



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

MODELO DE SIMULACIÓN PARA EL MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO DE RILES DE BODEGA CACHAPOAL, VIÑA CONCHA Y TORO.

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL.

FERNANDO ALFONSO AVARIA PICCARDO

PROFESORA GUÍA:

ANA LUCÍA PRIETO SANTA

MIEMBROS COMISIÓN:

NÉSTOR ROJAS ALCAYAGA

GONZALO CORREA IRIARTE

SANTIAGO DE CHILE

2019

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR AL
TÍTULO DE: Ingeniero Civil
POR: Fernando Avaria Piccardo
FECHA: 29/05/2019
PROFESORA GUÍA: Ana Lucía Prieto Santa

Modelo de simulación para el Mejoramiento del Sistema de Tratamiento de RILes de Bodega Cachapoal, Viña Concha y Toro.

El objetivo del presente trabajo es implementar un modelo de simulación para la mejora de la planta de tratamiento de RILes de la Bodega Cachapoal, propiedad de Viña Concha y Toro, utilizando el software GPS-X.

La metodología utilizada contempla una revisión bibliográfica sobre las tecnologías disponibles para el tratamiento de RILes de la industria vitivinícola, enfocada en un sistema de biorreactores de membrana (MBR), considerando que la planta ya posee un sistema de lodos activados, la migración a un sistema de MBR implica un menor costo que migraciones hacia otros tipos de tratamiento, y además es una tecnología ya aplicada en otras bodegas de la viña. A su vez, se realiza una breve revisión acerca del software GPS-X.

Para la implementación del modelo se comienza por realizar una caracterización de los RILes de la Bodega de San Javier, donde se ha realizado una migración de un sistema de lodos activados a un sistema de membranas MBR, con la finalidad de poder extrapolar dicha caracterización hacia la planta de la Bodega Cachapoal. A su vez, se caracteriza el RIL existente en la Bodega Cachapoal, en particular los parámetros de DQO, SST, N y P. Luego, se construye un modelo de simulación de la bodega de San Javier, de modo de ajustar los parámetros de fraccionamiento de la DQO para luego utilizarlos como referencia en el modelo realizado en la Bodega Cachapoal.

Posteriormente se proponen 2 escenarios de modelación de la planta de tratamiento para la Bodega Cachapoal. Ambos escenarios consideran la aplicación de un biorreactor de membrana (MBR). El primer escenario considera el tamaño actual del reactor, esto es, 550 m^3 y un área de membrana de 550 m^2 para tratar un caudal de $300 \text{ m}^3/\text{d}$. El segundo contempla la ampliación del volumen del reactor hasta 750 m^3 , con un área de membrana de 800 m^2 , para tratar un caudal de $400 \text{ m}^3/\text{d}$.

Además, se realiza un análisis de sensibilidad, donde se concluye que las variables que influyen mayormente en el funcionamiento de la planta son la edad del lodo, caudal y la DQO. Este ejercicio no considera variaciones en la presión transmembrana (TMP).

Los resultados obtenidos para el efluente cumplen con la normativa, en particular la Tabla 1 del Decreto Supremo 90, la cual define los límites máximos de contaminantes permitidos para la descarga de RILes a cuerpos de aguas superficiales sin capacidad de dilución.

Agradecimientos

Me gustaría utilizar este espacio para agradecer a todos quienes estuvieron presentes durante todo este largo proceso.

Primero que todo agradecer a mi familia, pues sin ellos nada de esto habría sido posible, a mi mamá y papá por el apoyo y por permitirme el lujo de salir de la universidad sin deuda alguna. A mis hermanos y cuñados por estar ahí cuando los necesité. Y a mis queridas mascotas por recibirme alegres cada vez que llegaba cansado a la casa.

Agradecer a mis amigos del colegio y de la vida por estar siempre presentes y ayudar a despejar la mente en los momentos en que era necesario.

Agradecer mis compañeros de la u, por las innumerables ventanas, almuerzos y tardes en la terraza, y por los viernes en geología.

Agradecer mis profesores, Ana Lucía y Néstor por ser los guías durante este último proceso llamado tesis, y a Gonzalo por el apoyo y la buena disposición para ayudar en todo lo que necesité.

Agradecer a la empresa Hydromantis por facilitar su software GPS-X, ya que sin el no podría haber realizado este trabajo.

Finalmente, agradecer a la Viña Concha y Toro y a toda la gente de desarrollo sustentable por la oportunidad de realizar este trabajo con ellos y por recibirme como uno más desde el primer día.

Por esto y mucho más, gracias a todos.

Tabla de contenido

1. Introducción	1
2. Objetivos.....	3
2.1. Objetivo General.....	3
2.2. Objetivos Específicos	3
3. Metodología.....	4
OE1: Determinación del estado del arte de tecnologías de tratamiento de RILes de la industria vitivinícola y biorreactores de membrana MBR.....	4
OE2: Caracterización del RIL la Bodega San Javier para determinar el fraccionamiento de la DQO del RIL vitivinícola durante época de vendimia.....	4
OE3: Caracterización del RIL de la Bodega Cachapoal durante época de vendimia.....	4
OE4: Construcción del modelo de simulación MBR en bodega Cachapoal mediante software GPS-X.....	5
4. Revisión bibliográfica.....	7
4.1. Caracterización de Riles vitivinícolas	7
4.2. Biorreactores de membrana (MBR)	11
4.2.1. Diseño en MBR	12
4.3 Modelación en GPS-X.....	14
5. Modelo de simulación para el Mejoramiento del Tratamiento de RILes en la Bodega Cachapoal	17
5.1. Modelo de calibración: Bodega San Javier	17
5.1.1. Caracterización Afluente y Efluente	17
5.1.2. Características de la planta	19
5.2. Modelo de simulación Bodega Cachapoal	22
5.2.1. Caracterización Afluente.....	24
5.2.2. Bases de Diseño	26
5.2.3. Diagrama de procesos propuesto.....	28
6. Resultados simulación	30
6.1. Análisis de sensibilidad.....	31
7. Discusión y Conclusiones	35
8. Bibliografía.....	38
9. Anexos	40
Anexo A: GPS-X	40
Anexo B: Afluente en GPS-X.....	47
Anexo C: Resultados simulación.....	50
C.1: Resultados simulación condición actual.	50
C.2: Resultados simulación condición futura.....	53
Anexo D: Métodos utilizados para caracterización de RIL.....	55

Índice de Figuras

Figura 1-1: Fachada de Bodega Cachapoal.....	2
Figura 4-1: Escobajo.	7
Figura 4-2: Proceso elaboración del vino y generación de RILes..	9
Figura 4-3: Objetos de MBR en GPS-X.....	15
Figura 4-4: Influent Advisor en GPS-X.	16
Figura 5-1: Gráfico DQO y SST para Bodega San Javier	18
Figura 5-2: Nitrógeno y Fósforo para Bodega San Javier.	18
Figura 5-3: Diagrama de Flujo planta San Javier.	20
Figura 5-4: Modelo de calibración planta de San Javier en software GPS-X.....	21
Figura 5-5: Reactor de lodos activados de Bodega Cachapoal.....	23
Figura 5-6: Tranques de acumulación de RIL en Bodega Cachapoal.....	24
Figura 5-7: DQO y SST para Bodega Cachapoal.....	25
Figura 5-8: Nitrógeno y Fósforo para Bodega Cachapoal.	25
Figura 5-9: Diagrama de flujo propuesto para la Bodega Cachapoal.....	29
Figura 5-10: Modelo de simulación de la Bodega Cachapoal en GPS-X.	29
Figura 9-1: Procedimiento de cálculo para variables SCOD, COD, SBOD, BOD, SBODU y BODU.	41
Figura 9-2: Procedimiento de cálculo para variables VSS, TSS.....	42
Figura 9-3: Procedimiento de cálculo para variables STKN y TKN..	43
Figura 9-4 Procedimiento de cálculo para variables STP, XTP y TP..	44
Figura 9-5: Procedimiento de cálculo para variables TOC, STOC y XTOC.	45

Índice de Tablas

Tabla 4.1: Rango de valores esperados para RILes vitivinícolas.	10
Tabla 4.2: Fraccionamiento DQO para época de vendimia.	11
Tabla 4.3: Parámetros operacionales para distintas plantas de tratamiento MBR.	13
Tabla 5.1: Caracterización del RIL bodega San Javier.	19
Tabla 5.2: Parámetros de diseño para planta de San Javier ingresados al software GPS-X.	21
Tabla 5.3: Fraccionamiento DQO para planta de San Javier.	22
Tabla 5.4: Calidad afluente a la planta de tratamiento de la Bodega Cachapoal.	26
Tabla 5.5: Afluente de diseño para Bodega Cachapoal.	26
Tabla 5.6: Fraccionamiento de la DQO adoptado para la Bodega Cachapoal.	27
Tabla 5.7: Parámetros de diseño y operación planta MBR Cachapoal situación actual.	27
Tabla 6.1: Resultados simulación en software GPS-X para condición actual.	30
Tabla 6.2: Resultados simulación en software GPS-X para condición futura.	31
Tabla 6.3: Resultados análisis de sensibilidad para edad del lodo de 10 días.	31
Tabla 6.4: Resultados análisis de sensibilidad para edad del lodo de 30 días.	32
Tabla 6.5: Variables modificadas en análisis de sensibilidad.	32
Tabla 6.6: Análisis de sensibilidad modificando variable Caudal.	33
Tabla 6.7: Análisis de sensibilidad modificando variable DQO.	33
Tabla 6.8: Análisis de sensibilidad modificando variable Ss.	33
Tabla 6.9: Análisis de sensibilidad modificando variable Si.	34
Tabla 6.10: Análisis de sensibilidad modificando variable Xi.	34
Tabla 6.11: Análisis de sensibilidad modificando variable Xs.	34
Tabla 9.1: Librerías disponibles en GPS-X.	40
Tabla 9.2: Modos operacionales del modelo MBR.	46
Tabla 9.3: Caudales MBR condición actual.	50
Tabla 9.4: Resultados simulación MBR condición actual.	50
Tabla 9.5: Flujos máxicos MBR condición actual.	50
Tabla 9.6: Resultados simulación efluente condición actual.	51
Tabla 9.7: Resultados simulación lodos condición actual.	52
Tabla 9.8: Flujos máxicos lodo condición actual.	52
Tabla 9.9: Caudales MBR condición futura.	53
Tabla 9.10: Resultados simulación MBR condición futura.	53
Tabla 9.11: Flujos máxicos MBR condición futura.	53
Tabla 9.12: Resultados simulación efluente condición futura.	54
Tabla 9.13: Resultados simulación lodos condición futura.	55
Tabla 9.14: Flujos máxicos lodo condición futura.	55
Tabla 9.15: Métodos utilizados para realizar mediciones de calidad del RIL.	55

1. Introducción

Desde tiempos inmemoriales, el ser humano ha fermentado la uva con la finalidad de conseguir alcohol etílico a modo de disfrutar y festejar con él. Sin embargo, la producción del vino no está exenta de la generación de residuos tanto sólidos como líquidos, los cuales se generan en las distintas etapas del proceso productivo. En Chile, el sector vitivinícola debe cumplir con ciertos requerimientos ambientales para cumplir con la normativa vigente y mantener una posición competitiva en el mercado global. Los crecientes costos asociados han estimulado a buscar estrategias de manejo sustentables, enfocándose en controlar la demanda de agua y mejorando su suministro (Oliveira y Duarte, 2011).

Se conoce que la disposición de RILes vitivinícolas sin tratar es considerado un riesgo ambiental, el que puede causar eutrofización y anoxia en el cuerpo de agua receptor del RIL (van Schoor, 2005).

Además, la generación de aguas residuales de la industria vitivinícola tiene un comportamiento estacional y son generadas principalmente por el resultado de los procesos de limpieza, tales como: lavado de cubas de fermentación, barriles, bodegas, embotellado y purgas del proceso de enfriamiento. Como consecuencia de la estacionalidad del trabajo y las tecnologías disponibles, los volúmenes y cargas de contaminantes varían fuertemente a lo largo del año. Además, cada viña es única en su generación de aguas residuales, con una alta variación, desde 0,8 a 14 litros de RIL por litro de vino producido (van Schoor, 2005; Moletta, 2009).

El tratamiento de RILes vitivinícolas puede ser realizado utilizando diversos procesos biológicos, tanto aeróbicos como anaeróbicos. Considerando la gran estacionalidad que estos poseen, y la alta carga orgánica presente es que se ha considerado el uso de biorreactores de membrana (MBR por sus siglas en inglés) como una opción conveniente para realizar su tratamiento. Entre las ventajas que presenta el uso de MBRs están una rápida puesta en marcha, una gran flexibilidad a soportar cambios significativos en la carga afluente, un efluente de buena calidad, y requiere superficie menor que otros tipos de tratamiento, como por ejemplo lodo activado convencional (Gugliemi et al. 2009; Valderrama et al. 2012).

El presente trabajo de título se enmarca en la necesidad de realizar una ampliación a la planta de tratamiento de RILes de la Bodega Cachapoal (Figura 1-1), propiedad de la Viña Concha y Toro, ubicada en la localidad de Peumo. Esto debido a que la producción de la bodega ha experimentado crecimiento desde su instalación el año 2006, llegando a producir hasta 30 millones de litros de vino al año, sin embargo, su planta de tratamientos no ha aumentado su capacidad desde dicha fecha, lo cual se traduce en un actual subdimensionamiento.



Figura 1-1: Fachada de Bodega Cachapoal.

Actualmente la Viña Concha y Toro posee 14 bodegas productoras de vino, de las cuales 5 poseen una planta de tratamiento para sus RILes, entre ellas destaca la bodega de San Javier, donde se ha realizado una migración desde un sistema de tratamiento de lodo activado a un sistema de MBR, por lo que las experiencias de esta planta son de suma utilidad para la realización de este proyecto.

2. Objetivos

2.1. Objetivo General

El objetivo general del proyecto es formular un modelo de simulación para la migración desde un sistema de tratamiento con lodos activados a un sistema MBR para la planta de tratamiento de RILes de la Bodega Cachapoal.

2.2. Objetivos Específicos

OE1: Determinación del estado del arte de tecnologías de tratamiento de RILes de la industria vitivinícola y biorreactores de membrana (MBR).

OE2: Caracterización del RIL la Bodega San Javier para determinar el fraccionamiento de la DQO del RIL vitivinícola durante época de vendimia.

OE3: Caracterización de RIL de la Bodega Cachapoal durante época de vendimia.

OE4: Construcción del modelo de simulación MBR en bodega Cachapoal mediante software GPS-X.

3. Metodología

Para lograr los objetivos específicos planteados, se desarrollaron las siguientes tareas:

OE1: Determinación del estado del arte de tecnologías de tratamiento de RILes de la industria vitivinícola y biorreactores de membrana MBR.

Tarea 1: Se realiza una revisión bibliográfica acerca de los distintos componentes dentro de los RILes vitivinícolas y sus rangos esperados.

Tarea 2: Se realiza una revisión bibliográfica sobre biorreactores de membranas (MBR) y se estudian sus distintos parámetros operacionales, de modo de realizar un diseño acorde a lo expuesto en la bibliografía.

OE2: Caracterización del RIL la Bodega San Javier para determinar el fraccionamiento de la DQO del RIL vitivinícola durante época de vendimia.

