



---

---

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

**FACULTAD DE QUÍMICA**

**DISEÑO DE UN SISTEMA DE RECUPERACIÓN Y TRATAMIENTO DE LODOS  
PRODUCIDOS EN UN REACTOR BIOLÓGICO TUBULAR (RBT), PARA EL  
TRATAMIENTO DE AGUA EN UN CANAL UBICADO EN XOCHIMILCO.**

*Tesis*

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:**

**INGENIERA QUÍMICA**

**PRESENTA:**

**ALEJANDRA PAOLA RENDÓN MORENO**

**ASESOR:**

**DR. SERGIO ADRIÁN GARCÍA GONZÁLEZ**



Ciudad Universitaria, CD. MX., 2022



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**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.

**JURADO ASIGNADO:**

Presidente	M. en I. María Rafaela Gutiérrez Lara
Vocal:	Dr. Alfonso Durán Moreno
Secretario	Dr. Sergio Adrián García González
Suplente 1	M. en C. Alejandra Mendoza Campos
Suplente 2	M. en I. Úrsula Manríquez Tolsá

**SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:**

Unidad de Proyectos y de Investigación en Ingeniería Ambiental (UPIIA)

Laboratorio 301, conjunto E

Departamento de Ingeniería Química

Facultad de Química, conjunto E

Universidad Nacional Autónoma de México

ASESOR DEL TEMA:

\_\_\_\_\_

Dr. Sergio Adrián García González

SUPERVISOR TÉCNICO:

\_\_\_\_\_

Dr. Alfonso Durán Moreno

SUSTENTANTE:

\_\_\_\_\_

Alejandra Paola Rendón Moreno

## AGRADECIMIENTOS

Agradezco a la Universidad Nacional Autónoma de México y a la Facultad de Química, por haberme permitido formarme en ellas, así como a cada uno de los docentes, personal administrativo y compañeros que fueron partícipes de mi desarrollo, ya sea de forma directa o indirecta. Gracias por permitirme crecer, aprender y conocer personas excepcionales.

A mis padres Emma y Luis, por dedicar una gran parte de su vida en apoyarme tanto económica como emocionalmente. Gracias por estar allí en cada nueva aventura y por darme el legado más importante de la vida que es la educación, por la cual les estaré eternamente agradecida.

A mi mejor amiga Diana, por toda la paciencia que has tenido conmigo, estoy consciente de que no ha sido nada fácil. Gracias por estar allí en los momentos más difíciles, por motivarme a seguir adelante y por todas esas aventuras (muchas de ellas vergonzosas) que alegran mi vida, siempre estaré agradecida.

A esas 15 personas que recibieron una carta de mi parte hace ya 9 años, quiero recordarles que sin ustedes yo no estaría aquí. Muchas gracias por haber sido y seguir siendo parte fundamental de mi vida.

A mis buenos amigos: Braulio, Isabel, Lety, Leo, Óscar, Iván y Pao por aconsejarme, brindarme su ayuda cuando fue necesario y por la amistad que me han demostrado hasta ahora. No olviden que los quiero y que siempre contarán conmigo.

A mi amigo César, por dedicar parte de su tiempo en revisar este trabajo y brindarme sus comentarios, perdón por haber sido tan insistente.

A mi asesor de tesis el Dr. Sergio Adrián García González porque sin su tiempo, paciencia y buenos consejos, culminar de escribir lo que hoy eh logrado habría sido más complicado. Muchas gracias por sus palabras de aliento, cuando más las necesité.

A los sinodales quienes cordialmente se tomaron el tiempo de revisar mi trabajo y expresar sus comentarios para enriquecerlo. Agradezco mucho cada uno de sus comentarios.

A mis compañeros del laboratorio 301 de Ingeniería Ambiental, por brindarme su ayuda cuando la necesité y por los recuerdos que creamos juntos.

A todas las personas que de una u otra manera estuvieron a mi lado, que me enseñaron y me dieron ánimos. A ti, por tomarte el tiempo de leer esta tesis.

## RECONOCIMIENTOS

Al proyecto CM-SECTEI/033/2022 titulado “Tratamiento y reúso in situ de aguas residuales en espacios públicos de la CDMX mediante procesos biológicos y fisicoquímicos, en módulos tubulares compactos y de bajo costo” por la beca otorgada durante la realización de este trabajo.

## Contenido:

Resumen.....	3
CAPÍTULO 1.....	4
Introducción.....	4
Justificación.....	6
Objetivos.....	7
Objetivo general.....	7
Objetivos particulares .....	7
CAPÍTULO 2.....	8
Marco Teórico.....	8
2.1. Balance de materia de la producción de lodos .....	8
2.2. Estabilización del lodo.....	11
2.2.1. Estabilización alcalina.....	13
2.3. Espesamiento del lodo.....	14
2.4. Programa SuperPro Designer.....	15
2.4.1. Equipos SuperPro Designer.....	15
CAPÍTULO 3.....	20
Metodología .....	20
3.1. Estimación de la cantidad de lodo generado .....	20
3.2. Tamaño de grano.....	26
3.3. Área máxima de filtrado (Filtro Prensa).....	27
3.4. Bomba de lodos .....	28
3.5. Consideraciones para la simulación del proceso de filtrado .....	35
3.6. Condiciones de operación SuperPro Designer .....	39
3.7. Limpieza preventiva de la línea de purga .....	47
3.8. Simulación del compresor .....	50
3.9. Mantenimiento de los filtros.....	54
3.9.1. Filtro prensa.....	55
3.9.2. Filtro de discos.....	55
3.10. Manejo del lodo .....	57
3.10.1. Etapa previa a la estabilización .....	57
3.10.2. Etapa de estabilización .....	57

3.10.3. Etapa posterior a la estabilización.....	59
CAPÍTULO 4.....	60
Resultados, Análisis y Discusión.....	60
4.1. Resultados del filtro prensa.....	60
4.2. Resultados del filtro de discos.....	63
4.3. Resultados secador.....	66
4.4. Estabilización del lodo.....	69
Conclusiones.....	71
Recomendaciones.....	72
Referencias.....	73
ANEXO A: Factores de Fricción para cualquier tipo de tubería comercial.....	77
ANEXO B: DFP de la PTAR en el polígono de San Lorenzo, Xochimilco.....	78
ANEXO C: DTI de la PTAR en el polígono de San Lorenzo, Xochimilco.....	79
ANEXO D: Manual de operación y mantenimiento de la línea de purga.....	80

## Índice de Tablas:

Tabla 1 Límites máximos permisibles para metales pesados en biosólidos .....	11
Tabla 2 Límites máximos permisibles para patógenos y parásitos en lodos y biosólidos .	12
Tabla 3 Frecuencia de muestreo y análisis .....	12
Tabla 4 Ventajas y desventajas de los diferentes tipos de métodos de filtrado .....	14
Tabla 5 Condiciones de operación predeterminadas (Filtro prensa). .....	16
Tabla 6 Condiciones de operación predeterminadas (Filtrado sin salida).....	17
Tabla 7 Condiciones de operación predeterminadas (Secado de placas). .....	18
Tabla 8 ...Continuación de Tabla 7 .....	19
Tabla 9 Datos auxiliares (Secado de placas). .....	19
Tabla 10 Valores considerados para el cálculo de SSV. ....	23
Tabla 11 Valores correspondientes a los tipos de lodos .....	27
Tabla 12 Capacidad por ciclo para 400L de lodo .....	28
Tabla 13 Datos recolectados de distintos distribuidores de filtros prensa.....	28
Tabla 14 Longitud equivalente en reducciones y ampliaciones de PVC. ....	33
Tabla 15 Porcentajes por componente en el influente del equipo de filtrado. ....	36
Tabla 16 Flujo por componente en el influente del equipo de filtrado. ....	36
Tabla 17 Propiedades de la biomasa $CH_{1.8}O_{0.5}N_{0.2}$ .....	37
Tabla 18 Propiedades de la biomasa muerta. Se tomó como “blanco” el componente agua y las propiedades se modificaron de acuerdo con lo señalado en el ejemplo base. ....	38
Tabla 19 Cambio en las propiedades de la biomasa para la simulación $CH_{1.8}O_{0.5}N_{0.2}$ . ....	41
Tabla 20 Cambio en las propiedades de la biomasa muerta para la simulación. ....	41
Tabla 21 Dosis de $Ca(OH)_2$ requerida para el proceso de estabilización alcalina de lodos .....	58
Tabla 22 Requisitos fisicoquímicos y sanitarios para los mejoradores de suelos .....	59
Tabla 23 Condiciones y tiempo máximo de almacenamiento de las muestras .....	69
Tabla 24 Parámetros y frecuencia de muestreo para biosólido después de la estabilización alcalina .....	70



## Índice de Figuras:

Figura 1 Corrientes en equipo de simulación (Filtro prensa). .....	15
Figura 2 Corrientes en equipo de simulación (Filtro de discos). .....	16
Figura 3 Corrientes en equipo de simulación (Secado por placas).....	18
Figura 4 Granulometría de lodos de Estaciones de Depuración de Aguas Residuales en España .....	26
Figura 5 Bomba centrífuga SIEMENS motor monofásico 1 HP. ....	29
Figura 6 Pérdida de carga del filtro AZUD Helix System. ....	30
Figura 7 Longitud equivalente en codos y accesorios de PVC. ....	33
Figura 8 Curva de bombas centrífugas. MOTI-2 corresponde a la bomba de 1 HP.....	35
Figura 9 Selección del modo de operación del proceso de filtrado.....	39
Figura 10 Composición de corriente de ingreso al filtro (Filtro prensa/Filtro de discos). ...	39
Figura 11 Representación de equipos en el software Filtro prensa (izquierda) filtro de discos (derecha). ....	42
Figura 12 Propiedades de Equipo (Filtro prensa – área máxima de filtrado). ....	42
Figura 13 Propiedades del Equipo (Filtro prensa - material). ....	43
Figura 14 Condiciones de operación (Filtro prensa). ....	44
Figura 15 Etiqueta del equipo. Filtro AZUD HELIX SYSTEM, Modelo 2NA. ....	44
Figura 16 Características del equipo; Dimensiones . ....	45
Figura 17 Propiedades del Equipo (Filtro de discos – área máxima de filtrado). ....	45
Figura 18 Propiedades del Equipo (Filtro de discos - material). ....	46
Figura 19 Tamaño de poro de la membrana. ....	46
Figura 20 Condiciones de operación (Filtro de discos).....	47
Figura 21 Compresor horizontal 10L, 1HP, marca TRUPER. Flujo @ 40 PSI (2.76 bar) 0.085 m <sup>3</sup> /min correspondiente a un flujo másico de aire de 0.102 kg/min. ....	48
Figura 22 Representación de equipos en el software Filtro prensa & Compresor. ....	50
Figura 23 Temperatura. Estación de monitoreo de la UAM Xochimilco en el 2021 a las 12 h. ....	51
Figura 24 Composición de la mezcla aire proporcionada por la base de datos del software. ....	52
Figura 25 Composición de la corriente de aire de ingreso al compresor.. ....	52
Figura 26 Propiedades del Equipo (Compresor-P - área máxima de secado). ....	53
Figura 27 Condiciones de operación para el compresor. ....	54

Figura 28 Componentes principales del Filtro Prensa. ....	55
Figura 29 Componentes de un módulo HELIX SYSTEM.....	56
Figura 30 Ejemplo de los pasos a seguir para el mantenimiento del filtro de discos. ....	56
Figura 31 Resumen de actividad (Filtro prensa).....	60
Figura 32 Reporte de Equipo (Filtro prensa). ....	60
Figura 33 Resultados del Balance de Materia (Filtro prensa). ....	61
Figura 34 Composición final de la torta de lodo (Filtro prensa). ....	61
Figura 35 Propiedades de la torta de lodo (Filtro prensa).....	62
Figura 36 Composición final de la línea de agua a la salida del módulo de filtrado (Filtro prensa). ....	62
Figura 37 Propiedades de la línea de agua a la salida del módulo de filtrado (Filtro prensa). ....	63
Figura 38 Resumen de actividad (Filtro de discos).....	63
Figura 39 Reporte de Equipo (Filtro de discos). ....	64
Figura 40 Resultados del Balance de Materia (Filtro de discos).....	64
Figura 41 Composición final de la línea de agua a la salida del módulo de filtrado (Filtro de discos). ....	65
Figura 42 Propiedades línea de líquido (Filtro de discos).....	65
Figura 43 Flujo másico de aire correspondiente a un valor de LOD del 29% (Compresor). .....	66
Figura 44 Resumen de actividad (Compresor).....	66
Figura 45 Reporte de Equipos. ....	67
Figura 46 Resultados del Balance de Materia (Compresor). ....	67
Figura 47 Composición final de la línea de aire (Compresor). ....	68
Figura 48 Composición de la torta de lodo una vez concluido el barrido con aire (Compresor).....	68

## Nomenclatura

COT	Carbono Orgánico Total
DBO <sub>5</sub>	Demanda Bioquímica de Oxígeno (A los 5 días)
DBO <sub>u</sub>	Demanda Bioquímica de Oxígeno última
DQO	Demanda Química de Oxígeno
EDAR	Estaciones de Depuración de Aguas Residuales
$f_i$	Relación SSV/SST
FS <sub>bi</sub>	Materia orgánica biodegradable
FS <sub>ti</sub>	Materia orgánica total
FX <sub>ioi</sub>	Sólidos suspendidos inorgánicos
FX <sub>ivi</sub>	Materia orgánica suspendida no biológica.
FX <sub>T</sub>	Masa de lodos como SST producidos diariamente
MX <sub>BHv</sub>	Masa de SSV de OHOs
MX <sub>EHv</sub>	Residuo endógeno
MX <sub>iv</sub>	Material orgánico no biodegradable
MX <sub>T</sub>	Masa de lodos en el sistema
MX <sub>v</sub>	Sólidos suspendidos volátiles
O <sub>c</sub>	Tasa de utilización de Oxígeno carbonáceo en el reactor
PTAR	Planta de Tratamiento de Aguas Residuales
Q <sub>i</sub>	Caudal tratado de agua residual
Q <sub>s</sub>	Caudal de recirculación del lodo
Q <sub>w</sub>	Caudal de purga del reactor
RBT	Reactor Biológico Tubular
SDB	Sólidos Disueltos Biodegradables
SDT	Sólidos Disueltos Totales
SSI	Sólidos Sedimentables Inorgánicos
SST	Sólidos Suspendidos Totales
SSV	Sólidos Suspendidos Volátiles
SSVD	Sólidos Suspendidos Volátiles Biodegradables
SVD	Sólidos Volátiles Disueltos
SVDB	Sólidos Volátiles Disueltos Biodegradables
S <sub>te</sub>	Concentración total de DQO soluble en efluente

TNK	Nitrógeno Total tipo Kjeldahl
TRH <sub>n</sub>	Tiempo de Retención Hidráulico nominal
TRS	Tiempo de Retención de Sólidos
V <sub>p</sub>	Volumen del RBT
X <sub>BH</sub>	Organismos heterótrofos ordinarios
X <sub>EH</sub>	Residuo endógeno
X <sub>v</sub>	Concentración SSV reactor biológico
X <sub>1</sub>	Fracción de material orgánico particulado no biodegradable

## **Resumen.**

El presente trabajo se enfocó en el diseño de un sistema de recuperación y tratamiento de lodos producidos en un reactor biológico tubular (RBT), el cual se instaló en un terreno en comodato de la Alcaldía de Xochimilco. Este sistema de recuperación de lodos consiste en una línea de purgado de lodos, equipo mecánico y accesorios necesarios para su adecuada recuperación y posterior estabilización. Adicionalmente, se elaboró un manual para la operación de la línea que incluye un protocolo de muestreo para el correcto cumplimiento de la NOM-004-SEMARNAT-2002.

Como primer paso, en diversas fuentes bibliográficas se recabó información con respecto a los intervalos de valores característicos de las distintas propiedades físicas y químicas presentes en las líneas de purga provenientes de tratamientos de agua por medios biológicos, lo que permitió determinar la cantidad de lodos producidos en cada ciclo de operación.

Por otra parte, para el proceso de filtrado se llevaron a cabo dos simulaciones, en donde las condiciones de operación, accesorios y equipos electromecánicos eran iguales a excepción del equipo de filtrado empleado para la línea. Los resultados obtenidos con el programa proporcionaron una serie de parámetros a evaluar para la adecuada selección del módulo de filtrado. Para el resto de equipo electromecánico se evaluó la viabilidad de utilizar el equipo presente en el laboratorio, finalmente se buscó brindar una alternativa para la estabilización del lodo que permitiera su posterior disposición como abono, para ayudar a la comunidad aledaña.

Se determinó que por cada ciclo se generan aproximadamente 400 kg de purga, que se reducen a 5 kg de lodo una vez se concluye el proceso de filtrado. Los resultados de la simulación arrojaron que la mejor opción para la línea es el uso de un módulo del filtro de discos, ya que, aunque el tiempo destinado para el proceso es casi igual en ambos módulos, el espacio requerido para su instalación es mucho más pequeño. Por su parte, el equipo mecánico disponible en el laboratorio es adecuado mientras que, para el proceso de estabilización alcalina, el adicionar 30% en peso de cal hidratada es suficiente para que el biosólido cumpla con los parámetros establecidos en la NOM-004-SEMARNAT-2002.

### Introducción.

De acuerdo con la información disponible por parte de la alcaldía de Xochimilco (Xochimilco, 2021) ésta se conforma por un total de 14 pueblos y 17 barrios originarios. Es una zona que se distingue por su belleza natural, reflejada en sus canales y chinampas, así como por la diversidad cultural encontrada en su suelo.

Cada año, en este lugar se celebran más de 400 fiestas patronales, ferias comerciales y culturales, a la vez, se tiene conocimiento de que el 80% de su territorio se considera como área de conservación ecológica incluida la zona chinampera lo que, en 1987 propició que fuera declarado Patrimonio de la Humanidad por parte de la UNESCO (UNESCO, 2021), de ahí que, su conservación sea muy importante.

No obstante, en el año 2019 esta zona ya presentaba problemas ecológicos, tales como el acrecentamiento de la mancha urbana o el direccionamiento de los drenajes de domicilios a los canales, elementos favorables para la erosión en el fondo de estos y que se convertían en factores que favorecían que la zona esté totalmente destruida para el 2050 (González Arévalo, 2019).

De acuerdo con el Inventario de Plantas Municipales de Potabilización y de Tratamiento de Aguas Residuales en Operación en el 2019, en la CDMX existían un total de 29 Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR), dentro de las cuales dos se ubicaban en la localidad de Xochimilco y operaban con un influente de 66.6 L/s (CONAGUA, 2019).

Sin embargo, dos años antes de la publicación del inventario, se había detectado que dichas PTAR no se encontraban operando en óptimas condiciones (Botello, 2017), con lo que fallaban en el cumplimiento de sus funciones.

Por otra parte, el tratamiento de agua residual por medios biológicos conlleva a su vez la generación de residuos orgánicos coloquialmente conocidos como “lodos”, los cuales requieren de un correcto proceso de estabilización, porque *“la contaminación de estos afecta al medio ambiente y a la salud, debido a su contenido de materia orgánica, microorganismos y metales pesados”* (Saltos, y otros, 2020) generando un problema importante para la comunidad (Mendoza Sanchez, 2020).

El manejo de los sólidos originados por el tratamiento de agua residual es un proceso complejo y muchas veces costoso. La necesidad de minimizar estos residuos, así como su disposición adecuada y segura, son aspectos de suma importancia mundialmente, lo que ha llevado a la búsqueda de alternativas tecnológicas y cambios en las políticas de manejo que permitan generar residuos no peligrosos y estables para su correcta disposición o reaprovechamiento (Ramírez, 2020).

Es así, que los objetivos principales en el proceso de estabilización de los lodos de purga son el reducir el número de patógenos, así como el mal olor y el porcentaje de agua presente. Las centrifugas, los filtros prensa, y las eras de secado, son tecnologías convencionales de deshidratación de lodos muy conocidas a nivel mundial (Tipantasig Lenin , 2019 ).

En México, al revisar los esquemas de procesos de 24 PTAR ubicadas en distintos estados de la república mexicana con capacidades instaladas desde los 6 hasta los 35,000 L/s (CONAGUA, 2019), se observa que el equipo más utilizado para la deshidratación de este tipo de sólidos es el filtro de banda, seguido por cuatro esquemas que plantean el uso del lecho de secado, otros cuatro el uso del método de centrifugación y con únicamente tres de ellos realizando este proceso mediante un filtro prensa.

Una vez el residuo biológico es deshidratado, si se estabiliza correctamente puede ser útil como abono, ya que *“los lodos producidos en una PTAR pueden reutilizarse debido a sus nutrientes minerales y materia orgánica, siendo de ayuda en la agricultura y el mejoramiento del suelo”* (R. S. Ramalho, 2003), con lo que el lodo se convierte en un beneficio para la comunidad aledaña.

En México la NOM-004-SEMARNAT-2002 establece las *“especificaciones y los límites máximos permisibles de contaminantes en los lodos y biosólidos provenientes del desazolve de los sistemas de alcantarillado urbano o municipal, de las plantas potabilizadoras y de las plantas de tratamiento de aguas residuales”* (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2003) en la cual se menciona que el destino final de este tipo de material puede ser en sitios de disposición final o su reúso cumpliendo con ciertos parámetros.

## **Justificación.**

El presente trabajo se enfocó en el diseño de una línea de recuperación y estabilización de lodos de purga provenientes de dos sistemas modulares de tratamiento de agua residual in situ, cuya instalación planea realizarse dentro del polígono de San Lorenzo Xochimilco en la CDMX (García González, y otros, 2020), indicando los accesorios y el equipo electromecánico necesarios, así como una propuesta para la estabilización del sólido, procurando que el producto final sea benéfico para la comunidad.

Se plantea que la PTAR requiera de una purga de lodos cada 20 días, con un volumen aproximado de 400 L por la totalidad de los módulos, motivo por el que se buscará evaluar dos sistemas convencionales de filtración (Filtro prensa y Filtro de discos), para lo cual, se generará una modelación predictiva que determinará cuál de ellos es el más adecuado para realizar la operación de recuperación de sólidos, tomando en consideración aspectos tales como; dimensiones del equipo, eficiencia en la deshidratación de la torta, tiempo de operación y facilidad de mantenimiento.

Para la simulación se empleará el software SuperPro Designer v12 (INTELLIGEN, 2020), debido a que el equipo de trabajo contaba con la licencia de uso, y porque es una herramienta integral de simulación para el diseño, actualización y evaluación de diversos procesos, entre ellos el de purificación de agua y tratamiento de aguas residuales.

El trabajo también proporcionará una propuesta de metodología para llevar a cabo una estabilización química del sólido, que permita su posterior reutilización, con la finalidad de convertir el desecho en un beneficio para la comunidad aledaña.

En todo momento se consideró el cumplimiento de los parámetros establecidos en la NOM-004-SEMARNAT-2002, que establece las especificaciones y los límites máximos permisibles de contaminantes en los lodos y biosólidos con el fin de posibilitar su aprovechamiento o disposición final.



## **Objetivos.**

### *Objetivo general*

- Diseñar un sistema de tratamiento y gestión de lodos de purga de reactores biológicos tubulares utilizando un simulador de procesos para la construcción de una Planta de Tratamiento de Aguas Residuales en el polígono de San Lorenzo en Xochimilco.

### *Objetivos particulares*

- Realizar una búsqueda bibliográfica referente al estado del arte de las características de los lodos biológicos, así como de sus métodos de recuperación y estabilización, con la finalidad de diseñar un sistema de aprovechamiento de la purga generada en los reactores biológicos tubulares, permitiendo a su vez un beneficio para la comunidad aledaña.
- Estimar el tiempo de operación y número de módulos requeridos, de dos equipos distintos de filtrado para el espesamiento de la purga mediante el uso de un simulador de procesos, que ayude a brindar un criterio de selección de equipo para la PTAR.
- Diseñar un manual de operación de la línea de purga, el cual señale el equipo de filtrado a emplear, los instrumentos, equipo electromecánico y accesorios necesarios, fungiendo así, como una guía para su correcta operación y mantenimiento, facilitando el trabajo de los operadores de la PTAR.

**Marco Teórico.**

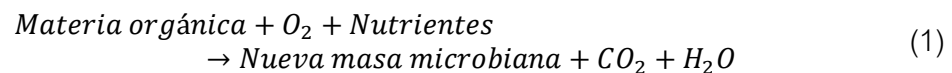
Como primer paso es importante el determinar la cantidad de lodo producido por cada ciclo de operación, en donde, el término “lodo” hace referencia a la mezcla de agua y biosólido obtenido de la purga de un equipo RBT, cuando este es deshidratado hasta el punto en que no es posible su flujo como un líquido, se conoce como “torta”.

**2.1. Balance de materia de la producción de lodos**

Los microorganismos en los reactores, independientemente de si son aerobios o anaerobios, pueden encontrarse de dos formas ( Lozano Rivas, 2012):

- Suspendidos (Cultivo en suspensión), cuando los microorganismos no cuentan con ningún medio de soporte sobre el cual adherirse.
- Adheridos (Cultivo fijo), se presenta cuando los microorganismos se fijan sobre un medio de soporte (e.g. piedras, piezas plásticas, materiales inertes) formando una biopelícula (biofilm).

*“El uso de oxígeno como el aceptor de electrones es la principal característica del metabolismo aerobio. Los sistemas de tratamiento biológico casi siempre se componen de poblaciones microbianas mixtas y, debido a las interacciones metabólicas de las diversas especies. Los principales productos finales del crecimiento aeróbico heterotrófico y la respiración son nuevas células microbianas, CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>O”* (Boltz, y otros, 2010).



La nueva masa microbiana se considera como el aumento de sólidos en suspensión volátiles (SSV) que miden solo sólidos orgánicos y son más adecuados para describir la biomasa en un reactor.

De acuerdo con lo mencionado en el libro “Tratamiento Biológico de Aguas Residuales: Principios Modelación y Diseño” (López Vázquez, y otros, 2017), los constituyentes orgánicos biodegradables sean solubles, no sedimentables o sedimentables, pueden ser transformados en organismos heterótrofos ordinarios (OHO, X<sub>BH</sub>). Cuando estos

organismos mueren dejan tras de sí materia orgánica no biodegradable y soluble llamada residuo endógeno ( $X_{EH}$ ) compuesto de materia no biodegradable de la pared celular.

La fracción de material orgánico particulada (suspendida y sedimentable) no biodegradable ( $X_1$ ) se adhiere junto con la masa de las OHO's y de residuo endógeno. Los tres ( $X_{BH} + X_{EH} + X_1$ ) forman el componente orgánico de los sólidos sedimentables y los SSV que se acumulan en el reactor.

Los componentes inorgánicos (sedimentables y suspendidos) junto con los componentes inorgánicos solubles precipitados forman la masa de sólidos sedimentable inorgánicos (SSI). La fracción no biodegradable y particulada de la DBO tiene una influencia considerable en la producción diaria de lodos y en su acumulación en un reactor biológico.

Como se señala en el libro de Biofilm Reactors (Boltz, y otros, 2010), escribir la ecuación (1) en forma de un balance estequiométrico no es posible porque las conversiones están relacionadas con las características de la materia orgánica, las especies de organismos presentes y las características de funcionamiento del sistema de tratamiento, pero es un paso necesario para el diseño del sistema de tratamiento, ya que las estimaciones de oxígeno necesario y la producción de exceso de sólidos deben calcularse.

Tiempo de Retención de Sólidos o Edad de Lodo (TRS) ( Lozano Rivas, 2012):

Es la relación en masa de la cantidad de biomasa existente (microorganismos) en el reactor, por la biomasa eliminada por día.

Considerando que cuando los lodos se purgan directamente del reactor, las concentraciones en la purga y en el reactor son las mismas. En el proceso en estudio se buscó lograr una edad de 20 días para el lodo.

$$TRS = \frac{X_T V_p}{X_T Q_w} = \frac{V_p}{Q_w} \text{ [día]} \quad (2)$$

En donde:

- $V_p$  es el volumen del reactor biológico [L]
- $Q_w$  es el caudal de purga de lodos del reactor [L/día].

Tiempo de Retención Hidráulico nominal ( $TRH_n$ ) ( Lozano Rivas, 2012):

Es el cociente entre el volumen del reactor biológico o unidad de tratamiento  $V_p$  [L] por el caudal tratado de aguas residuales " $Q_i$  [L/día].

$$TRH_n = \frac{V_p}{Q_i} [\text{día}] \quad (3)$$

Cuando el lodo de recirculación del clarificador secundario ( $Q_s$ ) y cualquier otra recirculación de licor mezclado que ingresa al reactor ( $Q_a$ ) se incurren en el cálculo, se denomina tiempo de retención hidráulica real.

$$TRH_a = \frac{V_p}{Q_i + Q_s + Q_a} = \frac{TRH_n}{1 + s + a} [\text{día}] \quad (4)$$

s, a: Relación de recirculación de lodos ( $Q_s/Q_i$ ) y de licor mezclado ( $Q_a/Q_i$ ) respectivamente.

Cuando se incluye la remoción de sólidos en la fase acuosa los tiempos de retención se vuelven independientes y TRS es mayor a  $TRH_n$ . Cuando el TRS aumenta, también el  $TRH_n$  (López Vázquez, y otros, 2017).

En este caso la remoción biológica de nutrientes es de 20 días, mientras que el tiempo de retención hidráulico nominal es de 1 hora.

En el libro *Biofilm Reactors* (Boltz, y otros, 2010) se describe que, en casi todas las aplicaciones de tratamiento biológico una mezcla de compuestos orgánicos está presente, algunos de los cuales son solubles y otros están en forma de partículas. Las poblaciones microbianas mixtas generalmente atacan una amplia variedad de materiales solubles y particulados simultáneamente, por esta razón, es necesario el uso de una variable representativa del contenido de la fracción orgánica y la más común es la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO), pero también se utilizan la Demanda Química de Oxígeno (DQO) y el Carbono Orgánico Total (COT).

El DQO mide la capacidad de donación de electrones del material orgánico y, dado que los electrones no se pueden crear ni destruir, proporciona una base conservadora para estos cálculos. La cuestión de la cantidad de DQO que representa materia orgánica biodegradable se trata caracterizando el DQO en términos de sus diferentes fracciones.

Simplificaciones del modelo (Uso completo de la materia orgánica biodegradable):

La diferencia entre la concentración de DQO soluble en el efluente con tiempos de retención de 2 a 3 h y de 18 a 24 h es muy baja (10 a 20 mg/L).

La materia orgánica biodegradable está presente en concentraciones muy bajas en aguas residuales municipales y se divide en dos grupos: Biodegradable y No Biodegradable.

