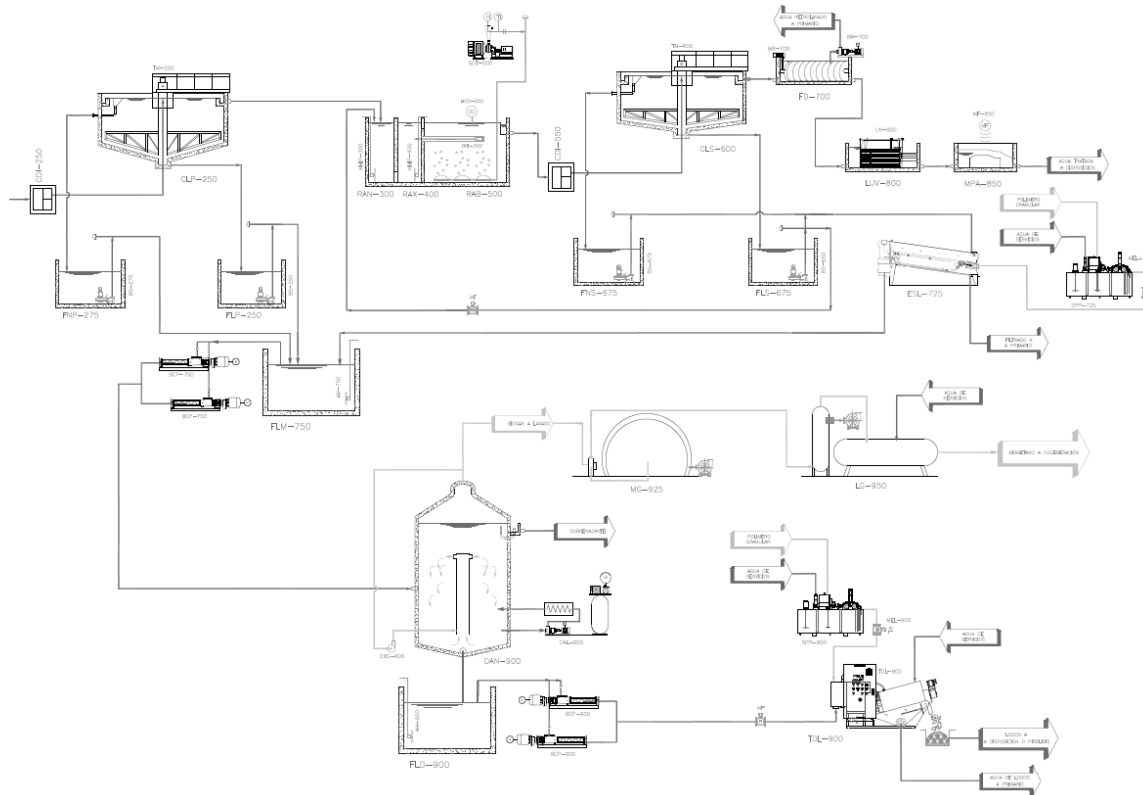


Figura3. Diagrama de flujo del proceso de lodo (plano



3. Arreglo General del tren de lodos

Disposición general del arreglo y perfil altimétrico

Las unidades de proceso de lodos se disponen a la entrada al predio en su parte operativa, con el objetivo de facilitar las maniobras de carga y acarreo de los residuos al exterior.

Unidades:

CG- Cogeneración ubicada a un costado de la subestación CFE.

PIR- Pirólisis de lodos ubicada a la entrada de la PTAR para facilitar el retiro de los residuos sólidos.

ESL- Edificio de deshidratado de lodos a un costado del edificio de pirólisis para rápido transporte de sólidos deshidratados a secado y reacción de pirólisis.

EL- Espesadores de lodos secundarios ubicados a un costado del tanque de lodos mixtos

LM-Tanque de lodos mixtos al inicio de los digestores para fácil alimentación a digestores.

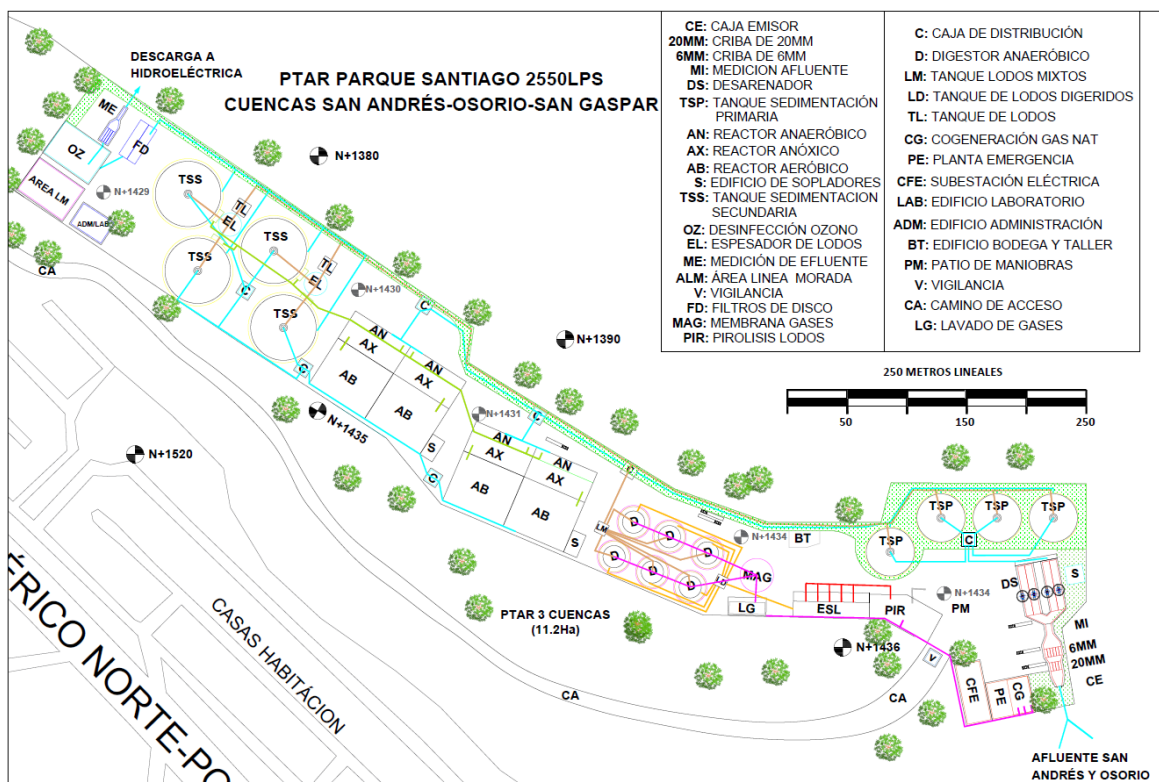
LD- Tanque de lodos digeridos al final de la batería de digestores para fácil alimentación a tornillo de desagüe de lodos.

D- Digestores de lodos en la misma área para flujo accesible de lodos mixtos, lodos digeridos y biogás.

MG- Membrana gasómetro emplazada a un costado de los digestores para almacenar el biogás que se utilizará en cogeneración

LG- Lavado de gases para obtener biometano y aumentar la eficiencia de la cogeneración, unidad ubicada a un costado de la membrana doble de almacenamiento.

Figura 4. Arreglo de unidades de la PTAR 2,550.00 L.P.S.



3.1 Bombeo línea de lodos

Bombeo fase sólida:

Recirculación de lodos activados (RAS 75 % Q, 1,725 L/s total) y nitratos (300 % Q, 4,150 L/s total), con estaciones de bombeo compactas ubicadas al pie de sedimentadores secundarios.

Manejo de lodos excedentes (primarios y secundarios hacia espesamiento/digestión) y retornos internos (filtrados, retro lavados).

3.2 Interconexiones fase sólida

Tipos de interconexiones:

Tuberías directas para retornos bombeados (diámetros optimizados, longitudes <100–150 m por línea).

3.3 Accesos vehiculares y peatonales.

Acceso principal vehicular: Ubicado en la entrada del predio, con vía de doble sentido de ancho mínimo 8 m, pavimentada en concreto hidráulico para soportar tráfico pesado -camiones de lodos, polímeros, mantenimiento y emergencias-.

Incluye caseta de control de acceso con barrera automática, sistema de registro y báscula para camiones de lodos con capacidad de 40 ton.

Patio de maniobras: Adyacente a la entrada, con área amplia >1.000 m², para circulación y estacionamiento de vehículos pesados. Facilita acceso directo a:

Subestación eléctrica CFE y plantas de emergencia con generadores diésel.