Tarea 3: Se utiliza datos previstos por la empresa para la Bodega de San Javier con mediciones de caudales (Q), y concentraciones de sólidos suspendidos totales (SST), demanda química de oxígeno (DQO), nitrógeno(N) y fósforo(P). Esto se realiza para el afluente, reactor (MBR) y efluente. Posteriormente se calculan los promedios para la época de vendimia, esto es, para los meses de marzo, abril y mayo. Los valores obtenidos son utilizados como *input* para el modelo de calibración que entrega las variables del fraccionamiento de la DQO, las cuales son ingresados en el modelo de simulación de la Bodega Cachapoal.

Las mediciones de concentraciones son realizadas con instrumentos de medición marca Hach, los cuales cumplen con los métodos del Standard Methods. El detalle de los métodos es presentado en el Anexo D.

OE3: Caracterización del RIL de la Bodega Cachapoal durante época de vendimia.

Tarea 4: De igual manera que en la Tarea 3, se utilizan mediciones hechas por la empresa para la Bodega Cachapoal con datos de caudal y concentraciones de SST, DQO, N y P, luego se utilizan los promedios para la época de vendimia, pues es durante estas fechas que los caudales y cargas son mayores. Luego estos datos son ingresados al software GPS-X, además del fraccionamiento obtenido con el modelo de simulación en la Bodega de San Javier.

OE4: Construcción del modelo de simulación MBR en bodega Cachapoal mediante software GPS-X.

Tarea 5: Construcción del modelo de calibración de la planta de tratamiento San Javier.

Se realiza un modelo de calibración utilizando los datos obtenidos en la Tarea 3, la metodología consiste en ingresar al software GPS-X los datos medidos del afluente (Q, DQO, SST, N y P) y los valores de diseño de la planta existente, esto es, volumen del reactor, área de membranas, caudal de aireación tanto del reactor como de la membrana y caudal de purga del lodo. Para el resto de los parámetros cinéticos y estequiométricos se mantienen los valores por defecto del software. Luego se calibran las variables de entrada para el fraccionamiento de la DQO las cuales son:

- DQO inerte soluble (S_i).
- DQO fácilmente biodegradable (S_s).
- DQO particulada inerte (no biodegradable) (X_i).
- DQO lentamente biodegradable (X_s).

La calibración se realiza de manera iterativa de manera de ajustar las variables operacionales que entrega el software con las mediciones que se tienen para sólidos dentro del reactor y DQO y SST en el efluente. Esta calibración se realiza pues no se tienen mediciones del fraccionamiento de la DQO y estas son necesarias para la implementación del modelo de la Bodega Cachapoal, considerando que no se tiene información de estas variables, se suponen como representativas para la Bodega Cachapoal.

Tarea 6: Construcción del modelo de simulación de Bodega Cachapoal.

Una vez calibradas las variables de entrada del afluente a la planta de San Javier se procede a realizar el modelo de simulación de la planta de tratamiento de Bodega Cachapoal.

Para este proceso se contempla realizar 2 modelos distintos, uno capaz de tratar un caudal de 300 m³/día y otro de 400 m³/día. Actualmente el caudal que ingresa a la planta de tratamiento es de 400 m³/día, pero en las instalaciones existen 2 tranques de acumulación, los que sumados totalizan un volumen de 15.000 m³, por lo que es posible acumular el RIL para tratarlo paulatinamente. Es por esto por lo que se requiere saber si es posible tratar un caudal de 300 m³/día con el volumen actual del reactor de lodos activados existente en la planta de tratamiento de la Bodega Cachapoal, esto es, 550 m³. Además, se realiza un modelo contemplando un aumento del volumen del reactor, que sea capaz de tratar los 400 m³/día afluentes a la planta de tratamiento.

Para ambos diseños se ingresan los valores del afluente obtenidos en la Tarea 4 y las variables de entrada obtenidas de la calibración en la Tarea 5. El diseño se realiza tomando como referencia los rangos de variables operacionales encontrados en la literatura durante la revisión bibliográfica, estas variables son el tiempo de retención de sólidos (SRT), la concentración del licor de mezcla en el reactor (SSLM), la presión transmembrana (TMP) y el flujo (J). Además, como recomendación del jefe de gestión de RILes de la Viña Concha y Toro se procura mantener los niveles de oxígeno disuelto dentro del reactor en un mínimo de 1 mg/L.

Además, se realiza un análisis de sensibilidad para ver el comportamiento de la planta modificada frente a variaciones en la calidad y cantidad de RIL afluente. Se considera variar el caudal a tratar, la DQO, sólidos totales y volátiles, nitrógeno y fósforo afluente.

4. Revisión bibliográfica.

4.1. Caracterización de Riles vitivinícolas

Para entender bien la generación de los RILes vitivinícolas, primero se debe conocer el proceso productivo que genera estos RILes, Valderrama (2008) explica la generación de RILes vitivinícolas como sigue.

Durante la época de vendimia, la cual se extiende durante los meses de marzo, abril y mayo para nuestro hemisferio, las uvas son cosechadas, esto puede ser de forma manual o mecanizada. El primer método es el más utilizado debido a que cada racimo es seleccionado y cortado con tijeras, y, además, este presenta como ventajas una mayor adaptabilidad y aumento de empleos estacionales. Posteriormente las uvas recibidas son registradas, indicando la cantidad de uva, estado sanitario, procedencia y variedad para luego ser enviadas a la bodega. Es durante esta primera etapa que se genera el escobajo, primer residuo sólido que deberá ser removido de la maquinaria. En la Figura 4-1 se aprecia el escobajo.



Figura 4-1: Escobajo.

La mayor parte de los residuos líquidos que se generan durante el proceso de producción del vino están asociados a la limpieza de las bodegas, la que debe realizarse antes, durante y después de la vendimia, esta limpieza incluye paredes, suelo y equipos. Además, las cubas deben ser lavadas periódicamente según un procedimiento de lavado que se desarrolla como sigue (Valderrama, 2008):

- Pre-lavado en seco con escobillas removiendo residuos sólidos.
- Pre-enjuague inicial.
- Etapa alcalina con recirculación.
- Enjuague intermedio.
- Desinfección con tiempo de recirculación.

En la Figura 4-2 se muestra un esquema donde se explican los procesos de producción del vino y los residuos generados en cada uno de dichos procesos.

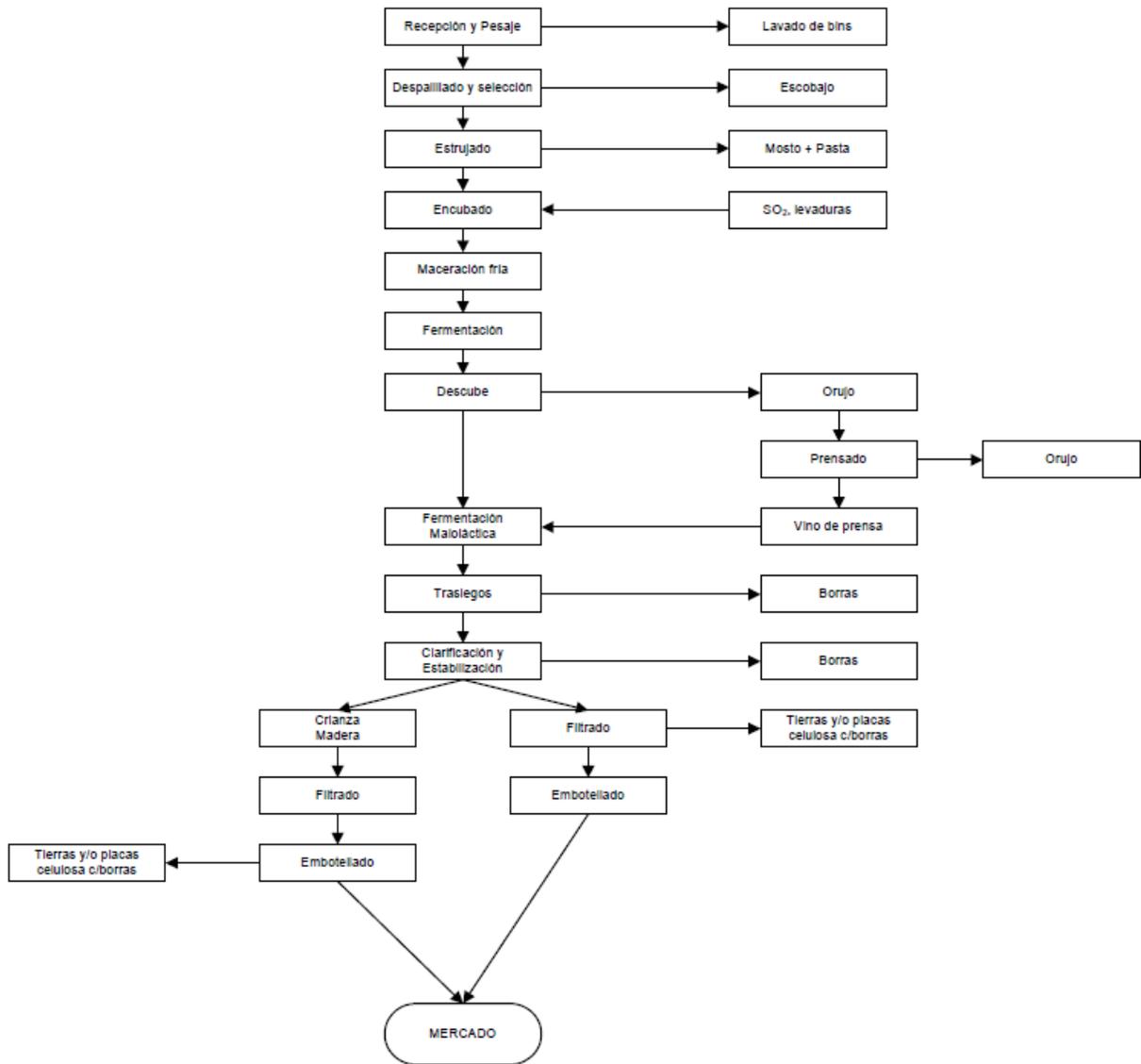


Figura 4-2: Proceso elaboración del vino y generación de RILes.
Fuente: Valderrama (2008).

Es por esto por lo que la generación de RILes provenientes de la industria vitivinícola presenta una gran variabilidad con respecto a las cargas de contaminantes que pueden encontrarse en ellos. Esto se debe a una serie de factores como:

- La estación del año en que se encuentre.
- Las distintas tecnologías que se utilizan en los procesos de limpieza.
- El tipo de vino a producir.
- La tecnología utilizada durante la producción.

Según la estación del año en que se encuentre la viña podrá estar en período de vendimia, que es cuando se cosechan las uvas y se comienza a producir el vino, o no vendimia que es el período más prolongado. Esto influye fuertemente en la calidad del agua a tratar. Durante la época de cosecha las cargas y caudales de contaminantes aumentan con respecto al resto del año. Además, las distintas tecnologías disponibles para la fabricación del vino implican aguas residuales de distintas características. Sumado a esto, existen distintos tipos de vino (blanco, tinto) y distintas cepas (carmenere, pinot, cabernet, merlot, entre otras). A su vez, la calidad del RIL generado depende del operador que realice la limpieza (por ejemplo: un operador puede utilizar más o menos agua para limpiar una cuba de fermentación), por lo que los rangos de valores de los distintos contaminantes pueden variar considerablemente.

Para poder realizar el tratamiento de los RILes producidos por la industria vitivinícola es primordial tener una correcta caracterización de ellos. El RIL producido en las viñas posee una alta carga orgánica, y contiene principalmente azúcares y ácidos orgánicos como acético, tartárico y propanoico. Esto fue expuesto por Mosse et al. (2011) en una revisión sobre las características de los RILes de la industria vitivinícola alrededor del mundo. La Tabla 4.1 muestra un resumen realizado por Lofrano y Meric (2015), donde se presenta las características de los RILes producidos por la industria vitivinícola.

Tabla 4.1: Rango de valores esperados para RILes vitivinícolas.

Parámetro	Unidad	Rangos
pH	-	3,5 - 12,4
Conductividad	mS/cm	3,2 – 3,3
DQO	mg/L	4.650 – 24.500
DBO	mg/L	3.250 – 13.400
COT	mg/L	2.674
TKN	mg/L	1.350
TSS	mg/L	485 – 1.259
TS	mg/L	748 – 21.410
Polifenoles	mg/L	103 - 735
Cu	mg/L	0,5 – 1,63
Ni	mg/L	0,1
Cr	mg/L	0,12
Zn	mg/L	0,14 – 1,47

Fuente: Lofrano y Meric (2015).

Cabe mencionar que estos parámetros son solo referenciales y que, considerando la gran variabilidad en las cargas de los RILes, existen parámetros que pueden encontrarse fuera de estos rangos.

Además, se hace necesario conocer las variables del fraccionamiento de la DQO. Los cuales, como fue mencionado en la metodología, son requeridos para la modelación en el software GPS-X. En la Tabla 4.2 se pueden apreciar los valores obtenidos por Andreottola et al. (2009) y Beck et al. (2005), ambos para época de vendimia. Estos valores son presentados siguiendo las subdivisiones propuestas en el modelo ASM1 por Henze (2007).

Tabla 4.2: Fraccionamiento DQO para época de vendimia.

Variable	Unidad	Andreottola et al. (2009)	Beck et al. (2005)	Promedio
DQO inerte soluble (Si)	% DQO	12,4	1,2	6,8
DQO fácilmente biodegradable (Ss)	% DQO	71,4	85	78,2
DQO particulada inerte (Xi)	% DQO	13,3	5	9,15
DQO lentamente biodegradable (Xs)	% DQO	2,9	9,4	6,15

Fuente: Andreottola et al. (2009).

4.2. Biorreactores de membrana (MBR)

Existen diversos tipos de tratamientos que pueden ser utilizados para tratar las aguas de la industria vitivinícola, en particular, y considerando la alta carga orgánica que estas poseen, los tratamientos biológicos aparecen como una buena alternativa. Dentro de estos existen tratamientos aerobios y anaerobios, y de microorganismos suspendidos y de *biofilm*.

Considerando que en la Bodega de San Javier ya se ha realizado una migración desde un sistema de lodo activado a un sistema MBR, se ha considerado realizar la misma migración en la Bodega Cachapoal para homogeneizar el sistema de tratamientos de la viña. Esto a su vez considerando que la Bodega Cachapoal ya posee un sistema de lodos activados, por lo que la migración a un sistema MBR implica menores costos que la migración hacia otros sistemas.

El concepto de los sistemas MBR consiste en utilizar sistema de lodo activado y una unidad de microfiltración como un solo proceso para el tratamiento de las aguas, reemplazando así, la función de un clarificador secundario.

El uso de biorreactores de membrana es considerado como una opción conveniente para el tratamiento de RILes vitivinícolas (Bolzonella et al., 2010; Artiga et al., 2005; Valderrama et al., 2012). Pues la posibilidad de eliminar el clarificador secundario y operar a concentraciones más altas de licor de mezcla (6.000 a 12.000 mg/L) presenta varias ventajas por sobre otros métodos de tratamiento de RILes, entre las que se cuenta las siguientes ventajas: incluyen una gran flexibilidad con respecto a las cargas afluentes que

es posible tratar, una reducida huella ecológica, una reducción de la producción de lodos debido a un aumento en el tiempo de retención de sólidos, una rápida puesta en marcha, un sistema compacto con una mejor remoción de sólidos y desinfección (Valderrama et al., 2012; Lofrano, 2014; Metcalf & Eddy, 2003).

Si bien los sistemas MBR son capaces de operar bajo *shocks* de cargas, se sugiere operar a un flujo constante y no menor al recomendado por el fabricante, con la finalidad de no promover el fouling. (Yoon, 2016)

A su vez, los sistemas MBR también presentan desventajas como son los altos costos de inversión y altos costos de operación, estos últimos asociados principalmente a los requerimientos energéticos de los aireadores, tanto de la membrana como del reactor. A su vez, existe cierta incertidumbre sobre la vida útil de las membranas, pues las distintas cargas afluentes al sistema de tratamiento, la frecuencia de limpiezas y la correcta o incorrecta operación del sistema puede afectar la duración de las membranas.