*“Con tiempos bajos de retención se remueve toda la materia biodegradable dejando solamente la no biodegradable, el material orgánico lentamente biodegradable (DQOlb) se incorpora a la masa de lodos activados y a los SSV en el reactor. Para la materia orgánica particulada biodegradable no removida es a través de purga de lodos ( $Q_w$ )”* (López Vázquez, y otros, 2017).

## 2.2. Estabilización del lodo.

El manejo de los sólidos originados por el tratamiento de agua residual es un proceso complejo y costoso. La necesidad de minimizar residuos y disponerlos de una forma segura para el medio ambiente, es de suma importancia y ha llevado a la búsqueda de alternativas tecnológicas y cambios en las políticas de manejo que permitan generar residuos no peligrosos y estables para su correcta disposición o reaprovechamiento (Ramírez, 2020).

En México, si se desea reutilizar el lodo producido en una PTAR la NOM-004-SEMARNAT-2002 indica una serie de restricciones, dentro de las cuales, se encuentra que el sólido cumpla con lo indicado para la clase C (Tabla 1, 2, y 3).

Tabla 1 Límites máximos permisibles para metales pesados en biosólidos (*Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2003*).

<b>Contaminante (determinados en forma total)</b>	<b>Excelentes mg/kg en base seca</b>	<b>Buenos mg/kg en base seca</b>
Arsénico	41	75
Cadmio	39	85
Cromo	1200	3000
Cobre	1500	4300
Plomo	300	840
Mercurio	17	57
Níquel	420	420
Zinc	2800	7500

Tabla 2 Límites máximos permisibles para patógenos y parásitos en lodos y biosólidos (*Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2003*).

Clase	Indicador bacteriológico de contaminación	Patógenos	Parásitos
	Coliformes fecales NMP/g en base seca	Salmonella spp. NMP/g en base seca	Huevos de helmintos/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

Tabla 3 Frecuencia de muestreo y análisis (*Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2003*).

Tipo	Clase	Aprovechamiento
Excelente	A	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Usos urbanos con contacto público directo durante su aplicación.</li> <li>• Los establecidos para clase B y C</li> </ul>
Excelente o bueno	B	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Usos urbanos sin contacto público directo durante su aplicación.</li> <li>• Los establecidos para clase C.</li> </ul>
Excelente o bueno	C	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Usos forestales.</li> <li>• Mejoramientos de suelos.</li> <li>• Usos agrícolas.</li> </ul>

Para ello, comúnmente es necesario el empleo de un proceso de estabilización del sólido, que tiene como objetivo principal el reducir el número de microorganismos patógenos, eliminar los malos olores y el potencial de putrefacción.

La manera más eficaz para lograrlo es mediante el empleo de procesos como: La reducción biológica y la oxidación química del contenido de materia volátil presente en el lodo, la adición de agentes químicos como la cal, que reduce la concentración de microorganismos presentes y la aplicación de calor para la desinfección o esterilización del lodo.

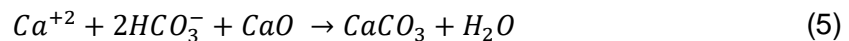
### 2.2.1. Estabilización alcalina.

“La estabilización de lodos por medios químicos es la oxidación húmeda y estabilización térmica bajo condiciones de temperatura y presión elevadas, con lo que puede reducirse la presencia de patógenos y olores desagradables” (Díaz, y otros, 2015).

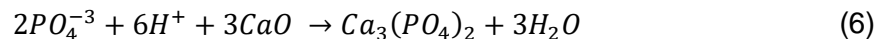
Entre la estabilización por medios químicos se encuentra la estabilización alcalina, añadir un producto alcalino a la torta favorece a la reducción de microorganismos patógenos como bacterias y virus, para este proceso de estabilización puede emplearse cal viva (CaO) o cal hidratada [Ca(OH)<sub>2</sub>], las cuales son capaces de elevar el pH del lodo a valores mayores a 12 y mantenerlo el tiempo suficiente como para inactivar los patógenos y microorganismos presentes en él (Mansur, y otros, 1999), de igual forma, su adición brinda cierto control del olor porque los compuestos de sulfuro causantes de este problema se transforman en formas no volátiles (CONAGUA, 2020).

Un exceso de cal es requerido debido a que cuando el valor de pH en el lodo aumenta, se llevan a cabo reacciones de hidrólisis y saponificación, pero si la cantidad de material alcalino no es suficiente, el pH disminuirá gracias a estas reacciones impidiendo la correcta estabilización del material biológico produciendo a su vez malos olores, por ello se recomienda aplicarla después del secado, debido a que se requieren menos reactivos y los resultados son mejores. Ejemplos de reacciones que se llevan a cabo en el proceso de estabilización alcalina (CONAGUA, 2020):

Calcio



Fósforo



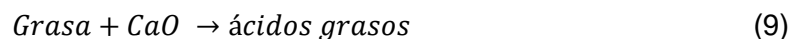
Dióxido de carbono



Ácidos



Grasas



PTAR pequeñas comúnmente emplean  $\text{Ca(OH)}_2$ , mientras que las grandes utilizan  $\text{CaO}$  y esto se debe a que la primera es de un costo más elevado, pero requiere de menos trabajo porque no es necesario llevar a cabo el proceso de “apagado”, en el cual por cada parte de cal viva se añaden cuatro partes de agua para formar una solución de lechada de cal (CONAGUA, 2020).

Otro aspecto importante es que, en la estabilización con cal no hay reducción de la masa de lodo, por el contrario, la masa aumenta por la adición del material alcalino y por la precipitación química que se deriva del proceso y el biosólido generado, no tiene efectos adversos en el crecimiento de plantas o en las características del suelo, por lo que es ideal si se busca emplearlo como abono en suelos no alcalinos.

### 2.3. Espesamiento del lodo.

El proceso de espesamiento de lodos se realiza para incrementar la concentración de sólido en la línea, mediante la reducción del porcentaje de agua y facilita a su vez, el proceso de estabilización.

Algunos de los métodos comúnmente utilizados en la industria para esta operación utilizan una corriente de aire (como los lechos de secado) o métodos mecánicos (como la filtración o la centrifugación). En la Tabla 4 pueden observarse las ventajas y desventajas de cada uno.

Tabla 4 Ventajas y desventajas de los diferentes tipos de métodos de filtrado (Milacron Mexicana Sales, 2004).

	Ventajas	Desventajas
Filtración al vacío	<ul style="list-style-type: none"> <li>- El costo inicial es relativamente bajo.</li> <li>- Filtración altamente eficiente de 10 a 25 micrones.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- El requerimiento de espacio es relativamente alto.</li> <li>- Los medios filtrantes desechables añaden costo a la operación.</li> </ul>
Filtración a presión	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Remueve partículas finas eficientemente.</li> <li>- Maneja un gran volumen de fluido con un mínimo de espacio de piso.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Los costos más importantes son los del acondicionamiento químico, mantenimiento y sustitución de telas filtrantes.</li> </ul>
Centrifugación	<ul style="list-style-type: none"> <li>- No se requiere medio filtrante.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Altos costos y tiempos de mantenimiento.</li> <li>- Operan a flujos bajos.</li> </ul>



Datos proporcionados por el inventario de plantas municipales de potabilización y de tratamiento de aguas residuales en operación en México (CONAGUA, 2019), señalan que, los métodos de filtración más utilizados fueron la filtración a presión, seguida por la centrifugación. Sin embargo, *“la elección sobre que método es más adecuado depende de las características del lodo, del método de eliminación final, de la disponibilidad de terreno y de la economía obtenible”* (Villaseñor, 1995).

## **2.4. Programa SuperPro Designer.**

De acuerdo con el manual del programa (SPDv12, 2014), el software de simulación logra un equilibrio entre flexibilidad, facilidad de uso y potencia computacional, lo que permite que sea utilizado fácilmente tanto por usuarios que no están familiarizados con la simulación y la evaluación económica, como por usuarios expertos en simulación de procesos, que modelan situaciones de procesos complejos en condiciones continuas a modo por lotes o ambos (procesos de modo mixto).

El programa cuenta con una amplia base de datos en cuanto a equipos y procesos, así como a componentes puros y mezclas que el usuario puede seleccionar para realizar un modelado cercano a la realidad del proceso.

### **2.4.1. Equipos SuperPro Designer.**

La siguiente información sobre la descripción de los equipos, así como de sus condiciones estándar de operación fueron recopiladas del menú de ayuda disponible para los usuarios (SPDv12, 2014), (ayuda-> unidades de proceso -> filtración y secado/granulación). En la Figura 1 se puede observar un esquema indicando las corrientes de entrada y salida, disponibles para el equipo.

Filtro prensa:

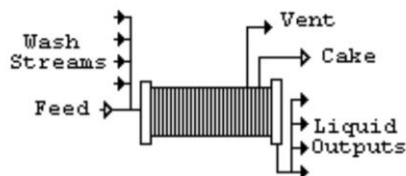


Figura 1 Corrientes en equipo de simulación (Filtro prensa).

En “Designed Mode” el usuario puede especificar el área máxima de filtrado, el flujo de filtrado específico y que componente desea remover, así como su porcentaje, por su parte, el programa determina el tiempo de operación, el número de unidades necesarias y realiza el balance de materia del proceso. En la Tabla 5 se muestran las condiciones de operación para el equipo de filtrado por placas, proporcionadas por el software que pueden modificarse para ajustar el equipo al empleado en el proceso.

Tabla 5 Condiciones de operación predeterminadas (Filtro prensa).

Concepto	Valor por defecto
% Removido: Porcentaje de un componente en particular que es removido.	0.0
LOD (%): Porcentaje de componentes volátiles en un ejemplo de torta, usando la prueba LOD.	30
Porosidad de torta: Fracción de espacios vacíos en la torta sobre el vol. total de la torta.	0.4
Retención de solventes: Porcentaje de solvente retenido por la torta.	20
Espesor máximo de torta (cm):	15
Espesor de torta (cm):	0.0
Tiempo muerto (min):	0.0
Tiempo de filtrado (min):	240
Flujo de filtrado (L/m <sup>2</sup> -h):	200
Corriente de filtrado: Indica el puerto de salida.	
Tipo de energía: Indica el tipo de energía usada para el proceso.	
Energía específica (kW/m <sup>3</sup> ): Energía consumida por el proceso de filtración por área de filtrado.	0.1
Energía total (kW): Energía total consumida por el proceso de filtración (ciclo).	0.0
Energía por unidad (kW): Energía consumida por unidad de proceso.	0.0

#### Filtrado sin salida:

Es un flujo con dirección normal a la superficie del filtro en donde las partículas son detenidas en la superficie, formándose así una torta. La Figura 2 muestra el esquema ejemplo del filtro sin salida que, debido a sus características, puede emplearse para la simulación del filtro de discos.

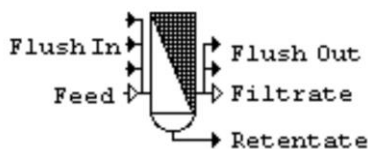


Figura 2 Corrientes en equipo de simulación (Filtro de discos).

En la Tabla 6 se enlistan los valores iniciales para las condiciones de operación del equipo, en donde el porcentaje de eliminación es especificado por el usuario o calculado por el programa, basado en el tamaño de poro del medio de filtrado (0.45 micrones por default para la membrana de microfiltración “MF-Membrane”). El porcentaje de remoción de componentes particulados determina la cantidad de componentes retenidos en el filtro, mientras que la sequedad de la torta expresado en v/v determina la cantidad de solvente y componentes solubles retenidos.

En “Designed Mode” el usuario puede especificar el área máxima de filtrado, el flujo de filtrado específico y que componente desea remover, así como su porcentaje, por su parte, el programa determina el tiempo de operación, el número de unidades necesarias y realiza el balance de materia del proceso.

Tabla 6 Condiciones de operación predeterminadas (Filtrado sin salida).

Concepto	Valor por defecto
% Removido: Porcentaje de un componente en particular que es removido.	0.0
Concentración de partículas en el retenido v/v:	0.5
Tiempo muerto (min):	0.0
Tiempo de proceso (min): Duración por ciclo.	60
Ignore labor (?): Marcar esta casilla si se desea ignorar la mano de obra en la operación (Sólo para relaciones master-slave).	Yes
Espesor de torta (cm):	0.0
Tiempo muerto': Tiempo por ciclo que el equipo de proceso es preparado para el siguiente ciclo.	0.0
Flujo de filtrado (L/m <sup>2</sup> -h): Tasa de flujo volumétrico por área de filtrado.	250
Flujo de filtrado por área (L/m <sup>2</sup> ): Volumen de filtrado por área.	100
Corriente de filtrado: Indica el puerto de salida.	

En la remoción de componentes particulados, cuando la opción “Calculated” es seleccionada, se asume que el 100% de todos los componentes con un tamaño de partícula mayor que el poro de la superficie de filtrado es retenido en el filtro. Para los procesos de secado la biblioteca cuenta con 12 unidades de proceso, entre ellas se encuentra el secador de placas, cuyo esquema se muestra en la Figura 3:

Secador de placas:

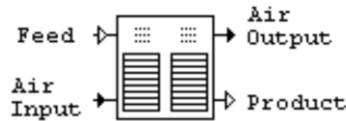


Figura 3 Corrientes en equipo de simulación (Secado por placas).

Es utilizado para el secado de sólidos y pastas. El proceso se logra por el contacto directo con un gas de secado. Estos secadores son útiles para tasas de producción pequeñas (Operación costosa debido a la carga y descarga).

El equipo consiste en una serie de cámaras rectangulares de lámina de metal poco profundas que contienen el material a secar y estas se ubican dentro de otra cámara a través de la cual pasa una corriente de aire o gas de secado.

Las propiedades de operación del equipo que pueden modificarse se enlistan en la Tabla 7. El tiempo de secado puede ser especificado o calculado, basado en la tasa de evaporación ( $\text{kg evap/m}^2\text{-h}$ ). La descarga de la torta también puede ser especificada o calculada basado en la tasa de descarga (El usuario siempre especificará el tiempo muerto de descarga).

En "Rating Mode" el usuario puede especificar el área de secado, el tiempo de operación y el flujo de aire, el programa a su vez calculará el porcentaje de agua removido de la torta.

Tabla 7 Condiciones de operación predeterminadas (Secado de placas).

Concepto	Valor por defecto
Volátil (?).	NO
% de evaporación de un componente volátil.	0.0
LOD Inicial (%): Cantidad de componentes volátiles en una muestra de torta utilizando la prueba de LOD antes del secado de la torta.	0.0
LOD Final (%): Cantidad de componentes volátiles en una muestra de torta utilizando la prueba de LOD después del secado de la torta.	5.0
Tasa de evaporación ( $\text{kg/m}^2\text{-h}$ ): Tasa de flujo másico de los componentes evaporados por área de secado.	100
Temperatura final del sólido ( $^{\circ}\text{C}$ ): Temperatura de la torta seca.	70
Profundidad de la torta húmeda (mm):	20
Profundidad máxima de la torta húmeda (mm):	35
Barrido de gas durante secado:	NO

Tabla 8 ...Continuación de Tabla 7

Barrido de gas (corriente):	None
Tasa de flujo de barrido de gas de barrido relativo (p/p): Masa del gas de secado por la masa de los componentes evaporados de la torta.	0.0
STP Flujo de gas de barrido (m <sup>3</sup> /h): Flujo volumétrico estándar del gas de secado	1000
Presión (Establecida por el usuario):	NO
Presión (atm): Presión de operación del equipo.	1.0
Bomba de vacío: Indica el nombre de la bomba.	None
Energía de la bomba de vacío (kW): Consumo de energía.	0.0
Tiempo muerto (min).	0.0
Tiempo de secado (h): Duración total del proceso por ciclo.	6.0

El usuario puede establecer el tiempo del proceso o calcularlo con el programa, especificando la tasa de evaporación. Si el uso de un servicio auxiliar de calentamiento es necesario, el programa ofrece un apartado para modificar sus propiedades y adecuarlas al proceso, así como aquellas propiedades correspondientes a la energía utilizada, tal como se enlista en la Tabla 9.

Tabla 9 Datos auxiliares (Secado de placas).

Concepto	Valor por defecto
Nombre del agente de calentamiento.	Vapor
Temperatura de ingreso (°C): Del agente de calentamiento.	152
Temperatura de salida (°C): Del agente de calentamiento.	152
Cantidad específica (kg/kg evap):	2.0
Tasa (kg/h): Tasa de flujo másico del agente de calentamiento.	0.0
% de eficiencia de transferencia de calor: Si es del 100 el programa calculará una mayor cantidad de agente de transferencia para satisfacer la carga requerida.	100
Tipo de energía.	Energía estándar
Energía específica por área (kW/m <sup>2</sup> ): Por área de secado.	0.0
Energía (kW): Energía total consumida en el proceso, por ciclo.	0.0
Energía por unidad (kW):	0.0

**Metodología**

A continuación, se presenta la metodología de cálculo para estimar la cantidad de lodos generados en la operación del reactor biológico, con base en un balance de materia utilizando la DQO como indicador de la concentración de sustrato.

**3.1. Estimación de la cantidad de lodo generado**

Ecuaciones del sistema en estado estacionario (López Vázquez, y otros, 2017):

- Para el afluente:

Los flujos máxicos de entrada de:

- ✓ Materia orgánica total

$$FS_{ti} = Q_i S_{ti} \quad \left[ \frac{mgDQO}{día} \right] \quad (10)$$

- ✓ Orgánica biodegradable

$$FS_{bi} = Q_i S_{bi} \quad \left[ \frac{mgDQO}{día} \right] \quad (11)$$

- ✓ Orgánica suspendida no biológica

$$FX_{ivi} = Q_i S_{ii} \quad \left[ \frac{mgSSV}{día} \right] \quad (12)$$

- ✓ Sólidos suspendidos inorgánicos

$$FXI_{ioi} = Q_i S_{ioi} \quad \left[ \frac{mgSSI}{día} \right] \quad (13)$$

- ✓ Materia orgánica biodegradable

$$FS_{bi} = Q_i S_{ti} (1 - f_{s'us} - f_{s'up}) \quad \left[ \frac{mgDQO}{día} \right] \quad (14)$$

$$FS_{bi} = FS_{ti} (1 - f_{s'us} - f_{s'up}) \quad \left[ \frac{mgDQO}{día} \right] \quad (15)$$

- ✓ Materia orgánica suspendida no biodegradable

$$FXI_{ivi} = \frac{Q_i S_{s'up} S_{ti}}{f_{cv}} \quad \left[ \frac{mgSSVI}{día} \right] \quad (16)$$

$$FXI_{ivi} = \frac{FS_{ti}FS_{s'up}}{f_{cv}} \left[ \frac{mgSSVI}{día} \right] \quad (17)$$

- Para el sistema:

Masa de SSV en el reactor:

✓ Masa de SSV de OHOs

$$MX_{BHv} = X_{BHv}V_p \quad [mgSSV] \quad (18)$$

✓ Residuo endógeno

$$MX_{EHv} = X_{EHv}V_p \quad [mgSSV] \quad (19)$$

✓ Material orgánico no biodegradable

$$MX_{iv} = X_{iv}V_p \quad [mgSSV] \quad (20)$$

✓ Sólidos Suspendedos Volátiles

$$MX_v = X_vV_p \quad [mgSSV] \quad (21)$$

Balance de masa de DQO (Balance de electrones) (López Vázquez, y otros, 2017).

Los electrones (e<sup>-</sup>) de la DQO de la materia orgánica en el efluente son:

- Retenidos en la materia orgánica particulada y soluble no biodegradable.
  - Transformada en OHOs y conservando en otro tipo de materia
  - Transferidos al O<sub>2</sub> para formar agua.
- S<sub>te</sub>: Concentración total de DQO soluble en efluente [mgDQO/L]
  - X<sub>v</sub>: Concentración SSV reactor biológico [mgSSV/L]
  - O<sub>c</sub>: Tasa de utilización de Oxígeno carbonáceo (degradación de la materia orgánica) en el reactor [mgO<sub>2</sub>/L-h]

Balance:

$$\left[ \begin{array}{c} (e^-) \text{Flujo de} \\ \text{DQO en la salida} \end{array} \right] = \left[ \begin{array}{c} (e^-) \text{Flujo de} \\ \text{DQO en la entrada} \end{array} \right] \left[ \begin{array}{c} \text{Flujo de DQO soluble} \\ \text{en el efluente} \end{array} \right] + \left[ \begin{array}{c} \text{Flujo de DQO soluble} \\ \text{en la purga de lodos} \end{array} \right] + \left[ \begin{array}{c} \text{Flujo de DQO particulado} \\ \text{en la purga de lodos} \end{array} \right] + \left[ \begin{array}{c} \text{Flujo de O}_2 \text{ utilizado por} \\ \text{OHO para la degradación de DQO} \end{array} \right] \quad (22)$$

$$Q_e S_{te} + Q_w S_{te} + Q_w X_v f_{cv} + V_p O_c = Q_i S_{ti} \quad (23)$$

- Producción diaria de lodos.

La masa de lodos como SST producidos diariamente  $FX_T$  está dada por:

$$FX_T = \frac{MX_T}{TRS} \quad (24)$$

En donde:

- $MX_T$ : Masa de lodos en el sistema [mgSST/día]
- TRS: Edad de lodos [días]

Lodos producidos por día por mg de DQO en el reactor:

$$\frac{FX_T}{FS_{ti}} = \frac{1}{f_i} \left[ \frac{(1 - f_{s'us} - f_{s'up}) Y_{HV}}{(1 + b_H TRS)} (1 + f_H b_H TRS) + \frac{f_{s'up}}{f_{cv}} \right] \left[ \frac{mgSST}{mgDQO} \right] \quad (25)$$

La masa de lodos disminuye a medida que la edad de los lodos aumenta.

La masa de sólidos suspendidos inorgánicos en el afluente se acumula en el reactor de la misma forma que la materia orgánica particulada no biodegradable.

Concentración de SSI afluente.

$$MX_{io} = FX_{ioi} * TRS * X_{io} \left[ \frac{mgSSI}{L} \right] \quad (26)$$

Masa total de sólidos sedimentables (SST)( $MX_T$ ) es la suma de sólidos suspendidos orgánicos (volátiles e inorgánicos).

$$MX_T = MX_V + MX_{io} \quad [mgSST] \quad (27)$$

La relación SSV/SST de los lodos ( $f_i$ ).

$$f_i = \frac{MX_V}{MX_T} \left[ \frac{mgSSV}{mgSST} \right] \quad (28)$$



Si no se conoce la concentración de SSI entonces puede calcularse  $MX_T$  estimando la relación de SSV/SST ( $f_i$ ).

$$MX_T = \frac{MX_V}{f_i} \quad [mgSST] \quad f_i: \text{Relación de SSV/SST} \quad (29)$$

Tabla 10 Valores considerados para el cálculo de SSV.

PARÁMETRO	SIMBOLO	UNIDAD	VALOR
Caudal	Q	L/d	40320
DQO afluente	Sti	mgDQO/L	400
Fracción no bio. y particulada DQO	fs'up		0.15
Fracción no bio. y soluble de la DQO	fs'us		0.07
SSV/SST del lodo	fi	mgSSV/mgSST	0.75
DQO/SSV	Fcv	mgDQO/mgSSV	1.48
Rendimiento	YHv	mgSSV/mgDQO	0.45
Tiempo de retención sólidos	TRS	días	20
Tasa de respiración endógena	bh	1/d	0.24
Fracción de residuo endógeno	fh		0.2

Naranja: Valores característicos del agua a tratar, Verde: Valores estándar a 20°C para influentes medianamente contaminados (Metcalf and Eddy, Inc., 2003)

Una vez que se tuvo conocimiento de todas las ecuaciones, se procedió con el cálculo de los mg SST producidos por día en los módulos del RBT. Se consideró que debido a que la mayoría de los desechos descargados en el canal ubicado en el polígono de San Lorenzo provenían de las casas aledañas, su nivel de contaminación no tendría por qué ser tan alto, es así como, en la Tabla 10 se enlistan los valores característicos de un cuerpo de agua medianamente contaminado (Metcalf and Eddy, Inc., 2003).

Utilizando la ecuación (10) se calculó la materia orgánica total:

$$FS_{ti} = \left(40320 \frac{L}{\text{día}}\right) \left(400 \frac{mgDQO}{L}\right) = 1.61 \times 10^7 \frac{mgDQO}{\text{día}}$$

Utilizando la ecuación (15) se determinó la materia orgánica biodegradable:

$$FS_{biP} = \left(1.61 \times 10^7 \frac{mgDQO}{\text{día}}\right) (1 - 0.07 - 0.15) = 1.26 \times 10^7 \frac{mgDQO}{\text{día}}$$

Utilizando la ecuación (17) se estimó la materia orgánica suspendida no biodegradable:

$$FX_{I_{ivi}} = \frac{\left(1.61 \times 10^7 \frac{mgDQO}{día}\right) (0.15)}{\left(1.48 \frac{mgDQO}{mgSSV}\right)} = 1.63 \times 10^6 \left(\frac{mgSSV}{día}\right)$$

Para la estimación de los sólidos suspendidos volátiles de la ecuación (25) se despejó  $FX_T$ :

$$FX_T = \left( \frac{1}{0.75 \frac{mgSSV}{mgSST}} \left[ \frac{(1 - 0.07 - 0.15) \left(0.45 \frac{mgSSV}{mgDQO}\right)}{\left(1 + \left(0.24 \frac{1}{día}\right) (20 \text{ días})\right)} \left(1 + (0.2) \left(0.24 \frac{1}{día}\right) (20 \text{ días})\right) \right. \right. \\ \left. \left. + \frac{0.15}{1.48 \frac{mgDQO}{mgSSV}} \right] \left(1.61 \times 10^7 \frac{mgDQO}{día}\right) \right) \\ FX_T = 4.73 \times 10^6 \frac{mgSST}{día}$$

Posteriormente, considerando las ecuaciones (24) y (28) se sustituyó para despejar  $MX_v$ .

$$MX_v = \left(0.75 \frac{mgSSV}{mgSST}\right) \left(4.73 \times 10^6 \frac{mgSST}{día}\right) (20 \text{ días}) = 7.09 \times 10^7 \text{ mgSSV}$$

Utilizando la ecuación (28) se calculó la masa total de sólidos sedimentables.

$$MX_t = \frac{7.09 \times 10^7 \text{ mgSSV}}{0.75 \frac{mgSSV}{mgSST}} = 9.46 \times 10^7 \text{ mgSST}$$

Para estimar los lodos producidos por día por mg de DQO en el reactor, se empleó la ecuación (25).

$$\frac{FX_t}{F_{sti}} = \frac{1}{0.75 \frac{mgSSV}{mgSST}} \left[ \frac{(1 - 0.07 - 0.15) \left( 0.45 \frac{mgSSV}{mgDQO} \right)}{\left( 1 + \left( 0.24 \frac{1}{día} \right) (20 \text{ días}) \right)} \left( 1 + (0.2) \left( 0.24 \frac{1}{día} \right) (20 \text{ días}) \right) \right. \\ \left. + \frac{0.15}{1.48 \frac{mgDQO}{mgSSV}} \right] = 0.259 \frac{mgSST}{mgDQO}$$

Para la producción diaria de lodos la ecuación (24).

$$FX_t = \frac{9.46 \times 10^7 \text{ mgSST}}{20 \text{ días}} = 4.73 \times 10^6 \frac{\text{mgSST}}{\text{día}}$$

Finalmente, para la masa de SSV producidos/purgados por día, se utilizó la siguiente ecuación:

$$FX_v = f_i FX_t \left[ \frac{mgSSV}{día} \right] \quad (30)$$

$$FX_v = \left( 0.75 \frac{mgSSV}{mgSST} \right) \left( 4.73 \times 10^6 \frac{mgSST}{día} \right) = 3.55 \times 10^6 \left[ \frac{mgSSV}{día} \right]$$

De acuerdo con lo indicado por Limón Macías (2013), los lodos están compuestos por un 99.2% de agua. Tomando en cuenta que el valor de SST corresponde a la fracción de ST visible y capaz de ser removida por medios físicos o mecánicos a través de un proceso de sedimentación o filtración con un tamaño de poro de comúnmente 1.58  $\mu\text{m}$  (Secretaría de Economía, 2015), se consideró este valor como la masa de sólido producido por día.

Los kgSST/h se determinaron utilizando la relación  $FX_v/F_{sti}$  ecuación (25), el DQO afluente y el caudal. El resultado representó el 0.8% de la línea de lodos y con este valor se estimó la cantidad de agua, en donde para la operación se tomó un valor de densidad 1000 kg/m<sup>3</sup>.

$$\left( 0.259 \frac{\frac{mgSST}{día}}{\frac{mgDQO}{día}} \right) \left( 40320 \frac{L}{día} \right) \left( 400 \frac{mgDQO}{L} \right) \left( \frac{1 \text{ kgDQO}}{1 \times 10^6 \text{ mgDQO}} \right) \left( \frac{1 \text{ día}}{24 \text{ h}} \right) \quad (31)$$

$$= 0.174 \frac{\text{kgSST}}{\text{h}}$$

$$\frac{\left(0.174 \frac{kgSST}{h}\right) (0.992)}{0.008} = 21.62 \frac{kgH_2O}{h} \quad (32)$$

### 3.2. Tamaño de grano

Debido a que no se contaba con datos característicos del lodo producido en la PTAR, se realizó una investigación sobre el tamaño característico de los lodos obtenidos por el tratamiento de aguas residuales mediante métodos biológicos, encontrando que el tamaño de partícula puede determinarse mediante tres procedimientos: examen directo, fraccionamiento y conteo, en donde, cada una de estas técnicas implica modificaciones del lodo alterando la distribución original, con lo cual no es posible definir un tamaño específico (Abonza , 2018).