Área de cogeneración moto generadores de biogás.

Equipos de pirólisis y deshidratación de lodos tornillos prensa, carga/descarga de torta.

4. Memoria descriptiva de unidades de tratamiento del tren de lodos

4.1 Tren de lodos sedimentador primario

Propósito

Remover sólidos sedimentables y parte de la carga orgánica (60 % SST, 32 % DBO₅) mediante gravedad.

Dimensiones

4 unidades circulares, todas en servicio.

Sedimentador primario, diámetro: 41m, Tirante de agua 4.5m, altura de muros: 5m

Área superficial unitaria: 5,281.00 m²

Fosa de lodos primarios: Longitud total: 10.00 m, Anchura: 5.00 m, Tirante de agua: 1.50 m, Altura muros: 2.00 m.

Fosa de natas: Longitud total: 10.00 m, Anchura: 5.00 m, Tirante de agua: 1.50 m, Altura muros: 2.00 m.

Material de construcción

Concreto armado de alta resistencia en tanque.

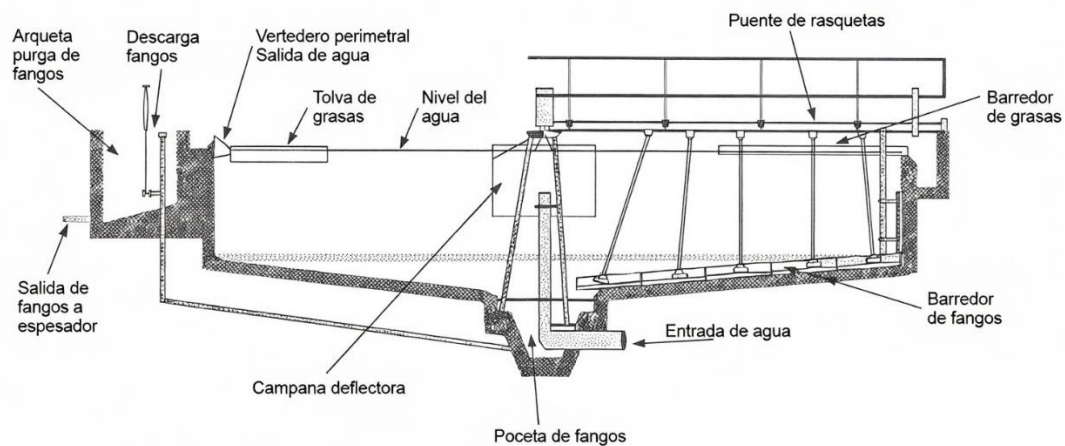
Acero AISI 304 en mecanismo de rastra y áreas de operación.

Tabla 7. Equipo por instalar en Sedimentadores primarios

CLAVE	UNIDAD DE TRATAMIENTO	EQUIPAMIENTO	POTENCIA UNIDAD	OPERACIÓN	RESERVA
TSP	Tanque de Sedimentación Primaria	Rastra y elemento motriz	0.75 kW	4	0
		Bomba de tornillo lodos	7.5 kW	4	1
		Desmenuzador de lodos	7.5 kW	2	0



Figura 6. Sedimentador primario, conceptual.



4.2 Tren de lodos sedimentador secundario

Propósito

Separar lodos biológicos del efluente tratado, recirculación de lodos activados y purga de lodos a espesamiento.

Dimensiones

4 unidades circulares, todas en operación.

Diámetro: 54 m.

Área unitaria: 2,290.00 m²

Área 4 unidades: 9,151.00 m²

Tirante: 4.5 m.

Material de construcción

Concreto armado en tanque, acero AISI 304 elementos mecánicos.

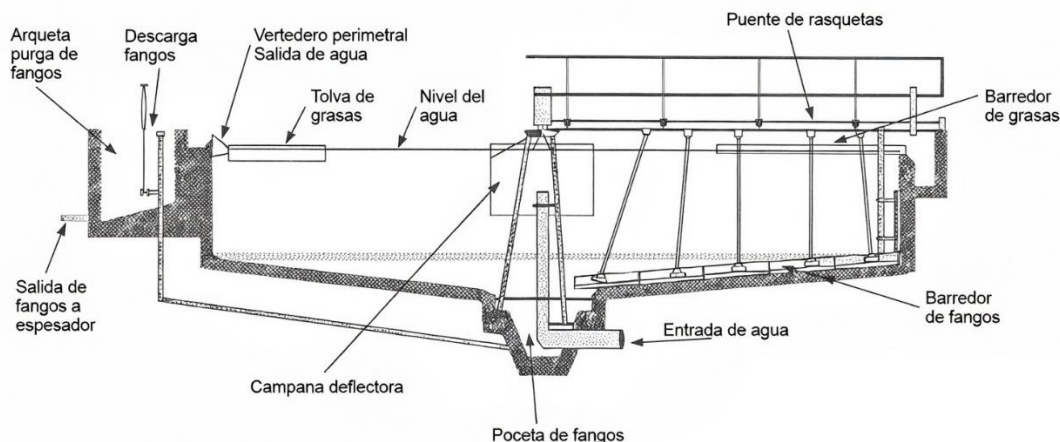
Tabla 8. Equipo por instalar, tanque de sedimentación secundaria

CLAVE	UNIDAD DE TRATAMIENTO	EQUIPAMIENTO	POTENCIA UNIDAD	OPERACIÓN	RESERVA
TSS	Tanque de Sedimentación Secundaria	Rastra y elemento motriz	0.75 kW	4	0
		Bomba de recirculación	7.5 kW	4	1
		Bomba de purga	4 kW	4	1

Figura 7. Clarificador Secundario, infraestructura similar a la propuesta



Figura 8. Clarificador Secundario, conceptual



4.3 Equipos espesadores de lodos

Propósito

Aumentar la concentración de sólidos en los lodos secundarios y reducir significativamente su volumen al separar y eliminar una gran cantidad de agua libre que estos contienen. Al disminuir el volumen de lodos, se optimiza y reduce la carga hidráulica y orgánica en las etapas posteriores del tratamiento, lo que permite ahorrar costos en almacenamiento, transporte, dimensionamiento de equipos subsiguientes, además de facilitar una gestión más eficiente y ambientalmente adecuada de los biosólidos.

Dimensiones

Tabla 9. Dimensiones de elementos de espesado de lodos

DIMENSIONES LINEA DE LODO PTAR PARQUE SANTIAGO 2550LPS							CAUDAL PROMEDIO (LPS)			2550	
CLAVE	TIPO	UNIDAD DE TRATAMIENTO	U	Ø (M)	L (M)	A (M)	H ₂ O (M)	HT (M)	S (M ²)	V.T. (M ³)	TRH (h)
EL	EDIFICIO	Espesadores de lodos	1.00	NA	20.00	10.00	NA	4.00	200	NA	NA
	EQUIPO	Equipo de espesado	5.00	NA	4.20	1.80	NA	2.00	38	NA	NA
	EQUIPO	Preparador de polímero	5.00	NA	1.00	1.00	NA	2.00	5	NA	NA

Material de construcción

Concreto armado de alta resistencia para losa de operación, edificación estándar para alojamiento de equipos.

Tabla 10. Equipo por instalar en espesado de lodos

EQUIPAMIENTO LINEA DE LODOS PTAR PARQUE SANTIAGO 2550LPS					
CLAVE	UNIDAD DE TRATAMIENTO	EQUIPAMIENTO	POTENCIA UNIDAD	OPERACIÓN	RESERVA
TSP	Tanque de Sedimentación Primaria	Rastra y elemento motriz	0.75 kW	4	0
		Bomba de tornillo lodos	7.5 kW	4	1
		Desmenuzador de lodos	7.5 kW	2	0
EL	Equipos espesadores de lodos	Equipo para espesamiento de lodos	5 kW	5	1
		Preparadores de polímero	0.4 kW	4	1
		Mezcladores en línea	3 kW	4	1

Figura 9. Equipo espesador de lodo, infraestructura similar a la propuesta.