Además, los procesos de MBR, al igual que los lodos activados, pueden ser configurados de distintas formas, dependiendo de los requerimientos y condiciones del proyecto. Zonas anóxicas antes o después del tratamiento aeróbico pueden ser utilizadas para producir desnitrificación. Zonas anaerobias pueden ser utilizadas para mejorar la remoción biológica del fósforo.

4.2.1. Diseño en MBR

Como fue mencionado anteriormente, una unidad de procesos MBR, consiste en un reactor de lodos activados más una unidad de filtración, es por esto por lo que los principales parámetros de diseño de un MBR están asociados a la unidad de lodos activados.

Existen formas analíticas con factores empíricos para el diseño, como lo son rutinas en un software como MATLAB o planillas en Excel, sin embargo, se escoge utilizar un modelo de simulación mediante un software especializado en el tratamiento de aguas para la realización de este trabajo. Este apartado tiene como finalidad presentar los valores de las variables operacionales más comunes encontradas en la literatura.

Para el diseño de la parte biológica de una planta MBR, las variables más relevantes a la hora de dimensionar el reactor de lodos activados son:

- Caudal (Q).
- Carga másica (CM).
- Edad del lodo (SRT).

- Concentración de sólidos en el reactor (MLSS).
- Presión Transmembrana (TMP).
- Área de filtración (A).
- Caudal de aireación, tanto para el reactor como la membrana.

En la Tabla 4.3 se muestran valores encontrados en la literatura para las principales variables de diseño y operación de las plantas con tecnología MBR, estos son valores utilizados en distintas plantas de tratamiento, pero no necesariamente son valores óptimos de funcionamiento. Según Iglesias (2014), valores habituales para la edad del lodo son de entre 8 y 20 días para MBR de Fibra hueca y entre 21 y 31 para MBR de Placa plana. A su vez, Judd (2006) sugiere valores de concentración de lodo en el reactor de entre 8 y 12 kg/m³.

Para el caso de la edad del lodo, esta corresponde al tiempo de permanencia medio de la biomasa en el reactor, numéricamente se expresa como la relación entre la masa de sólidos volátiles en suspensión y la producción de lodos en exceso, esta última en el caso de régimen permanente es igual a la masa de sólidos purgados. La edad del lodo es de suma importancia, pues está directamente relacionada con la producción de lodos y, además, tiene estrecha relación con el *fouling* de la membrana, según estudios realizado por Yoon (2016) y Grelier et al. (2005), a mayor edad del lodo menor será el potencial de *fouling* sobre la membrana. Sin embargo, a mayor edad del lodo, mayores serán los costos operacionales (Yoon, 2016), por lo que se debe encontrar un equilibrio que permita disminuir el *fouling* sin aumentar demasiado los costos operacionales.

Tabla 4.3: Parámetros operacionales para distintas plantas de tratamiento MBR.

Variable	Unidad	Valor(es)	Referencia
SRT	d	8-30; 15-40; 10-30	Iglesias (2014); Grelier et al. (2005); Yoon (2016)
SSLM	kg/m ³	8-12	Judd (2006)
TMP	bar	0,1-0,3	Iglesias (2014), Artiga et al.(2005)
Flujo	LMH	14-28	Iglesias (2014)
SADm	Nm ³ /(m ² h)	0,53-0,63 ; 0,3-0,7	Iglesias (2014), Judd (2006)

Además, existen básicamente tres elementos principales que contribuyen a los costos operacionales de un MBR, sin contar el reemplazo propio de las membranas, estos son:

- Bombeo del líquido.
- Mantenimiento de la membrana.
- Aireación.
- Generación y gestión del lodo.

De estos el más relevante es la aireación, especialmente para configuraciones de MBR inmersas. Esto pues la aireación debe realizarse tanto dentro del reactor para mantener condiciones óptimas para la generación de la biomasa como en la membrana misma para evitar el *fouling*.

El diseño de un MBR requiere conocer la calidad del afluente a tratar, el cual determinará la demanda de oxígeno del reactor, y la demanda de aireación para el control del *fouling* en la membrana.

4.3 Modelación en GPS-X

GPS-X es un software de la empresa Hydromantis, el cual es utilizado en la modelación de plantas de tratamiento de aguas residuales, tanto domesticas como industriales (Phillips et al. 2009).

Este software posee una serie de modelos biológicos disponibles para realizar la modelación de la planta de tratamiento, estas se muestran en el Anexo A, donde se indica la cantidad de variables de estado que cada una utiliza y algunas variables definibles por el usuario, las primeras se refieren a las variables básicas que se irán integrando en el tiempo, (como lo son oxígeno disuelto, nitratos, amoniacos, substratos solubles y particulados, etc.), estas variables son calculadas para cada punto de conexión en el diseño de la planta.

Además, existen las variables compuestas, las cuales son calculadas a partir de las primeras con el uso de ciertos coeficientes estequiométricos, los cuales describen las relaciones entre variables y dependen del tipo de librería a utilizar. En este caso la librería a utilizar será MANTIS2.

El modelo MANTIS2 en GPS-X es un modelo bioquímico integral, el que permite analizar diferentes configuraciones para el tratamiento de aguas residuales y remoción de DBO, nitrógeno y fosforo, principalmente. El modelo utiliza un set de 48 variables de estado (21 solubles y 27 particuladas) y 56 reacciones biológicas, químicas y físicas. Ecuaciones algebraicas para estimar el pH y la alcalinidad son implementadas en el modelo. (Hydromantis)

Este modelo, está basado en el modelo ASM2d de la IWAPRC, particularmente lo que respecta al modelo biológico del objeto MBR. Los esquemas con las ecuaciones que rigen este modelo son presentados en el Anexo A.

Además, el software GPS-X contiene 2 objetos (representaciones simbólicas de una unidad de procesos) de MBR, los que son *Plug-Flow* y *Completely-Mixed* (Flujo pistón y Mezcla completa, respectivamente), estos se presentan en la Figura 4-3 con sus puntos de conexión con el resto de la planta. Estos consisten en una combinación entre un módulo de lodo activado y un filtro de separación de sólidos. La principal diferencia es el

tipo de mezcla que se logra dentro del reactor, en el flujo pistón se puede definir la cantidad de reactores, donde cada uno tendrá concentraciones de operación distintas, mientras que en mezcla completa se considera todo como un solo reactor.

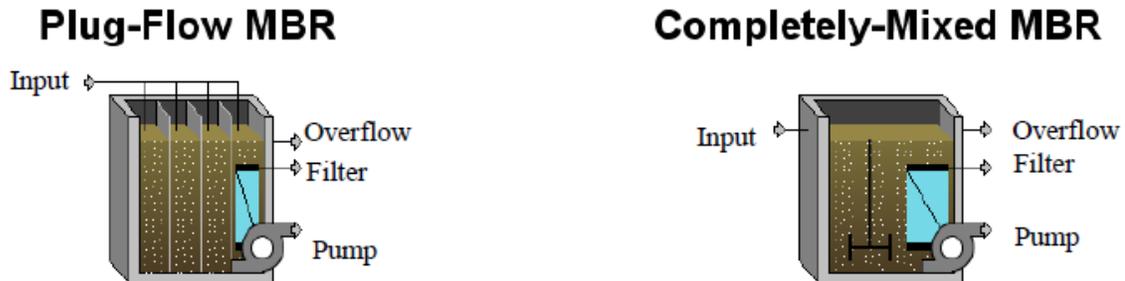


Figura 4-3: Objetos de MBR en GPS-X. Fuente: GPS-X Technical Reference (2017).

Ambos objetos tienen tres modos distintos de operación: Modo Simple, Intermedio y Avanzado. El modo simple asume que el filtro es correctamente operado y que las limpiezas periódicas lo mantienen “como nuevo”, esto implica que se mantiene el flujo y no considera los efectos de la presión transmembrana (TMP), la formación de la torta en las paredes de la membrana, *fouling*, retrolavado ni resistencia de la membrana. El modo intermedio calcula la TMP, incluye la formación de la torta, *fouling*, retrolavados y la resistencia de la membrana en base a la frecuencia de limpieza. Finalmente, el modo avanzado calcula todo lo que calcula el modo intermedio y, además, calcula el volumen de líquido que hay dentro del reactor y puede aumentar o disminuir según el flujo permeado. En el Anexo A se muestran las principales diferencias entre los tres modos.

Como fue mencionado anteriormente, una de las principales tareas que se debe realizar es la correcta caracterización del RIL, en particular del fraccionamiento de la DQO. Para ello GPS-X dispone de una herramienta llamada “*Influent Advisor*”, el cual permite definir cada parámetro del RIL, como lo son nitrógeno, fósforo y sólidos, entre otros. Y a partir de estos valores calcula otros parámetros del RIL. En la Figura 4-4 se muestra una parte de esta herramienta.

User Inputs			
Influent Composition			
cod	total COD	gCOD/m3	5320.0
tkn	total TKN	gN/m3	70.0
tp	total phosphorus	gP/m3	20.0
Nitrogen Compounds			
snh	ammonia nitrogen	gN/m3	10.0
snoi	nitrite	gN/m3	3.9
snoa	nitrate	gN/m3	0.2
Phosphorus Compounds			
sp	ortho-phosphate	gP/m3	1.0
xpp	stored poly-phosphate in PAO	gP/m3	0.0
Influent Fractions			
ivsstotss	VSS/TSS ratio	gVSS/gTSS	0.8
Organic Fractions			
frsi	soluble inert fraction of total COD	-	0.07
frss	readily biodegradable fraction of total COD	-	0.65
frxi	particulate inert fraction of total COD	-	0.04
frscol	colloidal fraction of slowly biodegradable C...	-	0.06
Nitrogen Fractions			
frsnh	ammonium fraction of soluble TKN	-	0.8
insi	N content of soluble inert material	gN/gCOD	0.0
inxi	N content of inert particulate material	gN/gCOD	0.0
Phosphorus Fractions			
ipsi	P content of soluble inert material	gP/gCOD	0.0

Figura 4-4: Influent Advisor en GPS-X.

5. Modelo de simulación para el Mejoramiento del Tratamiento de RILes en la Bodega Cachapoal

5.1. Modelo de calibración: Bodega San Javier

Considerando que en la Bodega de San Javier ya se realizó una migración desde un sistema de lodos activados a un sistema de membranas MBR, la experiencia de esta bodega es de suma utilidad para la construcción del modelo de Cachapoal. En este caso se supondrá que la generación de los RILes en San Javier es equivalente a la que se genera en Cachapoal, este es un supuesto fuerte, pero es la manera que se tiene de caracterizar el RIL sin realizar más mediciones que las que ya se tienen del RIL de Cachapoal.

Para realizar el modelo de simulación se utilizan los parámetros de diseño físicos de la planta San Javier, principalmente el volumen del reactor y la aireación. Este modelo utiliza como *input* los datos medidos del afluente a la planta, y se calibran iterativamente los parámetros de fraccionamiento de la DQO en el RIL, hasta llegar a los valores medidos para la concentración dentro del reactor y el efluente de dicha planta.

5.1.1. Caracterización Afluente y Efluente

Se recopiló los valores medidos por la empresa para los años 2017 y 2018, con ellos se calcularon los promedios y desviaciones estándar. Estos valores fueron medidos siguiendo los métodos del Standard Methods.

Los valores obtenidos para el afluente de la bodega de San Javier se muestran en las Figura 5-1 Figura 5-2, donde el periodo comprendido entre las barras rojas verticales representa la época de vendimia, en estas se puede apreciar como las cargas aumentan para esta época.

A su vez en la Tabla 5.1 se presentan los valores promedios y desviación estándar para el afluente y efluente, tanto para vendimia como para el resto del año. Cabe mencionar que los datos ingresados al software corresponden a la época de vendimia, pues esta es la más restrictiva.

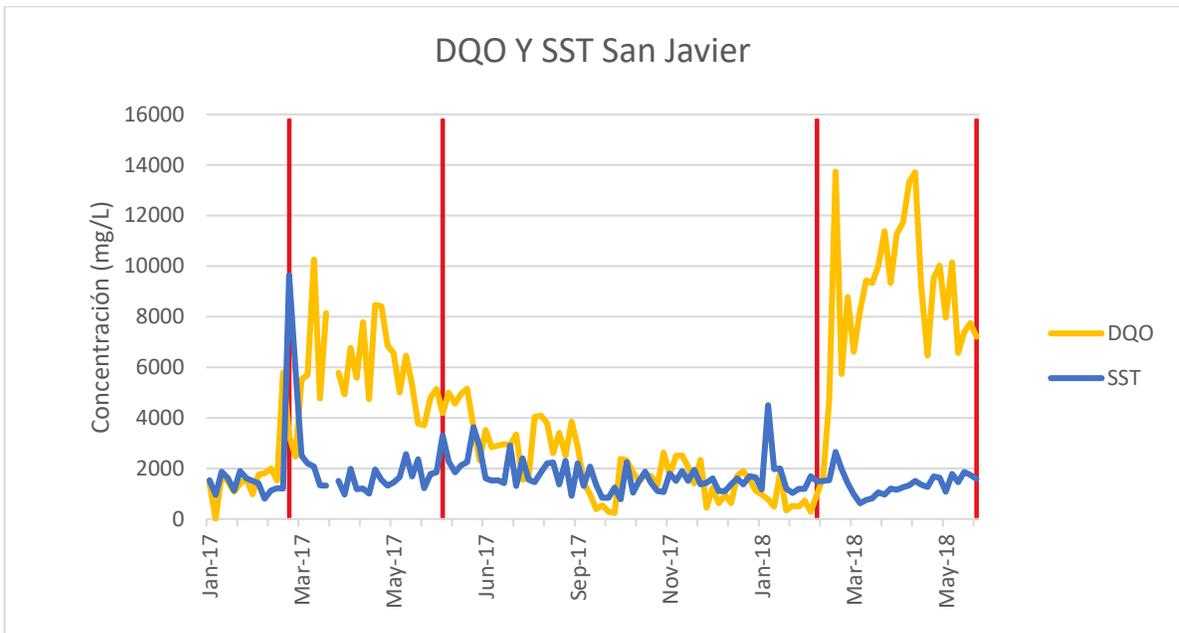


Figura 5-1: Gráfico DQO y SST para Bodega San Javier

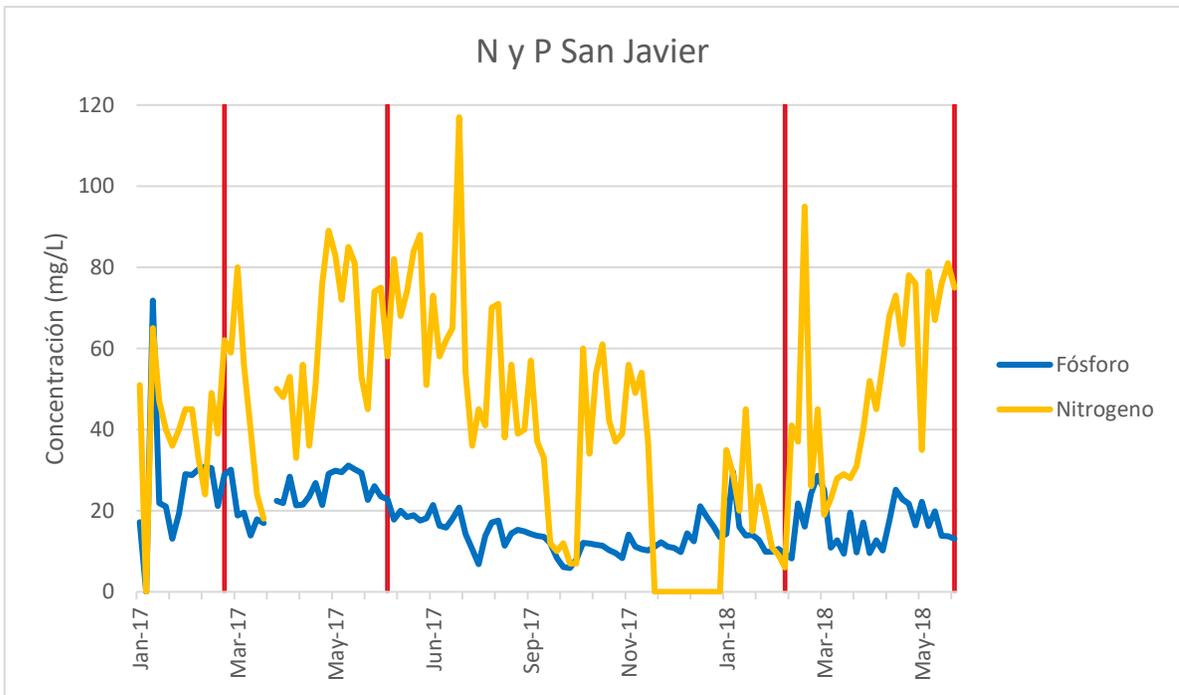


Figura 5-2: Nitrógeno y Fósforo para Bodega San Javier.