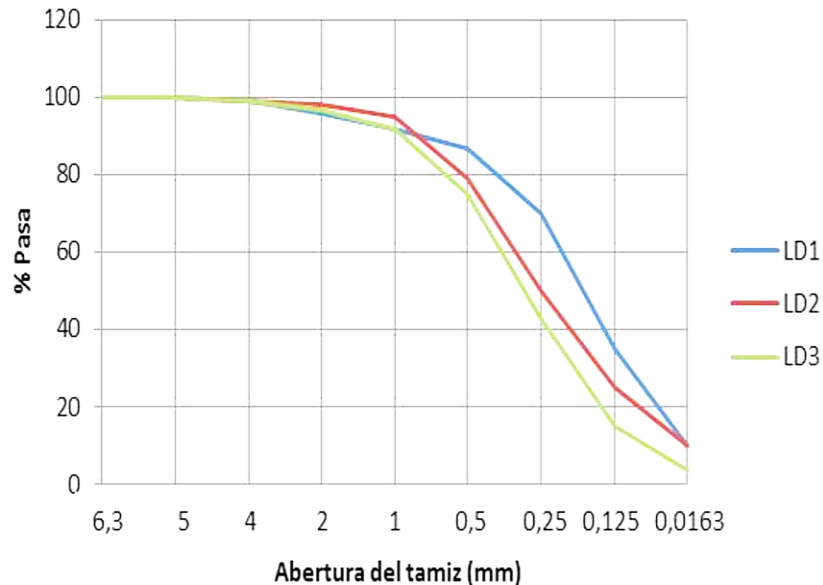


Figura 4 Granulometría de lodos de Estaciones de Depuración de Aguas Residuales en España (Gobierno de España, 2013).

A pesar de lo anterior, en la Figura 4 puede observarse la información reportada por el Gobierno de España, en donde se brindan datos de los lodos secos utilizados en su catálogo de residuos utilizables en construcción provenientes de Estaciones de Depuración de Aguas Residuales (EDAR) las cuales operan mediante la tecnología de lodos activados, en donde de acuerdo con los datos recolectados, el lodo seco tiene una densidad de 0.5-0.6 T/m<sup>3</sup> y presenta un tamaño de grano fino (Gobierno de España, 2013). La Universidad

Complutense de Madrid (UCM, 2013) señala que cuando el tamaño de un grano es inferior a 1 mm puede considerarse como grano fino.

### 3.3. Área máxima de filtrado (Filtro Prensa)

A pesar de que los métodos para el proceso de deshidratación de lodos más comunes en el país involucran el empleo de filtros de banda, lechos de secado, centrifugación o filtros prensa (CONAGUA, 2019), al tomar en consideración que, tanto el predio disponible para la instalación de los equipos, como el flujo de purga del RBT es pequeño en comparación a los presentados en una PTAR de escala industrial, se planteó el uso de un filtro prensa o de un filtro de discos, este último es comúnmente utilizado en el filtrado de aguas de riego y es un equipo disponible en el almacén del laboratorio.

El software de simulación requiere de un área máxima de filtrado adecuada para los aproximadamente 400 L de lodo a filtrar por cada lote de purga, en el caso del filtro de discos el dato se indica en su ficha técnica, por el contrario, para filtro prensa se utilizó la siguiente ecuación (Ambiente, 2020):

$$\left(\frac{gal}{ciclo}\right) \times \text{Sólidos por peso} \times \text{Peso} \left(\frac{lbs}{gal}\right) \div \text{Peso} \left(\frac{lbs}{ft^3}\right) = \left(\frac{ft^3}{ciclo}\right) \quad (33)$$

El porcentaje de sólidos por peso y el peso promedio por pie cúbico se obtuvieron de la Tabla 11. El peso en libras por galón del líquido en este caso fue constante y equivalía al peso en libras de un galón de agua (8.34 lb/gal).

Tabla 11 Valores correspondientes a los tipos de lodos (Ambiente, 2020).

Tipo de Lodo	Porcentaje de sólidos por peso (Base seca)	Peso promedio por ft <sup>3</sup> (Base seca)
Biológico	15 - 20%	15 lb
Hidróxido metálico	25 - 40%	25 lb
Lodo de Cal	30 - 60%	35 lb

En la Tabla 12 se muestran los valores correspondientes para cada término de la ecuación (33). La cantidad de lodos a filtrar es de 400 L/ciclo, se consideró que un galón son 3.79 L.

Tabla 12 Capacidad por ciclo para 400L de lodo

Total de L por ciclo	Total de gal por ciclo	Sólidos por peso	Peso de líquido (lb/gal)	Peso (lb) por ft <sup>3</sup>	Capacidad (ft <sup>3</sup> ) por ciclo
400	105.67	0.025	8.34	15	1.47

Con este dato se realizó una búsqueda en internet en distintos distribuidores de este tipo de filtro; los resultados pueden observarse en la Tabla 13. El resultado de la investigación reveló que en promedio el área de filtrado necesaria oscila entre los 3 - 4 m<sup>2</sup> y el espesor de la torta es de aproximadamente 30 mm.

Tabla 13 Datos recolectados de distintos distribuidores de filtros prensa.

País	Empresa	Modelo	P <sub>máx</sub> (Bar)	Área de filtrado (m <sup>2</sup> )	Espesor de la torta (mm)	Número de platos
China	HENAN DAZHANG FILTER EQUIPMENT	XAMQ2/320	6.9	3.00	30	9
China	Zhejiang Jianhua Group Filter Press	BJ650	6.0	5.00	30	9
China	Zhejiang Jianhua Group Filter Press	XJ500	10.0	4.00	25	9
México	ACS Medio Ambiente México	AA	15.5	3.25	N.R	9

N.R: El dato no está reportado en la página de la empresa o en la ficha técnica del equipo.

### 3.4. Bomba de lodos

El proceso de espesamiento mediante filtrado comienza a la salida de los módulos del RBT y finaliza una vez que el lodo atraviesa la totalidad del filtro. La purga de los módulos no involucra el uso de agua a presión, con lo que se corre el riesgo de que el efluente no sea capaz de finalizar el recorrido, razón por la cual se recomendó el uso de una bomba.

El laboratorio contaba con una bomba centrífuga de motor monofásico marca SIEMENS de 1 HP cuyas especificaciones y curva de operación pueden observarse en la Figura 5. Se buscó evaluar si su uso era viable para impulsar la corriente hacia el final de la línea.

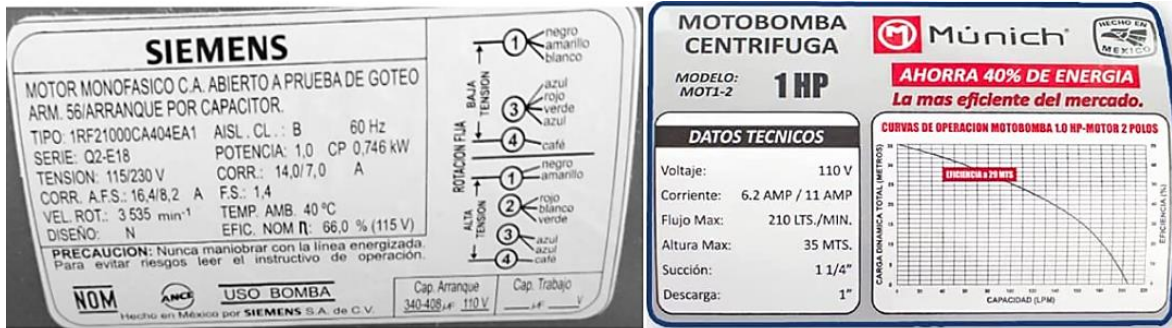


Figura 5 Bomba centrífuga SIEMENS motor monofásico 1 HP.

La totalidad del tramo está compuesto de tubería PVC de 2” cédula 80 y la presión de salida del flujo de purga es de aproximadamente  $1.03 \times 10^5 \text{ kg/ms}^2$ , la cual corresponde a la presión atmosférica de acuerdo con la información disponible en la página web de la UAM Xochimilco (2022).

La pérdida de carga generada por el lodo depende de la concentración de sólidos en la línea y de su naturaleza, pero como en este caso el porcentaje de sólido se tomó de 0.8%, las propiedades de la línea se consideraron como las del agua sin presencia de sólidos (CONAGUA, 2020).

Se priorizó la caída de presión del filtro para la determinación de la potencia necesaria para la bomba. En ambos equipos, la filtración tiene lugar sobre la superficie de filtrado de afuera hacia adentro, de forma que los sólidos se van acumulando en la parte externa, lo que origina un aumento gradual de la pérdida de carga hasta llegar a un valor que indica el final del proceso para proceder a la descarga de los sólidos retenidos.

Respecto a la velocidad del influente, primero se calculó la suma de los cocientes de los kg/h de la fracción sólida y líquida de la corriente entre sus respectivas densidades.

$$\frac{0.714 \frac{\text{kg}_{\text{sólido}}}{\text{h}}}{600 \frac{\text{kg}_{\text{sólido}}}{\text{m}^3}} + \frac{21.62 \frac{\text{kg}_{\text{liquido}}}{\text{h}}}{1000 \frac{\text{kg}_{\text{liquido}}}{\text{m}^3}} = 2.19 \times 10^{-2} \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

Este resultado se dividió entre el área de la tubería, para lo que se hizo uso de la ecuación del área de un cilindro:

$$A = \frac{\pi}{4} D^2 \tag{34}$$

$$A = \frac{\pi}{4} (0.0508 \text{ m})^2 = 2.027 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$\left( \frac{2.19 \times 10^{-2} \frac{\text{m}^3}{\text{h}}}{2.027 \times 10^{-3} \text{ m}^2} \right) \left( \frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}} \right) = 3.00 \times 10^{-3} \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

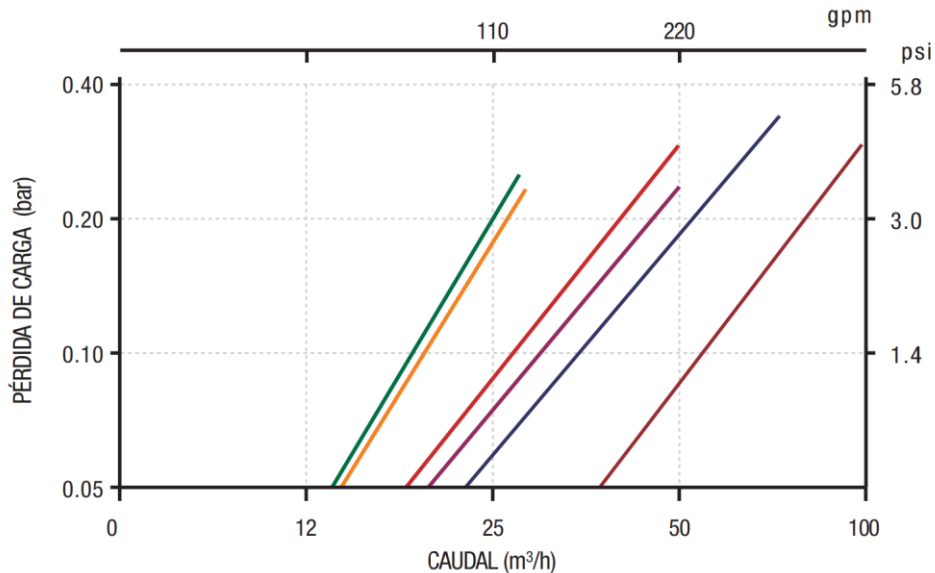


Figura 6 Pérdida de carga del filtro AZUD Helix System.

Tal y como se muestra en la Figura 6, la pérdida de carga ocasionada por el filtro de discos es de unos  $5.00 \times 10^3 \text{ kg/ms}^2$ , mientras que para el filtro prensa, al no contar con datos de fabricantes, se consideró la presión máxima de operación que es  $\leq 6.00 \times 10^5 \text{ kg/ms}^2$ . Para fines prácticos, se realizó el cálculo con el equipo que representaba una mayor pérdida de carga en la línea, en este caso, el filtro prensa.

Se tomó una longitud de línea estimada de 3 m para permitir que el reactor, la bomba y el filtro no estuvieran muy cercanos entre ellos facilitando su operación y mantenimiento. La densidad del influente se consideró como  $1000 \text{ kg/m}^3$  ( $\rho$ ) y su viscosidad de  $9.0 \times 10^{-4} \text{ kg/m}^3$  ( $\mu$ ). Se tomó la eficiencia de la bomba como de un 66% ( $\eta$ ) porque así venía indicado en la etiqueta del equipo.

Cálculos:

Para conocer la potencia de la bomba mínima necesaria en la línea, se empleó la ecuación de Bernoulli con pérdidas de fricción (Crane, 2010) y adicionalmente se consideró la caída de presión ocasionada por el filtro prensa ( $F_P$ ):



$$\frac{v_2^2 - v_1^2}{2} + g(z_2 - z_1) + \frac{P_2 - P_1}{\rho} + E_f + \frac{F_P}{\rho} = -W_B \quad (35)$$

En donde:

- v: Velocidad del flujo en el punto uno y en el punto dos respectivamente (m/s).
- g: Fuerza de gravedad 9.81 (m/s<sup>2</sup>)
- z: Distancia del suelo al punto uno y punto dos respectivamente (m).
- P: Presión del fluido en el punto uno y punto dos respectivamente (kg/ms<sup>2</sup>)
- ρ: Densidad del fluido 1000 (kg/m<sup>3</sup>)
- E<sub>f</sub>: Pérdidas de energía por fricción (J/kg)
- W<sub>B</sub>: Trabajo de la bomba (J/s)

Los valores de z<sub>1</sub> y z<sub>2</sub> eran similares, por lo que el término de energía potencial se consideró despreciable. Por otra parte, la ecuación de continuidad establece que en una tubería el flujo másico del influente es igual al del efluente, representándose de la siguiente forma:

$$\rho_1 A_1 v_1 = \rho_2 A_2 v_2 \quad (36)$$

Como el flujo en la tubería y la sección de esta permanecían iguales a lo largo de la totalidad del trayecto, el término de energía cinética en la ecuación también se consideró como despreciable. La nueva expresión quedó de la siguiente forma:

$$\frac{P_2 - P_1}{\rho} + E_f + \frac{F_P}{\rho} = -W_B \quad (37)$$

El valor de P<sub>2</sub> era desconocido, razón por la que, como primer paso se consideró la ausencia de una bomba para despejar el término de energía por presión en la ecuación y conocer su valor.

$$E_f + \frac{F_P}{\rho} = \frac{P_2 - P_1}{\rho} \quad (38)$$

El término E<sub>f</sub> se calculó de la siguiente forma:

$$E_f = (f + k_f) \frac{Lv^2}{D^2} \quad (39)$$

En donde:

- $K_f$ : Es la pérdida de energía por accesorios
- $f$ : Es el factor de fricción de Darcy

Para determinar el valor de  $f$  se empleó un gráfico  $f$  vs  $Re$ , en donde  $Re$  es el número de Reynolds:

$$Re = \frac{\rho v D}{\mu} \quad (40)$$

Una vez conociendo esto, se procedió con el cálculo de la potencia. Con la ecuación (40) se calcula  $Re$ :

$$Re = \frac{\left(1000 \frac{kg}{m^3}\right) \left(3.00 \times 10^{-3} \frac{m}{s}\right) (5.08 \times 10^{-2} m)}{9.0 \times 10^{-4} \frac{kg}{m \cdot s}} = 1.69 \times 10^2$$

El valor de  $Re$  se encontraba dentro del régimen laminar y debido a que este se caracteriza por el movimiento de las partículas en trayectorias paralelas, formando capas o láminas, lo cual podría favorecer el asentamiento del sólido presente en la línea a lo largo del trayecto. El gráfico de  $f$  vs  $Re$  empleado para obtener el valor de  $f$  puede localizarse en el ANEXO A (Crane, 2010). Mientras que el valor de la rugosidad relativa ( $\epsilon/D$ ) para la tubería de PVC se tomó como 0.0015 mm (Osorio Escamilla, y otros, 2004).

De acuerdo con la información extraída de la Figura 7 y la Tabla 14 FERROPLAST (DICELTRO GARRAF, 2018), la longitud equivalente para un codo de 90° de 2" es de aproximadamente 1 m, para una T es de unos 2 m, para reducciones graduales de 2" a 1 ¼" es de unos 2 m y para ampliaciones de 1" a 2" es de 20 m. Por el momento la línea considera la presencia de dos T, cinco codos de 90°, una reducción y una ampliación (para la conexión de la bomba).

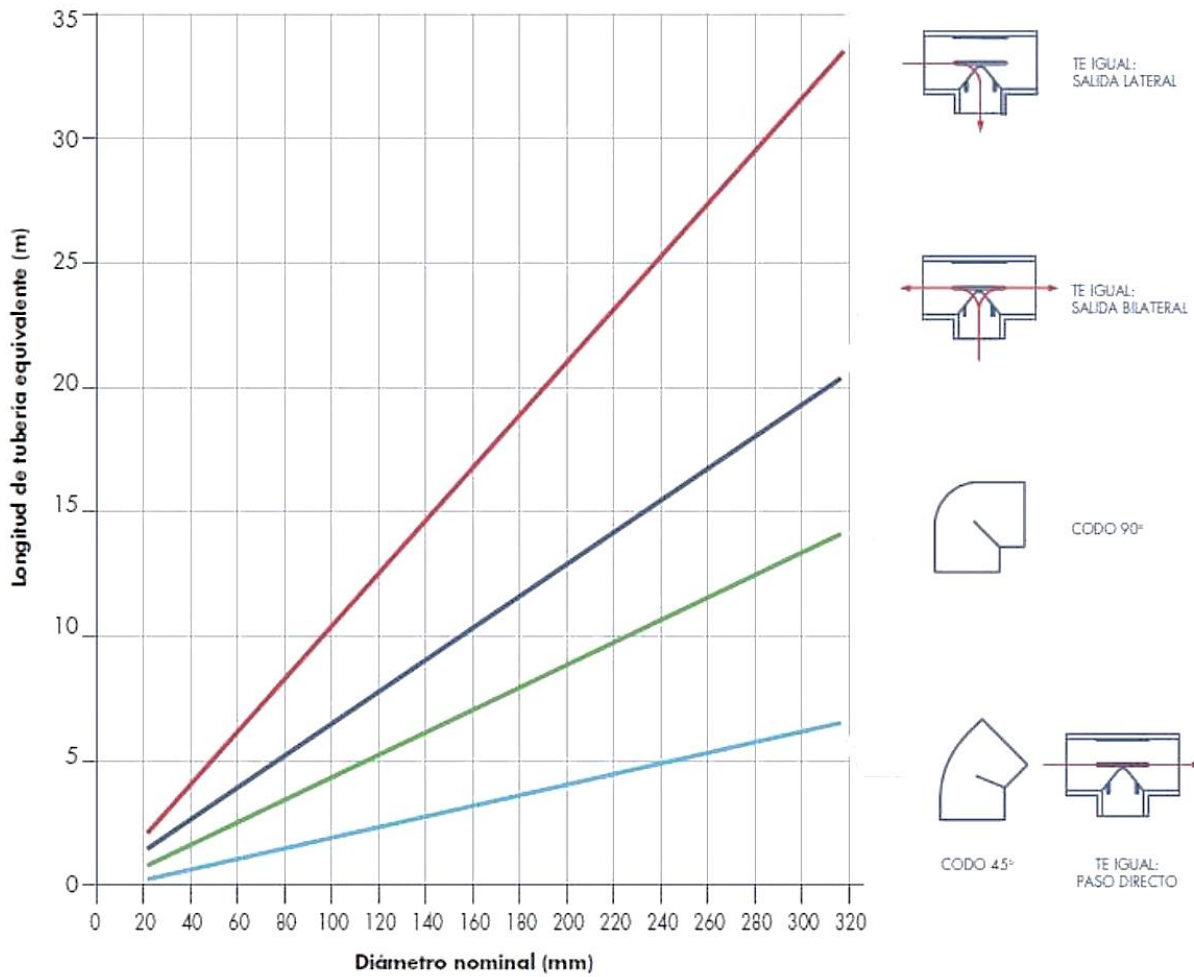


Figura 7 Longitud equivalente en codos y accesorios de PVC.

Tabla 14 Longitud equivalente en reducciones y ampliaciones de PVC.

Diámetro		Como ampliación	Como reducción
d	D	Le (m)	Le (m)
20	32	10	1.5
20	40	15	2.0
20	50	20	3.0
25	40	16	2.0
25	50	20	3.0
25	63	25	4.0
32	50	15	2.0

$$L_e = (2\text{ m})(2) + (1\text{ m})(5) + 20\text{ m} + 2\text{ m} = 31\text{ m}$$

Esta  $L_e$  se suma a los 3 m de línea y se obtiene el valor de  $E_f$ .

$$E_f = [0.022] \left[ \frac{(34 \text{ m}) \left( 3.00 \times 10^{-3} \frac{\text{m}}{\text{s}} \right)^2}{(0.0508 \text{ m})(2)} \right] = 6.63 \times 10^{-5} \frac{\text{J}}{\text{kg}}$$

$$\left( 6.63 \times 10^{-5} \frac{\text{J}}{\text{kg}} \right) + \frac{\left( 6.00 \times 10^5 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2} \right)}{\left( 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right)} = 600.00 \frac{\text{J}}{\text{kg}}$$

Sustituyendo este valor en la ecuación (37) se obtuvo el trabajo de la bomba.

$$600.00 \frac{\text{J}}{\text{kg}} + 6.24 \times 10^{-5} \frac{\text{J}}{\text{kg}} + \frac{\left( 6.00 \times 10^5 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2} \right)}{\left( 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right)} = -1.2 \times 10^3 \frac{\text{J}}{\text{kg}}$$

Finalmente, la potencia real de la bomba se calculó de la siguiente forma:

$$P_B = \frac{W_B \rho F}{-\eta} \quad (41)$$

$$P_B = \frac{\left( -1.2 \times 10^3 \frac{\text{J}}{\text{kg}} \right) \left( 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right) \left( 6.08 \times 10^{-6} \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right)}{-0.66} = 11.06 \frac{\text{J}}{\text{s}} = 1.48 \times 10^{-2} \text{ HP}$$

Revisando las curvas de operación disponibles para el modelo de bomba centrífuga MOTI-2, disponible en el grupo High Power (Figura 8), se observó que, una bomba de 1/4 HP (MOTO.25-2) es más que suficiente para la línea de purga. Sin embargo, si bien en un inicio se plantea que la PTAR maneje un caudal de 20 L/min por un lapso de prueba inicial de seis meses (debido a que en las primeras pruebas de la tecnología realizadas en el 2020 en las instalaciones de la UNAM, ese fue el influente tratado mostrando resultados favorables referentes a la calidad del efluente), se desea incrementar este influente una vez el periodo de prueba culmine, con lo cual la producción de purga también aumentaría, es así que, con fines de escalamiento es posible utilizar la bomba de 1HP (MOTI-2) disponible en el laboratorio.

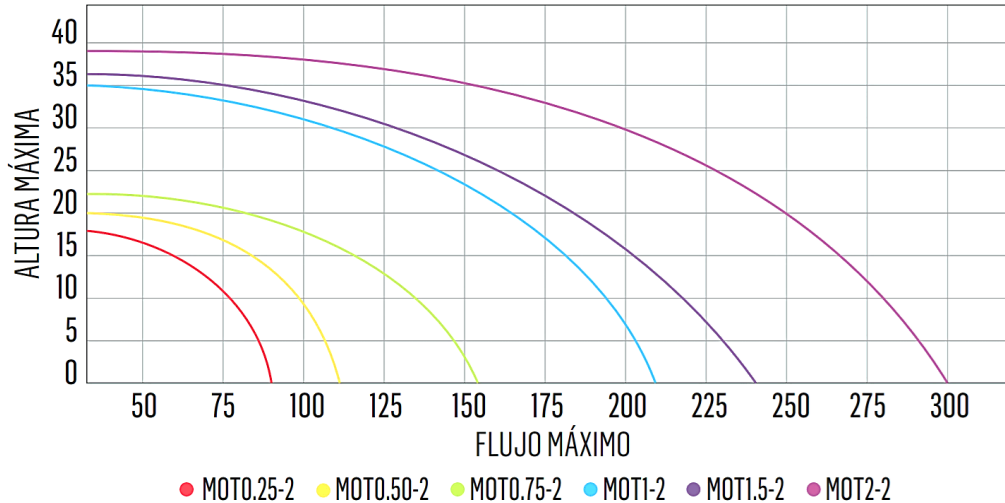


Figura 8 Curva de bombas centrífugas. MOTI-2 corresponde a la bomba de 1 HP (Grupo High Power de México, S.A. de C.V., 2021).

Para mantener la eficiencia del equipo en un 66% la bomba trabajará con un flujo aproximado de 88 L/min y una altura máxima de unos 32 mca correspondientes a una  $P_2$  de 3.14 bar.

### 3.5. Consideraciones para la simulación del proceso de filtrado

Se consideró que el influente estaba conformado por biomasa muerta, biomasa viva y agua. Si bien, la NOM-004-SEMARNAT-2002 menciona que es fundamental la determinación de metales pesados en la composición del lodo, debido a que el agua residual a la que se le dará tratamiento en la PTAR del polígono de San Lorenzo proviene en su mayor parte de casas aledañas, se omitió este componente para la simulación del funcionamiento de los filtros.

Los porcentajes de biomasa muerta y biomasa viva que componen al 0.8% previamente calculado de lodos producidos que se muestran en la Tabla 15, se obtuvieron de uno de los archivos ejemplo de simulación que ofrecía el software en el folder: aplicaciones medioambientales, subcarpeta IndWater. Este mostraba el análisis del diseño de una planta de tratamiento de aguas residuales industriales y demostraba cómo rastrear el destino de múltiples componentes químicos en una instalación integrada (Durme, y otros, 1993 en SPDv12, 2014). Por su parte, la Tabla 16 muestra el valor de los influentes correspondientes a los porcentajes por componente modificados.

La estequiometría y cinética de reacción que se empleó para la descomposición de la biomasa en el ejemplo pueden consultarse en la ecuación (42). El documento mencionaba que la modelación en el software de la descomposición de la biomasa se consideró como una reacción separada al momento de introducir los datos en el reactor, por lo que no especificaron un coeficiente de desintegración y en su lugar se estableció una reacción de desintegración con su propia constante cinética.



$$k = 0.005 \text{ 1/h}$$

Tabla 15 Porcentajes por componente en el influente del equipo de filtrado.

Componente	Anteriores	En corriente	Actuales
Agua	100.000%	99.200%	99.200%
Biomasa	1.570%	0.800%	0.013%
Biomasa Muerta	98.430%		0.787%

Tabla 16 Flujo por componente en el influente del equipo de filtrado.

Componente	F anteriores (kg/h)	Actuales	F actuales (kg/h)
Agua	21.624	99.200%	21.624
Biomasa	0.174	0.013%	0.003
Biomasa Muerta		0.787%	0.172

En todas las simulaciones que eran posibles de realizar en el software, los componentes puros: agua, nitrógeno y oxígeno se encontraban presentes en la corriente de entrada a los equipos y el usuario podía determinar si asignaba un porcentaje en la corriente o no, sin embargo, los componentes de biomasa y biomasa muerta debían añadirse desde la biblioteca de componentes puros del programa.

El componente puro "Biomasa" estaba incluido en la base de datos y sus propiedades pueden apreciarse en la Tabla 17, pero para el componente "Biomasa muerta" fue necesario partir de un componente nuevo y cambiar sus propiedades a las presentadas en la Tabla 18. A consecuencia del desconocimiento de un valor específico para muchas de las propiedades, se optó por colocar las que se utilizaron en el ejemplo consultado y cambiar las resaltadas con una tonalidad amarilla.

Tabla 17 Propiedades de la biomasa CH<sub>1.8</sub>O<sub>0.5</sub>N<sub>0.2</sub> (SPDv12, 2014).

Constantes físicas					
PM (g/mol)	24.63	PE (°C)	526.85		
Propiedades Críticas					
T <sub>c</sub> (°C)	1086.85	P <sub>c</sub> (bar)	50	Ω	0.344
Factor de compresibilidad		0.229			
Diversos					
Entalpía de formación (J/mol)			0.00	FP (°C)	-273.15
H x10 <sup>4</sup> (atm-m <sup>3</sup> /mol)		0.00	Psize (micrón)		1.50
Coeficiente volumétrico predeterminado			1.00		
Constantes físicas dependientes de la Temperatura					
Densidad (g/L)		a	1050	b	0.00
Capacidad Calorífica (J/kg-K)					
Líquidos y sólidos		a	103	b	0.00
c	0.00	d	0.00	e	0.00
Gases		a	0.0000	b	0.0000
c	0.0000	D	0.0000	e	0.0000
Antoine		a	0.0000	b	0.0000
c	0.0000				
Calor de vaporización (J/mol)					
Δh <sub>vap</sub> a 1 atm (J/mol)		26717.2812			
a	0.0000	b	0.0000		
Acuoso					
Propiedades de difusividad		Agua	0.00	Aire	0.00
Biodegradación		kmax <sub>0</sub>	0.00	ks	0.00
Proporciones de Oxígeno					
DQO (gO/g)	1.82	BBOu/DQO (g/g)	0.92	DTO (gO/g)	1.82
DBO5/DBOu (g/g)	0.68				
Proporciones de Nitrógeno					
TKN (gN/g)	0.114	NH <sub>3</sub> (gNH <sub>3</sub> /g)	0.114	NO <sub>3</sub> -NO <sub>2</sub>	0.00
Log <sub>10</sub> (Octano/Agua)		0.00			
Proporción de carbono		TOC (gC/g)		0.488	
Proporción de fósforo		TP (gP/g)		0.02	
Proporción de CaCO <sub>3</sub>		CaCO <sub>3</sub>		0.00	
Proporción de sólidos					
ST (g sólidos/g)	1.00	SST/ST (g/g)	1.00	SSV/SST (g/g)	0.90
SSVD/SSV (g/g)	1.00	SDB/SDT (g/g)	0.00	SVDB/SVD (g/g)	0.00

Tabla 18 Propiedades de la biomasa muerta (SPDv12, 2014). Se tomó como “blanco” el componente agua y las propiedades se modificaron de acuerdo con lo señalado en el ejemplo base.