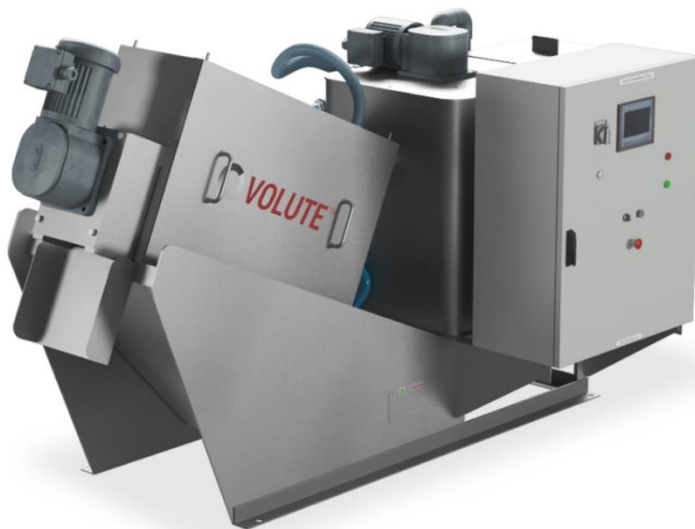
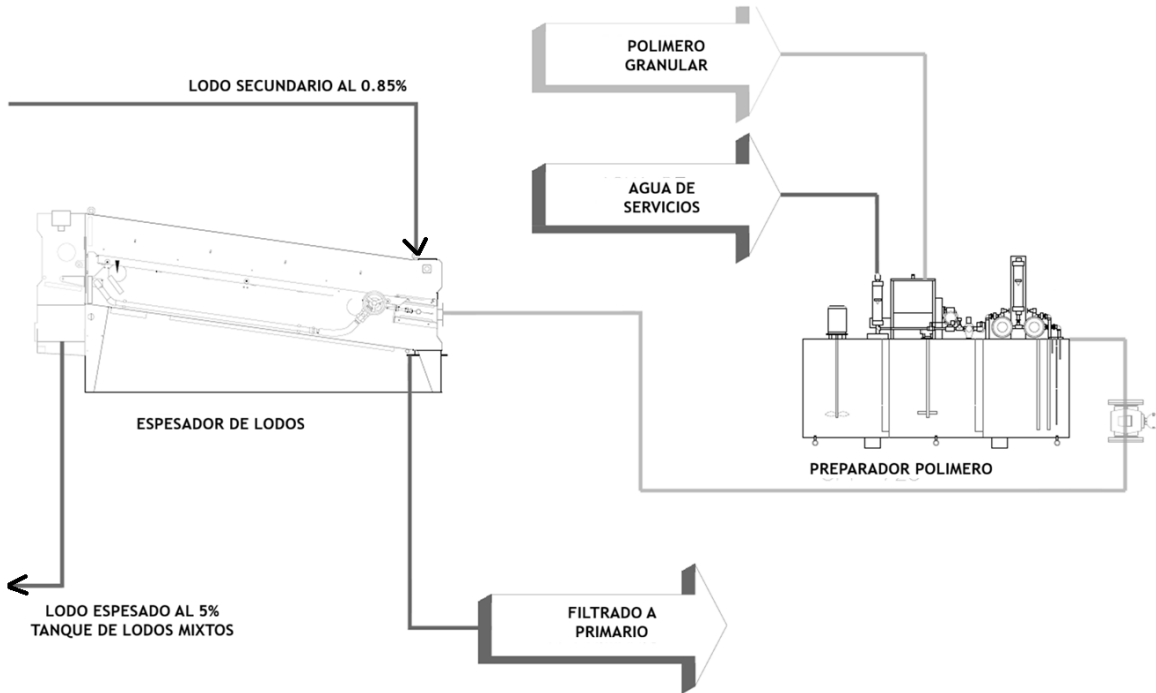


Figura 10. Equipo espesador de lodos, conceptual.



4.4 Tanque de lodos mixtos

Propósito

Almacenar y mezclar temporalmente lodos primarios y secundarios para posteriormente bombearlos a estabilización por medio de digestión anaeróbica.

Dimensiones

Tanque de lodos mixtos: 1 unidad, largo 12.00 m, ancho 12.00m profundidad total 3.50 m, profundidad agua 3.00 m, borde libre 0.50 m.

Tabla 11. Dimensiones del tanque de lodos mixtos

DIMENSIONES LINEA DE LODO PTAR PARQUE SANTIAGO 2550LPS							CAUDAL PROMEDIO (LPS)			2550	
CLAVE	TIPO	UNIDAD DE TRATAMIENTO	U	Ø (M)	L (M)	A (M)	H ₂ O (M)	HT (M)	S (M2)	V.T. (M3)	TRH (h)
TLM	TANQUE	Tanque de lodos mixtos	1.00	NA	12.00	12.00	3.00	3.50	144	432	0.05

Tanque de lodos mixtos: 1 unidad, largo 12.00 m, ancho 12.00m profundidad total 3.50 m, profundidad agua 3.00 m, borde libre 0.50 m.

Material de construcción

Concreto armado de alta resistencia

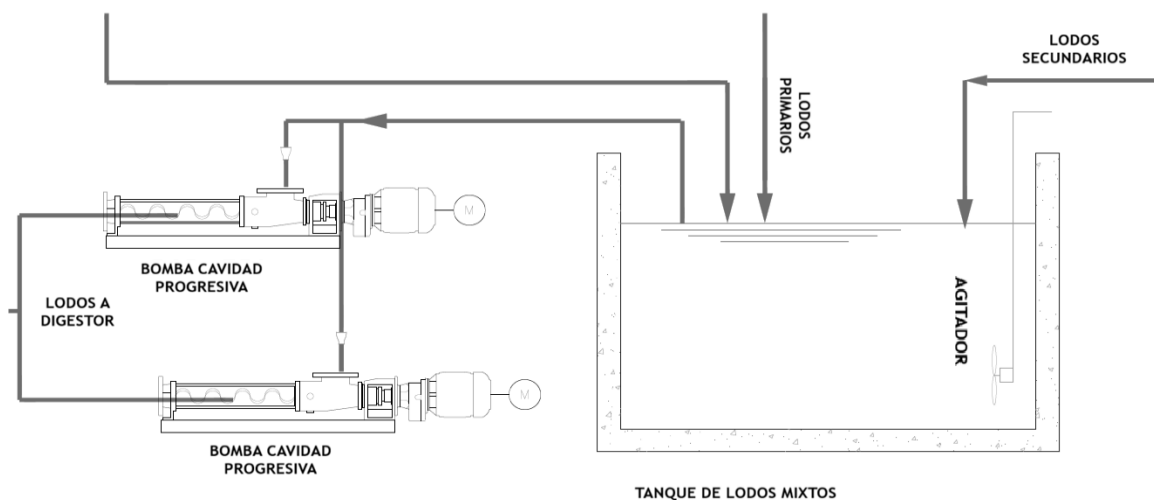
Tabla 12. Equipo por instalar, Tanque de lodos mixtos

EQUIPAMIENTO LINEA DE LODOS PTAR PARQUE SANTIAGO 2550LPS					
CLAVE	UNIDAD DE TRATAMIENTO	EQUIPAMIENTO	POTENCIA UNIDAD	OPERACIÓN	RESERVA
TLM	Tanque de lodos mixtos	Bombas de cavidad progresiva	10kw	2	1
		Agitador compacto	5 kW	1	1

Figura 11. Tanque de lodos mixtos, Infraestructura similar a la propuesta.



Figura 12. Tanque de lodos mixtos, conceptual.



4.5 Digestores de lodos

Propósito

Estabilizar los lodos primarios y secundarios mediante un proceso de digestión anaeróbica, eliminando el 50% de la porción volátil de los mismos, adicionalmente este proceso genera biogás aprovechable energéticamente.

Dimensiones

5 unidades circulares, todas en servicio.

Diámetro interno: 30.0 m.

Área superficial huella: 4,241.00 m²

Profundidad lateral promedio: 13.00 m

Tabla 13. Dimensiones Digestores de lodos

DIMENSIONES LINEA DE LODO PTAR PARQUE SANTIAGO 2550LPS							CAUDAL PROMEDIO (LPS)			2550	
CLAVE	TIPO	UNIDAD DE TRATAMIENTO	U	Ø (M)	L (M)	A (M)	H ₂ O (M)	HT (M)	S (M ²)	V.T. (M ³)	TRH (h)
DL	TANQUE	Digestores de lodos anaeróbicos	6.00	30.00	NA	NA	13.00	14.50	4,241	55,135	6.01

Material de construcción

Concreto armado de alta resistencia en tanque.
Acero AISI 304 en elementos mecánicos.