Tabla 5.1: Caracterización del RIL bodega San Javier.

	Parámetro	Anual			Vendimia		
		Promedio	Desv. est	N Muestra	Promedio	Desv. est	N Muestra
Afluente	DQO (mg/l)	4.210,1	3.354,8	124	7.295,7	2.990,9	49
	SST (mg/l)	1.697,2	998,9	125	1.763,8	1.389,0	49
	N (mg/l)	59,7	27,1	113	64,7	26,6	49
	P (mg/l)	53,5	20,4	124	63,1	20,6	49
Reactor	SST (mg/l)	7.252,2	2.500,2	126	9.078,6	2.177,3	50
Efluente	DQO (mg/l)	87,3	76,4	125	107,6	111,8	50
	SST (mg/l)	63,6	28,0	126	70,6	29,1	50
	N (mg/l)	28,6	27,6	114	28,0	33,8	50
	P (mg/l)	34,5	18,6	125	37,4	20,2	50

Además, se debe realizar la caracterización completa según los datos que requiere el *Influent Advisor*, estos valores se presentan en el Anexo B. Es en función de estos datos que se estimará un valor representativo del RIL, el que se ingresa como afluente al modelo a implementar para la Bodega Cachapoal.

5.1.2. Características de la planta

A continuación, en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se muestra el diagrama de flujo de la planta de San Javier. En ella se puede apreciar como el RIL crudo entra por un tornillo sin fin, para luego pasar por 2 filtros parabólicos de 1mm, luego el RIL es acumulado en 2 tranques aireados, posteriormente pasa a un equalizador desde donde se lleva hacia los reactores, desde el reactor el RIL se hace circular por las membranas, lugar donde sale el efluente. Además, se considera una línea de lodo que es extraída desde el reactor hacia el digester y su posterior deshidratación.

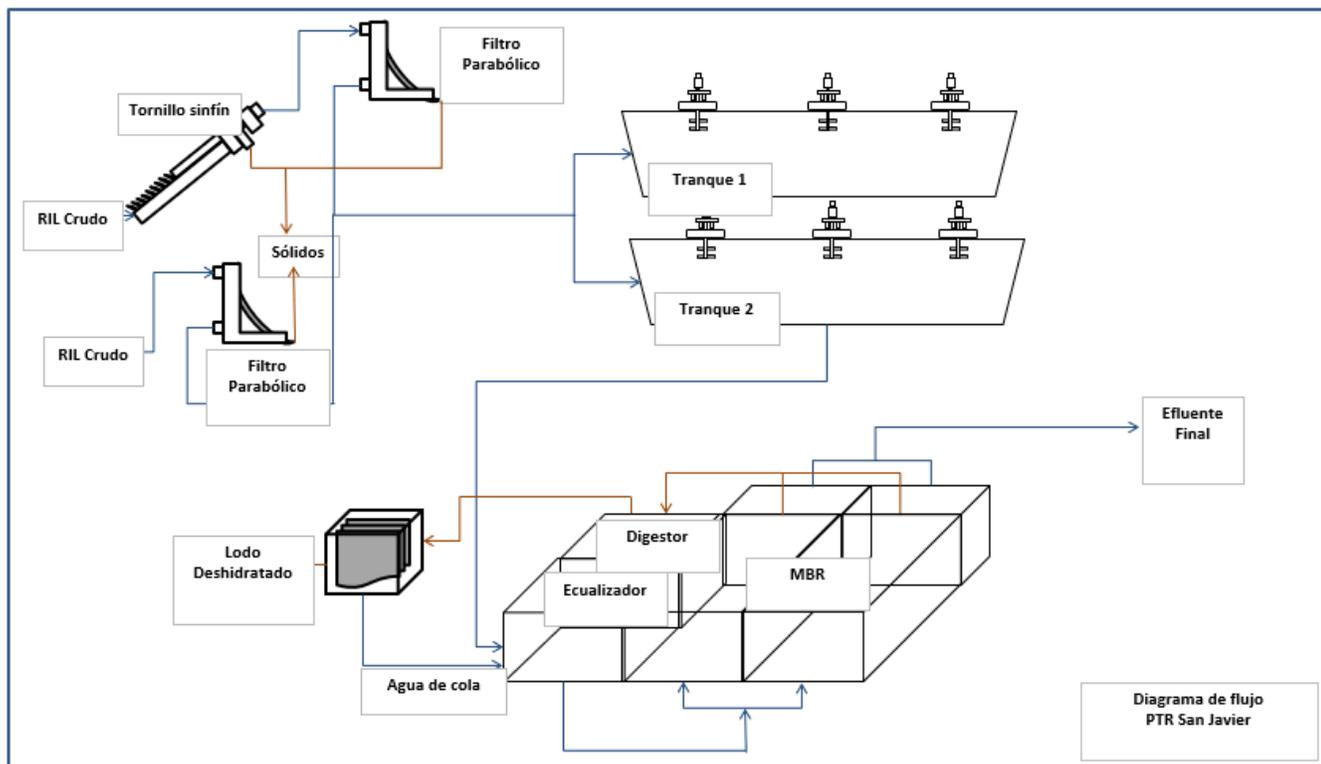


Figura 5-3: Diagrama de Flujo planta San Javier.

Luego, en la Figura 5-4 se presenta el esquema utilizado en el software GPS-X para representar la planta de tratamiento. Este consta de un ecualizador, 2 MBR, 2 objetos que permiten agregar nitrógeno y fósforo al afluente, esto con la finalidad de mantener una razón DQO:N:P apropiada para el crecimiento de la biomasa, el mandante sugiere que esta razón sea 100:5:1, respectivamente, sin embargo en la práctica se ha observado que hasta una razón 100:3:0,75 podría ser apropiada.

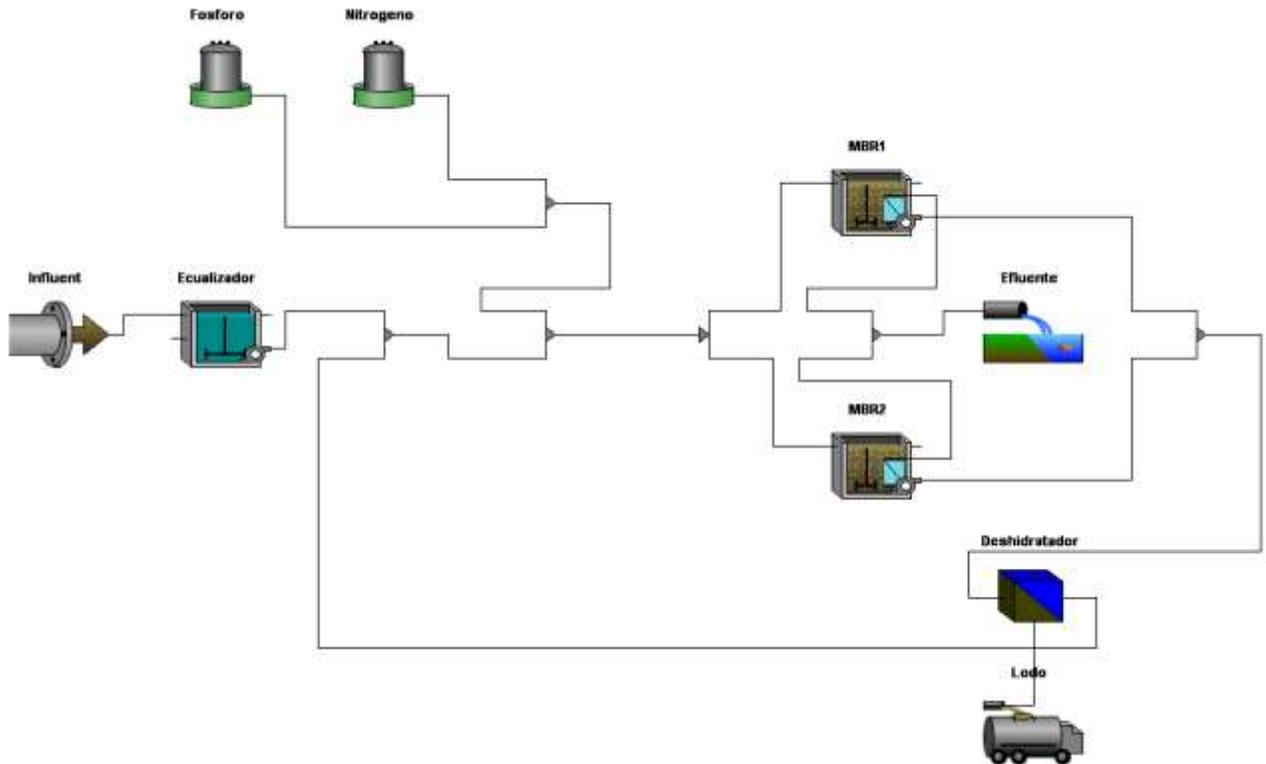


Figura 5-4: Modelo de calibración planta de San Javier en software GPS-X.

Las variables físicas y operacionales de la membrana y el reactor se presentan en la Tabla 5.2. Estos valores contemplan solo 1 línea de tratamiento, es decir, el volumen total de la planta de tratamiento es el doble del mencionado en la tabla. El resto de las variables que utiliza el software para MBR se mantienen por defecto. Para el caso del ecualizador, este trabaja en un modo *no-react*, es decir, solo se utiliza como *buffer* para amainar los *peaks* de caudal. Cabe mencionar que esta planta ya existe, por lo que todos estos valores vienen predefinidos.

Tabla 5.2: Parámetros de diseño para planta de San Javier ingresados al software GPS-X.

Parámetro	Unidad	Valor
Caudal de diseño	m ³ /d	200
Volumen Reactor	m ³	550
Superficie Membrana	m ²	1.200
Aireación Membrana	m ³ /min	12
Aireación Reactor	m ³ /h	2.100
Caudal de Purga	m ³ /d	39
Edad del Lodo	d	14,1
Flujo	LMH	6,9
Concentración en Reactor	g SSLM/ m ³	9

Para el desarrollo del modelo de calibración se ingresaron al software los valores expuestos para el afluente de la Tabla 5.1 y los parámetros de diseño de la planta de la Tabla 5.2 y se calibró iterativamente las variables del fraccionamiento de la DQO, hasta que los valores entregados por el software para la concentración del licor de mezcla dentro del reactor (MLSS) y para el efluente se ajustaran a los valores medidos.

Finalmente, en la Tabla 5.3 se muestran los valores obtenidos mediante el modelo de calibración para el fraccionamiento de la DQO, además, se muestran los valores referenciales obtenidos por Andreottola et al. (2009) y Beck et al. (2005) para época de vendimia. Considerando que la generación de RILes vitivinícolas depende de una gran cantidad de variables, las que fueron expuestas durante la revisión bibliográfica, es que se da esta diferencia, donde solo la fracción inerte soluble de la DQO se encuentra dentro del rango que expresan Andreottola et al. (2009) y Beck et al. (2005).

Tabla 5.3: Fraccionamiento DQO para planta de San Javier

Variable	Unidad	Adoptado	Andreottola et al. (2009)	Beck et al. (2005)
DQO inerte soluble (Si)	% DQO	1,5	12,4	1,2
DQO fácilmente biodegradable (Ss)	% DQO	65	71,4	85
DQO particulada inerte (Xi)	% DQO	0,1	13,3	5
DQO lentamente biodegradable (Xs)	% DQO	1	2,9	9,4

5.2. Modelo de simulación Bodega Cachapoal

Como fue mencionado anteriormente, la Bodega Cachapoal actualmente posee un sistema de tratamiento mediante lodos activados, es por esto por lo que una migración hacia un sistema MBR se presenta como una buena alternativa. En la Figura 5-5 se muestra el reactor de lodos activados que actualmente funciona en la planta.



Figura 5-5: Reactor de lodos activados de Bodega Cachapoal.

Para el desarrollo del modelo se proponen dos escenarios de modelación, la primera considerando las condiciones actuales de la planta, esto es, el volumen actual del reactor de lodos activados y una condición futura optimizada la que contempla un aumento del volumen en el reactor. Para ambos casos la calidad del afluente es la misma, sin embargo, para el caso de la condición actual, el caudal disminuye en un 25%. Esto es posible realizarlo ya que existen dos tranques de acumulación, los que en conjunto poseen un volumen de 15.000 m³. En la Figura 5-6 se pueden apreciar estos tranques llenos de RIL.



Figura 5-6: Tranques de acumulación de RIL en Bodega Cachapoal.

5.2.1. Caracterización Afluente

A continuación, en las Figura 5-7 y Figura 5-8 se presentan los valores de DQO y SST y Nitrógeno y Fósforo, respectivamente, obtenidos para la Bodega Cachapoal, donde el periodo comprendido entre las barras verticales rojas representa la época de vendimia, en estas figuras se puede notar, principalmente para la DQO, como se generan los *peaks* entre marzo y mayo, como es de esperarse, ya que es en esta época donde se produce la cosecha de uva.

A su vez, en la Tabla 5.4 se muestran los valores promedios y desviación estándar para el afluente y efluente, tanto para vendimia como para no vendimia por la viña para el afluente a la planta de tratamiento de la bodega de Cachapoal. Estos valores fueron medidos con la misma metodología que se expone en dicho apartado.

Con respecto a los gráficos, es posible observar que los valores máximos para la DQO para los años 2017 y 2018 son 8680 y 12800 mg/L, respectivamente, y estos son medidos

al comienzo del mes de mayo, momento en que la bodega está a su máxima producción, a su vez notar que durante el mes de marzo se aprecia un aumento paulatino de la carga, pues es cuando se comienza a cosechar, esto a su vez explica la alta desviación estándar que poseen los datos, incluso para un periodo de tiempo acotado como es la vendimia.

Con respecto a los sólidos totales no se aprecia una gran variación durante el año, esto podría ser atribuible a la presencia de filtros previo a la toma de mediciones.