Constantes físicas					
PM (g/mol)	18.02	PE (°C)	100.05		
Propiedades Críticas					
T <sub>c</sub> (°C)	374.19	P <sub>c</sub> (bar)	221.2	Ω	0.344
Factor de compresibilidad		0.235			
Diversos					
Entalpía de formación (J/mol)			0.00	FP (°C)	-273.15
H x10 <sup>4</sup> (atm-m <sup>3</sup> /mol)		0.00	Psize (micrón)		0.00
Coeficiente volumétrico predeterminado			1.00		
Constantes físicas dependientes de la Temperatura					
Densidad (g/L)		a	1000	b	0.00
Capacidad Calorífica (J/kg-K)					
Líquidos y sólidos		a	75	b	0.00
c	0.00	d	0.00	e	93701000
Gases		a	32.2400	b	0.1924
c	0.1055	d	-0.3596	e	0.0000
Antoine		a	8.1437	b	1746.1500
c	-42.5500				
Calor de vaporización (J/mol)					
Δh <sub>vap</sub> a 1 atm (J/mol)		42322.4971			
a	60361.0531	b	0.4132		
Acuoso					
Propiedades de difusividad		Agua	0.00	Aire	0.00
Biodegradación		k <sub>max0</sub>	0.00	k <sub>s</sub>	0.00
Proporciones de Oxígeno					
DQO (gO/g)	1.82	BBOu/DQO (g/g)	0.92	DTO (gO/g)	1.82
DBO5/DBOu (g/g)	0.68				
Proporciones de Nitrógeno					
TKN (gN/g)	0.114	NH3 (gNH <sub>3</sub> /g)	0.114	NO <sub>3</sub> -NO <sub>2</sub>	0.00
Log <sub>10</sub> (Octano/Agua)		0.00			
Proporción de carbono		TOC (gC/g)		0.488	
Proporción de fósforo		TP (gP/g)		0.02	
Proporción de CaCO <sub>3</sub>		CaCO <sub>3</sub>		0.00	
Proporción de sólidos					
ST (g sólidos/g)	1.00	SST/ST (g/g)	1.00	SSV/SST (g/g)	0.00
SSVD/SSV (g/g)	0.00	SDB/SDT (g/g)	0.00	SVDB/SVD (g/g)	0.00



### 3.6. Condiciones de operación SuperPro Designer

En la Figura 9 se muestra que, la simulación se realizó considerándola como un proceso Batch, la totalidad del proceso está compuesto por tres etapas: Espesamiento con filtro, limpieza de la línea con aire comprimido y finalmente la estabilización de la torta, lo que genera una serie de tiempos muertos. El influente de lodo se tomó como 400 L/ciclo.

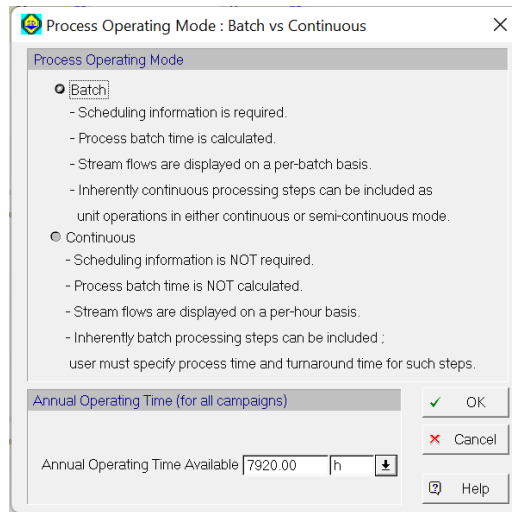


Figura 9 Selección del modo de operación del proceso de filtrado.

Los valores de los influentes biomasa, biomasa muerta y agua, así como los correspondientes a la presión de ingreso y temperatura se ingresaron tal y como se muestra en la Figura 10.

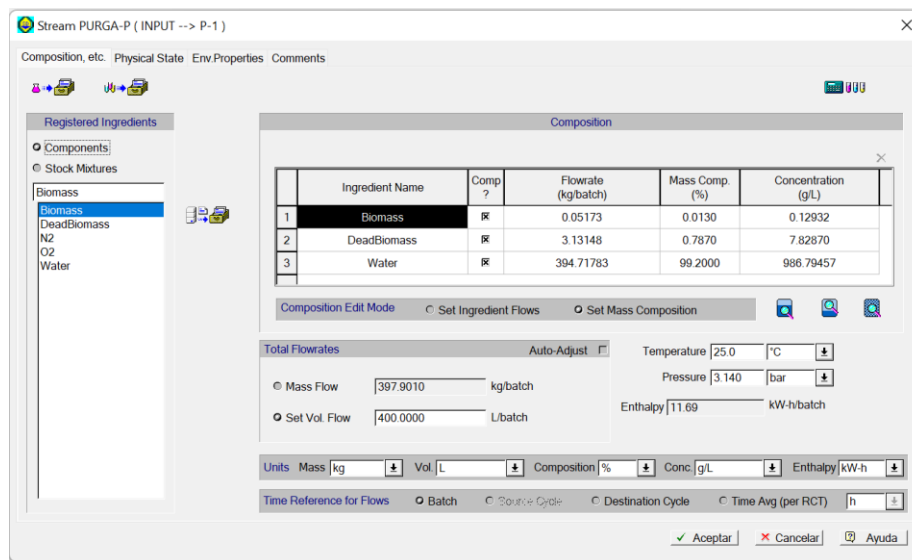


Figura 10 Composición de corriente de ingreso al filtro (Filtro prensa/Filtro de discos).

Con respecto a los datos por cambiar para la simulación, el tamaño de partícula utilizado en el ejemplo cumplía con el requisito de ser menor a 1 mm, por lo que este dato no fue modificado.

Las Tablas 19 y 20 muestran en color verde las propiedades que se ingresaron al programa para realizar la simulación y en color naranja aquellas que, si bien son características del proceso, debido a la escasez de datos no fue posible asignarles un valor exacto por lo que, para resolverlo se realizó una búsqueda en artículos, fuentes oficiales y trabajos de tesis sobre rangos de valores comunes para estas propiedades en lodos:

#### Relación DBO/DQO:

*“Una presencia alta de DBO respecto a la de DQO señala un agua residual relativamente biodegradable, mientras que una baja proporción señala un agua con una fracción significativa de materia no biodegradable, de esta forma, una relación por debajo de 0.2 se considera de una baja biodegradabilidad con lo que, no es recomendable el uso de un tratamiento biológico por el contrario, para el influente y relaciones superiores a 0.4 corresponden a una buena biodegradabilidad”* (REMTAVARES, 2012).

Con base en datos bibliográficos (SEMARNAT, 2016), se consideró una relación de DBO/DQO para el afluente igual a 0.63. Este valor debe disminuir a medida que el flujo pase a través de las distintas unidades de proceso en la PTAR debido a una reducción en la fracción biodegradable, sin llegar a ser menor a 0.4, por lo que el valor empleado en la simulación fue de 0.50.

#### Relación DBO<sub>5</sub>/DBO<sub>u</sub>:

Un valor bajo en la relación indica baja presencia de materia orgánica susceptible de ser degradada por los microorganismos. Un artículo en cinco estaciones diferentes de monitoreo sobre el río negro en Colombia (Benjumea Hoyos, 2018) mencionaba que, un valor común para esta relación en lodos era de 0.31.

#### Relación SVDB/SVD:

En información proporcionada por la Universidad de Valencia se encontraron valores para obtener la fracción de Sólidos Suspendidos Volátiles Biodegradables (SSVB) (Álvarez Hornos, y otros, 2002), más no la fracción de Sólidos Volátiles Disueltos Biodegradables (SVDB), sin embargo, en la bibliografía se reportó la simulación de

una corriente de entrada a una PTAR con el software de Super Pro Designer, en donde al igual que en el ejemplo base, la relación era de 0.00 (University, 1997), por lo que el valor no fue modificado.

Tabla 19 Cambio en las propiedades de la biomasa para la simulación  $CH_{1.8}O_{0.5}N_{0.2}$ .

Proporciones de Oxígeno					
DQO (gO/g)	1.00	DBO/DQO (g/g)	0.50	DTO (gO/g)	1.82
DBO5/DBO (g/g)	0.31				
Proporciones de Nitrógeno					
TKN (gN/g)	0.213	NH <sub>3</sub> (gNH <sub>3</sub> /g)	0.00	NO <sub>3</sub> -NO <sub>2</sub>	0.00
Log <sub>10</sub> (Octano/Agua)	0.00				
Proporción de carbono	TOC (gC/g)		0.488		
Proporción de fósforo	TP (gP/g)		0.02		
Proporción de CaCO <sub>3</sub>	CaCO <sub>3</sub>		0.00		
Proporción de sólidos					
ST (g sólidos/g)	1.00	SST/ST (g/g)	0.57	SSV/SST (g/g)	0.75
SSVD/SSV (g/g)	0.98	SDB/SDT (g/g)	0.78	SVDB/SVD (g/g)	0.00

Tabla 20 Cambio en las propiedades de la biomasa muerta para la simulación.

Proporciones de Oxígeno					
DQO (gO/g)	1.00	DBO/DQO (g/g)	0.50	DTO (gO/g)	1.82
DBO5/DBO (g/g)	0.31				
Proporciones de Nitrógeno					
TKN (gN/g)	0.213	NH <sub>3</sub> (gNH <sub>3</sub> /g)	0.00	NO <sub>3</sub> -NO <sub>2</sub>	0.00
Log <sub>10</sub> (Octano/Agua)	0.00				
Proporción de carbono	TOC (gC/g)		0.488		
Proporción de fósforo	TP (gP/g)		0.02		
Proporción de CaCO <sub>3</sub>	CaCO <sub>3</sub>		0.00		
Proporción de sólidos					
ST (g sólidos/g)	1.00	SST/ST (g/g)	0.57	SSV/SST (g/g)	0.00
SSVD/SSV (g/g)	0.00	SDB/SDT (g/g)	0.00	SVDB/SVD (g/g)	0.00

Las propiedades para el componente puro agua, se mantuvieron tal como se muestran en la base de datos del programa. En la Figura 11 se observan las líneas de ingreso y egreso para ambos equipos de filtrado.

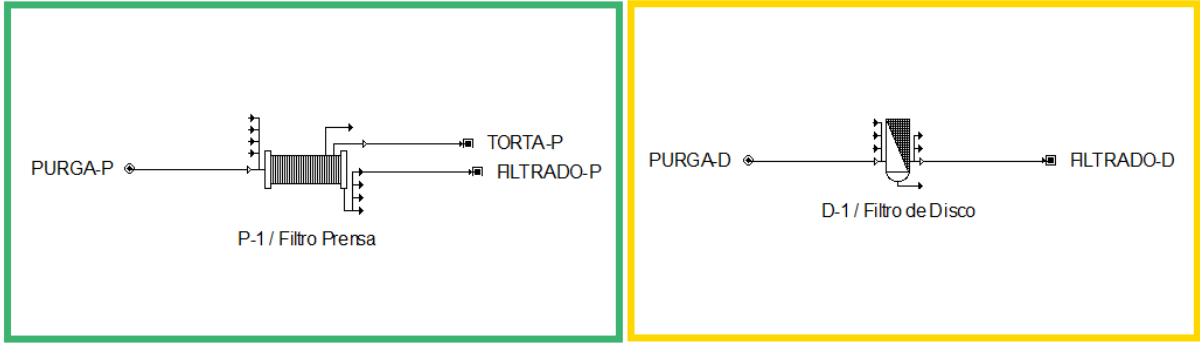


Figura 11 Representación de equipos en el software Filtro prensa (izquierda) filtro de discos (derecha). En el filtro de discos los lodos quedan retenidos en la superficie de filtrado dentro del equipo y para recuperar el sólido es necesario abrirlo y limpiar de forma manual, debido a esto, a diferencia de con el diagrama del filtro prensa, una corriente de salida para la torta no fue incluida.

De la Figura 12 a 14 se aprecian los datos establecidos para la simulación del Filtro prensa, en donde se especifica un área de filtrado máxima de 4 m<sup>2</sup> considerando que el área mínima señalada en la Tabla 13 es de 3 m<sup>2</sup> y la máxima de 5 m<sup>2</sup>. El material seleccionado para el filtro fue plástico, debido a que era el material más común entre los equipos presentados en la Tabla 13.

La presencia de la bomba de lodos se ve reflejada en el apartado de “Flujo de filtrado específico”, el cual hace referencia a los L/h de flujo de purga entre el área máxima de filtrado de cada equipo en m<sup>2</sup>.

Figura 12 Propiedades de Equipo (Filtro prensa – área máxima de filtrado).

Filtro Prensa (Plate and Frame Filter)

Equipment Purchase Cost Adjustments Consumables Scheduling Throughput Comments Allocation

Number of Standby Units

**Capital Cost**

Material  
Plastic  Material Factor

PC = Equipment Purchase Cost Installation Cost  x PC

**Operating Cost**

**Annual Maintenance Cost**

Maintenance Cost  x PC

**Usage / Availability Rates**

Usage Rate  \$/equipment-h  
Availability Rate  \$/h

**Depreciation**

PC Portion Already Depreciated  %

Figura 13 Propiedades del Equipo (Filtro prensa - material).

OPERACIONES DE FILTRACIÓN

Oper.Cond's Vent/Emissions Labor, etc. Description Batch Sheet Scheduling

### Particulate Component Retention

Component	Particulate?	% Removed
Biomass	<input checked="" type="checkbox"/>	99.0000
DeadBiomass	<input checked="" type="checkbox"/>	99.0000
N2	<input type="checkbox"/>	0.0000
O2	<input type="checkbox"/>	0.0000
Water	<input type="checkbox"/>	0.0000

Show Components  With Flow  All

### Cake Dryness / Solvent Retention

LOD 30.00 %  
 Cake Porosity 0.30 v/v  
 Solvent Retained 0.34 %

Cake Thickness 1.13 mm  
 Max. Cake Thickness 30.00 mm

### Duration

Setup Time 0.00 min

### Filtration Time

Set by User 0.000 min  
 Calculated Based on  
 Filtrate Flux 1320.000 L/m2-h

### Filtration Mode

Filter contents  
 Draw-and-Filter In #5 : PURGA-P

Filtrate Stream Out #3 : FILTRADO-P

### Power Consumption

Power Type Std Power

Set Specific Power 0.0000 kW/m2  
 Set Total Power 0.0000 kW  
 Set Power per Unit 0.0000 kW

Aceptar Cancelar Ayuda

Figura 14 Condiciones de operación (Filtro prensa).

En la Figura 16 se muestran las características del filtro de discos, para el área de filtrado máxima de este equipo, se tomó como referencia el modelo HELIX SYSTEM 2NA de la marca AZUD (2020) debido a que se contaba con uno en el laboratorio, una fotografía de la carcasa del equipo puede apreciarse en la Figura 15.



Figura 15 Etiqueta del equipo. Filtro AZUD HELIX SYSTEM, Modelo 2NA.


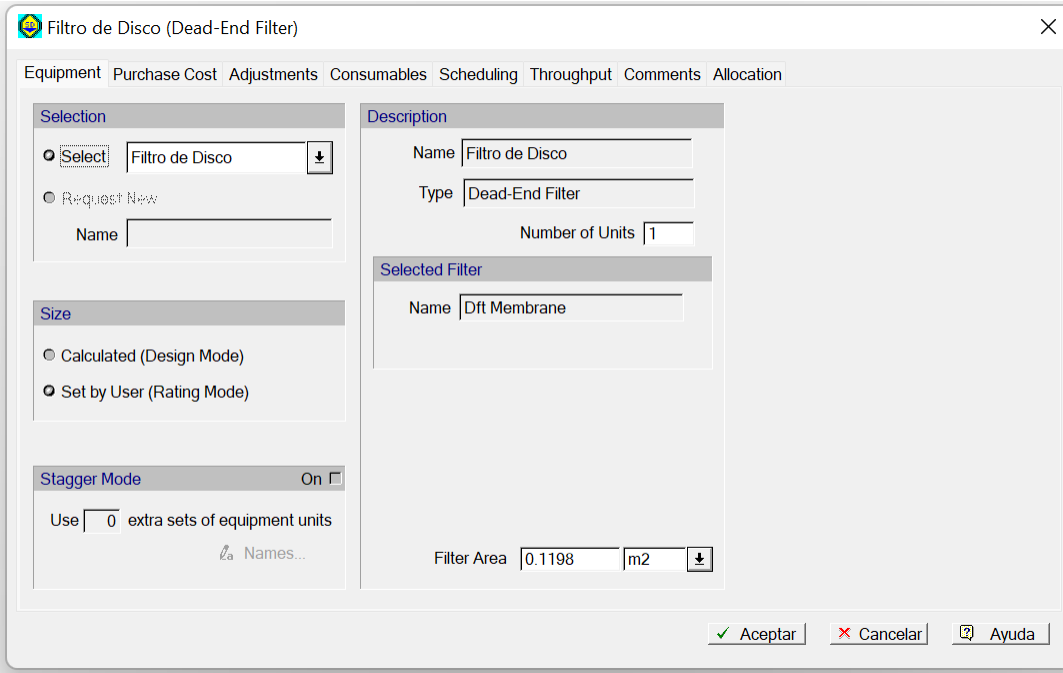
CONFIGURACIÓN FILTRO	Conexión	Modelo	Dimensiones					
			H		W		X	
			mm	in	mm	in	mm	in
	2"	2NR	595	23.4	310	12.2	133	5.2
		2NA						
		2NV						
		2NW						

Figura 16 Características del equipo; Dimensiones (AZUD, 2020).

El equipo está compuesto con una superficie de filtrado de  $0.1198 \text{ m}^2$ , capaz de filtrar un flujo máximo de  $30 \text{ m}^3/\text{h}$  y con un poro de discos de  $130 \text{ micrón}$ . Las Figuras 17 a 20 muestran los valores ingresados en el programa para las propiedades del filtro prensa, su operación y el tipo de membrana seleccionada.



**Filtro de Disco (Dead-End Filter)**

Equipment Purchase Cost Adjustments Consumables Scheduling Throughput Comments Allocation

**Selection**

Select

Request New

Name

**Size**

Calculated (Design Mode)

Set by User (Rating Mode)

**Stagger Mode** On

Use  extra sets of equipment units

**Description**

Name

Type

Number of Units

**Selected Filter**

Name

Filter Area

Figura 17 Propiedades del Equipo (Filtro de discos – área máxima de filtrado).

Filtro de Disco (Dead-End Filter)

Equipment Purchase Cost Adjustments Consumables Scheduling Throughput Comments Allocation

Number of Standby Units

**Capital Cost**

Material  Material Factor

PC = Equipment Purchase Cost Installation Cost  x PC

**Operating Cost**

**Annual Maintenance Cost**

Maintenance Cost  x PC

**Usage / Availability Rates**

Usage Rate  \$/equipment-h

Availability Rate  \$/h

**Depreciation**

PC Portion Already Depreciated  %

Figura 18 Propiedades del Equipo (Filtro de discos - material).

Filtro de Disco (Dead-End Filter)

Equipment Purchase Cost Adjustments Consumables Scheduling Throughput Comments Allocation

**Filtration Membrane**

Type  Pore Size  micron

**Cost**

Total Amount of Membrane (per use, all units)  m2

Unit Cost  \$/m2

Replacement Frequency  Cycle(s)

**Other Consumables**

Name	Consumption Rate	Quantity Meas. Units	Consumption Basis	Total Amount (per use)	Replac. Frequency	Replac. Basis

Include Use of Consumables for D-1

Figura 19 Tamaño de poro de la membrana. No fue posible cambiar este dato, porque el programa sólo permitía escoger entre 5 membranas: Ósmosis inversa, Dft DEF, Dft, ultrafiltración y microfiltración.



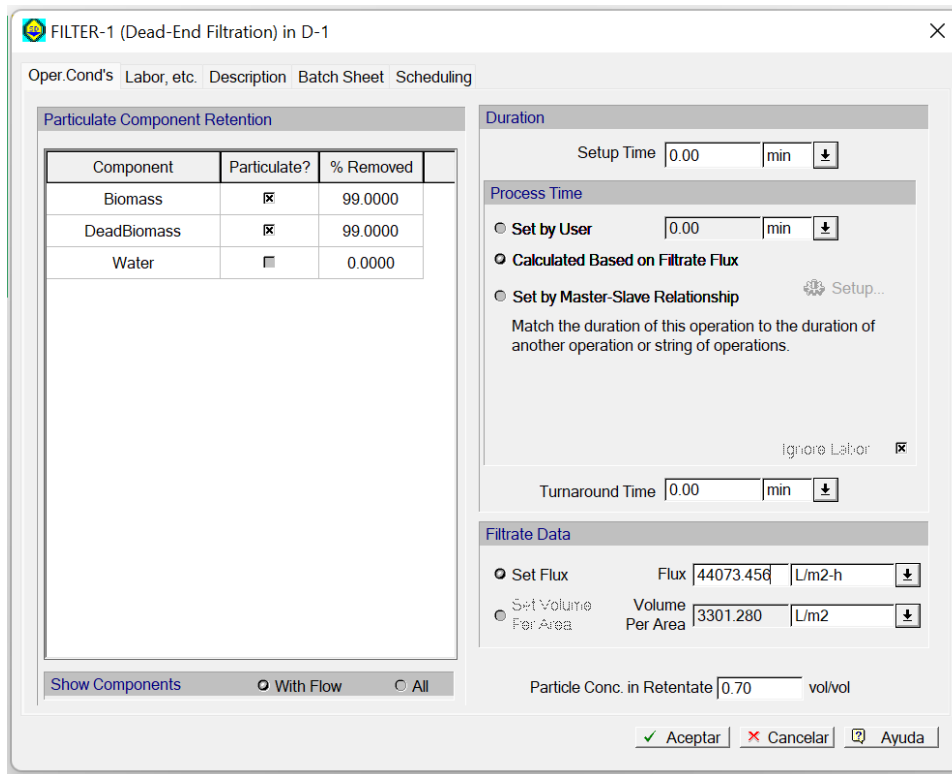


Figura 20 Condiciones de operación (Filtro de discos).

### 3.7. Limpieza preventiva de la línea de purga

La presencia de la bomba en la línea de purga modifica la velocidad de la corriente de manera que el régimen de flujo ya no es laminar, el nuevo valor de  $Re$  ( $4.08 \times 10^4$ ) corresponde a la zona de transición, caracterizada por tener fluctuaciones intermitentes entre el régimen laminar y el turbulento, por ende, es posible que un pequeño porcentaje del sólido se asiente a lo largo de la tubería. Con el propósito de evitar que en un futuro esto ocasione un daño en la línea (mantenimiento preventivo) y para garantizar que la totalidad del influente llegue al equipo de filtrado, se propuso el empleo de un barrido con aire en la tubería.

Los compresores, sopladores y ventiladores operan incrementando la presión de una corriente de aire, no obstante, la principal diferencia entre los equipos es el valor máximo de presión que pueden suministrar, los ventiladores y sopladores proporcionan presiones pequeñas en comparación a las otorgadas por un compresor.

Como se observa en el DFP de la PTAR (ANEXO B), la corriente 12 es el ingreso a un soplador vortex de la marca Hailea modelo VB-290G, que tiene como objetivo suministrar aire a los módulos del RBT (proceso aerobio) y la presión máxima que puede otorgar a la

corriente de aire es de unos 0.01 MPa es decir 0.1 bar, muy por debajo de los 3.14 bar otorgador por la bomba de centrifuga, haciendo inviable su uso para el barrido con aire.

Por esta razón, se propuso el uso de un compresor que sea capaz de suministrar una presión similar a la proporcionada por la bomba centrifuga. La ficha técnica del compresor disponible en el laboratorio (Figura 21) establece dos presiones de operación y sus respectivos flujos (5.09 m<sup>3</sup>/h a 2.76 bar y 3.40 m<sup>3</sup>/h a 6.21 bar) es así, que para la simulación se utilizó una presión de 2.76 bar.

Un aspecto importante por considerar en los compresores es que, el aire atmosférico contiene humedad y al ser comprimido la concentración de agua aumenta, haciendo posible que esta condense a lo largo de la línea provocando un incremento en la humedad de la torta de lodo, sin embargo, el manual del equipo señala la presencia de una pequeña válvula para liberar el agua generada antes de que el aire ingrese a la corriente.



Figura 21 Compresor horizontal 10L, 1HP, marca TRUPER. Flujo @ 40 PSI (2.76 bar) 0.085 m<sup>3</sup>/min correspondiente a un flujo másico de aire de 0.102 kg/min (TRUPER, 2022).

Es así como, si bien el proceso de filtrado es capaz de remover hasta el 70% m/m del agua presente en el influente, se espera que la corriente de aire comprimido remueva otro pequeño porcentaje debido a la transferencia de vapor de agua desde la interfase de la torta-aire al seno del aire, para encontrar este porcentaje se llevó a cabo una nueva simulación incluyendo un “secador” conectado a la salida del sistema de filtrado.

Para determinar el tiempo necesario de operación del equipo, primero se estimó el volumen de aire requerido para recorrer la totalidad de la tubería hasta la entrada del equipo de filtrado y la longitud de este.

El espacio necesario para cada uno de los filtros se muestra a continuación, es importante señalar que las medidas del filtro AZUD se obtuvieron de la ficha técnica del equipo y que para el filtro prensa, se realizó la búsqueda de un equipo que contará con el área de filtrado requerida de acuerdo con los resultados de la simulación, entre las empresas consultadas se encontraban; ACS México, Zhejiang Jinhua y Henan Dazhang.

Filtro prensa:

En general la longitud del equipo varía entre 1.47 – 1.96 m (considerando un valor de 1.50 m), la altura entre 1.03 – 1.18 m y el ancho entre 0.89 - 1.05 m (considerando un valor de 0.90 m), con lo que el área mínima necesaria para su instalación es de unos 1.35 m<sup>2</sup>.

Filtro de discos:

El modelo 2NA tiene una altura de 0.590 m (sin considerar la distancia piso-filtro) y el largo y ancho es de 0.310 m, dando así un área necesaria de 0.096 m<sup>2</sup> para su instalación.

La longitud total por recorrer de tubería se consideró de 2.5 m, los cuales abarcan la suma de los tramos de la línea de aire (comprendida desde la salida del compresor hasta la unión con la línea de purga) y la línea de purga (comprendida desde la unión de ambas líneas hasta el ingreso al módulo de filtrado). El volumen total por recorrer es de:

$$\text{Área del tubo: } \pi (0.025 \text{ m})^2 = 0.002 \text{ m}^2$$

$$\text{Longitud total: Longitud de la tubería + Filtro}$$

$$\text{Longitud total}_{PRENSA}: 2.5 \text{ m} + 1.50 \text{ m} = 4.00 \text{ m}$$

$$\text{Longitud de total}_{DISCOS}: 2.5 \text{ m} + 0.90 \text{ m} = 3.40 \text{ m}$$

$$\text{Volumen requerido}_{PRENSA}: (0.002 \text{ m}^2)(4.000 \text{ m}) = 0.008 \text{ m}^3$$

$$\text{Volumen requerido}_{DISCOS}: (0.002 \text{ m}^2)(3.400 \text{ m}) = 0.007 \text{ m}^3$$

El tiempo de operación es el cociente del volumen requerido entre el flujo de aire (0.085 m<sup>3</sup>/min):

$$\text{T tiempo de operación}_{PRENSA} : \frac{0.008 \text{ m}^3}{0.085 \text{ m}^3/\text{min}} = 0.095 \text{ min}$$

$$\text{T tiempo de operación}_{DISCOS} : \frac{0.007 \text{ m}^3}{0.085 \text{ m}^3/\text{min}} = 0.081 \text{ min}$$

El resultado muestra un tiempo muy pequeño para ambos casos, por lo que si el equipo opera durante 1 min es más que suficiente.

### 3.8. Simulación del compresor

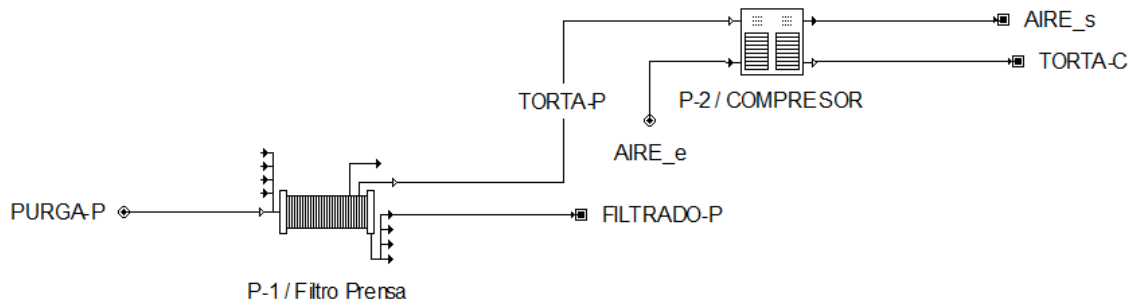


Figura 22 Representación de equipos en el software Filtro prensa & Compresor. La terminación P hace referencia al tipo de filtro "Prensa" y las letras e y s indican "entrada" y "salida" respectivamente.

Para esta simulación el influente corresponde a la corriente de salida del filtro (Figura 22), sin embargo, al momento de la operación de la PTAR ambos procesos se realizarían dentro del equipo de filtrado. En el caso del filtro de discos, conectar el compresor no fue posible por lo mencionado en la Figura 11. Tomando en cuenta lo anterior, en el apartado de características del equipo se ingresaron valores cercanos a los establecidos para el equipo de filtrado.

En cuanto a la corriente del gas, las propiedades de la mezcla de aire ya venían preestablecida en el software y la presión del aire se establece como la proporcionada por

el compresor (2.76 bar). En cuanto a su temperatura se espera que, al no ser un cambio de presión muy brusco, permanezca en un valor similar a la temperatura ambiente.

La secretaria general del medio ambiente a través de la dirección general de calidad del aire recolecta los datos expedidos por las distintas estaciones de monitoreo esparcidas en la CDMX (México, 2021), para conocer la temperatura ambiente máxima en los alrededores del predio, se graficaron los datos reportados por la estación de monitoreo perteneciente a la UAM Xochimilco en el 2021 los días 1, 15 y 28 de cada mes a las 12:00 h. En la Figura 23 se muestra que la temperatura máxima de ese año fue de 24.7°C y la mínima de 12.8 °C.

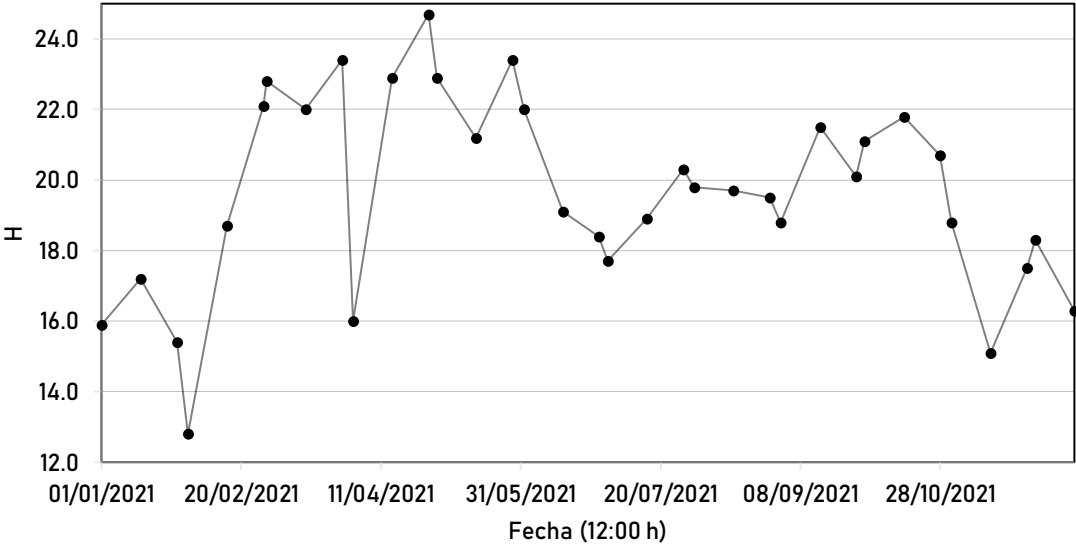


Figura 23 Temperatura. Estación de monitoreo de la UAM Xochimilco en el 2021 a las 12 h.