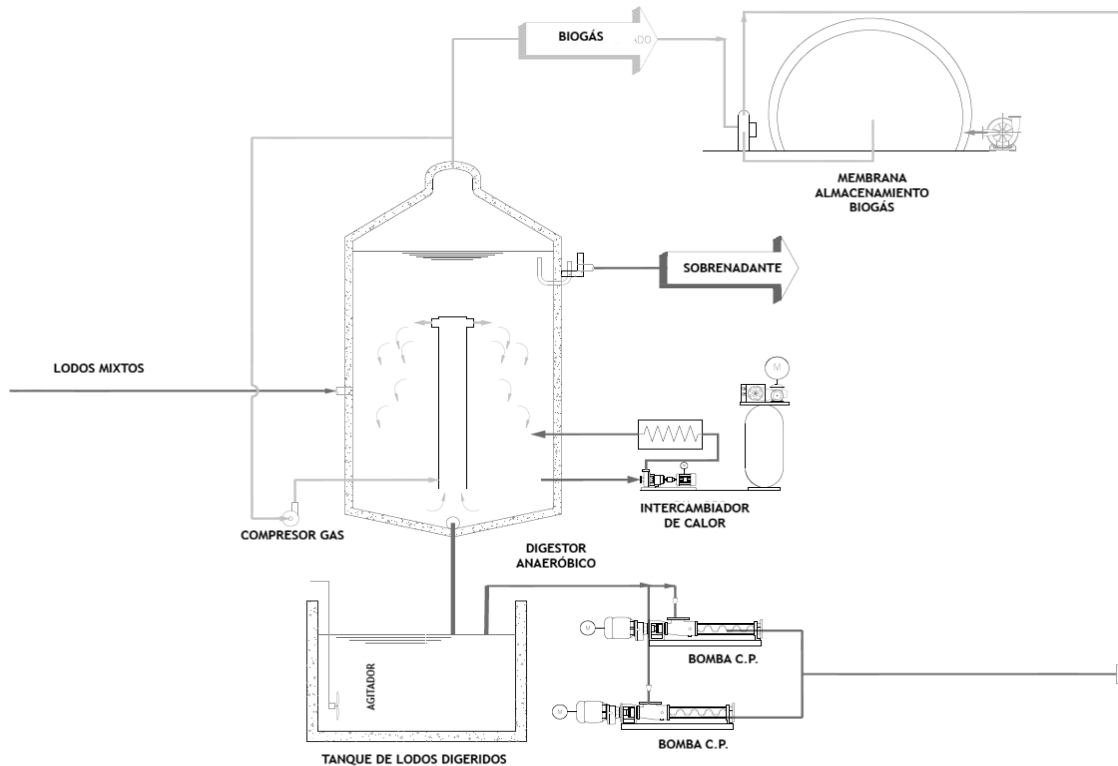
Tabla 14. Equipo por instalar en digestores anaeróbicos

EQUIPAMIENTO LINEA DE LODOS PTAR PARQUE SANTIAGO 2550LPS					
CLAVE	UNIDAD DE TRATAMIENTO	EQUIPAMIENTO	POTENCIA UNIDAD	OPERACIÓN	RESERVA
DL	Digestores anaeróbicos	Mezclador lateral	10 kW	18	0
		Mezclador de bóveda	15 kW	6	0
		Intercambiador de calor	33 kW	6	0

Figura 13. Digestores anaeróbicos, infraestructura similar a la propuesta



Figura 14. Digestores anaeróbicos, conceptual.



4.6 Tanque de lodos digeridos

Propósito

Almacenar y mezclar temporalmente lodos estabilizados en digestor anaeróbico para posteriormente bombearlos a deshidratación mecánica.

Dimensiones

Tanque de lodos digeridos: 1 unidad, largo 12.00 m, ancho 12.00m profundidad total 3.50 m, profundidad agua 3.00 m, borde libre 0.50 m.

Tabla 15. Dimensiones del tanque de lodos digeridos

DIMENSIONES LINEA DE LODO PTAR PARQUE SANTIAGO 2550LPS							CAUDAL PROMEDIO (LPS)			2550	
CLAVE	TIPO	UNIDAD DE TRATAMIENTO	U	Ø (M)	L (M)	A (M)	H2O (M)	HT (M)	S (M2)	V.T. (M3)	TRH (h)
TLD	TANQUE	Tanque de lodos digeridos	1.00	NA	12.00	12.00	3.00	3.50	144	432	0.05

Material de construcción

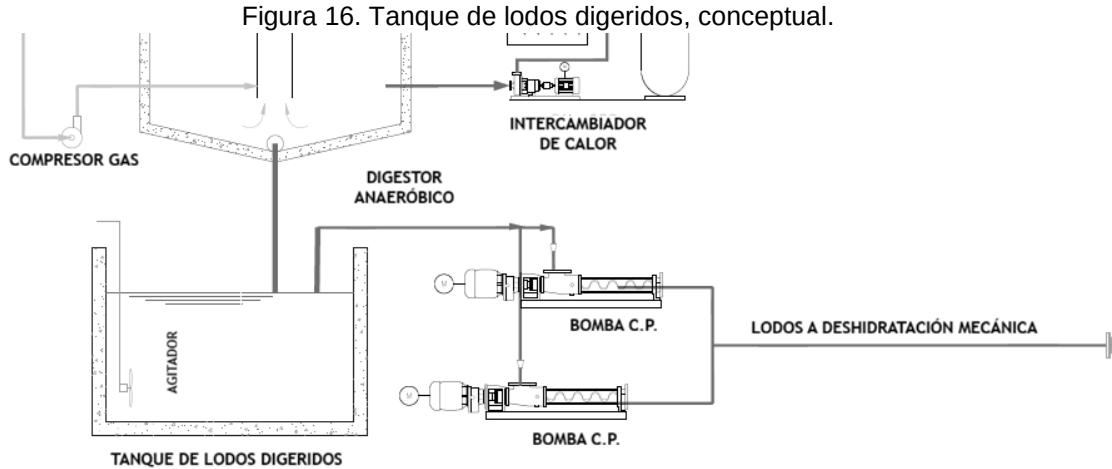
Concreto armado de alta resistencia

Tabla 16. Equipo por instalar, Tanque de lodos digeridos

EQUIPAMIENTO LINEA DE LODOS PTAR PARQUE SANTIAGO 2550LPS					
CLAVE	UNIDAD DE TRATAMIENTO	EQUIPAMIENTO	POTENCIA UNIDAD	OPERACIÓN	RESERVA
TLD	Tanque de lodos digeridos	Bombas de cavidad progresiva	10kw	2	1
		Agitador compacto	5 kW	1	1

Figura 15. Tanque de lodos digeridos, Infraestructura similar a la propuesta.





4.7 Deshidratación de lodos

Propósito

Remover agua de los sólidos de desecho digeridos procedentes del digestor anaeróbico, a partir de un proceso mecánico por medio de equipos de tornillo.

Dimensiones

Edificio: 60m largo x 20m ancho, altura 10 metros.

Tabla 17. Dimensiones de los elementos para deshidratación de lodos.

DIMENSIONES LINEA DE LODO PTAR PARQUE SANTIAGO 2550LPS							CAUDAL PROMEDIO (LPS)			2550	
CLAVE	TIPO	UNIDAD DE TRATAMIENTO	U	Ø (M)	L (M)	A (M)	H ₂ O (M)	HT (M)	S (M2)	V.T. (M3)	TRH (h)
ESL	EDIFICIO	Edificio de deshidratación de lodos	1.00	NA	20.00	60.00	NA	NA	1,200	NA	NA
	EQUIPO	Tornillo Volute deshidratación	5.00	NA	7.00	3.00	NA	3.00	105	NA	NA
	EQUIPO	Preparador de polímero	5.00	NA	1.00	1.00	NA	2.00	5	NA	NA

Material de construcción

Concreto armado en tanque, acero AISI 304 elementos mecánicos.