Figura 5-8

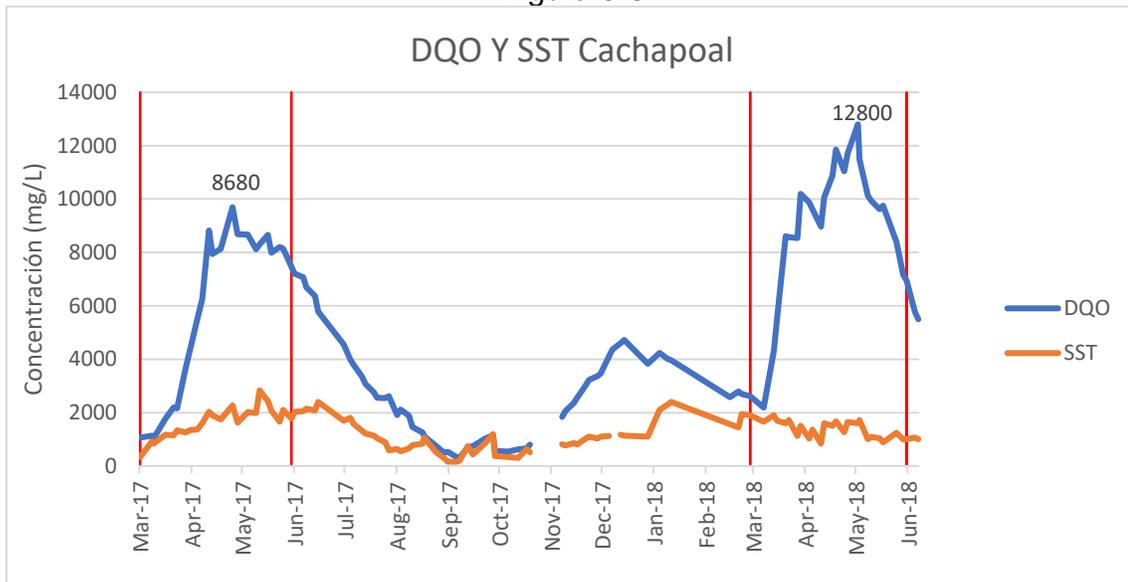


Figura 5-7: DQO y SST para Bodega Cachapoal.

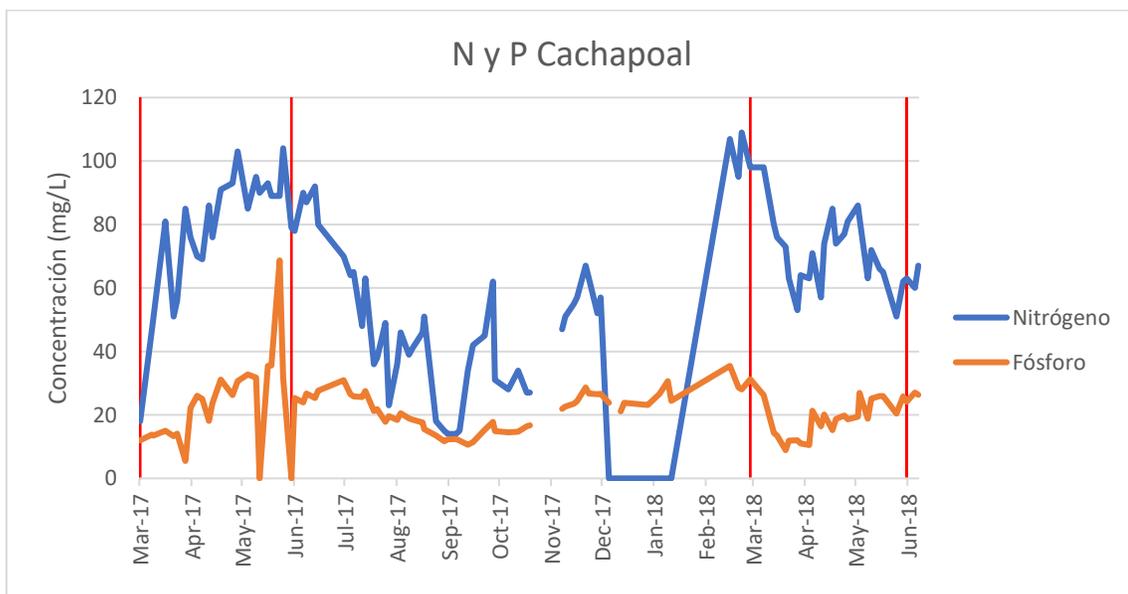


Figura 5-8: Nitrógeno y Fósforo para Bodega Cachapoal.

Tabla 5.4: Calidad afluente a la planta de tratamiento de la Bodega Cachapoal.

Parámetro	Anual			Vendimia		
	Promedio	Desv. est	N Muestra	Promedio	Desv. est	N Muestra
DQO (mg/l)	5.002,0	3.459,8	103	7.578,9	3.150,5	47
SST (mg/l)	1.289,2	587,7	102	1.500,0	475,5	47
N (mg/l)	63,3	23,7	95	74,0	16,7	47
P (mg/l)	65,5	20,7	101	63,9	23,2	46

5.2.2. Bases de Diseño

Para la realización del modelo de simulación de la Bodega Cachapoal se considera las mediciones tomadas en el afluente, pero se supone un 30% de remoción de DQO y SST por efecto del tranque de acumulación, este porcentaje de remoción es manejado por los operadores de la planta, por lo que las cargas de diseño quedan como se muestra en la Tabla 5.5. Además, el detalle del afluente ingresado al “*Influent Advisor*” se presenta en el Anexo B. Los valores de nitrógeno y fósforo presentan diferencias entre las mediciones y los valores de diseño, estos fueron modificados pues se considera que los datos obtenidos en las mediciones son demasiado altos, sin embargo, dado que el modelo posee dos objetos que agregan nutrientes, en este caso nitrógeno y fósforo, los valores del afluente no afectan mayormente los resultados.

Tabla 5.5: Afluente de diseño para Bodega Cachapoal.

Parámetro	Valor diseño
DQO (mg/l)	5.320
SST (mg/l)	1.050
N (mg/l)	70
P (mg/l)	20

Para el fraccionamiento de la DQO se toma como base el modelo calibrado de San Javier, y se supone que estas serán representativas del RIL generado en la Bodega Cachapoal, esto se realiza pues no se tiene información suficiente para realizar una caracterización del RIL propio de Cachapoal, en la Tabla 5.6 se muestran los valores adoptados.

Tabla 5.6: Fraccionamiento de la DQO adoptado para la Bodega Cachapoal.

Parámetro	Unidad	Adoptado
DQO inerte soluble (Si)	% DQO	1,5
DQO fácilmente biodegradable (Ss)	% DQO	65
DQO particulada inerte (Xi)	% DQO	0,1
DQO lentamente biodegradable (Xs)	% DQO	1

Como fue mencionado, el diseño contempla la propuesta de 2 escenarios de modelación.

El primer escenario que se presenta es para la condición actual, como fue mencionado anteriormente, se toma en cuenta la gran capacidad de amortiguar *peaks* que existe en la planta por efecto de 2 tranques de acumulación que en total suman 15.000 m³, por lo que es posible disminuir el caudal de diseño de 400 a 300 m³/día. Realizando un cálculo rápido, suponiendo que se debe acumular esta diferencia de 100 m³/día durante 2 meses, se tendrá un volumen de 6000 m³, el cual puede ser perfectamente almacenado en uno de los 2 tranques. Luego, se tiene la condición futura, en la que todo el RIL producido debe ser tratado por la planta de tratamiento, sin considerar un almacenamiento en los tranques. Los parámetros de diseño y operación se muestran en la Tabla 5.7.

Tabla 5.7: Parámetros de diseño y operación planta MBR Cachapoal situación actual.

Parámetro	Unidad	Cond. Actual	Cond. Futura	Rangos Literatura	Referencia
Caudal de diseño	m ³ /d	300	400	-	-
Volumen Reactor	m ³	550	750	-	-
Superficie Membrana	m ²	550	800	-	-
Aireación Membrana	m ³ /h	320	500	-	-
Aireación Reactor	m ³ /h	1.400	1.900	-	-
Caudal de Purga	m ³ /d	32	43	-	-
Edad del Lodo	d	17,2	17,4	8-30 ; 15-40; 10-30	Iglesias (2014); Grelier et al. (2005); Yoon (2016)
HRT	d	1,8	1,9	1,8	Artiga et al. (2005, 2007)
Flujo	LMH	22,7	20,83	14-28	Iglesias (2014)
Concentración en Reactor	g SSLM/m ³	11	11	8-12	Judd (2006); Yoon (2016)

Para la realización del diseño se fijó una concentración en el reactor de 11 g/L, el cual se encuentra dentro de los rangos operacionales encontrados en la literatura, y se fue modificando iterativamente el caudal de purga, la aireación del reactor y el caudal de aplicación de nutrientes (N y P) hasta que se obtiene esta concentración para el régimen permanente.

Con todo esto es posible calcular la edad del lodo como la razón entre la masa de sólidos presente en el reactor y la producción de lodos en exceso, esta última, para régimen permanente, corresponde al caudal de purga, y dado que las concentraciones en el reactor y en la purga son las mismas, finalmente la edad del lodo se calcula como la razón entre el volumen efectivo del reactor en m^3 y el caudal purgado en $m^3/día$.

Los valores presentados están en concordancia con los valores encontrados en la literatura presentados en la Tabla 4.3. Cabe mencionar que los valores del volumen de reactor deben ser efectivos, es decir, debe considerar el volumen desplazado por las membranas. Además, se considera que para la aireación en el reactor se debe utilizar burbujas finas, pues esto permite que haya una mayor superficie de contacto en la interfaz agua-aire, lo que permite una mejor transferencia de oxígeno al líquido. El caudal de aireación para el reactor se calcula para mantener una concentración de oxígeno disuelto mínima de 1 mg/L, esta condición es sugerida por los operadores y la literatura (Yoon, 2015), con la finalidad de estar preparados para un posible *peak* de DQO, el cual podría llevar al reactor a condiciones anóxicas. Finalmente, para la aireación en la membrana éstas deben ser burbujas de mayor tamaño, pues esto promueve la turbulencia y mejora la limpieza de las membranas (Judd, 2006). Además, cabe mencionar que la presión transmembrana no es posible calcularla, ya que se trabaja el módulo MBR en el modo simple y para un estado estacionario.

5.2.3. Diagrama de procesos propuesto

Para el diseño de la planta de tratamiento de la Bodega Cachapoal se utiliza como base el diseño realizado en San Javier, pero esto considerando las condiciones y limitaciones de la Bodega Cachapoal. En la Figura 5-9 se muestra el diagrama de flujo propuesto, mientras que en la Figura 5-10 se muestra el modelo utilizado en el software GPS-X. Este diseño es común a los 2 escenarios que se presentan en el apartado anterior.

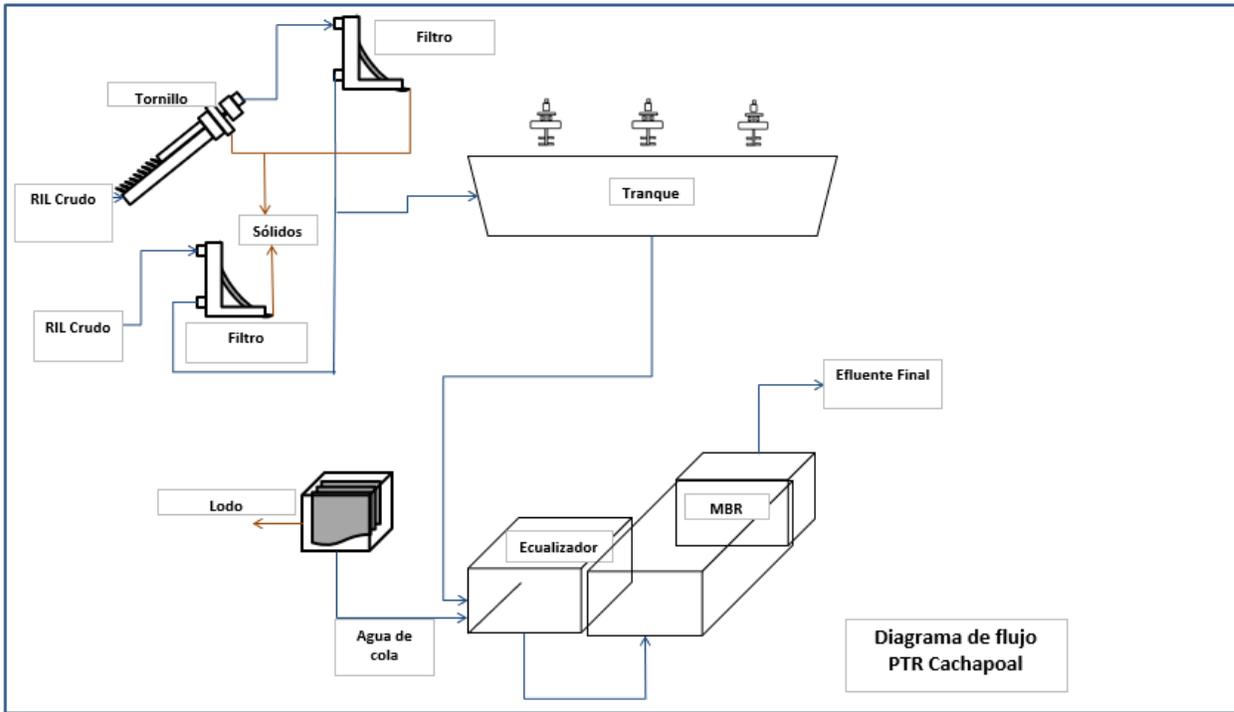


Figura 5-9: Diagrama de flujo propuesto para la Bodega Cachapoal.

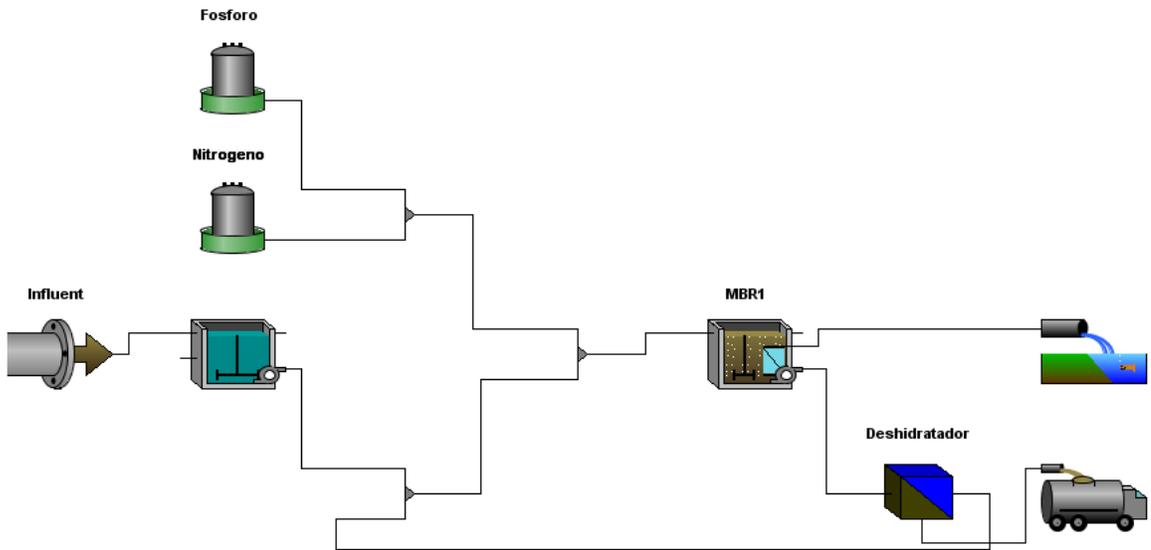


Figura 5-10: Modelo de simulación de la Bodega Cachapoal en GPS-X.