En las Figuras 24 a 26 se pueden visualizar los valores ingresados al simulador correspondientes a la composición de la corriente de aire y a las características del compresor presente en la línea.

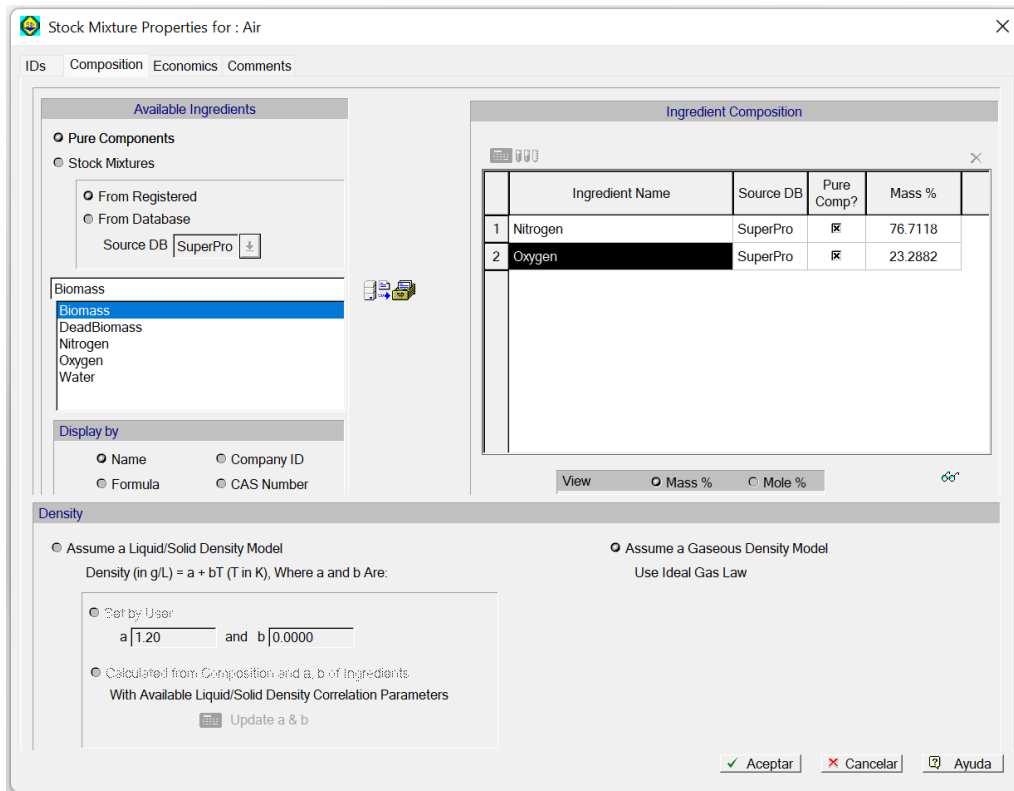


Figura 24 Composición de la mezcla aire proporcionada por la base de datos del software.

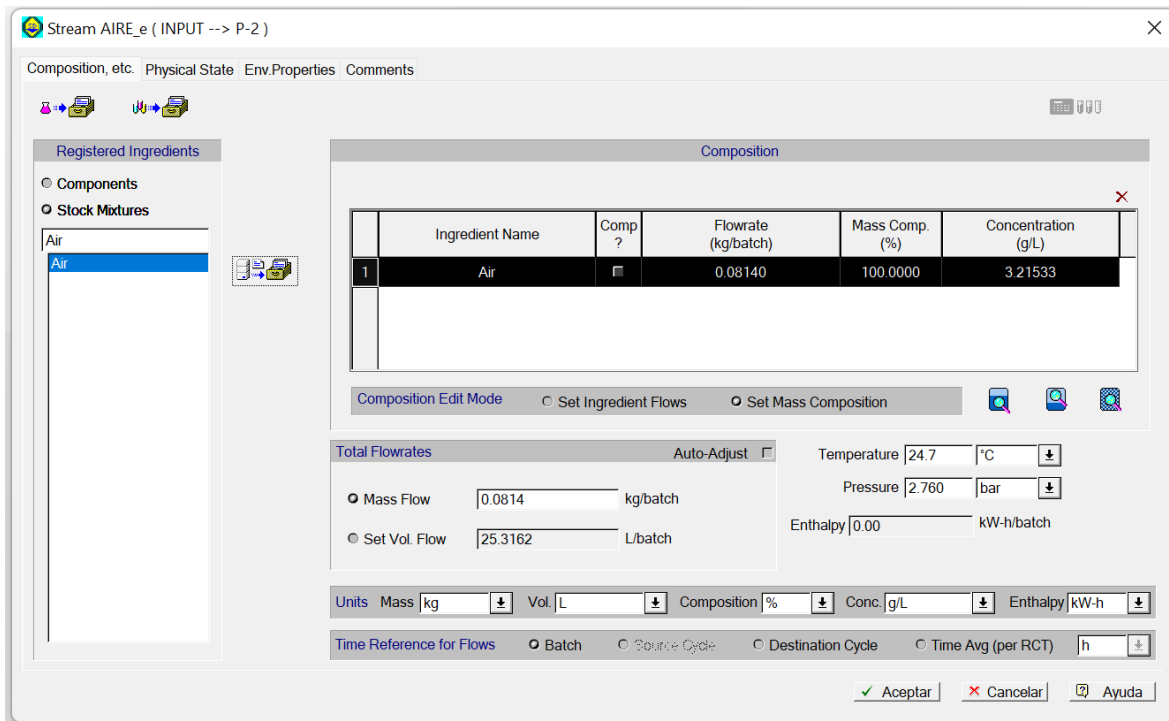


Figura 25 Composición de la corriente de aire de ingreso al compresor. El valor ingresado en el cuadro de kg/batch fue el resultado de multiplicar el flujo másico de la corriente de aire, proporcionado por la ficha técnica del compresor, por el tiempo de operación (1 min).

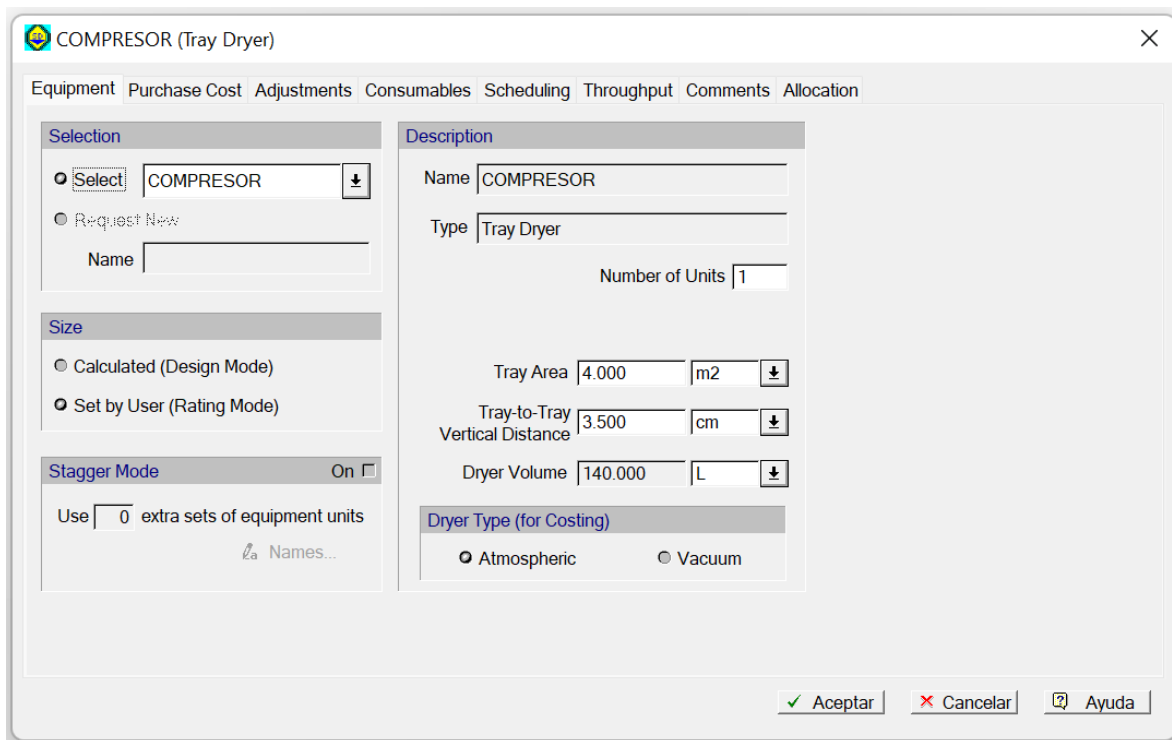


Figura 26 Propiedades del Equipo (Compresor-P - área máxima de secado).

El flujo de aire que ingresa al módulo que funge como el “compresor” se ajustará de acuerdo con el valor final de LOD establecido en las condiciones de operación (Figura 27). Loss On Drying (LOD) es una prueba comúnmente utilizada para determinar la cantidad de agua y materia volátil en una muestra cuando esta se seca bajo condiciones de tiempo y temperatura específicas, se indica como un porcentaje en peso.

De esta forma, como la temperatura y el tiempo de operación no cambian, a mayor porcentaje de LOD menor será el flujo de aire que ingrese al equipo. El valor predeterminado para esta relación es de 5%, pero se modificó hasta obtener un influente similar al proporcionado por el compresor.

Otro dato requerido por el programa es la tasa de flujo de barrido de gas de barrido relativo, es decir, la masa de gas de secado, en este caso aire, entre la masa de los componentes evaporados de la torta, en este caso agua (wt gas/ wt vapor 1.609).

DRY-1 (Tray Drying) in P-2

Oper.Cond's Utility Data Labor, etc. Description Batch Sheet Scheduling

**Volatile Component Evaporation**

Calculated Based on Final LOD  Set by User

Component	Volatile?	Evaporation (%)
Biomass	<input type="checkbox"/>	0.0000
DeadBiomass	<input type="checkbox"/>	0.0000
N2	<input type="checkbox"/>	0.0000
O2	<input type="checkbox"/>	0.0000
Water	<input checked="" type="checkbox"/>	0.0000

Show Components  With Flow  All

Initial LOD  % Final LOD  %

Evaporation Rate  kg/m<sup>2</sup>-h

Final Solids Temp.  °C

Wet Cake Depth  mm

Max Wet Cake Depth  mm

**Gas Sweep During Drying**

Gas Sweep During Drying

Inlet Stream  
AIRE\_e

**Flowrate specification**

Relative  wt gas / wt evaporated

Absolute  L/h

**Pressure** Set by User

Pressure  bar

**Duration**

Setup Time  min

**Drying Time**

Set by User  min

Calculated Based on Specific Evaporation Rate

Aceptar Cancelar Ayuda

Figura 27 Condiciones de operación para el compresor.

### 3.9. Mantenimiento de los filtros

La NOM-004-SEMARNAT-2002 establece una serie de parámetros que deben medirse en el lodo previo al proceso de estabilización, la lista de estos y la frecuencia de medición pueden consultarse en el ANEXO D.

El momento apropiado para realizar el mantenimiento de cada equipo puede estimarse con el resultado arrojado por la simulación, pero también es importante monitorear la caída de presión en el manómetro a la salida del equipo con respecto al ubicado a la entrada.



### 3.9.1. Filtro prensa

La Figura 28 muestra los componentes principales del equipo. Los pasos por seguir son los siguientes (EnviroSolutionsLST, 2014) (S.A., 2020):

- Los sólidos quedarán retenidos en la malla, mientras que el agua viajará por canales hacia el cárcamo de bombeo por tubería de regreso al canal.
- Una vez concluido el proceso las placas se descomprimen, dejando caer libremente las tortas de lodo al contenedor debajo del equipo (De ser necesario es posible el uso de una espátula). Las tortas se recolectan y se llevan al laboratorio para su análisis y su posterior estabilización.
- **NOTA:** Es importante revisar que las mallas no estén rotas, si se observa algún rasguño será necesario cambiar la malla. Así mismo, si al momento de filtrar los lodos se presenta un problema con alguna malla, puede intentar lavarse con agua a presión, si el problema persiste, lo mejor es usar una nueva.

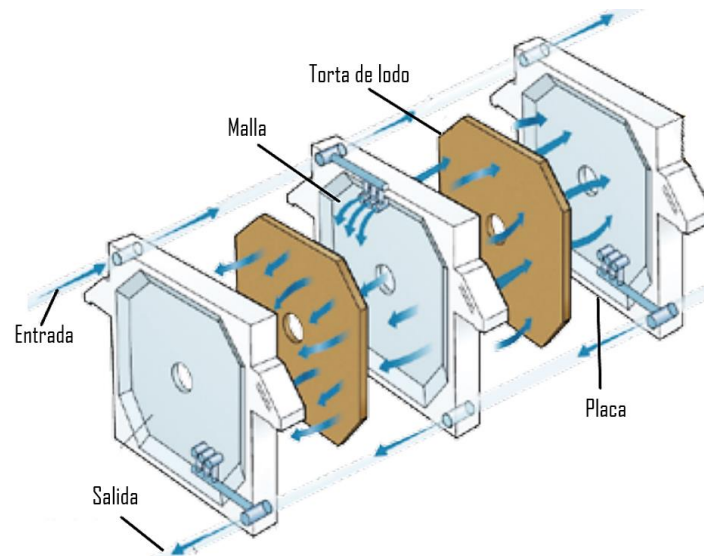


Figura 28 Componentes principales del Filtro Prensa.

### 3.9.2. Filtro de discos

Compuestos por una serie de anillas que al apilarse crean un hueco o canal central, el dispositivo obliga al agua de entrada a girar alrededor de los discos en la carcasa del filtro, ocasionando que las partículas más grandes se alejen de los discos, reduciendo así, la acumulación de sólidos en la superficie de filtrado, optimizando el rendimiento de los discos y reduciendo la frecuencia de limpieza del elemento. En la Figura 29 pueden visualizarse los componentes principales del equipo.



Figura 29 Componentes de un módulo HELIX SYSTEM.

- Los sólidos quedarán atrapados en los anillos del equipo, mientras que el agua viajará por canales hacia el cárcamo de bombeo por tubería de regreso al canal.
- Para retirar el sólido se abre la abrazadera del equipo, se extrae la carcasa, se desenrosca la manilla en la parte superior del disco, se separan con cuidado las anillas y mediante el uso de una espátula se limpian los discos (delicadamente).
- Una vez limpios se colocan nuevamente en su posición, se enrosca la manilla y se ensambla. Es importante recolectar los lodos para su posterior estabilización.

**NOTA:** Si se observa que las anillas están muy sucias y que la limpieza con la espátula no es suficiente, se recomienda retirar la mayor cantidad de sólido posible y limpiar las anillas con agua a presión o un baño ácido antes del siguiente ciclo (Figura 30).



Figura 30 Ejemplo de los pasos a seguir para el mantenimiento del filtro de discos (UPV, 2017).

### **3.10. Manejo del lodo**

#### *3.10.1. Etapa previa a la estabilización*

Para la correcta medición de los parámetros se recurrió a lo señalado en la NOM-004-SEMARNAT-2002 (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2003) la cual establece que, cualquier persona física o moral que esté interesada en el aprovechamiento de lodos deberá de recabar la constancia de no peligrosidad emitida por la SEMARNAT, en términos del trámite SEMARNAT-07-007.

También menciona que, en caso de utilizar cal para la estabilización, la muestra del lodo deberá tomarse antes de someterse a este proceso. El análisis debe cumplir con las especificaciones de al menos un sólido tipo C, permitiendo así, su aprovechamiento en usos agrícolas y de mejoramiento de suelo.

Al la PTAR generar un volumen de lodos anual por debajo de 1,500 ton/año, por norma se establece una frecuencia de muestreo anual, sin embargo, como los resultados son de interés académico se sugiere que los parámetros se midan de forma bimestral dentro de los 6 meses de operación.

**NOTA:** La PTAR podrá quedar exenta de presentar dichos análisis siempre y cuando la detección de éstos sea en cantidades menores que los límites máximos establecidos o cuando por la procedente de los sólidos y biosólidos, estos no contengan los contaminantes regulados por la norma. Sin embargo, esto deberá ser manifestado ante la Secretaría por escrito y bajo protesta de decir la verdad.

#### *3.10.2. Etapa de estabilización*

Aquí el objetivo principal es que, al añadir cal hidratada el pH del lodo aumente su valor por encima de 12 unidades y se mantenga así por un mínimo de 72 horas, lo que generará una reducción significativa de patógenos, huevos de helminto, atracción de vectores y mejoraría el tipo de biosólido producido por la PTAR, aumentando las posibilidades de emplearlo como abono.

La dosis del material a emplear como fuente cal ya sea, CaO, Ca(OH)<sub>2</sub>, cemento portland, cenizas o residuos alcalinos industriales dependerá de la concentración de calcio que aporta, así como del tipo de impurezas que posea. La Tabla 21 muestra dosis de cal requeridas para mantener el pH por encima de 12.

Tabla 21 Dosis de  $\text{Ca(OH)}_2$  requerida para el proceso de estabilización alcalina de lodos (CONAGUA, 2020).

Tipo de lodo	Sólidos totales (%)	Dosis de cal kg $\text{Ca(OH)}_2$ /kg sólido seco	pH inicial	pH final
Lodo primario	3 - 6	0.12	6.7	12.7
Lodo activado	1.3	0.30	7.1	12.6
Anaerobio combinado	5.5	0.19	7.2	12.4

Al revisar bibliografía relacionada al tema, se encontró que para este proceso es posible el uso de cal viva ( $\text{CaO}$ ) o cal apagada [ $\text{Ca(OH)}_2$ ], siendo la cal viva más usada a granel y para grandes volúmenes porque libera calor en contacto con el agua. Cuando el material alcalino entra en contacto con el lodo se llevan a cabo reacciones de hidrólisis y saponificación, que pueden ocasionar una disminución del pH si la cal agregada no fue la suficiente (CONAGUA, 2020).

Torres, Marmolejo y Botina (2008), evaluaron porciones de material alcalino en muestras de lodo, para determinar qué porcentaje era el adecuado para llevar a cabo el proceso de estabilización. Evaluaron tres materiales alcalinos distintos:  $\text{CaO}$ ,  $\text{Ca(OH)}_2$  y ceniza, del primero se realizaron pruebas por duplicado con porcentajes del 15% y 30% en peso, mientras que de los últimos dos se realizó una prueba adicional con un 8% en peso.

La humedad, la temperatura y el pH fueron las variables medidas diariamente en los lechos, con el fin de acompañar el proceso de deshidratación y remoción de patógenos y parásitos. Los resultados arrojaron que las muestras correspondientes a un 15% en peso de  $\text{CaO}$  y un 30% de  $\text{Ca(OH)}_2$  garantizaban una elevación del pH hasta 12 unidades durante un periodo de tiempo suficiente para la remoción de patógenos y parásitos. Por tal razón, una dosis de 30% en peso de  $\text{Ca(OH)}_2$  es suficiente para garantizar una correcta estabilización.

Adicionalmente, el material deshidratado y previamente higienizado con cal presentaba características que lo hacían apropiado para su uso agrícola, recomendándose su evaluación en pruebas a nivel de invernadero.

Finalmente, otra forma de conocer qué porcentaje de  $\text{Ca(OH)}_2$  es el adecuado para el lodo producido en la PTAR, es mediante la ejecución de una prueba en el laboratorio, añadiendo distintas cantidades del material alcalino hasta hallar el mínimo necesario para cumplir con lo requerido.

### 3.10.3. Etapa posterior a la estabilización

Se realizó una búsqueda sobre la calidad del suelo en la zona chinampera de Xochimilco, con el fin de tener un mejor conocimiento sobre el uso de abonos naturales en la producción de hortalizas y otros cultivos.

En el 2016 un material dirigido a los chinamperos de la zona (Restauración Ecológica y Desarrollo, A.C., 2016), menciona que la mala calidad del agua de riego empleada había ocasionado problemas de ensalitramiento del suelo (acumulación de sales solubles), afectando el desarrollo y productividad de las plantas. Debido a lo anterior y a que el abono producido con el lodo es alcalino, aplicarlo directamente en el suelo de las chinampas no es recomendable.

En el Estado de México, la Norma Técnica Estatal Ambiental NTEA-006-SMA-RS-2006 establece los requisitos para la producción de los mejoradores de suelo elaborados a partir de residuos orgánicos (Secretaría del Medio Ambiente, 2006) y puede tomarse como una guía adicional para el muestreo del biosólido. Los parámetros pueden encontrarse en la Tabla 22.

Tabla 22 Requisitos fisicoquímicos y sanitarios para los mejoradores de suelos (Secretaría del Medio Ambiente, 2006).

Parámetro	Valor
Químicos	
pH	6.5 a 8.0
Materia orgánica	mayor al 15%
Relación carbono-nitrógeno	menor a 12
Fósforo	mayor a 0.10% ó 1,000 ppm
Potasio	mayor a 0.25% o 2,500 ppm
Relación potasio-sodio	mayor a 2.5
Microbiológicos	
Hongos fitopatógenos	ausente
Huevos de helmintos/g en base seca	menor a 10
Coliformes fecales NMP/g en base seca	menor a 1000
Salmonella spp/g en base seca	menor a 3

Mientras que la NOM-077-FITO-2011 establece los requisitos y especificaciones para la realización de estudios de efectividad biológica de los insumos de nutrición vegetal (Secretaría de Agricultura, Ganadería y Desarrollo , 2011).

**Resultados, Análisis y Discusión.**

A continuación, se presentan los resultados referentes a la simulación de ambos filtros y del secador por placas, destacando el tiempo de operación y los porcentajes que componen a cada una de las líneas de ingreso y egreso de los equipos, así como, una propuesta del porcentaje de Ca(OH)<sub>2</sub> a emplear en la estabilización del lodo.

**4.1. Resultados del filtro prensa**

Tal como se muestra en la Figura 31, el tiempo obtenido con el simulador es de 4.494 min, sin embargo, el tiempo total del proceso de filtración involucraría aproximadamente 6 min porque el software no considera el recorrido del fluido hacia el módulo del filtro prensa.

	Operation	Stream	CHARGE/ DISCHARGE				CONTENTS					TIMES		
			Mass kg	Vol (Liq/Sol) L	Temp °C	Press bar	Mass kg	Vol (Liq/Sol) L	% Fill	Temp °C	Press bar	Duration h	Start h	Finish h
	START						0.1651	0.0000	0.00	25.0	1.013	0.07	0.00	
1	FILTER-1	PURGA-P (+)	397.9010	400.0000	25.0	3.140	4.6671	4.5067	3.22	25.0	1.047	0.07	0.00	0.07
		FILTRADO-P (-)	393.3991	395.4933	25.0	3.140								
	END	TORTA-P (-)	4.5020	4.5067	25.0	1.047	0.1651	0.0000	0.00	25.0	1.013			0.07

Figura 31 Resumen de actividad (Filtro prensa).

El reporte de equipo (Figura 32) señala que, se está empleando la totalidad del área de filtrado y también muestra un "costo de compra" de la unidad, pero este valor debe ignorarse debido a que no se ingresaron datos para esta estimación y el programa tomó como base el costo asignado al material del equipo registrado en la base de datos del simulador.

**Filtro Prensa (Plate and Frame Filter)**

Equipment size was set by user		
Number of Units	1.00	
Number of Standby Units	0.00	
Number of Staggered Units	0.00	
Installation Factor	0.50	
Maintenance Factor	0.10	
Cost Allocation Factor	1.00	
Usage Rate	100.00	\$/equipment-h
Availability Rate	100.00	\$/h
Material of Construction		Plastic
Purchase Cost (system model for Plate and Frame Filter)	27,000.00	\$/unit
Filter Area	4.00	m2

Figura 32 Reporte de Equipo (Filtro prensa).

Los resultados (Figuras 33 a 36) muestran que el 70% del agua presente en la purga es retirado, confirmando lo mencionado en las fichas técnicas de este tipo de filtros. En % m/m el agua en la corriente de la torta representa un 30%, la biomasa muerta un 68.86% y la biomasa un 1.14%. En la corriente del líquido estos porcentajes son de un 99.99%,  $8.0 \times 10^{-3}\%$  y  $1.0 \times 10^{-4}\%$  respectivamente.

Stream Name	PURGA-P	TORTA-P	FILTRADO-P
Source	INPUT	P-1	P-1
Destination	P-1	OUTPUT	OUTPUT
<b>Stream Properties</b>			
Activity (U/ml)	0.00	0.00	0.00
Temperature (°C)	25.00	25.00	25.00
Pressure (bar)	3.14	1.05	3.14
Density (g/L)	994.75	998.95	994.70
Total Enthalpy (kW-h)	11.69	0.20	11.48
Specific Enthalpy (kcal/kg)	25.27	39.12	25.11
Heat Capacity (kcal/kg-°C)	1.01	1.67	1.00
<b>Component Flowrates (kg/batch)</b>			
Biomass	0.05	0.05	0.00
DeadBiomass	3.13	3.10	0.03
Water	394.72	1.35	393.37
<b>TOTAL (kg/batch)</b>	<b>397.90</b>	<b>4.50</b>	<b>393.40</b>
<b>TOTAL (L/batch)</b>	<b>400.00</b>	<b>4.51</b>	<b>395.49</b>

Figura 33 Resultados del Balance de Materia (Filtro prensa).

Stream TORTA-P ( P-1 --> OUTPUT )

Composition, etc. Physical State Env.Properties Comments

Stream Contents  Total  Liquid/Solid  Vapor

Composition Data

Component	Flowrate (kg/batch)	Mass Comp. (%)	Concentration (g/L)
1 Biomass	0.05121	1.1375	11.363006
2 DeadBiomass	3.10017	68.8625	687.898927
3 Water	1.35059	30.0000	299.683686

Total Flowrates

Mass Flow  kg/batch

Volumetric Flow  L/batch

Temperature  °C

Pressure  bar

Enthalpy  kW-h/batch

Units Mass  Vol.  Composition  Conc.  Enthalpy

Time Reference for Flows  Batch  Source Cycle  Destination Cycle  Time Avg (per RCT)

Aceptar  Cancelar  Ayuda

Figura 34 Composición final de la torta de lodo (Filtro prensa).

Stream TORTA-P ( P-1 --> OUTPUT )

Composition, etc. Physical State Env.Properties Comments

Concentrations			Throughputs		
<b>Carbon</b>			<b>Carbon</b>		
TOC	341239.82346	mg C / L	TOC	1.53787	kg C / batch
<b>Phosphorus</b>			<b>Phosphorus</b>		
TP	13985.23867	mg P / L	TP	0.06303	kg P / batch
<b>Calcium</b>			<b>Calcium</b>		
CaCO3	0.00000	mg CaCO3 / L	CaCO3	0.00000	kg CaCO3 / batch
<b>Nitrogen</b>			<b>Nitrogen</b>		
TKN	147817.85416	mg N / L	TKN	0.66617	kg N / batch
NH3	1295.38273	mg N / L	NH3	0.00584	kg N / batch
NO3 - NO2	0.00000	mg N / L	NO3 - NO2	0.00000	kg N / batch
<b>Oxygen</b>			<b>Oxygen</b>		
COD	708579.59857	mg O / L	COD	3.19337	kg O / batch
ThOD	1272656.71863	mg O / L	ThOD	5.73550	kg O / batch
BODu	362975.68139	mg O / L	BODu	1.63583	kg O / batch
BOD5	119562.16187	mg O / L	BOD5	0.53883	kg O / batch
<b>Solids</b>			<b>Solids</b>		
TS	699261.93331	mg solids / L	TS	3.15138	kg solids / batch
TSS	403465.39475	mg solids / L	TSS	1.81830	kg solids / batch
VSS	10226.70577	mg solids / L	VSS	0.04609	kg solids / batch
DVSS	10226.70577	mg solids / L	DVSS	0.04609	kg solids / batch
TDS	295796.53856	mg solids / L	TDS	1.33307	kg solids / batch
VDS	0.00000	mg solids / L	VDS	0.00000	kg solids / batch
DVDS	0.00000	mg solids / L	DVDS	0.00000	kg solids / batch

Figura 35 Propiedades de la torta de lodo (Filtro prensa).

Stream FILTRADO-P ( P-1 --> OUTPUT )

Composition, etc. Physical State Env.Properties Comments

Stream Contents  Total  Liquid/Solid  Vapor

Composition Data

	Component	Flowrate (kg/batch)	Mass Comp. (%)	Concentration (g/L)
1	Biomass	0.00052	0.0001	0.001308
2	DeadBiomass	0.03131	0.0080	0.079179
3	Water	393.36724	99.9919	994.624326

**Total Flowrates**  
 Mass Flow 393.3991 kg/batch  
 Volumetric Flow 395.4933 L/batch  
 Temperature 25.0 °C  
 Pressure 3.140 bar  
 Enthalpy 11.48 kW-h/batch

Units Mass kg Vol. L Composition % Conc. g/L Enthalpy kW-h

Time Reference for Flows  Batch  Source Cycle  Destination Cycle  Time Avg (per RCT) h

Figura 36 Composición final de la línea de agua a la salida del módulo de filtrado (Filtro prensa).