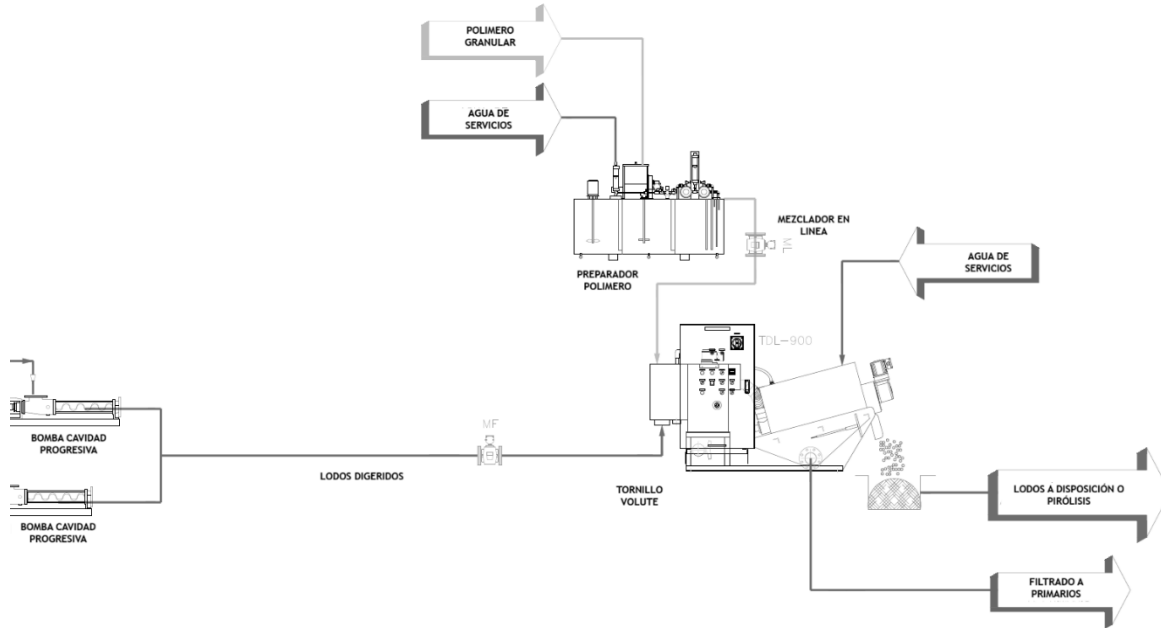
Tabla 18. Equipo por instalar, deshidratado de lodos

EQUIPAMIENTO LINEA DE LODOS PTAR PARQUE SANTIAGO 2550LPS					
CLAVE	UNIDAD DE TRATAMIENTO	EQUIPAMIENTO	POTENCIA UNIDAD	OPERACIÓN	RESERVA
ESL	Edificio de deshidratado de lodos	Tornillos Volute	8.2 kW	5	1
		Preparadores de polímero	0.4 kW	5	1
		mezcladores en línea	3 kW	5	1

Figura 17. Deshidratador de lodos de tornillo, infraestructura similar a la propuesta



Figura 18. Deshidratador de lodos de tornillo, conceptual



4.8 Pirólisis de lodos

Propósito

La pirólisis de lodos de aguas residuales consiste en calentar estos residuos orgánicos en ausencia de oxígeno a altas temperaturas, con el propósito principal de transformar un desecho problemático en recursos valiosos, reducir su volumen de manera significativa y eliminar patógenos, contaminantes orgánicos y micro contaminantes de forma segura. Este proceso genera principalmente biochar, un carbón estable rico en carbono que puede usarse como enmienda del suelo, secuestrar carbono o recuperar nutrientes como el fósforo. También se produce bio-aceite y syngas, los cuales sirven como fuentes de energía para mantener el proceso autotérmico promoviendo así la minimización del impacto ambiental en comparación con métodos tradicionales como el vertido o la incineración directa.

Medidas

Área designada para pirólisis: 1,200m²

Tabla 19. Dimensiones edificio de pirólisis

DIMENSIONES LINEA DE LODO PTAR PARQUE SANTIAGO 2550LPS							CAUDAL PROMEDIO (LPS)			2550	
CLAVE	TIPO	UNIDAD DE TRATAMIENTO	U	Ø (M)	L (M)	A (M)	H2O (M)	HT (M)	S (M2)	V.T. (M3)	TRH (h)

"ELABORACIÓN DE LAS INGENIERÍAS BÁSICAS PARA EL SANEAMIENTO DE
SUBCUENCAS SAN ANDRÉS, OSORIO Y SAN GASPAR"
PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL (PTAR) 2550 L.P.S. SAN ANDRES-OSORIO-SAN
GASPAR

**GOBIERNO DEL
ESTADO DE JALISCO**

CEA-047 PROCESO DE TRATAMIENTO DEL TREN DE LODO

PIR	EDIFICIO	Edificio de pirólisis	1.00	NA	20.00	60.00	NA	NA	1,200	NA	NA
-----	----------	-----------------------	------	----	-------	-------	----	----	-------	----	----

Material de construcción

Concreto armado de alta resistencia para losa de operación, edificación estándar para alojamiento de equipos.

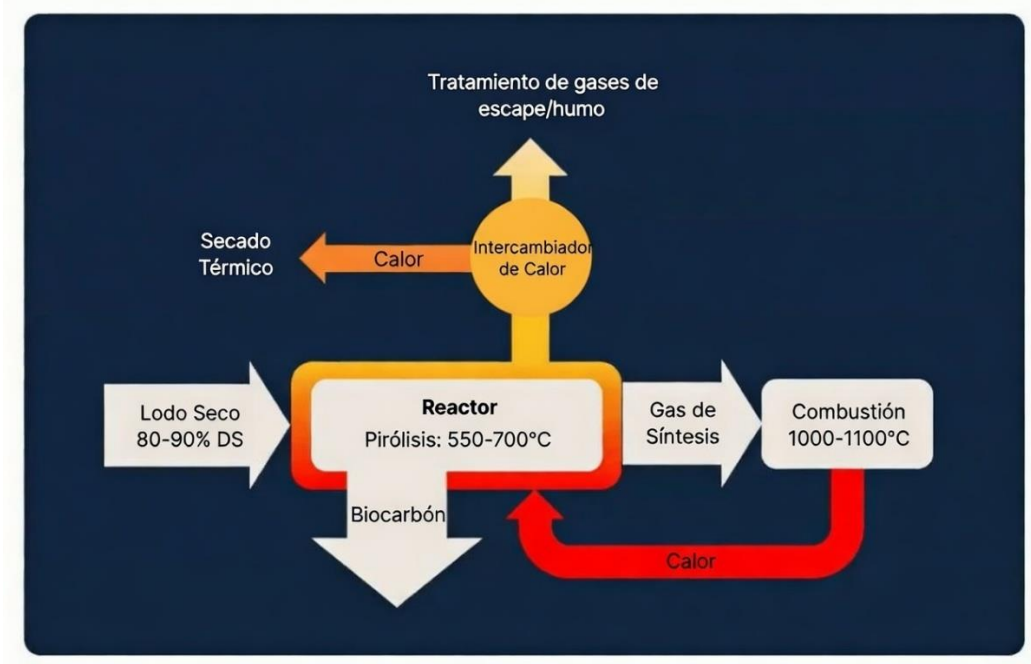
Tabla 20. Equipos por instalar, pirólisis de lodos.

EQUIPAMIENTO LINEA DE LODOS PTAR PARQUE SANTIAGO 2550LPS					
CLAVE	UNIDAD DE TRATAMIENTO	EQUIPAMIENTO	POTENCIA UNIDAD	OPERACIÓN	RESERVA
PIR	Edificio de pirólisis de lodos	Equipos diversos (secador de lodos, tornillos dosificadores, Reactor de pirólisis de tornillo gemelo, transportador y enfriador de biochar, recuperador de calor)	1000 kW	1	0

Figura 19. Pirólisis de lodos, infraestructura similar a la propuesta



Figura 20. Pirólisis de lodos concentrados



4.9 Almacenamiento de biogás

Propósito

Las membranas dobles o gasómetros de doble membrana para el almacenamiento de biogás tienen como propósito principal proporcionar un sistema flexible, seguro y eficiente para contener el biogás producido en procesos de digestión anaeróbica, permitiendo una acumulación variable según la producción y la demanda.

Consisten en una membrana interna que almacena directamente el biogás y una membrana externa inflada con aire que protege la interna de las condiciones ambientales regula la presión constante y mantiene la forma estructural del domo o cubierta.

Este diseño ofrece ventajas como bajo costo de inversión y mantenimiento, alta capacidad de almacenamiento, minimización de emisiones y olores, aislamiento térmico y operación a presión controlada, facilitando el uso continuo del biogás en generación de energía renovable sin necesidad de almacenamiento rígido costoso.

Dimensiones:

Membrana: $\frac{3}{4}$ de esfera de 30m de diámetro

Tabla 21. Dimensiones de la membrana de almacenamiento de biogás.