6. Resultados simulación

En esta sección se presentan los resultados obtenidos con el software GPS-X para la modelación de ambos escenarios para la planta de tratamiento de la Bodega Cachapoal. En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se muestran las variables operacionales más relevantes de los procesos para la condición actual, mientras que en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se muestran las mismas variables para la condición futura, así como también en ambas tablas se presenta, en la última columna, la normativa que deben cumplir las descargas, en este caso la Tabla 1 del DS90.

Las tablas completas de resultados se presentan en el Anexo C.

Cabe mencionar que los sólidos suspendidos totales que modela el software son mayores que los medidos por la viña, esto se debe a que el software calcula la cantidad de sólidos a partir de la DQO y del fraccionamiento de esta misma, obtenido mediante el modelo de calibración. Sin embargo, esto no debiese afectar mayormente los resultados.

Finalmente, se presenta un pequeño análisis de sensibilidad para probar el desempeño de la planta de tratamiento al modificar la edad del lodo y otro escenario en que se modifica la carga afluente.

Tabla 6.1: Resultados simulación en software GPS-X para condición actual.

Proceso / Parámetro	Afluente	MBR	Lodos	Efluente	DS90 Tabla 1
Caudal (m ³ /d)	300,0	331,4	1,6	299,4	-
SST (mg/L)	1.312,6	11.160,8	218.333	1,1	80,0
SSV (mg/L)	1.050,1	7243,8	141.706	0,7	-
cDBO (mg/L)	3.512,4	-	76.828	2,5	35*
DQO (mg/L)	5.320,0	91,3	211.251	83,5	-
TN (mg/L)	74,1	-	14.075	1,4	50
TP (mg/L)	20,0	-	9.074	4,5	10,0
DO (mg/L)	-	1,0	-	-	-
pH	7,0	7,0	7,0	7,0	6-8,5

(*) La DS90 considera DBO5 no solo la DBO carbonácea.

Tabla 6.2: Resultados simulación en software GPS-X para condición futura.

Proceso / Parámetro	Afluente	MBR	Lodos	Efluente	DS90 Tabla 1
Caudal (m ³ /d)	400,0	442,5	1,9	399,5	-
SST (mg/L)	1.312,6	11.200,5	246.667	1,1	80,0
SSV (mg/L)	1.050,1	7.101,3	156.392	0,7	-
cDBO (mg/L)	3.512,4	-	83.376	2,6	35*
DQO (mg/L)	5.320,0	91,4	233.125	83,6	-
TN (mg/L)	74,1		15.538	1,4	50
TP (mg/L)	20,0		11.613	0,3	10,0
DO (mg/L)	-	1,0	-	-	-
pH	7,0	7,0	7,0	7,0	6-8,5

(*) La DS90 considera DBO5 no solo la DBO carbonácea.

Además, se contempla una producción de lodos de 340 y 459,4 kg/día para la condición actual y futura, respectivamente. Para la deshidratación de los lodos se considera seguir utilizando la prensa que existe actualmente en la planta.

6.1. Análisis de sensibilidad

Se realiza un análisis de sensibilidad para ver el comportamiento del modelo ante ciertas variaciones en las variables operacionales originales. En este caso se tomará como diseño base el modelo de la situación actual, es decir, un reactor de 550 m³, para tratar un caudal de 300 m³/d. En este caso se variará la edad del lodo desde los 17,2 días originales a 10 y 30 días, para ver el comportamiento del modelo ante estos escenarios.

En las Tabla 6.3 y Tabla 6.4 se presentan los resultados obtenidos

Tabla 6.3: Resultados análisis de sensibilidad para edad del lodo de 10 días.

Proceso / Parámetro	Afluente	MBR	Lodos	Efluente	DS90
Caudal (m ³ /d)	300,0	354,3	1,7	299,3	-
SST (mg/L)	1.312,6	1.165,7	218.333	0,7	80,0
SSV (mg/L)	1.050,1	928,8	159.575	0,5	-
cDBO (mg/L)	3.512,4	-	97.991	3,2	35*
DQO (mg/L)	5.320,0	3.024,8	238.064	84,3	-
TN (mg/L)	74,1	49,2	15.798	1,4	50
TP (mg/L)	20,0	-	4.426	27,2	10,0

DO (mg/L)	-	0,8	-	-	-
pH	7,0	7,0	7,0	7,0	6-8,5

(*) La DS90 considera DBO5 no solo la DBO carbonácea.

Tabla 6.4: Resultados análisis de sensibilidad para edad del lodo de 30 días.

Proceso / Parámetro	Afluente	MBR	Lodos	Efluente	DS90
Caudal (m3/d)	300,0	317,7	1,3	299,7	-
SST (mg/L)	1.312,6	1.284,5	218.333	1,7	80,0
SSV (mg/L)	1.050,1	1.017,6	126.094	1,0	-
cDBO (mg/L)	3.512,4	-	58.169	2,9	35*
DQO (mg/L)	5.320,0	3.362,8	187.885	84,4	-
TN (mg/L)	74,1	55,0	12.554	1,3	50
TP (mg/L)	20,0	-	12.267	0,2	10,0
DO (mg/L)	-	0,7	-	-	-
pH	7,0	7,0	7,0	7,0	6-8,5

(*) La DS90 considera DBO5 no solo la DBO carbonácea.

Además, se realiza un análisis de sensibilidad para las cargas afluentes que se considera podrían afectar el correcto funcionamiento de la planta. En los casos en que se modifica el caudal y la DQO afluentes, se varía la edad del lodo desde 17,2 a 12,2 días, para evitar que la concentración de sólidos del licor de mezcla aumente por sobre los 12 g/L. Para el resto de los casos la edad del lodo se mantiene igual que el diseño original. Las variables modificadas son las siguientes:

- a) Caudal.
- b) DQO.
- c) Fracción inerte soluble de la DQO(Si).
- d) Fracción fácilmente biodegradable de la DQO(Ss).
- e) Fracción particulada inerte de la DQO(Xi).
- f) Fracción lentamente biodegradable de la DQO(Xs).

Los valores de los parámetros modificados se muestran en la Tabla 6.5

Tabla 6.5: Variables modificadas en análisis de sensibilidad.

Variable	Unidad	Valor original	Valor modificado
Caudal	m3/d	300	400
DQO	mg/L	5.320	6.400
Si	%DQO	7	10
Ss	%DQO	65	75
Xi	%DQO	4	6
Xs	%DQO	6	9

En las **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** a Tabla 6.11 se presentan los resultados del análisis de sensibilidad.

Tabla 6.6: Análisis de sensibilidad modificando variable Caudal.

Proceso / Parámetro	Afluyente	MBR	Lodos	Efluente	DS90
Caudal (m3/d)	400,0	443,6	2,4	398,6	-
SST (mg/L)	1.312,6	12.066,2	218.333	1,2	80,0
SSV (mg/L)	1.050,1	8.354,4	151.170	0,8	-
cDBO (mg/L)	3.512,4	-	96.512	3,0	35*
DQO (mg/L)	5.320,0	91,8	225.511	84,3	-
TN (mg/L)	74,1	-	14.960	1,5	50*
TP (mg/L)	20,0	-	7.478	0,2	10,0
DO (mg/L)	-	0,49	-	-	-

Tabla 6.7: Análisis de sensibilidad modificando variable DQO.

Proceso / Parámetro	Afluyente	MBR	Lodos	Efluente	DS90
Caudal (m3/d)	300,0	343,9	2,1	298,9	-
SST (mg/L)	1.561,3	10.773,4	218.333	1,1	80,0
SSV (mg/L)	1.249,1	7.394,0	149.846	0,7	-
cDBO (mg/L)	4.225,5	-	92.628	2,9	35*
DQO (mg/L)	6.400,0	109,7	223.523	100,1	-
TN (mg/L)	74,1	-	14.840	1,4	50*
TP (mg/L)	20,0	-	7.425	0,2	10,0
DO (mg/L)	-	0,70	-	-	-

Tabla 6.8: Análisis de sensibilidad modificando variable Ss.

Proceso / Parámetro	Afluyente	MBR	Lodos	Efluente	DS90
Caudal (m3/d)	300,0	331,5	1,5	299,5	-
SST (mg/L)	946,8	104.38,5	218.333,3	1,0	80,0
SSV (mg/L)	757,5	7.234,8	151.323,8	0,7	-
cDBO (mg/L)	3.584,6	-	81.917,2	2,5	35*
DQO (mg/L)	5.320,0	91,3	225.499,2	83,5	-
TN (mg/L)	74,1	-	15.056,8	1,4	50*
TP (mg/L)	20,0	-	9.735,7	2,4	10,0
DO (mg/L)	-	0,92	-	-	-

Tabla 6.9: Análisis de sensibilidad modificando variable Si.

Proceso / Parámetro	Afluyente	MBR	Lodos	Efluyente	DS90
Caudal (m3/d)	300,0	331,6	1,4	299,6	-
SST (mg/L)	1.111,4	10.341,6	218.333	1,0	80,0
SSV (mg/L)	889,1	6.763,1	142.783	0,7	-
cDBO (mg/L)	3.342,3	-	75.591	2,5	35*
DQO (mg/L)	5.320,0	415,2	213.150	375,0	-
TN (mg/L)	74,1	-	14.194	1,4	50*
TP (mg/L)	20,0	-	10.342	2,7	10,0
DO (mg/L)	-	1,05	-	-	-

Tabla 6.10: Análisis de sensibilidad modificando variable Xi.

Proceso / Parámetro	Afluyente	MBR	Lodos	Efluyente	DS90
Caudal (m3/d)	300,0	331,4	1,6	299,4	-
SST (mg/L)	1.312,9	11.504,2	218.333	1,2	80,0
SSV (mg/L)	1.050,3	7.398,3	140.409	0,7	-
cDBO (mg/L)	3.484,6	-	73.908	2,8	35*
DQO (mg/L)	5.320,0	91,6	210.592	83,9	-
TN (mg/L)	74,1	-	13.538	1,4	50*
TP (mg/L)	20,0	-	9.930	0,1	10,0
DO (mg/L)	-	0,93	-	-	-

Tabla 6.11: Análisis de sensibilidad modificando variable Xs.

Proceso / Parámetro	Afluyente	MBR	Lodos	Efluyente	DS90
Caudal (m3/d)	300,0	331,5	1,5	299,5	-
SST (mg/L)	1.263,2	11.067,5	218.333	1,1	80,0
SSV (mg/L)	1.010,6	7245,8	142.942	0,7	-
cDBO (mg/L)	3.522,1	-	77.502	2,6	35*
DQO (mg/L)	5.320,0	91,4	213.092	83,6	-
TN (mg/L)	74,1	-	14.198	1,4	50*
TP (mg/L)	20,0	-	9.160	5,0	10,0
DO (mg/L)	-	0,92	-	-	-

7. Discusión y Conclusiones

Con respecto a los resultados obtenidos, es posible observar que se cumple la normativa para el efluente con los parámetros entregados por el software GPS-X. En particular, se cumple con los requerimientos del DS90 Tabla 1. Además, se observa que existe una concentración significativa de DQO en el efluente, la cual está asociada principalmente a la fracción soluble inerte de la DQO, la cual fue definida mediante una calibración y con ayuda de la literatura, por lo que esta podría no ser 100% representativa de la realidad.

En relación con el análisis de sensibilidad, se puede observar que las variables que influyen mayormente en la operación son la edad del lodo, caudal y DQO. Aquí se observa que el tiempo de retención de sólidos es una de las principales variables en el diseño de una planta de tratamiento con sistema MBR, al disminuir la edad del lodo, es decir, aumentando el caudal a purgar, la concentración de sólidos en el licor de mezcla disminuye considerablemente, y viceversa al aumentar la edad del lodo.

Si bien la edad del lodo es una variable flexible, según las experiencias de Yoon (2015) y Grelier (2005), mientras mayor es la edad del lodo, mayores son los costos operacionales. Es por esto por lo que se sugiere un tiempo de retención de sólidos entre 15 y 20 días.

Con respecto a la DQO y caudal, si estos fueran mayores a los de diseño, se recomienda utilizar los tranques de acumulación para amortiguar estos *peaks* y ajustar las condiciones de operación para asegurar el buen funcionamiento de la planta, esto es, la cantidad de nutrientes disponibles y la aireación tanto al reactor como a las membranas. En este caso, en la literatura se recomienda no tener concentraciones del licor de mezcla mayores a los 12 g/L (Judd, 2006; Yoon, 2015) y si es necesario puede lograrse disminuyendo aumentando el caudal de purga, pero considerando que hacer esto último producirá un lodo de menor edad. El resto de los parámetros analizados no parecen tener una fuerte influencia en el funcionamiento de la planta.

Del modelo de calibración se observa que la planta de San Javier podría estar sobredimensionada para el tratamiento de las aguas de diseño. Esto se concluye comparándolo con el diseño realizado para la Bodega Cachapoal, pues el diseño de San Javier contempla una edad del lodo menor a la utilizada en esta última. Además, se observa un volumen de reactor mayor para tratar un menor caudal, con características del RIL similares.

Con respecto al software utilizado para la modelación, es posible concluir que es una herramienta bastante útil a la hora de realizar el modelo, pero este presenta ciertas limitaciones. En particular en el modo operacional utilizado para el objeto MBR, que fue el modo simple, este no calcula la presión transmembrana (TMP), pues solo se le ingresa un porcentaje de captura de sólidos para la membrana, sin utilizar el área para los cálculos. Además, este asume que la membrana siempre está limpia, lo cual en la práctica no es cierto. Por lo que, para realizar un análisis más a fondo se deberá considerar estas limitaciones.

Este trabajo se podría haber realizado de manera analítica, es decir, con una hoja de cálculo y sin utilizar un software de modelación. Sin embargo, se considera que hacerlo mediante un software especializado en el tratamiento de aguas facilita el trabajo y debiese permitir una simulación más precisa, pues este relaciona una mayor cantidad de variables que las que se podrían relacionar haciendo un cálculo analítico con el software Excel.

Algunas dificultades dentro de la realización de esta memoria fueron la dificultad en la obtención de datos medidos por la viña, las grandes distancias que hay entre las oficinas y ambas plantas de tratamiento y la falta de conocimientos acerca de la ecología microbiana que rige el desempeño de las plantas de tratamiento biológicas.

Haciendo referencia a la aireación, esta es sumamente necesaria para mantener las condiciones de operación de la planta, sin embargo, esta es la principal responsable de los costos de operación, pues implica un alto consumo energético, por lo que no es recomendable entregar un caudal de aire mayor al necesario. Para asegurar esto es necesario tener medidores de oxígeno disuelto en el reactor, de modo de mantener niveles de oxígeno suficientes para que ocurran las reacciones en el reactor, pero no demasiado altos como para encarecer aún más los costos operacionales. Si bien esto es un estándar para cualquier planta de tratamiento aeróbica, esto no siempre se cumple en la práctica.

En relación con las variables operacionales del módulo de MBR, estos son, flujo, edad del lodo, presión transmembrana, aireación y concentración en el licor de mezcla, todos ellos se encuentran dentro de los parámetros utilizados en la industria, a excepción de la presión transmembrana, la cual no es calculada por el software en el modo operacional que se escogió para realizar la simulación. Sin embargo, se entregan los valores de operación típicos de este indicador, por lo que durante la operación debe asegurarse de estar en dicho rango.

Para lograr lo anterior, se recomienda seguir las recomendaciones del fabricante de la membrana, principalmente con respecto a las limpiezas periódicas de esta, con la finalidad de mantener un flujo cercano al de diseño, sin aumentar demasiado la TMP.