Stream PURGA-P ( INPUT --> P-1)

Composition, etc. Physical State Env.Properties Comments

Concentrations			Throughputs		
<b>Carbon</b>			<b>Carbon</b>		
TOC	3883.51412	mg C / L	TOC	1.55341	kg C / batch
<b>Phosphorus</b>			<b>Phosphorus</b>		
TP	159.16041	mg P / L	TP	0.06366	kg P / batch
<b>Calcium</b>			<b>Calcium</b>		
CaCO3	0.00000	mg CaCO3 / L	CaCO3	0.00000	kg CaCO3 / batch
<b>Nitrogen</b>			<b>Nitrogen</b>		
TKN	1682.25595	mg N / L	TKN	0.67290	kg N / batch
NH3	14.74223	mg N / L	NH3	0.00590	kg N / batch
NO3 - NO2	0.00000	mg N / L	NO3 - NO2	0.00000	kg N / batch
<b>Oxygen</b>			<b>Oxygen</b>		
COD	8064.06137	mg O / L	COD	3.22562	kg O / batch
ThOD	14483.59776	mg O / L	ThOD	5.79344	kg O / batch
BODu	4130.88124	mg O / L	BODu	1.65235	kg O / batch
BOD5	1360.68921	mg O / L	BOD5	0.54428	kg O / batch
<b>Solids</b>			<b>Solids</b>		
TS	7958.02075	mg solids / L	TS	3.18321	kg solids / batch
TSS	4591.67850	mg solids / L	TSS	1.83667	kg solids / batch
VSS	116.38605	mg solids / L	VSS	0.04655	kg solids / batch
DVSS	116.38605	mg solids / L	DVSS	0.04655	kg solids / batch
TDS	3366.34225	mg solids / L	TDS	1.34654	kg solids / batch
VDS	0.00000	mg solids / L	VDS	0.00000	kg solids / batch
DVDS	0.00000	mg solids / L	DVDS	0.00000	kg solids / batch

Figura 37 Propiedades de la línea de agua a la salida del módulo de filtrado (Filtro prensa).

## 4.2. Resultados del filtro de discos

El resumen de actividad del equipo (Figura 38), indica un tiempo de operación de 4.490 min, considerando el recorrido del fluido hacia el módulo del filtro de discos, el tiempo total del proceso de filtración es de aproximadamente 6 min.

D-1 Procedure : Activity Overview

	Operation	Stream	CHARGE/ DISCHARGE				CONTENTS					TIMES				
			Mass kg	Vol (Liq/Sol) L	Temp °C	Press bar	Mass kg	Vol (Liq/Sol) L	% Fill	Temp °C	Press bar	Duration h	Start h	Finish h		
	START						0.0000	0.0000	0.00							
1	FILTER-1	PURGA-D (+)	397.9010	400.0000	25.0	3.140	4.5019	4.5067	0.00	25.0	3.140	0.07	0.00	0.07		
		FILTRADO-D (-)	393.3991	395.4933	25.0	3.140										

For Help, press F1

Figura 38 Resumen de actividad (Filtro de discos).

Al igual que en el reporte del filtro prensa, este señala que se emplea la totalidad del área de filtrado y también muestra un "costo de compra" de la unidad, así como de la membrana a emplear, pero estos valores deben ignorarse debido a que no se ingresaron datos para

esta estimación y el programa tomó como base el costo asignado al material del equipo registrado en la base de datos del simulador (Figura 39).

<b>Filtro de Disco (Dead-End Filter)</b>		
Equipment size was set by user		
Number of Units	1.00	
Number of Standby Units	0.00	
Number of Staggered Units	0.00	
Installation Factor	0.50	
Maintenance Factor	0.10	
Cost Allocation Factor	1.00	
Usage Rate	100.00	\$/equipment-h
Availability Rate	100.00	\$/h
Material of Construction		Plastic
Purchase Cost (system model for Dead-End Filter)	27,000.00	\$/unit
Unit Cost of Consumable: MF Membrane (Biotech)	735.84	\$/m2
Disposal Cost of Consumable: MF Membrane (Biotech)	0.00	\$/m2
Filter Area	0.12	m2

Figura 39 Reporte de Equipo (Filtro de discos).

Los resultados del balance de materia (Figura 40) muestran únicamente la corriente de ingreso y de egreso del agua, pero los valores son exactamente iguales a los que se muestran en el balance del filtro prensa, por lo que este equipo también es capaz de retirar un 70% del agua presente en la purga.

<b>Stream Name</b>	<b>PURGA-D</b>	<b>FILTRADO-D</b>
<b>Source</b>	<b>INPUT</b>	<b>D-1</b>
<b>Destination</b>	<b>D-1</b>	<b>OUTPUT</b>
Stream Properties		
Activity (U/ml)	0.00	0.00
Temperature (°C)	25.00	25.00
Pressure (bar)	3.14	3.14
Density (g/L)	994.75	994.70
Total Enthalpy (kW-h)	11.69	11.48
Specific Enthalpy (kcal/kg)	25.27	25.11
Heat Capacity (kcal/kg-°C)	1.01	1.00
Component Flowrates (kg/batch)		
Biomass	0.05	0.00
DeadBiomass	3.13	0.03
Water	394.72	393.37
<b>TOTAL (kg/batch)</b>	<b>397.90</b>	<b>393.40</b>
<b>TOTAL (L/batch)</b>	<b>400.00</b>	<b>395.49</b>

Figura 40 Resultados del Balance de Materia (Filtro de discos). En la corriente filtrado C los % m/m son los mismos que en la corriente de líquido en el filtro prensa.

En las Figuras 41 y 42 se observan los resultados de la corriente de agua en la salida del módulo de filtrado que, señalan composiciones del: 99.99% de agua,  $8.0 \times 10^{-3}\%$  de biomasa muerta y  $1.0 \times 10^{-4}\%$  de biomasa. Al no indicar una corriente de salida de sólido, el programa no arroja las propiedades de la torta de lodo, sin embargo, si tomamos en consideración

que las propiedades obtenidas de la línea de líquido son iguales para ambos filtros, puede suponerse que los resultados de ambas tortas son similares.

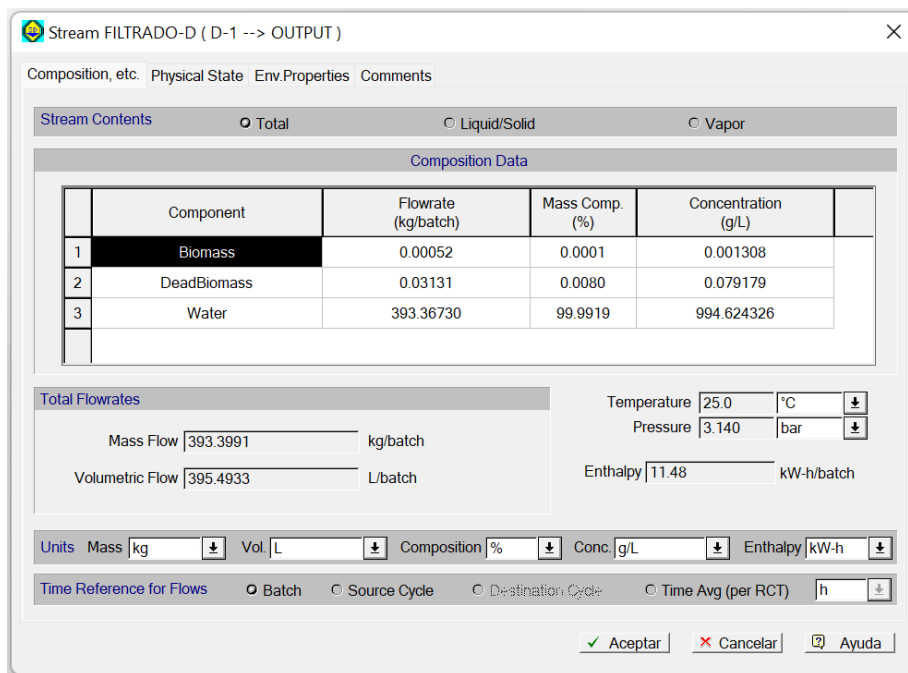


Figura 41 Composición final de la línea de agua a la salida del módulo de filtrado (Filtro de discos).

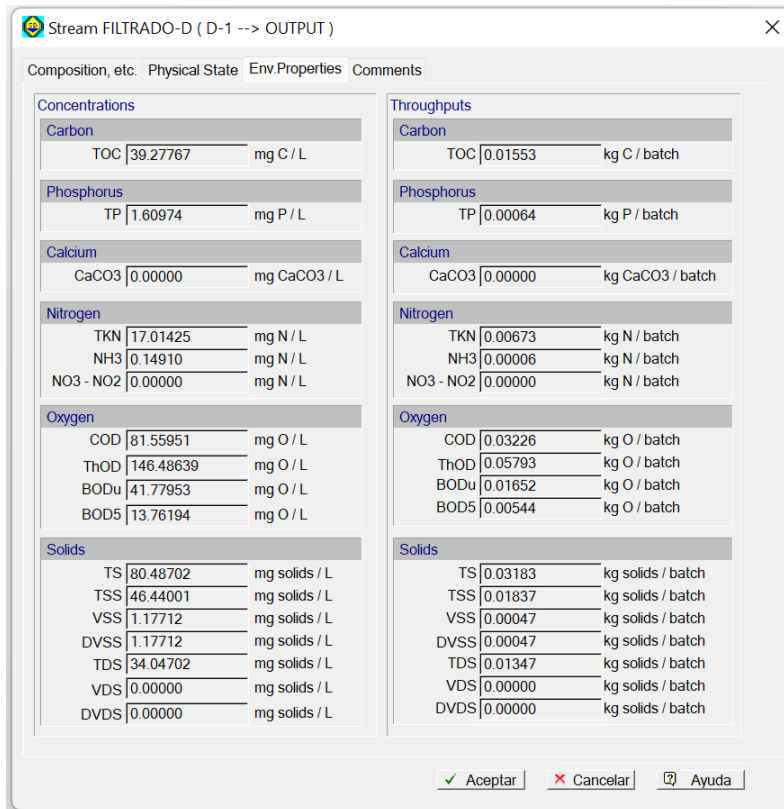


Figura 42 Propiedades línea de líquido (Filtro de discos).

### 4.3. Resultados secador

Con el valor predeterminado de LOD el flujo de aire al ingreso del equipo es de 1.916 kg/lote, una cifra muy por encima de la real. Modificando este criterio se encontró que un LOD de 29% (Figuras 43 y 44) requiere un flujo másico de tan sólo 0.103 kg/lote, el cual continúa estando por encima del proporcionado por el compresor y considerando que el LOD del lodo antes del ingreso de la corriente de aire ya es del 30% los resultados de la simulación indican que, al el tiempo de operación de esta etapa ser tan corto, el porcentaje de agua retirado del sólido es mínimo.

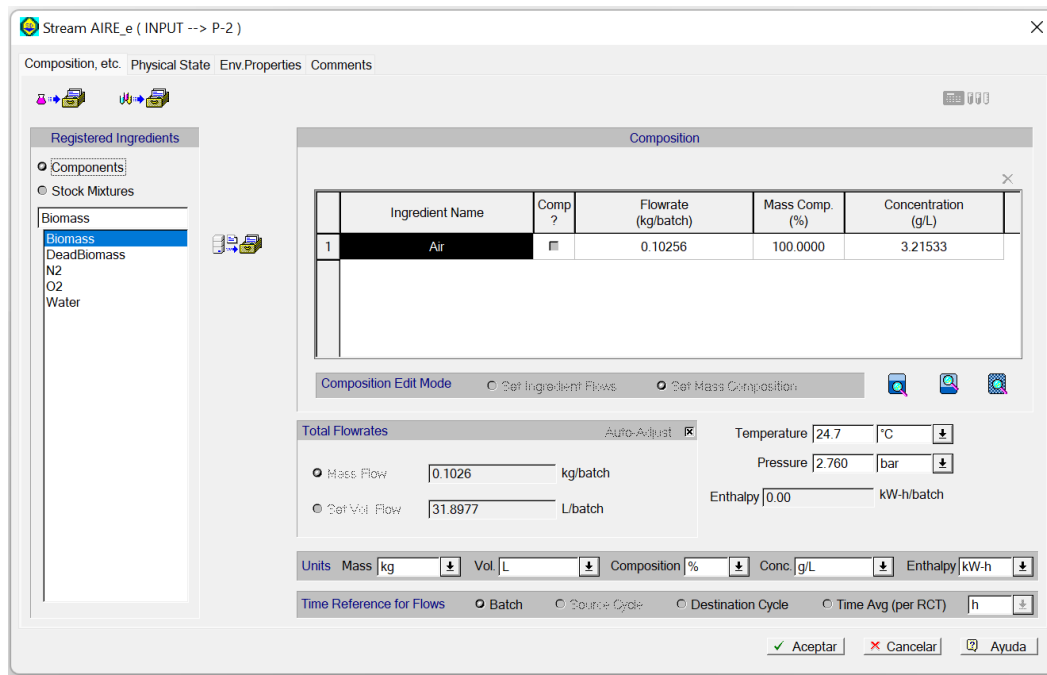


Figura 43 Flujo másico de aire correspondiente a un valor de LOD del 29% (Compresor).

The screenshot shows the 'P-2 Procedure : Activity Overview' window with a table summarizing the activity. The table has columns for Operation, Stream, CHARGE/ DISCHARGE (Mass, Vol (Liq/Sol), Temp, Press), CONTENTS (Mass, Vol (Liq/Sol), % Fill, Temp, Press), and TIMES (Duration, Start, Finish).

Operation	Stream	CHARGE/ DISCHARGE				CONTENTS					TIMES		
		Mass kg	Vol (Liq/Sol) L	Temp °C	Press bar	Mass kg	Vol (Liq/Sol) L	% Fill	Temp °C	Press bar	Duration h	Start h	Finish h
START						0.0000	0.0000	0.00			0.02	0.00	
AFTER AUTO-INIT	TORTA-P (+)	4.5257	4.5305	25.0	1.047	4.5257	4.5305	3.24	25.0	1.047			
1 DRY-1	AIRE_e (+)	0.1026	0.0000	24.7	2.760	4.4620	4.4663	3.19	24.7	2.760	0.02	0.00	0.02
	AIRE_s (-)	0.1663	0.0000	24.7	2.760								
END	TORTA-C (-)	4.4620	4.4663	24.7	2.760	0.0000	0.0000	0.00					0.02

At the bottom of the window, there are buttons for 'OK', 'Cancel', and 'Help', and a note 'For Help, press F1'.

Figura 44 Resumen de actividad (Compresor).

<b>Filtro Prensa (Plate and Frame Filter)</b>			
Equipment size was set by user			
Number of Units	1.00		
Number of Standby Units	0.00		
Number of Staggered Units	0.00		
Installation Factor	0.50		
Maintenance Factor	0.10		
Cost Allocation Factor	1.00		
Usage Rate	100.00	\$/equipment-h	
Availability Rate	100.00	\$/h	
Material of Construction		Plastic	
Purchase Cost (system model for Plate and Frame Filter)	27,000.00	\$/unit	
Filter Area	4.00	m2	
<b>COMPRESOR (Tray Dryer)</b>			
Equipment size was set by user			
Number of Units	1.00		
Number of Standby Units	0.00		
Number of Staggered Units	0.00		
Installation Factor	0.35		
Maintenance Factor	0.10		
Cost Allocation Factor	1.00		
Usage Rate	100.00	\$/equipment-h	
Availability Rate	100.00	\$/h	
Material of Construction		Plastic	
Purchase Cost (system model for Tray Dryer)	70,000.00	\$/unit	
Atmospheric Dryer			
Tray Area	4.00	m2	

Figura 45 Reporte de Equipos.

<b>Stream Name</b>	<b>PURGA-P</b>	<b>TORTA-P</b>	<b>FILTRADO-P</b>	<b>AIRE_e</b>	<b>AIRE_s</b>	<b>TORTA-C</b>
<b>Source</b>	<b>INPUT</b>	<b>P-1</b>	<b>P-1</b>	<b>INPUT</b>	<b>P-2</b>	<b>P-2</b>
<b>Destination</b>	<b>P-1</b>	<b>P-2</b>	<b>OUTPUT</b>	<b>P-2</b>	<b>OUTPUT</b>	<b>OUTPUT</b>
<b>Stream Properties</b>						
Activity (U/ml)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Temperature (°C)	25.00	25.00	25.00	24.70	24.70	24.70
Pressure (bar)	3.14	1.05	1.01	2.76	2.76	2.76
Density (g/L)	994.75	998.95	994.70	3.22	2.61	999.04
Total Enthalpy (kW-h)	11.75	0.21	11.54	0.00	0.05	0.20
Specific Enthalpy (kcal/kg)	25.27	39.12	25.11	5.98	237.17	38.82
Heat Capacity (kcal/kg-°C)	1.01	1.67	1.00	0.24	0.32	1.68
<b>Component Flowrates (kg/batch)</b>						
Biomass	0.05	0.05	0.00	0.00	0.00	0.05
DeadBiomass	3.15	3.12	0.03	0.00	0.00	3.12
N2	0.00	0.00	0.00	0.08	0.08	0.00
O2	0.00	0.00	0.00	0.02	0.02	0.00
Water	396.80	1.36	395.44	0.00	0.06	1.29
<b>TOTAL (kg/batch)</b>	<b>400.00</b>	<b>4.53</b>	<b>395.47</b>	<b>0.10</b>	<b>0.17</b>	<b>4.46</b>
<b>TOTAL (L/batch)</b>	<b>402.11</b>	<b>4.53</b>	<b>397.58</b>	<b>31.90</b>	<b>63.65</b>	<b>4.47</b>

Figura 46 Resultados del Balance de Materia (Compresor).

El "costo de compra" señalado en la Figura 45 de las unidades deben ignorarse debido a que no se ingresaron datos para esta estimación y el software tomó como base el costo asignado al material del equipo registrado en la base de datos del programa. En el balance de materia Figura 46 se observa la disminución de 1.36 a 1.29 en el porcentaje de agua presente en la torta de lodo.

Las Figuras 47 y 48 corresponden a los porcentajes por componente que constituyen a la línea de aire y de lodo respectivamente, una vez ha finalizado el proceso de secado.

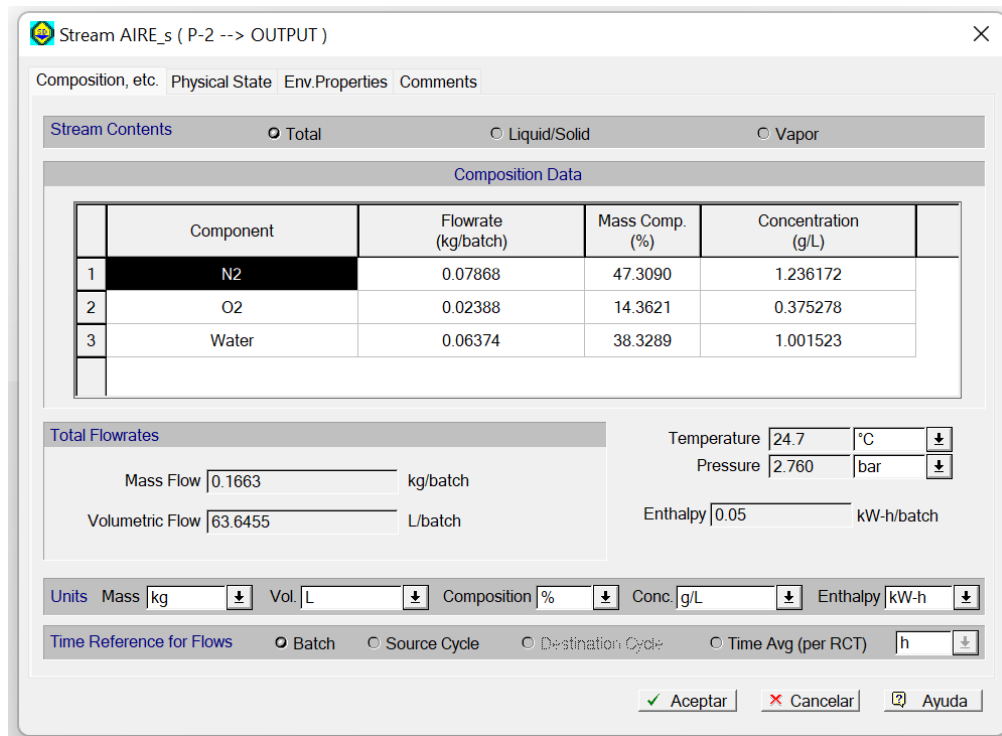


Figura 47 Composición final de la línea de aire (Compresor).

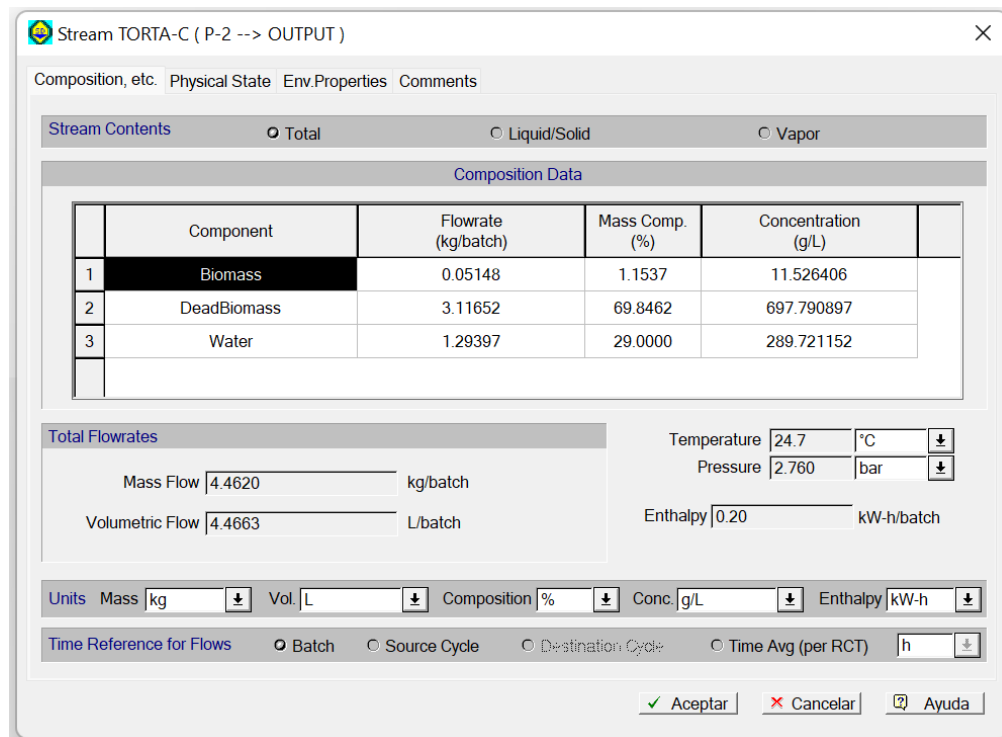


Figura 48 Composición de la torta de lodo una vez concluido el barrido con aire (Compresor).

#### 4.4. Estabilización del lodo

Una vez el proceso de espesamiento de la purga (filtración y barrido de aire) ha concluido, de acuerdo con lo señalado por la NOM-004-SEMARNAT-2002, es necesario realizar la medición de los parámetros señalados en las Tablas 2 y 3. Para estos, es necesario la recolección de muestras de lodo del mismo tamaño. En la Tabla 23 se muestra el tiempo máximo de almacenamiento permisible para cada parámetro.

Tabla 23 Condiciones y tiempo máximo de almacenamiento de las muestras (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2003).

Parámetro	Temperatura	Tiempo máximo de almacenamiento
Coliformes fecales y <i>Salmonella spp.</i>	4 °C	48 h
Huevos de helmintos.		30 días
Arsénico, cadmio, cobre, cromo, níquel, plomo y zinc.		180 días
Mercurio		13 días (plástico) 38 días (vidrio)

Al inicio del proceso de estabilización se propone que la medición de parámetros se realice diariamente durante una semana y que una vez se tenga una recopilación de los datos, el intervalo de muestreo coincida con el de la torta recién extraída del filtro. La preparación de las muestras y los procedimientos para cada uno de los análisis de muestras en los anexos de la norma.

Debido a que el agua que ingresa a la PTAR es en su mayoría de carácter doméstico, se espera que los valores de metales en el lodo sean menores a los correspondientes a un carácter "Excelente" de acuerdo en lo establecido en la Tabla 1 de la NOM-004-SEMARNAT.2002.

Una vez reportados los valores correspondientes a cada parámetro, el lodo debe pasar al proceso de estabilización. Para lograrlo se propone emplear un 30% en peso de cal hidratada [Ca(OH)<sub>2</sub>] respecto al peso de la torta de lodo, se mezclará para homogeneizar y se monitorearán los parámetros indicados en la Tabla 24.

**NOTA:** Un cronograma de detección de parámetros, así como la lista de estos puede encontrarse en el ANEXO D.

Tabla 24 Parámetros y frecuencia de muestreo para biosólido después de la estabilización alcalina (Torres, y otros, 2008).

Parámetro	Frecuencia de muestreo
Temperatura (°C)	Día 1: Hora cero, a las 4 horas, cada hora por 6 horas.
	Día 2 al 14: 2 veces al día.
pH (Unidades)	Día 1: Hora cero, pasada 1 hora y a las 4 horas.
	Día 2 a 14: 2 veces al día.
Humedad (%)	Una muestra cada dos días.
Coliformes totales y fecales (NMP/g)	Una muestra en el día 1, 6 y 14.
Huevos de helmintos (HH/g)	Una muestra en el día 1, 6 y 14.
Salmonella spp (NMP/g)	Una muestra en el día 1, 6 y 14.

Dadas las características alcalinas del abono generado mediante esta forma de estabilización, su uso directo en muestras recolectadas del suelo de las chinampas no es recomendable ya que, se han detectado problemas de ensalitramiento debido a la mala calidad del agua de riego.

En su lugar se propone la ejecución de una prueba de germinado, que consiste en un estudio de laboratorio en el cual se colocan semillas en condiciones controladas de temperatura, humedad y luz para que estas crezcan.

Para probar si el uso del biosólido como abono es viable, se añade un cierto porcentaje de este a una muestra de la semilla a germinar y se compara con un blanco (0% de abono) y otra muestra con un porcentaje similar, pero de abono comercial.

#### **NORMATIVIDAD POR CONSIDERAR:**

- NOM-004-SEMARNAT-2002
- NOM-077-FITO-2011
- NTEA-006-SMA-RS-2006

#### **TRAMITES POR CONSIDERAR:**

- SEMARNAT-07-007



## Conclusiones

Mediante el análisis de diversas fuentes bibliográficas se determinó que la línea de purga está compuesta por un 99.200% de agua (21.624 kg/h), 0.787% de biomasa muerta (0.172 kg/h) y 0.013% de biomasa (0.003 kg/h), caracterizándose por los parámetros siguientes: DQO (1 gO/g), DBO/DQO (0.5), DBO<sub>5</sub>/DBO (0.31), TNK (0.213 gN/g), NH<sub>3</sub> (0 gNH<sub>3</sub>/g), NO<sub>3</sub>-NO<sub>2</sub> (0), SST/ST (0.57 g/g), SSV/SST (0.75 g/g), SSVD/SSV (0.98 g/g) y SDB/SDT (0.78 g/g). En cuanto al método de estabilización, se propuso emplear un porcentaje de cal hidratada ya que su uso es común para PTAR pequeñas y no reduce el volumen del lodo, lo que es benéfico para el objetivo de emplearlo como mejorador del suelo, así mismo, un proceso de espesamiento previo a la estabilización era recomendable para emplear menos producto alcalino.

Se logró generar la modelación descriptiva del proceso de espesamiento/filtrado de la línea de purga para un influente de 400 L/ciclo con intervalos de 20 días entre cada ciclo de operación, empleando las propiedades químicas y físicas de los componentes, indicadas en un ejemplo de cálculo proporcionado por el software Super Pro Designer, tomando en cuenta los parámetros encontrados en la literatura.

Los resultados de la simulación indicaron que, instalar un módulo del filtro de discos AZUD HELIX SYSTEM para el espesamiento de la línea de purga ayuda a retirar un 70% del agua presente en el lodo y requiere de un tiempo de operación de 4.495 min, así como de un área de instalación de 0.096 m<sup>2</sup>. Por su parte, la instalación de un filtro prensa de nueve platos, ofrece el mismo porcentaje de agua retirada con un tiempo de operación de 4.490 min y un área de instalación requerido de 1.350 m<sup>2</sup>. Es así como, tomando en cuenta que ambos equipos de filtrado ofrecen el mismo porcentaje de agua retirada en la torta, un tiempo de operación de 4.5 min y que su proceso de mantenimiento es similar, el área de instalación requerida fungió como el parámetro principal para seleccionar al filtro de discos como el adecuado para la línea de purga.

Ante la preocupación de la existencia de un posible remanente de lodo en la línea de tubería, se propuso el uso de un barrido de aire, para lo cual se realizó una segunda simulación. Los resultados revelaron que, la línea de barrido con aire funciona empleando un compresor de 1HP a una presión de 2.76 bar y a un flujo de 5.09 m<sup>3</sup>/h con un tiempo de operación de 1 min, lo que aumenta en 1% la disminución del porcentaje de agua presente en la torta de lodo.

Con base en ambas simulaciones se estableció que, las líneas pertenecientes al proceso de espesamiento del lodo se componen de: Tubería PVC de 2" cédula 80, dos T, cinco codos de 90°, una bomba centrífuga de 1HP que opera a una presión de 3.14 bar y a un flujo de 5.28 m<sup>3</sup>/h, una reducción de 2" a 1 ¼", una ampliación de 1" a 2", cuatro válvulas de bola (tres ubicadas en la línea de purga y una en la línea de aire), dos manómetros, un rotámetro, un compresor de 1HP y las conexiones apropiadas para incorporar el equipo electromecánico y accesorios a la línea. El DTI de las líneas puede observarse en el ANEXO C.

### **Recomendaciones**

Se recomienda instalar el sistema de tratamiento de lodos de acuerdo con los parámetros establecidos en el presente trabajo, así como verificar los tiempos de purga en una operación real, para determinar si es necesario reducir el intervalo entre cada ciclo.

Así mismo, tomando como referencia la información consultada en la literatura, para el proceso de estabilización alcalina de la torta de lodo se propone el uso de un 30% m/m de Ca(OH)<sub>2</sub> y dadas las características alcalinas del suelo de la zona chinampera de Xochimilco, se plantea la ejecución de una prueba de germinado para evaluar la efectividad del biosólido como abono.