DIMENSIONES LINEA DE LODO PTAR PARQUE SANTIAGO 2550LPS							CAUDAL PROMEDIO (LPS)			2550	
CLAVE	TIPO	UNIDAD DE TRATAMIENTO	U	Ø (M)	L (M)	A (M)	H ₂ O (M)	HT (M)	S (M2)	V.T. (M3)	TRH (h)
MG	EQUIPO	Membrana de almacenamiento de biogás	1.00	30.00	NA	NA	13.00	14.50	707	9,189	1.00

Material de construcción

Tejidos de poliéster (PES) reforzados y recubiertos con PVC (policloruro de vinilo) de alta calidad, con tratamientos especiales en ambas caras para mejorar su resistencia

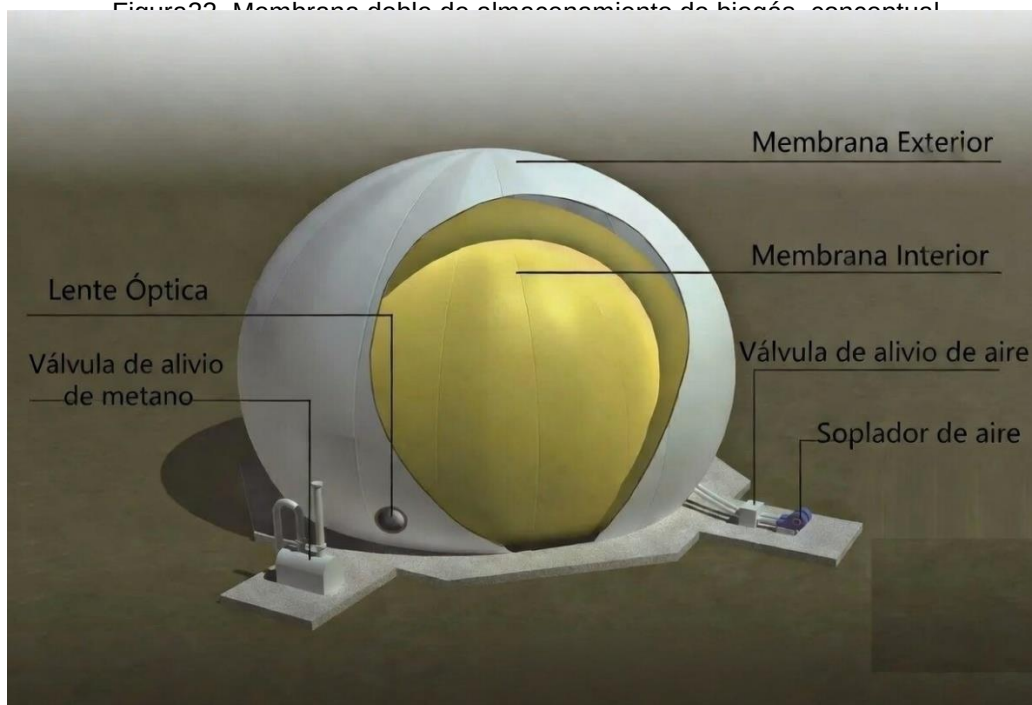
Tabla 22. Membrana de almacenamiento, equipo por instalar.

EQUIPAMIENTO LINEA DE LODOS PTAR PARQUE SANTIAGO 2550LPS					
CLAVE	UNIDAD DE TRATAMIENTO	EQUIPAMIENTO	POTENCIA UNIDAD	OPERACIÓN	RESERVA
MG	Membrana de almacenamiento de biogás	Soplador	5 kW	1	1
		Sistema de control de presión	0.1 KW	1	1

Figura21. Membrana dobla de almacenamiento de biogás, infraestructura similar a la propuesta



Figura 23. Membrana doble de almacenamiento de biogás conceptual



4.10 Lavado de biogás

Propósito

Purificar y enriquecer el biogás crudo para convertirlo en biometano de alta calidad. Este proceso aprovecha la mayor solubilidad del dióxido de carbono (CO_2) y del sulfuro de hidrógeno (H_2S) en agua comparado con el metano (CH_4), eliminando estas impurezas mediante contacto contracorriente en una columna de absorción presurizada.

Dimensiones:

Superficie necesaria: 480m²

Tabla 23. Dimensiones de la membrana de almacenamiento de biogás.

DIMENSIONES LINEA DE LODO PTAR PARQUE SANTIAGO 2550LPS							CAUDAL PROMEDIO (LPS)			2550	
CLAVE	TIPO	UNIDAD DE TRATAMIENTO	U	Ø (M)	L (M)	A (M)	H ₂ O (M)	HT (M)	S (M ²)	V.T. (M ³)	TRH (h)
LG	EDIFICIO	Lavado de gases	1.00	NA	32.00	15.00	NA	5.00	480	NA	NA

Material de construcción

Concreto armado en losa de operación, construcción estándar en edificio, acero AISI 304 en equipamiento

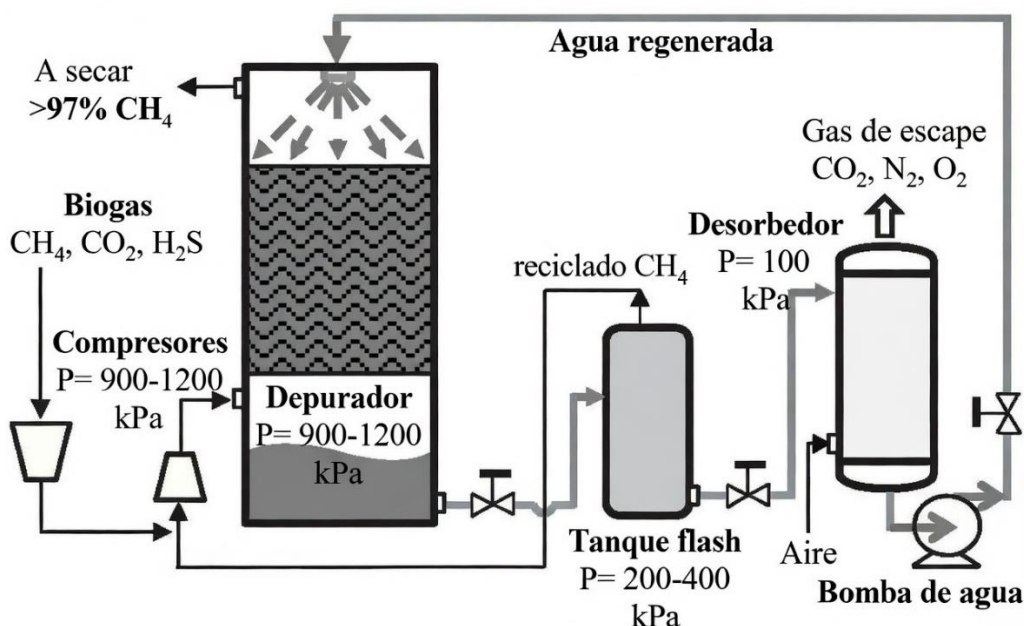
Tabla 24. Lavado de biogás, equipo por instalar.

EQUIPAMIENTO LINEA DE LODOS PTAR PARQUE SANTIAGO 2550LPS					
CLAVE	UNIDAD DE TRATAMIENTO	EQUIPAMIENTO	POTENCIA UNIDAD	OPERACIÓN	RESERVA
LG	Lavado de gases	Compresor de biogás Columna de absorción Bomba de circulación agua Soplador de aire	324 kW	1	0

Figura 23. Lavado de biogás, infraestructura similar a la propuesta



Figura 24 Levada de biogás conceptual



4.11 Cogeneración con biometano

Propósito

Generar simultáneamente electricidad y calor útil a partir de la combustión del biometano en motores de cogeneración o microturbinas, maximizando la eficiencia energética global del proceso. Este sistema aprovecha el biometano purificado para producir energía eléctrica que puede autoconsumirse o inyectarse a la red, mientras que el calor residual se recupera para calefacción de digestores anaeróbicos.

Dimensiones:

Superficie necesaria: 576m²

Tabla 25. Dimensiones del área para cogeneración con biometano.

DIMENSIONES LINEA DE LODO PTAR PARQUE SANTIAGO 2550LPS							CAUDAL PROMEDIO (LPS)			2550	
CLAVE	TIPO	UNIDAD DE TRATAMIENTO	U	Ø (M)	L (M)	A (M)	H2O (M)	HT (M)	S (M2)	V.T. (M3)	TRH (h)
COG	EDIFICIO	Edificio de cogeneración	1.00	NA	32.00	18.00	NA	5.00	576	NA	NA

Material de construcción

Concreto armado en losa de operación, construcción estándar en edificio, acero AISI 304 en equipamiento

Tabla 26. Cogeneración, equipo por instalar.