Es con respecto a esto último que aparece el concepto de *fouling*, el que se refiere básicamente a un bloqueo en las paredes de la membrana, este se produce por diversas causas, pero los principales responsables de esto parecen ser la fracción de carbohidratos de los *soluble microbial products* SMP_c, y los EPS, los cuales parecen disminuir su aporte al *fouling* al aumentar la edad del lodo (Judd, 2005). Sin embargo, para lograr una edad del lodo mayor una alternativa es disminuir el caudal de purga, lo que disminuiría la cantidad de agua que es posible tratar.

Como recomendación al funcionamiento de la bodega vinificadora, se recomienda realizar la instalación de canaletas de aguas lluvia, esto con la finalidad de disminuir los caudales a tratar por efectos de la precipitación.

Con relación a la calidad del afluente de diseño, es posible que los valores no sean del todo representativos de la planta, pues se observa una gran desviación estándar dentro de los datos, incluso para la época de vendimia.

Cabe recordar que esta memoria es un ejercicio académico y que el diseño realizado aquí no pretende entregar un diseño exacto para el tratamiento de estos RILes y solo debe ser utilizado de manera referencial. Por lo que los cálculos deberán ser revisados por un especialista en plantas de tratamiento. Es por esto por lo que la Universidad de Chile no se hace responsable de los cálculos y diseño expuestos en esta memoria.

Además, para realizar un correcto diseño de la planta de tratamiento, es necesario conocer los componentes del agua residual, por lo que se sugiere realizar campañas de muestreo durante la época de vendimia, para así por caracterizar de mejor forma el RIL.

8. Bibliografía

- [1] D. Bolzonella, F. Fatone, P. Pavan, F. Cecchi, Application of a membrane bioreactor for winery wastewater treatment, *Water Sci. Technol.* 62 (2010) 2754–2759.
- [2] P. Artiga, E. Ficara, F. Malpei, J.M. Garrido, R. Melendez, Treatment of two industrial wastewaters in a submerged membrane bioreactor, *Desalination* 179 (2005) 161–169.
- [3] G. Andreottola, P. Foladori, P. Nardelli, A. Denicolo, Treatment of winery wastewater in a full-scale fixed bed biofilm reactor, *Water Sci. Technol.* 51 (2005) 71–79.
- [4] P. Artiga, M. Carballa, J.M. Garrido, R. Meledéz, Treatment of winery wastewaters in a membrane submerged bioreactor, *Water Sci. Technol.* 56 (2007) 63–69.
- [5] C. Valderrama, G. Ribera, N. Bahi, M. Rovira, T. Gimenez, R. Nomen, S. Lluch, M. Yuste, X. Martínez- Llado, Winery wastewater treatment for water reuse purpose: Conventional activated sludge versus membrane bioreactor (MBR), *Desalination* 306 (2012) 1–7.
- [6] G. Andreottola, P. Foladori, G. Ziglio, Biological treatment of winery wastewater: An overview, *Water Sci. Technol.* 60 (2009) 1117–1125.
- [7] G. Lofrano, S. Meric, A comprehensive approach to winery wastewater treatment: a review of the state-of-the-art, (2015) *Desalination and Water Treatment*, 57:7, 3011-3028
- [8] Santos, A., Ma, W., & Judd, S. J. (2011). Membrane bioreactors: Two decades of research and implementation. *Desalination*, 273(1), 148–154.
- [9] Guglielmi, G., Andreottola, G., Foladori, P., & Ziglio, G. (2009). Membrane bioreactors for winery wastewater treatment: case-studies at full scale. *Water Science and Technology*, 60(5), 1201–1207.
- [10] Judd, S. (2008). The status of membrane bioreactor technology. *Trends in Biotechnology*, 26(2), 109–116.
- [11] Judd, S. (2005). Fouling control in submerged membrane bioreactors. *Water Science and Technology*, 51(6-7), 27–34.
- [12] Radjenović, J., Matošić, M., Mijatović, I., Petrović, M., & Barceló, D. (n.d.). Membrane Bioreactor (MBR) as an Advanced Wastewater Treatment Technology. *Emerging Contaminants from Industrial and Municipal Waste*, 37–101.
- [13] Judd S., *The MBR Book*, (2006) (2011), Elsevier, Oxford, UK.
- [14] Ng, H. and Hermanowicz, S. (2005). Specific Resistance to Filtration of Biomass from Membrane Bioreactor Reactor and Activated Sludge: Effects of Exocellular Polymeric Substances and Dispersed Microorganisms. *Water Environment Research*, 77(2), pp.187-192.
- [15] Buer, T., & Cumin, J. (2010). MBR module design and operation. *Desalination*, 250(3), 1073–1077.
- [16] Gil, J. A., Túa, L., Rueda, A., Montañó, B., Rodríguez, M., & Prats, D. (2010). Monitoring and analysis of the energy cost of an MBR. *Desalination*, 250(3), 997–1001.

- [17] Verrecht, B., Judd, S., Guglielmi, G., Brepols, C., & Mulder, J. W. (2008). An aeration energy model for an immersed membrane bioreactor. *Water Research*, 42(19), 4761–4770.
- [18] Metcalf, Eddy. (2003) *Wastewater Engineering – Treatment and Reuse* (4th edn). McGraw-Hill, New York.
- [19] L.A.Ioannou, G.Li Puma, D.Fatta-Kassinou, Treatment of winery wastewater by physicochemical, biological and advanced processes: A review, *Journal of Hazardous Materials*.
- [20] A.G Vlyssides, E.M. Barampouti, S. Mai, (2005). Wastewater characteristics from Greek wineries and distilleries, *Water Science and Technology* Vol 51 No 1 pp 53-60.
- [21] Henze, M. (2007). *Activated sludge models ASM1, ASM2, ASM2d and ASM3*. London: IWA Publ.
- [22] Ures, P, et al., (2015). *Biorreactores de membrana (BRM) (FT-BIO-010)*, Universidade da Coruña.
- [23] Valderrama C., (2008). *Guía de prácticas ambientales para la vitivinicultura. Memoria de agricultura*. Santiago, Universidad de Chile, Facultad de ciencias agronómicas.
- [24] Hydromantis, (2017). *GPS-X Technical Reference*.
- [25] Iglesias, R. (2014). *Biorreactores de membrana para la depuración y reutilización de aguas*. Centro de Estudios Hidrográficos. Ministerio de agricultura, alimentación y medio ambiente. Gobierno de España
- [26] van Schoor, L.H. (2005). *Guidelines for the management of wastewater and solid waste at existing wineries*. *Winetech*, 35 pp. Enviroscientific & Winetech.
- [27] Moletta, R. (2009). *Biological treatment of wineries and distillery wastewater*. Proceedings of 5th International Specialized Conference on Sustainable Viticulture Winery Wastes and Ecological Impact Management. pp. 389-398, ISBN 978-88-8443-284-1, Trento and Verona, 30 Mar-3 Apr.
- [28] Vasquez, E. (2015). *ESTUDIO DE BIORREACTOR DE MEMBRANA PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES URBANAS*. Memoria de Máster en Gestion Sostenible del Agua. Universidad de Alicante, España.
- [29] Moeller, G. (2009). *MICROBIOLOGÍA DE LODOS ACTIVADOS*.
- [30] Phillips, H., Sahlstedt, K., Frank, K., Bratby, J., Brennan, W., & Rogowski, S. et al. (2009). *Wastewater treatment modelling in practice: a collaborative discussion of the state of the art*. *Water Science And Technology*, 59(4), 695-704.
- [31] Grelier, P., Rosenberger, S., Tazi-Pain, A., (2005). Influence of sludge retention time on membrane bioreactor hydraulic performance. *Desalination* 192, 10-17.
- [32] Yoon, S. (2015). *Membrane bioreactor processes*.

9. Anexos

Anexo A: GPS-X

Tabla 9.1: Librerías disponibles en GPS-X

Librería	Variables de estado	Var definibles por usuario
CNLIB	16	0
CNIPLIB	16	30
CNPLIB	27	0
CNPIPLIB	27	30
MANTIS2LIB	48	4
MANTIS3LIB	52	4

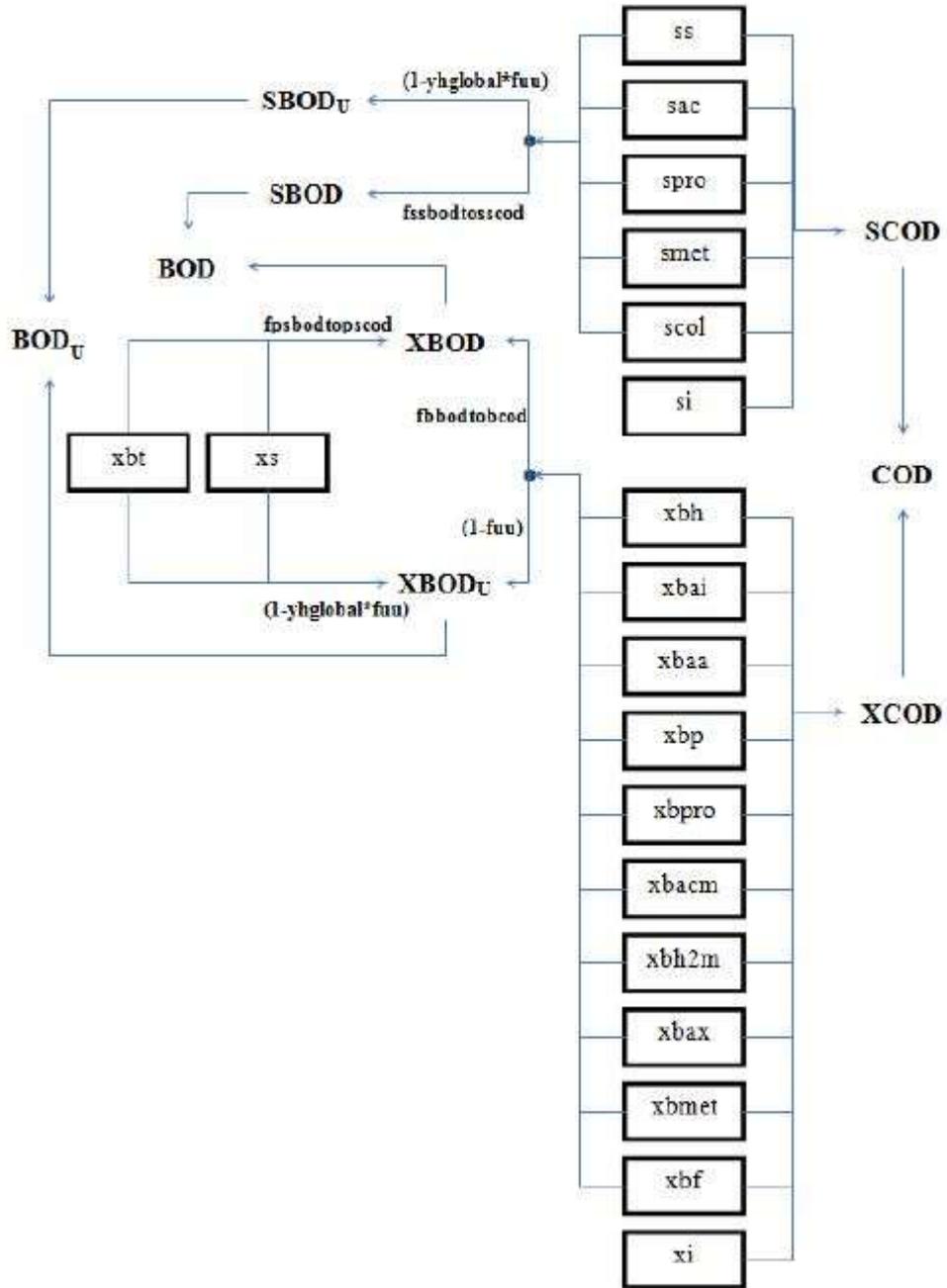


Figura 9-1: Procedimiento de cálculo para variables SCOD, COD, SBOD, BOD, SBODU y BODU.
Fuente: GPS-X Technical Reference. (2017).

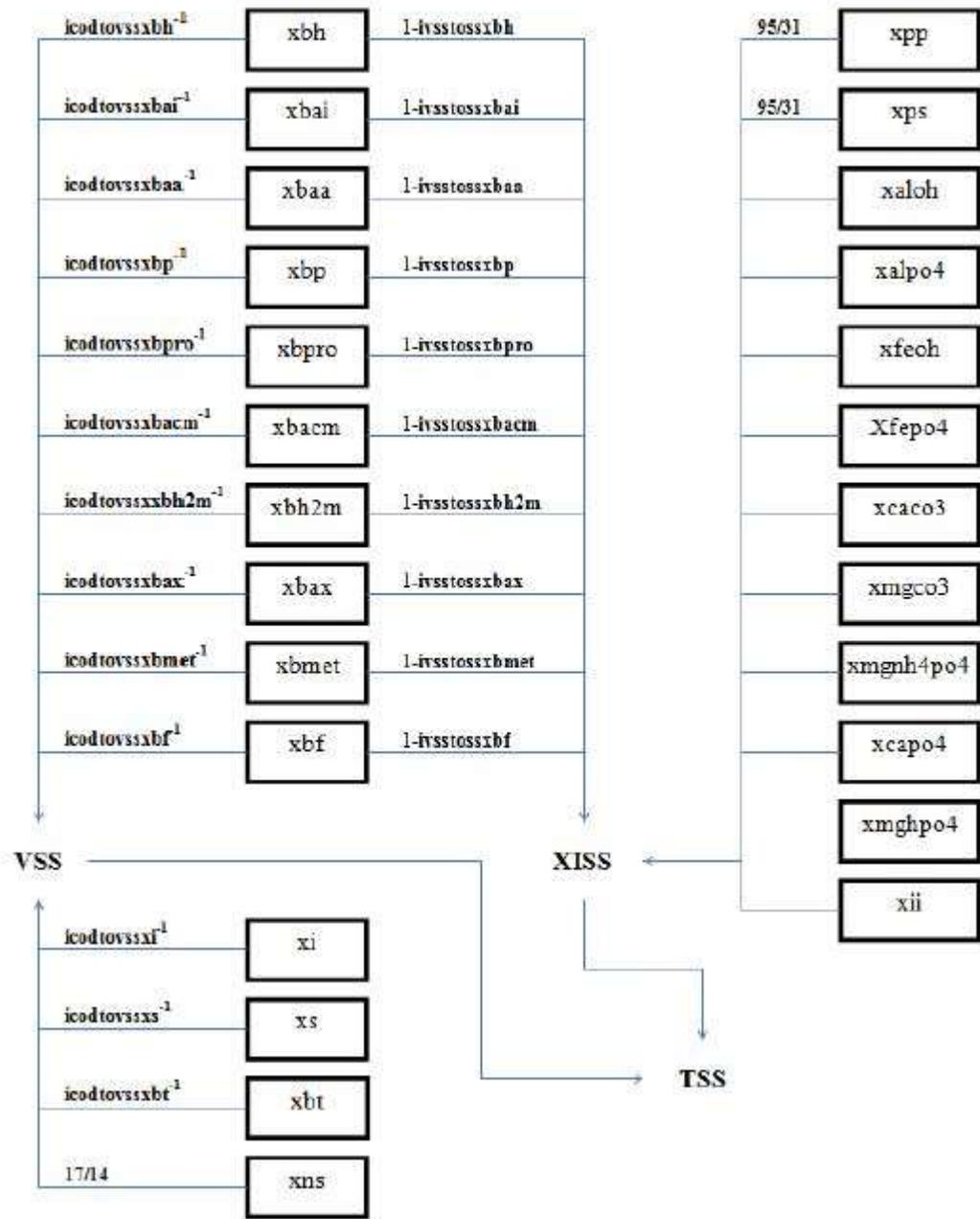


Figura 9-2: Procedimiento de cálculo para variables VSS, TSS.
Fuente: GPS-X Technical Reference. (2017).