## Referencias

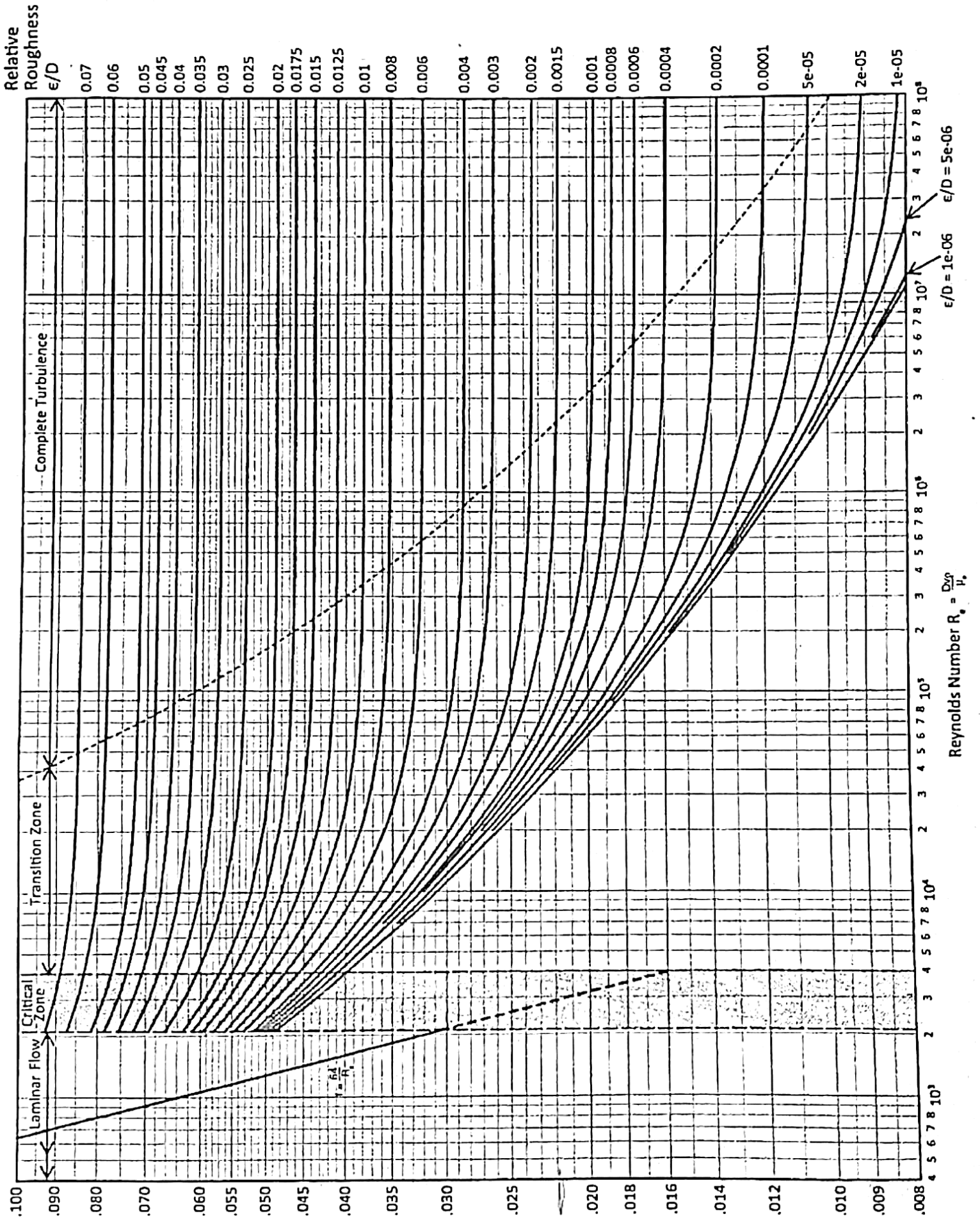
- 1 **Limón Macías, Juan Gualberto. 2013.** *Los lodos de las plantas de tratamiento de aguas residuales, ¿Problema o recurso? (Especialidad Ingeniería Química).* Guadalajara : Academia de Ingeniería México, 2013.
- 2 **Lozano Rivas, William Antonio. 2012.** Universidad Piloto de Colombia. *Diseño de plantas de tratamiento de aguas residuales.* [En línea] 11 de 2012. <https://n9.cl/r4jv0>
- 3 **Abonza , D. 2018.** *Aprovechamiento de los biosólidos derivados de las plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) con la mayor producción de lodos en México, como una propuesta para su destino en distritos de riego (Tesis de Licenciatura).* México : Universidad Nacional Autónoma de México, 2018.
- 4 **Álvarez Hornos, Javier, y otros. 2002.** *Medio ambiente y sostenibilidad; Caracterización de la contaminación.* Universidad de Valencia. Valencia : Ingeniería y Tecnología del Medio Ambiente, 2002. pág. 18.
- 5 **Amazon. 2020.** Amazon. *Hailea VB-290G Vortex Blower Powerful Air Pump 350 L/min.* [En línea] 2020. <https://www.amazon.com/-/es/dp/B083GZ2PPB>
- 6 **Ambiente, ACS Medio. 2020.** ACS Medio Ambiente. *Modelos de Filtro Prensa.* [En línea] 1 de 10 de 2020. <http://www.acs.com.mx/mfp.html>
- 7 **Ambiente, ACS Medio. 2020.** ACS Medio Ambiente. *Dimensionamiento de su Filtro Prensa .* [En línea] 5 de 10 de 2020. <https://n9.cl/yglp>
- 8 **AZUD. 2020.** FILTROS DE RIEGO. *HELIX SYSTEM.* [En línea] 08 de 12 de 2020. <https://n9.cl/u0gqi>
- 9 **Benjumea Hoyos, Carlos Augusto. 2018.** Determinación de coeficientes de degradación de materia orgánica en el río Negro (Municipio de Rionegro, Colombia). *Bionatura.* 01 de 03 de 2018, Vol. 3, 1, págs. 537-543.
- 10 **Boltz, Joshua, y otros. 2010.** *Biofilm Reactors.* USA : Water Environment Federation®, 2010. págs. 42-50.
- 11 **Botello, Blanca Estela. 2017.** Consejo Consultivo del Agua, A.C. *En Xochimilco, dos de las tres plantas de tratamiento de agua no funcionan.* [En línea] 24 de 05 de 2017. [Citado el: 11 de 01 de 2022.] <https://n9.cl/jjprm>
- 12 **CONAGUA. 2019.** Comisión Nacional del Agua. *Inventario de Plantas Municipales de Potabilización y de Tratamiento de Aguas Residuales en Operación.* [En línea] 11 de 12 de 2019. [Citado el: 11 de 05 de 2021.] <https://n9.cl/jpmya>
- 13 **CONAGUA. 2020.** *Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento; Operación y mantenimiento de plantas de tratamiento de aguas residuales municipales: Tratamiento y disposición de lodos.* CDMX : Subdirección General de

- Agua Potable, Drenaje y Saneamiento, 2020. págs. 30-35, 70-80, 115-125, 239-247, 316-325 . 978-607-8246-90-8.
- 14 **Crane. 2010** . *Flow of fluids through valves, fittings and pipe, technical paper No. 410*. STAMFORD : CRANE OC, 2010 .
  - 15 **Díaz, Amador, Lorenzo, Veliz y Venta, Bataller. 2015**. Tratamiento de lodos, generalidades y aplicaciones. *Revista CENIC. Ciencias Químicas*. 2015, Vol. 46, págs. 1 - 10.
  - 16 **DICELTRO GARRAF. 2018**. FERROPLAST. *Sistema de presión PVC*. [En línea] 2018. <https://www.diceltro.com/ferreteria-industrial/tuberia-y-racoreria/>
  - 17 **Durme, Van y P, Gayle. 1993**. Capping Air Emissions from Wastewater. *Pollution Engineering*. Septiembre de 1993, págs. 66-71.
  - 18 **EnviroSolutionsLST. 2014**. EnviroSolutionsLST. *Como abrir su filtro prensa*. [En línea] 12 de 08 de 2014. [Citado el: 09 de 07 de 2020.] <https://n9.cl/ztpai>
  - 19 **España, G. d. 2020**. Catálogo de residuos utilizables en construcción. . *Propiedades de los lodos secos*. [En línea] 11 de Noviembre de 2020. <https://n9.cl/cfdg2>
  - 20 **García Gonzáles, S y Durán Moreno, A. 2020**. *Informe técnico No.1 Proyecto 9125c19 (SECTEI/259/2019)*. México : CDMX, 2020.
  - 21 **Gobierno de España. 2013**. Catálogo de residuos utilizables en construcción. *Lodos de depuradoras: Propiedades de los lodos secos*. [En línea] 11 de Noviembre de 2013. <https://n9.cl/cfdg2>
  - 22 **González Arévalo, Ana Luisa . 2019**. *La contaminación del lago de Xochimilco, ubicado en la ciudad de México*. Málaga : Universidad de Málaga, 2019. págs. 110 - 126.
  - 23 **Grupo High Power de México, S.A. de C.V. 2021**. *Catálogo de productor ferreteros*. México : MUNICH, OAKLAND & HIGH POWER, 2021.
  - 24 **INTELLIGEN, INC. 2020**. *SuperPro Designer; User Guide: A Comprehensive Simulation Tool for the Design, Retrofit & Evaluation*. USA : INTELLIGEN, INC, 2020.
  - 25 **López Vázquez, Carlos, y otros. 2017**. *Tratamiento Biológico de Aguas Residuales: Principios Modelación y Diseño*. U.S.A : Cambridge University Press, 2017. págs. 9-31, 57-94.
  - 26 **Mansur, M, Fernández, F y da Silva, S. 1999**. *Aspectos tecnológicos e processos*. Brasil : Companhia de Saneamento do Paraná (SANEPAR), 1999. págs. 48 - 119.
  - 27 **Mendoza Sanchez, Mariana. 2020**. *Estudio comparativo de dos procesos biológicos para el aprovechamiento de los lodos generados en la Planta Piloto de Tratamiento de Aguas Residuales de la UAM-A (Tesis de Maestría)*. México : Universidad Autónoma Metropolitana, 2020.

- 28 **Metcalf and Eddy, Inc. 2003.** *Wastewater engineering: treatment and reuse*. Cuarta. USA : McGraw-Hill, 2003. págs. 186, 1771.
- 29 **México, Gobierno de la Ciudad de. 2021.** Calidad del aire. *Meteorología*. [En línea] 01 de 01 de 2021. [Citado el: 09 de 03 de 2022.] <https://n9.cl/3imir>
- 30 **Milacron Mexicana Sales, S.A. de C.V. 2004.** *Sistemas Centrales con filtración para fluidos de trabajo de metales*. Querétaro : División CIMCOOL, 2004.
- 31 **Osorio Escamilla, Francisco Javier y Rodríguez Gutiérrez, José Francisco Jerónimo. 2004.** *Propuesta de infraestructura hidráulica para la Universidad de las Américas de acuerdo al Plan Ordenador de Espacios (Tesis para obtener el grado de Maestría en Gerencia de Proyectos de Construcción)*. Cholula : Universidad de las Américas Puebla; Departamento de Ingeniería Civil, 2004.
- 32 **R. S. Ramalho. 2003.** *Tratamiento de Aguas Residuales*. Madrid : REVERTÉ, S.A., 2003. págs. 551-580.
- 33 **Ramírez, Luis Ángel Valente. 2020 .** *Tratamiento y disposición de lodos generados (Tesis de Pregrado)*. Universidad Nacional Autónoma de México : CDMX, 2020 .
- 34 **REMTAVARES. 2012.** Madrid Blogs; El agua. *Biodegradabilidad de efluentes resultantes del tratamiento de clorofenoles mediante hidrodechloración catalítica*. [En línea] 10 de 12 de 2012. [Citado el: 08 de 03 de 2022.] <https://n9.cl/rg1402>
- 35 **Restauración Ecológica y Desarrollo, A.C. 2016.** *Manejo integral para mejorar la calidad de agua y disminuir el salitre de tu chinampa*. CDMX : SEDESOL, 2016.
- 36 **S.A., Columbec del Ecuador. 2020.** Columbec del Ecuador S.A. *Filtros prensa: Operación y aplicación*. [En línea] 08 de 07 de 2020. <https://n9.cl/0dxr>
- 37 **Salto, L, y otros. 2020.** Alternativas en la estabilización de lodos provenientes de plantas de tratamiento de aguas residuales. *Revista de Investigaciones en Energía, Medio Ambiente y Tecnología (RIEMAT)*. 23 de 02 de 2020, Vol. 5, 1, págs. 23-57.
- 38 **Secretaría de Agricultura, Ganadería y Desarrollo . 2011.** NOM-077-FITO-2011. *Requisitos y especificaciones para la realización de estudios de efectividad biológica de los insumos de nutrición vegetal*. CDMX : Diario Oficial de la Federación, 2011.
- 39 **Secretaría de Economía. 2015.** NMX-AA-034-SCFI-2015. *Análisis de agua - Medición de sólidos y sales disueltas en aguas naturales, residuales y residuales tratadas – Método de prueba*. CDMX : s.n., 2015.
- 40 **Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. 2003.** NOM-004-SEMARNAT-2002. *Protección ambiental.- Lodos y biosólidos.-Especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final*. CDMX : Diario Oficial de la Federación, 2003.

- 41 **Secretaría del Medio Ambiente. 2006.** NTEA-006-SMA-RS-2006. *Requisitos para la producción de los mejoradores de suelos elaborados a partir de residuos orgánicos.* Estado de México : Periodico Oficial del Gobierno del Estado Libre y Soberano de México, 2006. págs. Toluca de Lerdo, México.
- 42 **SEMARNAT, IMTA, SENER. 2016.** *Revisión y actualización del potencial de biomasa para generación de energía eléctrica a partir de plantas de tratamiento de aguas residuales presentado en el Inventario Nacional de Energías Renovables (INERE).* CDMX : Subcoordinación de tratamiento de aguas residuales, 2016.
- 43 **SPDv12. 2014.** SuperPro Designer; IndWater Example. 2014.
- 44 **Tipantasig Lenin , Gabriel Silva. 2019 .** *Diseño de sistemas para el tratamiento de lodos mediante tecnologías de bajo coste para la EDAR Vall Dels Alcalans (Valencia) (Tesis para obtener el grado de Maestría).* Valencia : Universitat Politècnica de València, 2019 .
- 45 **Torres, Patricia, Madera, Arturo y Martínez, Genny. 2008.** Estabilización alcalina de biosólidos compostados de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales domésticas para aprovechamiento agrícola. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín.* 01 de 12 de 2008, Vol. 61, 1, págs. 4432-4444.
- 46 **TRUPER. 2022.** Ficha técnica compresor horizontal 10 L. 1 HP, Código: 19215. [En línea] 11 de 03 de 2022. <https://n9.cl/aqiud>
- 47 **UAM. 2022.** UAM Xochimilco. *Índice de Calidad del Aire.* [En línea] 23 de 05 de 2022. <https://aqicn.org/city/mexico/mexico/uam-xochimilco/es/m/>
- 48 **UCM. 2013.** Universidad Complutense de Madrid: Departamento de Petrología y Geoquímica. *Tamaño absoluto de grano.* [En línea] 03 de 04 de 2013. <https://n9.cl/6i4un>
- 49 **UNESCO. 2021.** Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura. *Patrimonio Mundial.* [En línea] 2021. [Citado el: 19 de 05 de 2022.] <https://n9.cl/f87y1>
- 50 **University, Northeastern. 1997.** *Global Environmental Biotechnology.* [ed.] D.L. Wise. 1 st. Boston : ELSEVIER, 1997. pág. 311.
- 51 **UPV. 2017.** Universitat Politècnica de València. *FILTROS DE ANILLAS. LIMPIEZA.* [En línea] 19 de 10 de 2017. <https://n9.cl/mwicb>
- 52 **Villaseñor, G. 1995.** *Tratamiento y disposición de lodos producidos en plantas de tratamiento de aguas residuales (Tesis de Licenciatura).* México : Universidad de Sonora, 1995.
- 53 **Xochimilco, Alcaldía. 2021.** Alcaldía Xochimilco. *Pueblos y Barrios.* [En línea] 17 de 08 de 2021. <https://n9.cl/mxc8z>

ANEXO A: Factores de Fricción para cualquier tipo de tubería comercial (Crane, 2010).



NOTAS GENERALES

- 1. El paquete del reactor biológico... 2. La línea de flujo... 3. Cuando se deseen... 4. El paquete del reactor eléctrico...

SIMBOLOGÍA

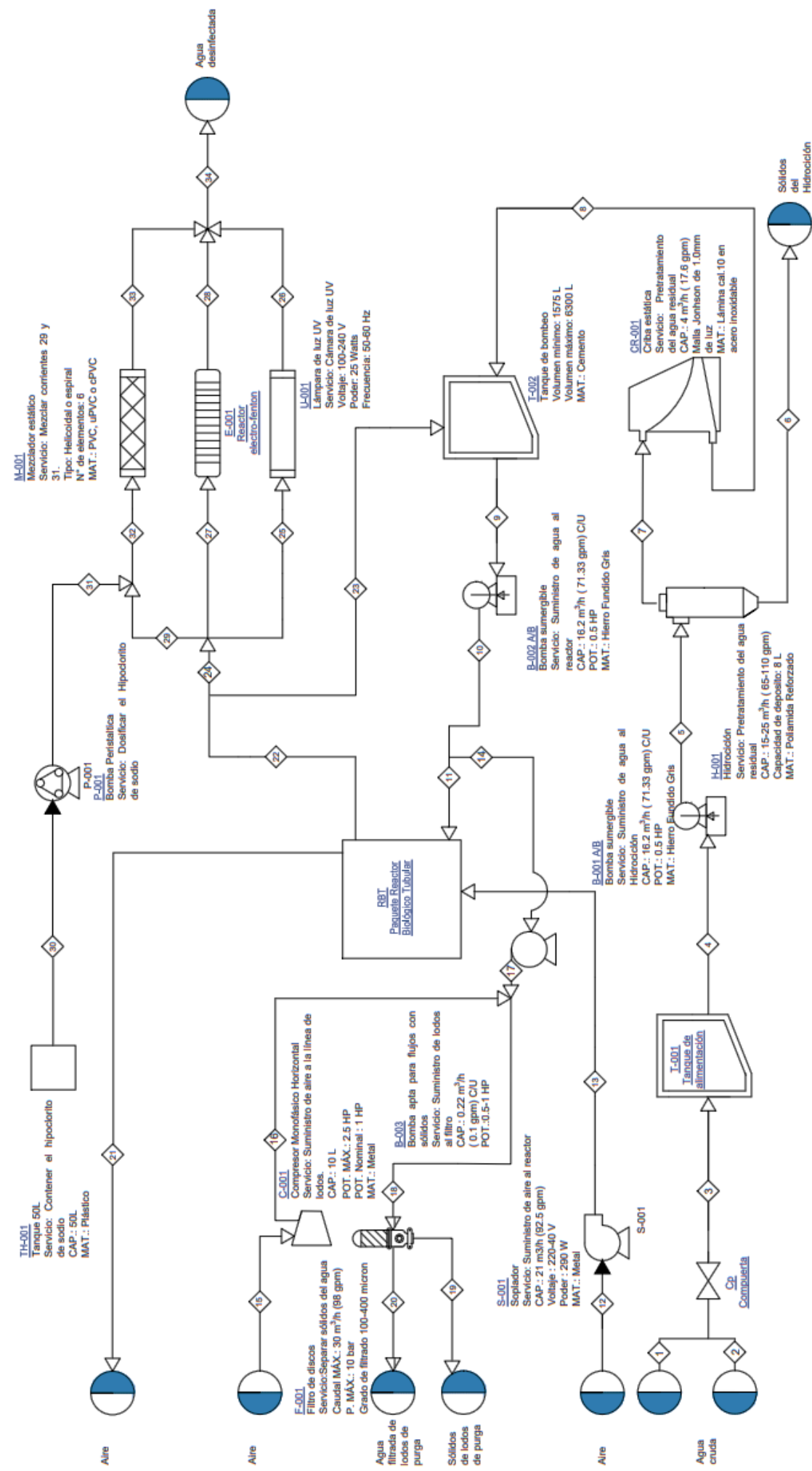
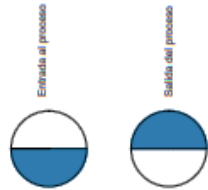


Table with 34 columns (No. Corriente 1-34) and 10 rows (Fase, Caudal, Densidad, pH, Turbiedad, Color Verdadero, Coeficientes Totales, DQO, NH4, Sólidos Suspendedos Totales, NACO). Each cell contains numerical values representing flow characteristics at different stages of the process.

Administrative table for 'EDICIÓN 0A' with columns for SECCIÓN (PROC-MEC, ELÉCTRICO, CONTROL, CIVIL), FECHA (RECIBE, REVISADA), FIRMA, and APROBADA.

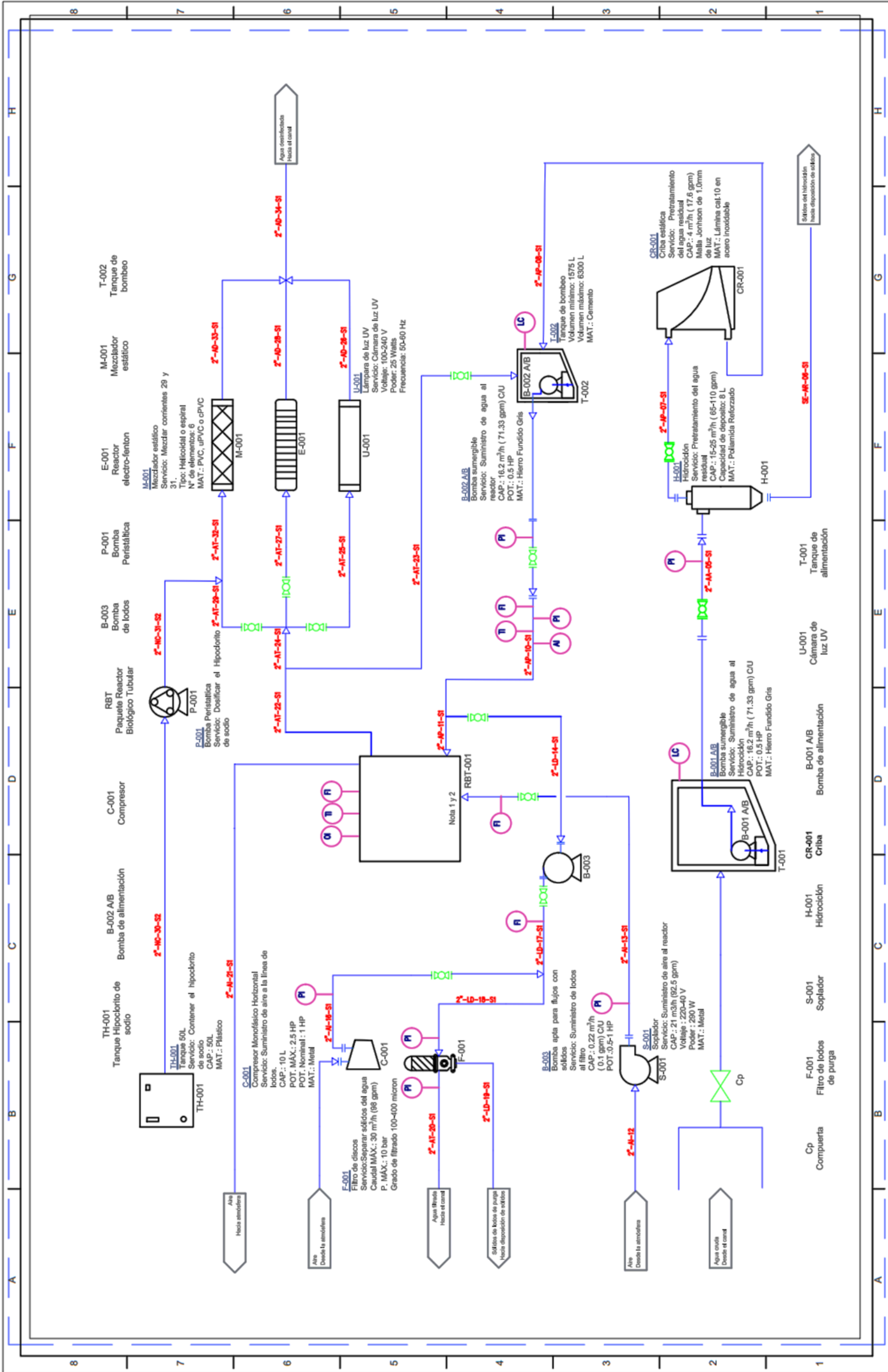
Project metadata including logos for the Government of Mexico and the Secretaría de Educación, Ciencia, Tecnología e Innovación, followed by a 'Diagrama de flujo de proceso' and a table with columns for PLANETA, DISCIPLINA, AREA, and EDICIÓN.



## ANEXO C: DTI de la PTAR en el polígono de San Lorenzo, Xochimilco.

### NOTAS GENERALES

- El paquete del reactor biológico tubular está compuesto por cuatro módulos conectados entre sí en forma paralela y unido por un sistema de tuberías.
- El sistema de tuberías de los tubos conectados entre sí, el agua residual proveniente de la bomba B-002 y el aire del soplador S-001 entran por el tubo de abajo y sale por el que se encuentra en la parte superior al agua tratada.
- El sistema de tuberías de los tubos conectados entre sí, el agua de alimentación del reactor y se abasteció la línea de todos la cual sale del tubo inferior de cada módulo.
- El paquete del reactor electro-fenton por espumificar.
- Válvulas de 2" BA



### CLAVES

Lineas de continentes:

Fluido	Clave
Agua cruda	AA
Agua pretratada	AP
Agua tratada	AT
Agua desinfectada	AD
Aire	AI
Lodos	LD
Arenas	AR
NACIO	NC

Material	Clave
PVC	S1
PVC Flexible	S2
Concreto	S3

PLANTA DISCIPLINA: PLANEACION AREA:	
Documento Diagrama de tubería e instrumentación	Proyecto: C.I.G.H. Sitio: L.L.E.F.L. Fecha: 21/09/21 Autores: B.L.H.F., A.P.C.D., S.A.G.G.
Edición: 0A Fecha: 21/09/21 Autor: B.L.H.F.	Edición: 02 Fecha: 21/09/21 Autor: B.L.H.F.

GOBIERNO DE LA CIUDAD DE MEXICO SECRETARÍA DE EDUCACIÓN, CIENCIA Y TECNOLOGÍA E INNOVACIÓN	
EDICIÓN 0A	
SECCIÓN: PROC-MEC ELECTRICO CONTROL CIVIL	FIRMA:
1ra edición: 01/04/21 2da edición: 21/09/21 3ra edición: 20/09/21 4ta edición: 03/01/22	EDICIONES:



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO  
FACULTAD DE QUÍMICA



**ANEXO D: MANUAL DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DE LA LÍNEA DE PURGA.**

PTAR Polígono de San Lorenzo, Xochimilco

05 de 06 del 2022

## Glosario

---

*Atracción de vectores.*

---

Característica de los lodos y biosólidos para atraer: roedores, moscas, mosquitos u otros organismos capaces de transportar agentes infecciosos.

---

*Biosólidos.*

---

Lodos que han sido sometidos a un proceso de estabilización y que, por su contenido de materia orgánica, nutrientes y características adquiridas después de su estabilización, pueden ser susceptibles de aprovechamiento.

---

*Coliformes fecales.*

---

Bacterias patógenas presentes en el intestino de animales de sangre caliente y humanos.

---

*Estabilización.*

---

Proceso químico al que el lodo es sometido para acondicionarlo para su aprovechamiento.

---

*Estabilización alcalina.*

---

Proceso mediante el cual se añade suficiente cal hidratada  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  a la masa de lodos para elevar el pH.

---

*Helminto.*

---

Término designado a un amplio grupo de gusanos parásitos (de humanos, animales y vegetales), de vida libre, con forma y tamaños variados.

---

*Límite máximo permisible.*

---

Valor asignado a un parámetro, el cual no debe ser excedido por los lodos y biosólidos para que puedan ser dispuestos o aprovechados.

---

*Lodos.*

---

Sólidos con un porcentaje del 21% m/m de humedad, provenientes de la PTAR y que no han sido sometidos al proceso de estabilización.

---

*Patógenos.*

---

Microorganismo capaz de causar enfermedades, si está presente en cantidad suficiente y condiciones favorables.

---

*Salmonella spp.*

---

Patógenos para el hombre y los animales cuando se ingieren, ocasionando fiebre tifoidea y enterocolitis (conocida también como gastroenteritis).

## Prefacio.

El tratamiento del agua residual conlleva a la generación de residuos biológicos coloquialmente conocidos como lodos, los cuales son un problema debido a que generalmente son producidos en grandes cantidades y a que se requiere de su estabilización para disponerlos de manera adecuada (Mendoza Sanchez, 2020).

Los lodos producidos dependen del tipo de planta de tratamiento y de la operación de ésta, aquellos producidos en procesos de tratamiento biológicos están formados por biomasa y contienen del 98.5 al 99.5% de humedad, con un valor típico del 99.2% (2).

La cantidad de lodos producidos por esta Planta de Tratamiento de Agua Residual (PTAR) es muy pequeña en comparación con la generada a escala industrial por lo que, el ciclo de operación se repite en un intervalo de 20 días.

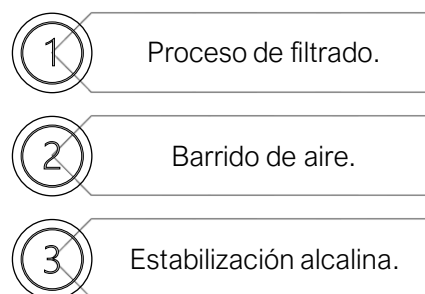
Es importante recalcar que, si la capacidad de la PTAR aumenta (La cantidad de agua a tratar por el reactor es mayor a la actual) lo recomendable es disminuir este intervalo de tiempo.

La línea de purga comienza a la salida del Reactor Biológico Tubular (RBT) y finaliza una vez se realiza el muestreo rutinario al biosólido obtenido.

Este manual está compuesto por una serie de instrucciones de operación para el correcto funcionamiento de la línea de purga proveniente de los módulos del RBT, así como por información sobre el mantenimiento de los equipos y una propuesta para el cronograma de muestreo para la torta de lodo (NOM-004-SEMARNAT-2002).

Las instrucciones de operación aquí presentadas son básicas y fungen como una guía para el operador encargado de la línea. La sección de mantenimiento muestra los cuidados mínimos necesarios, pero para información más detallada se recomienda referirse al manual de operación de cada equipo.

La totalidad de la línea de purga se divide en 3 bloques principales (Figura: 1).



**Figura: 1 Bloques que constituyen a la línea de purga.**

### Restricciones y Normativa aplicable.

La Norma por tomar en cuenta para la medición de parámetros es la NOM-004-SEMARNAT-2002 (3), la cual desde un inicio establece que, para cualquier persona física o moral que esté interesada en el aprovechamiento de lodos, deberá de recabar la constancia de no peligrosidad emitida por la SEMARNAT, en términos del trámite SEMARNAT-07-007.

También menciona que, en caso de utilizar estabilización alcalina es necesario realizar un análisis de la muestra antes y después del proceso.

El análisis previo debe cumplir con las especificaciones de al menos un sólido tipo C, permitiendo así, su aprovechamiento en usos agrícolas y de mejoramiento de suelo.