EQUIPAMIENTO LINEA DE LODOS PTAR PARQUE SANTIAGO 2550LPS					
CLAVE	UNIDAD DE TRATAMIENTO	EQUIPAMIENTO	POTENCIA UNIDAD	OPERACIÓN	RESERVA
COG	Cogeneración con biogás	Generadores de biometano	1000 kW	3	1

Figura 25. Cogeneración con biometano, infraestructura similar a la propuesta



Figura 26. Cogeneración con biometano, conceptual

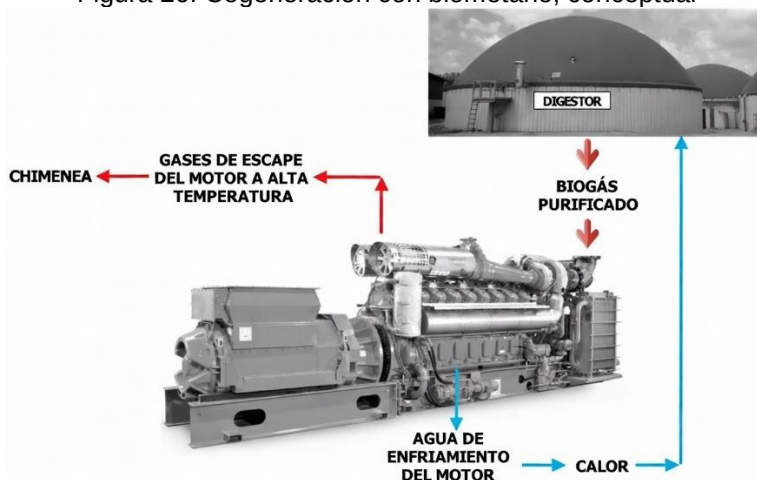


Tabla 27. Equipamiento del tren de lodo

EQUIPAMIENTO LINEA DE LODOS PTAR PARQUE SANTIAGO 2550LPS					
CLAVE	UNIDAD DE TRATAMIENTO	EQUIPAMIENTO	POTENCIA UNIDAD	OPERACIÓN	RESERVA
TSP	Tanque de Sedimentación Primaria	Rastra y elemento motriz	0.75 kW	4	0
		Bomba de tornillo lodos	7.5 kW	4	1
		Desmenuzador de lodos	7.5 kW	2	0
EL	Equipos espesadores de lodos	Equipo para espesamiento de lodos	5 kW	5	1
		Preparadores de polímero	0.4 kW	4	1
		Mezcladores en línea	3 kW	4	1
TSS	Tanque de Sedimentación Secundaria	Rastra y elemento motriz	0.75 kW	4	0
		Bomba de recirculación	7.5 kW	4	1
		Bomba de purga de lodos	3 kW	4	1
TLM	Tanque de lodos mixtos	Bombas de cavidad progresiva	10kw	2	1
		Agitador compacto	5 kW	1	1
DL	Digestores anaeróbicos	Compresor mezcla	65 kW	6	0
		Lanzas de gas mezcla	0 kW	36	0
		Intercambiador de calor	33 kW	6	0
TLD	Tanque de lodos digeridos	Bombas de cavidad progresiva	10kw	2	1
		Agitador compacto	5 kW	1	1
ESL	Edificio de deshidratado de lodos	Tornillos Volute	8.2 kW	5	1
		Preparadores de polímero	0.4 kW	5	1
		mezcladores en línea	3 kW	5	1
PIR	Edificio de pirólisis	Equipos diversos (secador de lodos, tornillos dosificadores, Reactor de pirólisis de tornillo gemelo, transportador y enfriador de biochar, recuperador de calor)	1000 kW	1	0
MG	Membrana de almacenamiento de biogás	Soplador	5 kW	1	1
		Sistema de control de presión	0.1 KW	1	1
LG	Lavado de gases	Compresor de biogás Columna de absorción Bomba de circulación agua Soplador de aire	324 kW	1	0

"ELABORACIÓN DE LAS INGENIERÍAS BÁSICAS PARA EL SANEAMIENTO DE
SUBCUENCAS SAN ANDRÉS, OSORIO Y SAN GASPAR"
PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL (PTAR) 2550 L.P.S. SAN ANDRES-OSORIO-SAN
GASPAR

**GOBIERNO DEL
ESTADO DE JALISCO**

CEA-047 PROCESO DE TRATAMIENTO DEL TREN DE LODO

COG	Cogeneración con biogás	Generadores de biometano	1000 kW	3	1
-----	-------------------------	--------------------------	---------	---	---

Tabla 28. Dimensiones de las unidades de proceso tren de lodo

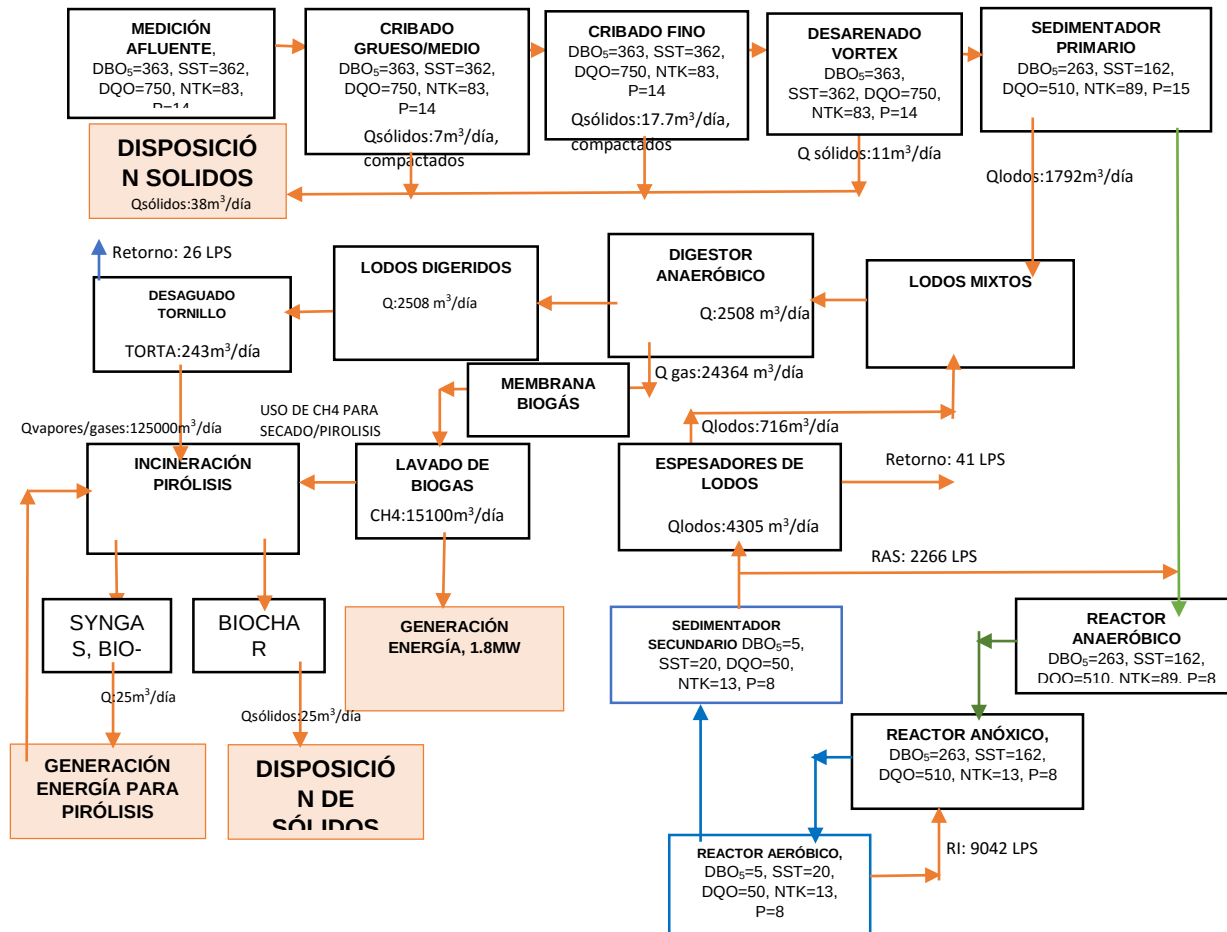
DIMENSIONES LINEA DE LODO PTAR PARQUE SANTIAGO 2550LPS							CAUDAL PROMEDIO (LPS)			2550	
CLAVE	TIPO	UNIDAD DE TRATAMIENTO	U	Ø (M)	L (M)	A (M)	H2O (M)	HT (M)	S (M2)	V.T. (M3)	TRH (h)
TSP	TANQUE	Tanque de Sedimentación Primaria	4.00	41.00	NA	NA	4.50	5.00	5,281	23,765	2.59
EL	EDIFICIO	Espesadores de lodos	1.00	NA	20.00	10.00	NA	4.00	200	NA	NA
	EQUIPO	Equipo de espesado	5.00	NA	4.20	1.80	NA	2.00	38	NA	NA
	EQUIPO	Preparador de polímero	5.00	NA	1.00	1.00	NA	2.00	5	NA	NA
TSS	TANQUE	Tanque de Sedimentación Secundaria	4.00	54.00	NA	NA	4.50	5.00	9,161	41,224	4.49
TLM	TANQUE	Tanque de lodos mixtos	1.00	NA	12.00	12.00	3.00	3.50	144	432	0.05
DL	TANQUE	Digestores de lodos anaeróbicos	6.00	30.00	NA	NA	13.00	14.50	4,241	55,135	6.01
TLD	TANQUE	Tanque de lodos digeridos	1.00	NA	12.00	12.00	3.00	3.50	144	432	0.05
ESL	EDIFICIO	Edificio de deshidratación de lodos	1.00	NA	20.00	60.00	NA	NA	1,200	NA	NA
	EQUIPO	Tornillo Volute deshidratación	5.00	NA	7.00	3.00	NA	3.00	105	NA	NA
	EQUIPO	Preparador de polímero	5.00	NA	1.00	1.00	NA	2.00	5	NA	NA
PIR	EDIFICIO	Edificio de pirólisis	1.00	NA	20.00	60.00	NA	NA	1,200	NA	NA
MG	EQUIPO	Membrana de almacenamiento de biogás	1.00	30.00	NA	NA	13.00	14.50	707	9,189	1.00
LG	EDIFICIO	Lavado de gases	1.00	NA	32.00	15.00	NA	5.00	480	NA	NA
COG	EDIFICIO	Edificio de cogeneración	1.00	NA	32.00	18.00	NA	5.00	576	NA	NA
*NA= no aplica, Ø diámetro, L=longitud, A=ancho, H2O=tirante, HT=altura muro, S=superficie, V.T.= Volumen total, TRH=tiempo de retención hidráulica									A (M2)	V.T. (M3)	TRH (h)
								TOTALES	23,487	130,177	14