Al la PTAR generar un volumen de lodos al año por debajo de 1,500 ton/año, se solicita una frecuencia de muestreo anual, sin embargo, como los resultados son de interés académico se sugiere que los parámetros se midan de forma bimestral dentro de los 6 meses de operación.

El objetivo por lograr con la cal hidratada es el aumentar el valor de pH por encima de 12 unidades y mantenerlo un mínimo de 72 horas, lo que generará una reducción significativa de patógenos, huevos de helminto, atracción de vectores y mejoraría el tipo de biosólido producido por la PTAR,

aumentando las posibilidades de emplearlo como abono.

Al inicio del proceso de estabilización se propone que la medición de parámetros se realice diariamente durante 1 semana y que una vez se tenga una recopilación de los datos, el intervalo de muestreo coincida con el de la torta recién extraída del filtro.

Es importante mencionar que en el 2016 se reportó que la mala calidad en el agua de riego en la zona chinampera de Xochimilco ocasionaba problemas de ensalitramiento del suelo (acumulación de sales solubles en el suelo), afectando el desarrollo y productividad de las plantas (4).

Debido a lo anterior y a que el abono producido con el lodo es alcalino, aplicarlo directamente en el suelo de las chinampas no es recomendable.

## PROCESO DE FILTRADO

Al momento de realizar la purga, se detendrá el ingreso de agua residual al equipo y se hará pasar agua para limpiar las membranas. La línea de desecho de lodos comienza en la salida de los reactores RBT mediante dos válvulas ubicadas en la línea de ingreso al equipo, al abrirse una y cerrar otra, se impide el paso del líquido al reactor y permite la salida de los lodos.

Las líneas de desecho se juntan mediante una conexión "T", a continuación, el flujo de lodos pasa por la bomba centrífuga y el rotámetro continuando su camino por la tubería hasta llegar a un codo de 90° que dirigirá el flujo hacia el módulo de filtrado. Se compone por los siguientes equipos e instrumentos:

### **Medidor de flujo o rotámetro (F1)**

Se utilizará un rotámetro de la marca Blue-White modelo (F-430N de 2") para conocer el flujo exacto de lodos por cada ciclo de purga.



Figura: 2 Rotámetro Blue-White modelo: F-430N.

### **Bomba (P-003)**

Bomba centrífuga SIEMENS, motor monofásico de 1 HP, que opera a una presión de 3.14 bar y a un flujo de 5.28 m<sup>3</sup>/h.

### **Precauciones.**

Para una mayor duración y buen funcionamiento del equipo, es importante seguir los siguientes pasos.

Antes de conectar el equipo, verificar que el voltaje disponible corresponda al requerido en la placa.

**Evitar el uso de prendas holgadas o joyería** porque, se corre el riesgo de que estas queden atrapadas en las piezas en movimiento.

De requerir el uso de una extensión, verificar que el calibre sea igual o mayor a la capacidad marcada en la bomba.

Revisar la alineación de partes en movimiento, ribete de partes móviles o si hay piezas deterioradas.

### **NOTA**

Los dispositivos de seguridad, interruptores y cualquier pieza deteriorada deberá ser reparada de manera apropiada por un centro de servicio autorizado HIGH POWER.

### **Cebado.**

Es importante llenar con agua limpia (tapón de cebado) antes de ponerla en marcha. Una vez efectuado lo anterior, enroscar el tapón y poner en marcha el equipo.

El cebado deberá repetirse siempre que la bomba haya permanecido inactiva durante largos periodos de tiempo o cuando haya entrado aire al sistema.

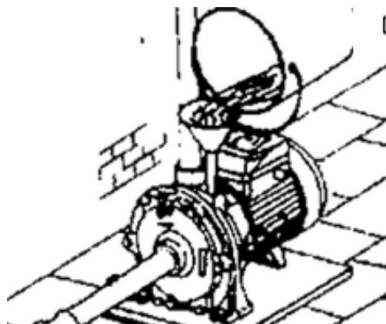


Figura: 3 Ejemplo del procedimiento de cebado.

### **Mantenimiento.**

Si se tiene en consideración lo mencionado anteriormente, el equipo no requerirá de un mantenimiento en especial, sin embargo, es recomendable cuidar que la válvula de aspiración se encuentre limpia.

Si la bomba no se ha utilizado por un largo periodo de tiempo se aconseja vaciarla por completo y lavarla con agua limpia.

De igual forma, si el eje no gira libremente es posible desbloquearlo con ayuda de un desarmador, introduciéndolo en la ranura correspondiente, de no ser suficiente, es posible quitar el cuerpo del equipo retirando los tornillos de fijación correspondientes y efectuando una limpieza esmerada para eliminar las posibles incrustaciones.

#### **NOTA**

Quitar la corriente del motor antes de efectuar cualquier intervención en el equipo.

### **Válvulas (V1/V2/V3/V4)**

Se cuenta con 4 válvulas de bola, una a la salida de cada módulo de filtrado (V1/V2), una después de la bomba (V3) y otra previa la unión de la línea de purga y la proveniente del compresor (V4). Si V3 se encuentra abierta, V4 deberá permanecer cerrada y viceversa.

### **Módulo de filtrado (F-001)**

Compuesto por un módulo del filtro de discos HELIX SYSTEM 2NA de la marca AZUD (5).

Dispositivo que obliga al agua de entrada a girar alrededor de los discos en la carcasa del filtro, ocasionando que las partículas más grandes se alejen de los discos, reduciendo así, la acumulación de sólidos en la superficie de filtrado, optimizando el rendimiento de los discos y reduciendo la frecuencia de limpieza del elemento.

Su sistema de cierre de mariposa permite una fácil descompresión de la pila de discos, facilitando la limpieza del elemento.



Figura: 4 Partes del módulo de filtrado.

## Mantenimiento.

### IMPORTANTE

Antes de realizar este procedimiento es importante que la etapa de barrido de aire culmine.

Los sólidos quedarán atrapados en los anillos del equipo, mientras que el agua viajará por canales hacia el cárcamo de bombeo por tubería de regreso al canal.

Para retirar el sólido se abre la abrazadera del equipo, se extrae la carcasa, se desenrosca la manilla en la parte superior del disco, se separan con cuidado las anillas y mediante el uso de una espátula se limpian los discos (delicadamente).

Una vez limpios se colocan nuevamente en su posición, se enrosca la manilla y se ensambla. Es importante recolectar los lodos para su posterior estabilización.



Figura: 5 Ejemplo de la secuencia de mantenimiento del equipo (6).

### NOTA

Si se observa que las anillas están muy sucias y que la limpieza con la espátula no es suficiente, se recomienda retirar la mayor cantidad de sólido posible y limpiar las anillas con agua a presión o un baño ácido antes del siguiente ciclo.

### Medidor de presión (P1)

A lo largo de la línea se encuentran 2 manómetros, antes y después del módulo de filtrado, esto con el objetivo de mediante la caída de presión, conocer el si es necesario realizar el mantenimiento del equipo antes del tiempo estimado de proceso.

### NOTA

Si se detecta una caída de presión importante ( $0.4 - 0.5 \text{ kgf/cm}^2$ ) una vez se recuperen los sólidos y antes de comenzar con un nuevo ciclo de operación será necesario realizar un mantenimiento exhaustivo del equipo empleando agua a presión o un baño ácido.



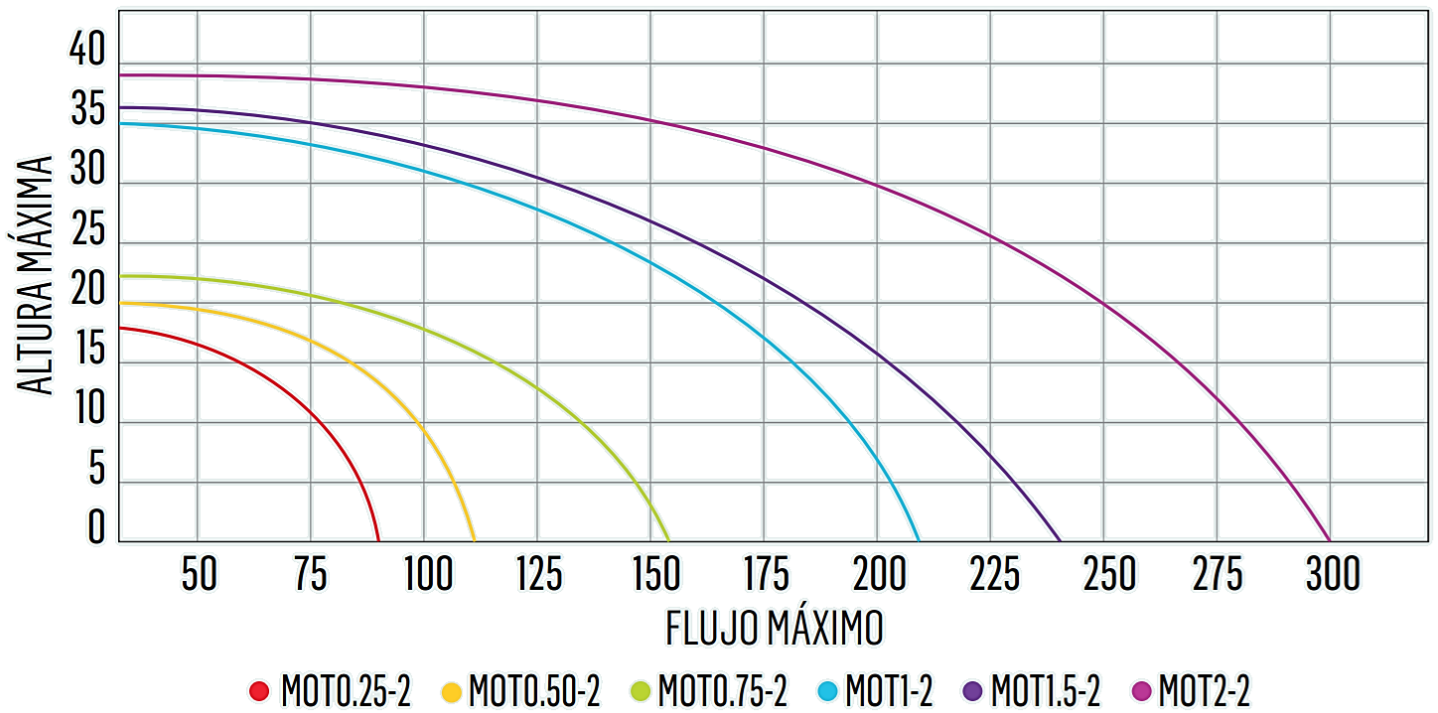


Figura: 6 Curva de operación bomba SIEMENS.

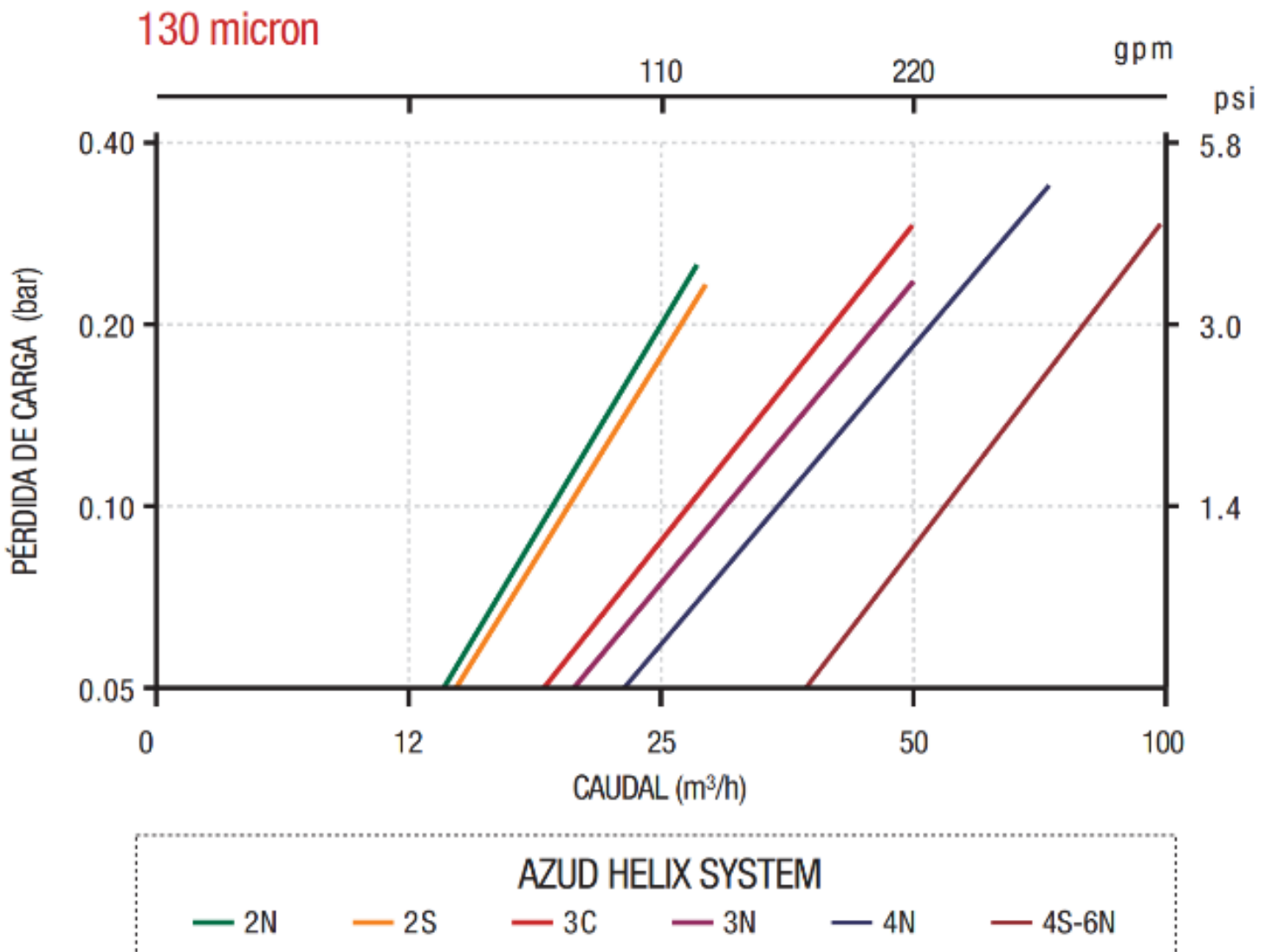


Figura: 7 Pérdida de carga filtro AZUD HELIX SYSTEM.

## BARRIDO DE AIRE

Con el propósito de evitar que posibles sólidos sedimentados a lo largo de la tubería ocasionen un daño en la línea (mantenimiento preventivo), se propuso el empleo de un barrido con aire mediante el uso de un compresor TRUPER de 1HP.

### **Compresor (V-002)**

Su función principal es ayudar a retirar el lodo remanente en la tubería, pero también funciona como un segundo proceso de secado de la torta de lodo dentro del módulo de filtrado. Opera a una presión de 2.76 bar y a un flujo de 5.09 m<sup>3</sup>/h.



Figura: 8 Componentes del compresor (7).

### **Precauciones.**

Para una mayor duración y buen funcionamiento del equipo, es importante seguir los siguientes pasos:

Evitar exponer el equipo a la lluvia y a superficies mojadas.

Si el equipo no está en uso, almacenar en un lugar seco y libre de polvo.

Evitar alcanzar algo sobre el equipo y cruzarlo mientras se encuentre operando.

Con el fin de reducir el riesgo de arranques accidentales, asegurarse de que el interruptor se encuentre en la posición “apagado” antes de conectar el cable de alimentación.

El equipo marca un nivel de ruido de máximo 90 dBA por lo que, se recomienda el uso de **protectores auriculares.**

Se recomienda el uso **de anteojos de seguridad** y es importante el nunca dirigir la boquilla del aspersor hacia alguna persona o hacia alguna parte del cuerpo.

No se recomienda el uso de extensiones eléctricas debido a que, su uso provoca que la tensión caiga, generando una pérdida de potencia en el motor y sobrecalentamiento. En su lugar, se propone aumentar la longitud de la línea conforme sea requerido.

Bajo la cubierta se presentan altas temperaturas y partes en movimiento, con el objetivo de evitar quemaduras u

otro tipo de lesiones, el equipo no debe operar sin la cubierta en su lugar.

Para permitir una ventilación adecuada para el enfriamiento del equipo, este debe mantenerse a una distancia mínima de 30.5 cm de la pared más cercana.

Durante la operación, la temperatura del aceite no debe estar por debajo de 70°C.

#### NOTA

No ajustar el presostato o válvula de alivio por ninguna razón ya que hacerlo generará una anulación de la garantía.

#### **Mantenimiento.**

Es importante apagar el equipo, retirar la clavija del tomacorriente y purgar toda la presión del sistema siempre que este no esté en uso o antes de realizar su mantenimiento.

Para esto, desensamble el equipo y limpie todas las partes utilizando un aceite ligero, seque las partes y vuelva a ensamblar aplicando grasa en las superficies de contacto.

Con el fin de evitar corrosión, drene la humedad del tanque periódicamente. Para asegurarse que la válvula de seguridad funcione adecuadamente y para retirar cualquier obstrucción, jale el anillo diariamente.

Verifique el nivel de aceite en la mirilla indicadora ubicada en la parte posterior del compresor. Si el nivel de aceite abarca el

punto medio (punto rojo), llene el depósito con aceite SAE-30 hasta el nivel indicado. Conecte el cable de corriente y opere el compresor sin carga para asegurarse que opera adecuadamente.

Después de 16 horas de operación es necesario abrir la válvula de purga y drenar el agua del tanque. Después de cada uso, desconecte y libere la presión de aire del tanque.

#### NOTA

Los protectores o cualquier otra parte del equipo que pueda encontrarse dañada deben ser cuidadosamente revisadas. Todo interruptor de mando deteriorado deberá ser remplazado por un centro de servicio autorizado TRUPER®.

#### NOTA

El compresor cuenta con un interruptor térmico que evita que el motor sufra de sobrecalentamiento, si este interruptor se activa, el motor se apagará y para restablecerlo debe seguir los siguientes pasos:

Presione el interruptor para asegurarse que el equipo este apagado.

Permita que el equipo se enfríe por al menos 5 min.

Oprima el interruptor térmico, ubicado a un costado del cárter.

Levante el interruptor para encender el compresor.

#### **Medidor de presión (P1)**

A lo largo de la línea se encuentra 1 manómetro

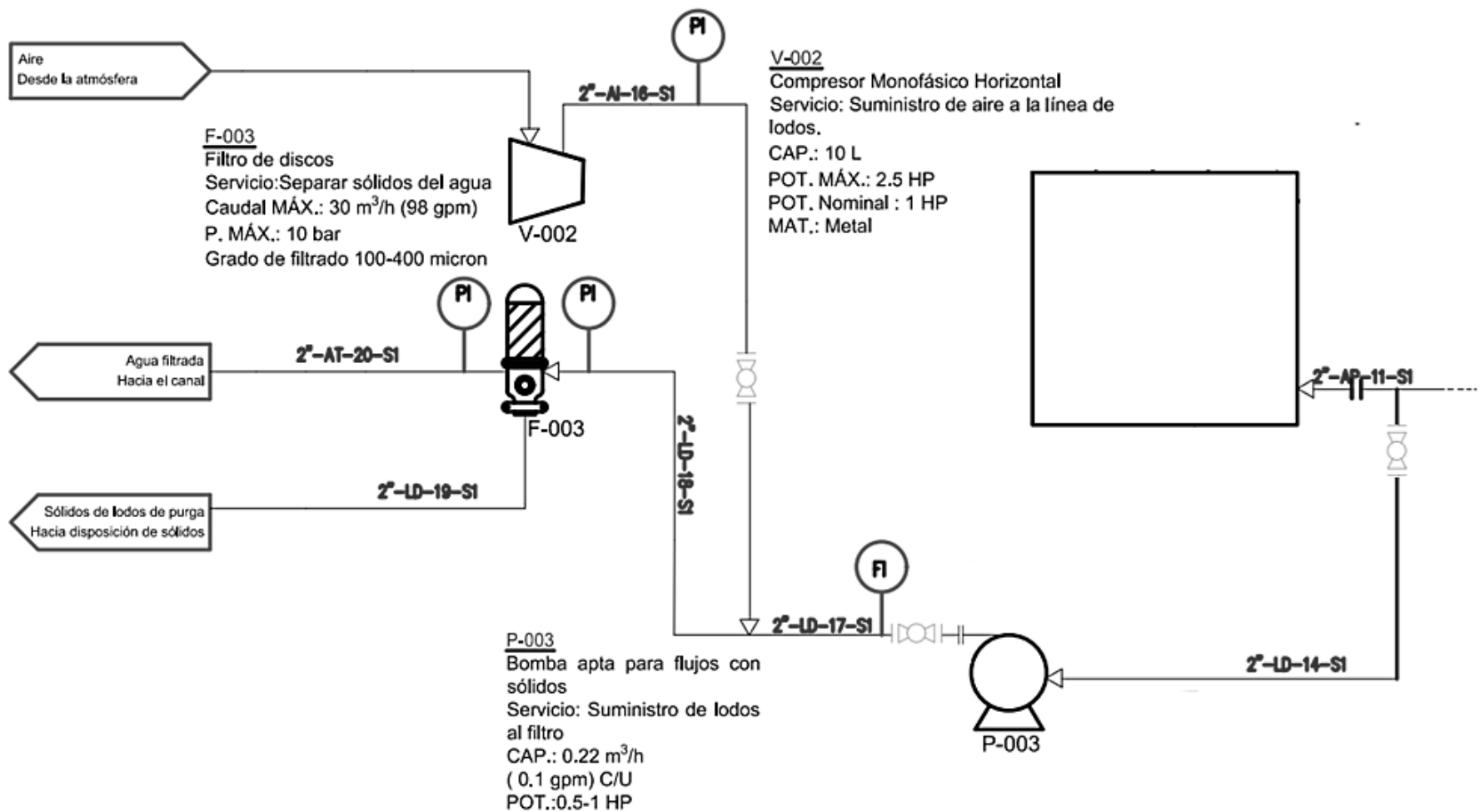


Figura: 9 Extracto del Diagrama de Tubería e Instrumentación de la Planta de Tratamiento: Línea de purga.

## ESTABILIZACIÓN ALCALINA

De acuerdo con lo señalado en la NOM-004-SEMARNAT-2002, una vez la torta de lodo es extraída del módulo de filtrado es importante realizar la determinación de los parámetros indicados en las Tabla: 2 y 3.

Para los análisis es necesario el recolectar muestras de lodo del mismo tamaño. En la Tabla: 1 se muestra el tiempo máximo de almacenamiento permisible para cada parámetro.

**Tabla: 1 Condiciones y tiempo máximo de almacenamiento de las muestras.**

Parámetro	Temperatura	Tiempo máximo de almacenamiento
Coliformes fecales y <i>Salmonella spp.</i>	4 °C	48 h
Huevos de helmintos.		30 días
Arsénico, cadmio, cobre, cromo, níquel, plomo y zinc.		180 días
Mercurio		13 días (plástico) 38 días (vidrio)

### Parámetros previos a la estabilización.

**Tabla: 2 Límites máximos permisibles para metales pesados en el lodo.**

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	2800	7500

**Tabla: 3 Límites máximos permisibles para patógenos y parásitos en el lodo.**

Clase	Indicador bacteriológico de contaminación	Patógenos	Parásitos
	Coliformes fecales NMP/g en base seca	<i>Salmonella</i> . NMP/g en base seca	Huevos de helmintos/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

La preparación de las muestras y los procedimientos para cada uno de los análisis de muestras en los anexos de la NOM.

### NOM-004-SEMARNAT-2002: ANEXOS

- ❖ Metales: ANEXO VI
- ❖ Coliformes fecales: ANEXO III
- ❖ *Salmonella*: ANEXO IV
- ❖ Huevos de helmintos: ANEXO V

Debido a que el agua que ingresa a la PTAR es en su mayoría de carácter doméstico, se espera que los valores de metales en el lodo sean menores a los correspondientes a un carácter "Excelente" de acuerdo en lo establecido en la Tabla: 3.

**Parámetros durante y posteriores a la estabilización.**

Una vez reportados los valores correspondientes a cada apartado, el lodo debe pasar al proceso de estabilización.

En esta etapa lo más importante es lograr elevar el pH del lodo a valores mayores a 12 y mantenerlo el tiempo suficiente como para inactivar a los patógenos y microorganismos presentes en él (CONAGUA, 2020).

Para lograrlo, se empleará un 30% en peso de cal hidratada  $[Ca(OH)_2]$  respecto al peso de la torta de lodo, se mezclará para homogeneizar y se monitorearán los parámetros indicados en la Tabla: 4.

**NOTA**

Conservar el  $Ca(OH)_2$  en un recipiente bien cerrado e identificado, almacenado en un área fresca, seca y ventilada.

**NOTA**

El  $Ca(OH)_2$  puede llegar a provocar irritación cutánea, ocular o de las vías respiratorias, por lo que para su manipulación es importante emplear equipo de protección, como: Guantes, lentes de seguridad y mascarilla o respirador para polvos con protección igual o superior a N95.

**Tabla: 4 Parámetros y frecuencia de muestreo para biosólido después de la estabilización alcalina (Torres, y otros, 2008).**

Parámetro	Frecuencia de muestreo
Temperatura (°C)	Día 1: Hora cero, a las 4 horas, cada hora por 6 horas. Día 2 al 14: 2 veces al día.
pH (Unidades)	Día 1: Hora cero, pasada 1 hora y a las 4 horas. Día 2 a 14: 2 veces al día.
Humedad (%)	Una muestra cada dos días.
Coliformes totales y fecales (NMP/g)	Una muestra en el día 1, 6 y 14.
Huevos de helmintos (HH/g)	Una muestra en el día 1, 6 y 14.
<i>Salmonella spp</i> (NMP/g)	Una muestra en el día 1, 6 y 14.

Si se observa que el 30% de cal hidratada no logra elevar el nivel de pH al valor requerido o el intervalo de tiempo establecido, se sugiere realizar una prueba con distintas cantidades del material alcalino hasta hallar el mínimo necesario para cumplir con lo requerido por la normatividad.

Dada la característica alcalina del abono generado mediante esta forma de estabilización, su uso directo en muestras recolectadas del suelo de las chinampas no es recomendable ya que, se han detectado problemas de ensalitramiento debido a la mala calidad del agua de riego.

En su lugar se propone la ejecución de una prueba de germinado, que consiste en un estudio de laboratorio en el cual, se colocan semillas en condiciones controladas de temperatura, humedad y luz para que estas germinen.

Para probar si el uso del biosólido como abono es viable, se añadiría un cierto porcentaje de este a una muestra de la semilla a germinar y se compararían con un blanco ( 0% de abono) y otra muestra con un porcentaje similar, pero de abono comercial.

En el Estado de México, la Norma Técnica Estatal Ambiental NTEA-006-SMA-RS-2006 establece los requisitos para la producción de los mejoradores de suelo elaborados a partir de residuos orgánicos (10). La Tabla: 5 puede tomarse como una guía adicional para el muestreo del biosólido.

**Tabla: 5 Requisitos fisicoquímicos y sanitarios para los mejoradores de suelos.**

Parámetro	Valor
Químicos	
pH	6.5 a 8.0
Materia orgánica	mayor al 15%
Relación carbono-nitrógeno	menor a 12
Fósforo	mayor a 0.10% ó 1,000 ppm
Potasio	mayor a 0.25% o 2,500 ppm
Relación potasio-sodio	mayor a 2.5
Microbiológicos	
Hongos fitopatógenos	ausente
Huevos de helmintos/g en base seca	menor a 10
Coliformes fecales NMP/g en base seca	menor a 1000
Salmonella spp/g en base seca	menor a 3

Mientras que la NOM-077-FITO-2011 establece los requisitos y especificaciones para la realización de estudios de efectividad biológica de los insumos de nutrición vegetal (Secretaría de Agricultura, Ganadería y Desarrollo , 2011).

## Referencias.

1. **Mendoza Sanchez, Mariana.** *Estido comparativo de dos procesos biológicos para el aprovechamiento de los lodos generados en la Planta Piloto de Tratamiento de Aguas Residuales de la UAM-A (Tesis de Maestría).* México : Universidad Autónoma Metropolitana, 2020.
2. **Limón Macías, Juan Gualberto.** *Los lodos de las plantas de tratamiento de aguas residuales, ¿Problema o recurso? (Especialidad Ingeniería Química).* Guadalajara : Academia de Ingeniería México, 2013.
3. **Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.** NOM-004-SEMARNAT-2002. *Protección ambiental.-Lodos y biosólidos.-Especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final.* CDMX : Diario Oficial de la Federación, 2003.
4. **Restauración Ecológica y Desarrollo, A.C.** *Manejo integral para mejorar la calidad de agua y disminuir el salitre de tu chinampa.* CDMX : SEDESOL, 2016.
5. **AZUD.** FILTROS DE RIEGO. *HELIX SYSTEM.* [En línea] 08 de 12 de 2020. <https://n9.cl/u0gqi>.
6. **UPV.** Universitat Politècnica de València. *FILTROS DE ANILLAS. LIMPIEZA.* [En línea] 19 de 10 de 2017. <https://n9.cl/mwicb>.

7. **TRUPER, S.A de C.V.** Compresor horizontal 10L. *Ficha técnica*. [En línea] 2022.

[https://www.truper.com/ficha\\_tecnica/view/s/ficha-print.php?id=894](https://www.truper.com/ficha_tecnica/view/s/ficha-print.php?id=894).

8. **CONAGUA.** *Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento. Diseño de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Municipales: Tratamiento y disposición de lodos*. CDMX : SEMARNAT, 2020. págs. 308-319. Vol. 32. 978-607-8246-88-5.

9. **Torres, Patricia, Madera, Arturo y Martínez, Genny.** Estabilización alcalina de biosólidos compostados de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales domésticas para aprovechamiento agrícola. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*. 01 de 12 de 2008, Vol. 61, 1, págs. 432-444.

10. **Secretaría del Medio Ambiente.** NTEA-006-SMA-RS-2006. *Requisitos para la producción de los mejoradores de suelos elaborados a partir de residuos orgánicos*. Estado de México : Periodico Oficial del Gobierno del Estado Libre y Soberano de México, 2006. págs. Toluca de Lerdo, México.

11. **Secretaría de Agricultura, Ganadería y Desarrollo** . NOM-077-FITO-2011. *Requisitos y especificaciones para la realización de estudios de efectividad*

*biológica de los insumos de nutrición vegetal*. CDMX : Diario Oficial de la Federación, 2011.