CEA-047 PROCESO DE TRATAMIENTO DEL TREN DE LODO

5. Balance de Materia del tren de lodos

Figura 27. Balance de Materia PTAR Parque Santiago Cap. 2550LPS

promedio.

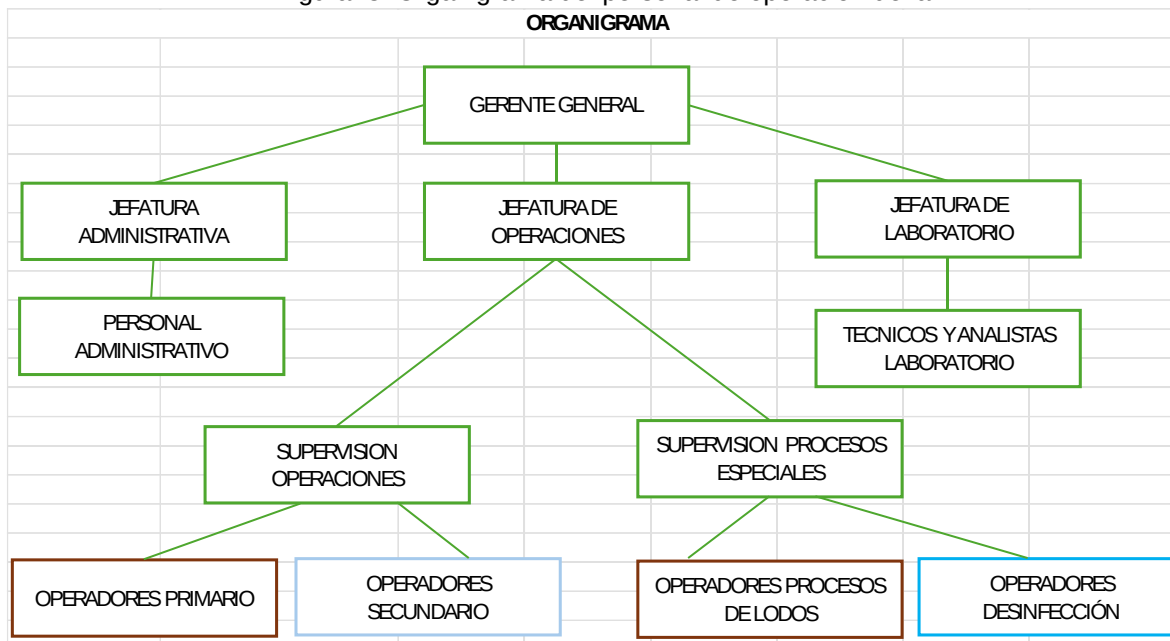


6. Operación y Mantenimiento para el tren de lodos

La operación y mantenimiento del tren de lodo debe garantizar continuidad del tratamiento completo, eficiencia energética, cumplimiento el marco normativo (NOM-004-SEMARNAT-2022) y minimización de riesgos ambientales.

6.1 Organigrama del personal de operación

Figura28. Organigrama del personal de operación de la PTAR



6.2 Estimación de consumo de energía del tren de lodos

Consumo firme promedio estimado: **210 kW**

Tabla 29. Consumo de energía eléctrica línea de lodos PTAR

Energía Eléctrica Operación Planta de Tratamiento		
Área / Categoría	Unidades Principales Incluidas	Potencia en Uso Continuo (kW)
Línea de Lodos	Espesadores, digestores (compresores biogás), bombas de lodos, soplador almacenamiento gas, lavado de gases, tornillo volute	210
Total	Línea de lodos	210

6.2 Estimación de Reactivos para el tren de lodos

Tabla 30. Masa de reactivos línea de lodos

Masa de Reactivos / Químicos de Proceso		
Reactivo / Químico	Detalle principal	Cantidad aproximada
Floculantes espesamiento	PAC para mejora de floculación	4.5Ton/mes (1500usd/Ton)
Floculantes tornillo lodos	PAC para mejora de floculación	16 Ton/mes (1500usd/Ton)
Misceláneos	Otros reactivos menores (antiespumantes, ajustadores pH, etc.)	variable

6.3 Reincorporación las corrientes internas de retorno del tren de lodos

Filtrados de deshidratación y espesamiento: retorno a ingreso de sedimentación primaria

Condensados y lavados de limpieza: retorno a sedimentación primaria.

6.4 Flexibilidad operativa y automatización.

La planta contará con redundancia para permitir mantenimiento sin interrupción.

Sistema SCADA integral para monitoreo remoto, alarmas y registro continuo de caudales, calidad efluente, consumos.

Mantenimiento predictivo recomendado (vibraciones, horas operación) y limpieza automática de equipos

7. Monitoreo y Laboratorio

El laboratorio de la PTAR se diseña como una instalación independiente, ubicada al final del predio para minimizar interferencias con áreas operativas de alto tráfico como el patio de maniobras, deshidratación y cogeneración.

Su propósito es realizar monitoreo rutinario para control de proceso en el caso del tren de lodos, se deberá atender lo indicado por la NOM-004-SEMARNAT-2002:

Tabla 31. Frecuencia de muestreo y análisis para lodos y biosólidos

Volumen generado por año (Ton/Año) en base seca	Frecuencia de muestreo y análisis	Parámetros a determinar
Hasta 1,500	Una vez al año	Metales pesados, indicador bacteriológico de contaminación, patógenos y parásitos
Mayor de 1,500 hasta 15,000	Una vez por semestre	Metales pesados, indicador bacteriológico de contaminación, patógenos y parásitos
Mayor de 15,000	Una vez por trimestre	Metales pesados, indicador bacteriológico de contaminación, patógenos y parásitos

8. Conclusiones

El anteproyecto de la línea de tratamiento de lodo para procesar un caudal de aguas residuales de 2550 L/s demuestra una configuración robusta y eficiente, adecuada para cumplir con normativas estrictas de disposición de biosólidos. El tren propuesto asegura una operación robusta y flexible y contempla el retiro accesible de los mismos.

La opción de implementación de un sistema de pirólisis para el tratamiento de lodos de aguas residuales ofrece múltiples ventajas clave que lo posicionan como una tecnología sostenible y eficiente frente a métodos tradicionales. Permite reducir drásticamente el volumen de lodos hasta un 90 %, eliminar patógenos, metales pesados y contaminantes orgánicos persistentes de forma segura, y transformar un residuo problemático en recursos valiosos: biochar (rico en carbono estable, ideal para mejorar suelos, secuestrar CO₂ o recuperar fósforo), bio-aceite y syngas utilizables como fuentes de energía renovable.

9. Referencias

- Metcalf & Eddy, Wastewater Engineering, FIFTH EDITION, 2014.
- WEF MOP 8, Design of Municipal Wastewater Treatment Plants, 2018.
- NOM-001-SEMARNAT-2021.
- NOM-004-SEMARNAT-2002
- NOM-003-SEMARNAT-1997

10. Anexos

- Diagrama de flujo detallados y balance de materia.
- Memoria completa de cálculos.