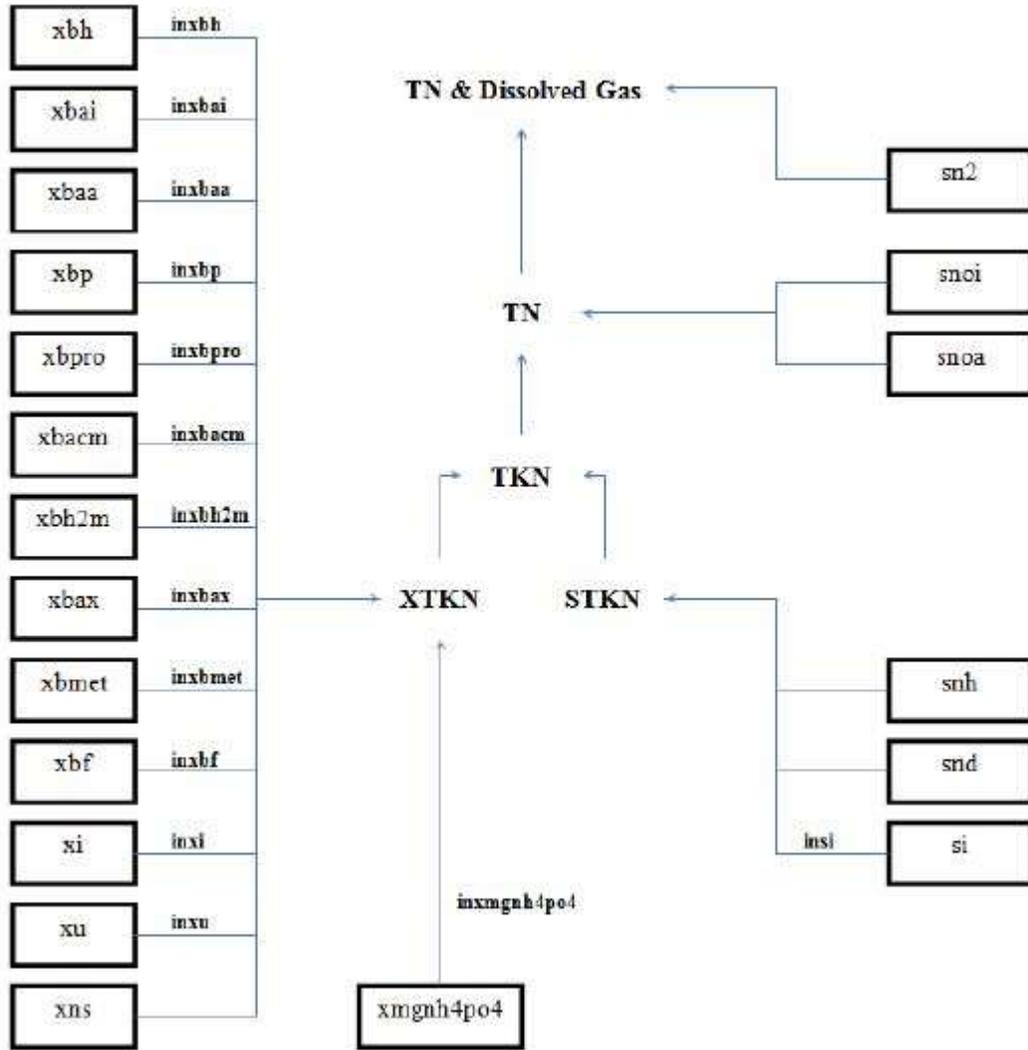


Figura 9-3: Procedimiento de cálculo para variables STKN y TKN.
Fuente: GPS-X Technical Reference. (2017).

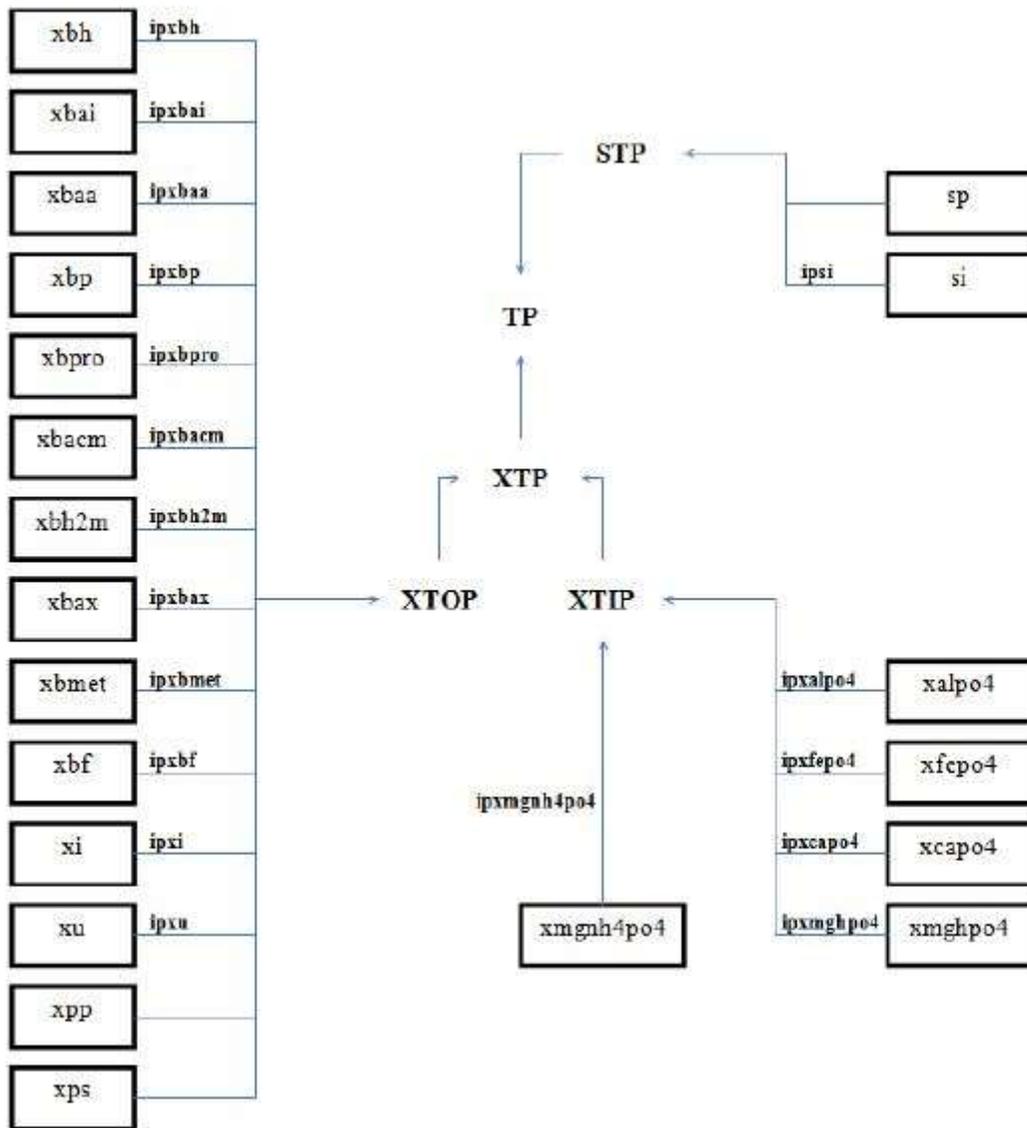


Figura 9-4 Procedimiento de cálculo para variables STP, XTP y TP.
Fuente: GPS-X Technical Reference. (2017).

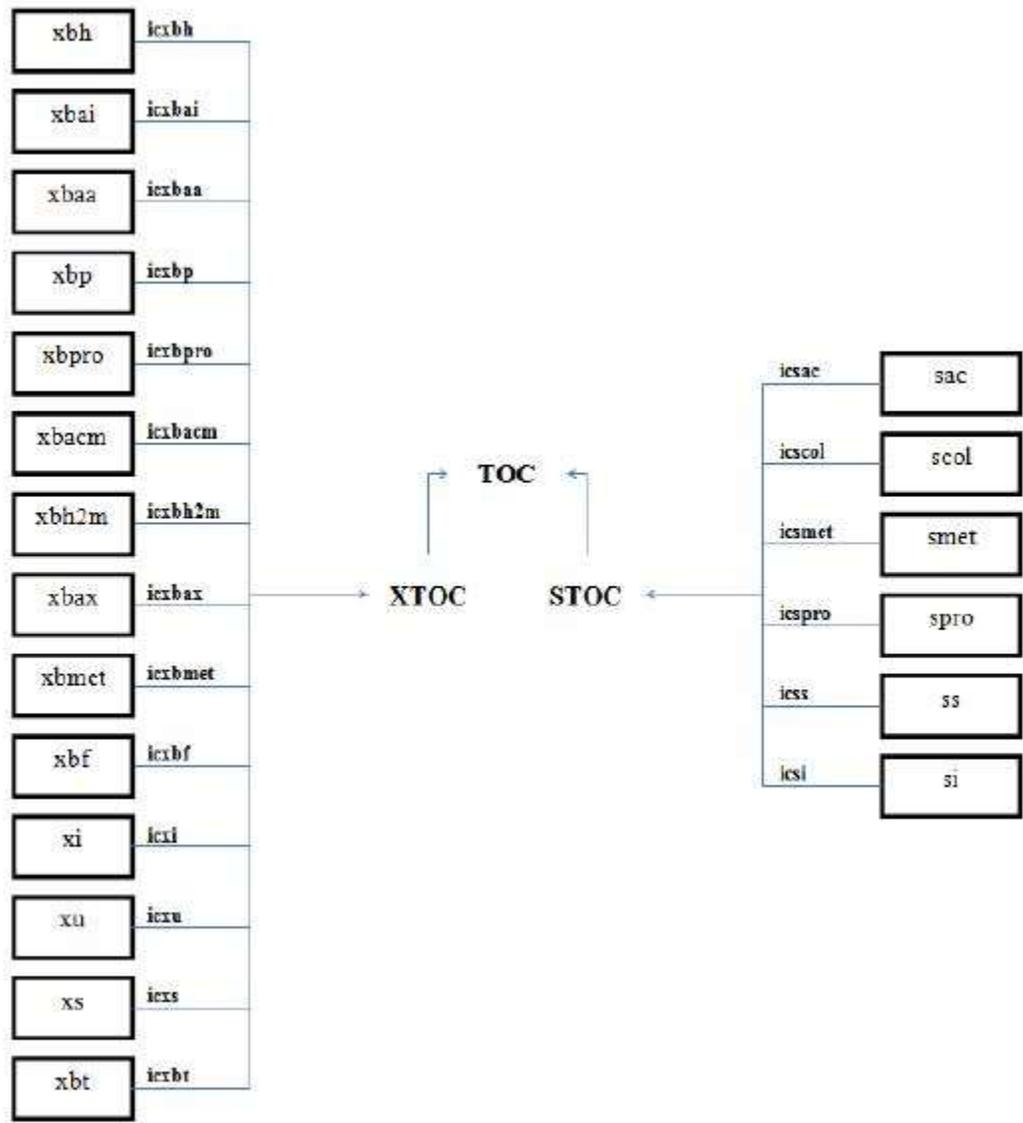


Figura 9-5: Procedimiento de cálculo para variables TOC, STOC y XTOC.
Fuente: GPS-X Technical Reference. (2017)

Tabla 9.2: Modos operacionales del modelo MBR.

Variable Operacional	Modo Operacional		
	Simple	Intermedio	Avanzado
Balace de flujo y Volumen de Reactor	Asume que el flujo que entra es igual al flujo que sale, por lo que no hay cambios en el volumen de líquido en el reactor. Todo el flujo que entra sale por el filtro y por el flujo residual.	El flujo de membrana requerido se determina en función del flujo afluente y efluente para asegurar que el volumen de líquido en el reactor se mantenga constante	El flujo de membrana se determina por el modelo del filtro. El volumen del reactor aumenta o disminuye dependiendo de la diferencia entre flujo que entra y sale. Se puede utilizar un controlador para manejar el nivel del tanque.
Operación de Filtros	Se ignora la operación de filtros	Se debe especificar TMP, ciclos de limpieza y aireación de flujo cruzado	Igual que Intermedio
Aire limpieza	Se ignora la remoción de sólidos en la torta por flujo de aire, pero se considera la transferencia de oxígeno al licor de mezcla	Considera remoción de sólidos y transferencia de oxígeno	Igual que Intermedio
Captura de Sólidos	La tasa de captura de sólidos determina la fracción de SSLM que se mantiene en el reactor.	La tasa de captura de sólidos determina la fracción de SSLM que se mantiene en el reactor. Estos sólidos crean la torta y pueden ser devueltos al licor de mezcla mediante retrolavado o aireación cruzada	Igual que Intermedio
Actividad Biológica	No existe diferencia en el modelo biológico		

Fuente: GPS-X Technical Reference. (2017).

Anexo B: Afluente en GPS-X

Influent Advisor San Javier

Influent Composition

cod	total COD	gCOD/m3	7300
tkn	total TKN	gN/m3	65
tp	total phosphorus	gP/m3	20

Nitrogen Compounds

snh	ammonia nitrogen	gN/m3	10
snoi	nitrite	gN/m3	3.9
snoa	nitrate	gN/m3	0.2

Phosphorus Compounds

sp	ortho-phosphate	gP/m3	1
xpp	stored poly-phosphate in PAO	gP/m3	0

Influent Fractions

ivsstotss	VSS/TSS ratio	gVSS/gTSS	0.8
-----------	---------------	-----------	-----

Organic Fractions

frsi	soluble inert fraction of total COD	-	0.015
frss	readily biodegradable fraction of total COD	-	0.65
frxi	particulate inert fraction of total COD	-	0.001
frscol	colloidal fraction of slowly biodegradable COD	-	0.01

Nitrogen Fractions

frsnh	ammonium fraction of soluble TKN	-	0.8
insi	N content of soluble inert material	gN/gCOD	0
inxi	N content of inert particulate material	gN/gCOD	0

Phosphorus Fractions

ipsi	P content of soluble inert material	gP/gCOD	0
ipxi	P content of inert particulate material	gP/gCOD	0

Inorganic Compounds

stic	total soluble inorganic carbon	gC/m3	84
sca	total calcium	gCa/m3	75
smg	total magnesium	gMg/m3	31
spot	total potassium	gK/m3	100
scat	other cation	eq/m3	3
sana	other anion	eq/m3	12

Organic Fractions

frsac	acetate fraction of total COD	-	0
frspro	propionate fraction of total COD	-	0
frsmet	methanol fraction of total COD	-	0
frxbh	heterotrophic biomass fraction of total COD	-	0
frxbai	ammonia oxidizer biomass fraction of total COD	-	0
frxbaa	nitrite oxidizer biomass fraction of total COD	-	0
frxbp	phosphate accumulating biomass fraction of total COD	-	0
frxbpro	acetogenic biomass fraction of total COD	-	0
frxbacm	acetoclastic methanogenic biomass fract. of total COD	-	0
frxbh2m	hydrogenotrophic methanogenic biomass fract. of total COD	-	0
frxbmet	methylotrophic biomass fraction of total COD	-	0
frxbf	fermenting biomass fraction of total COD	-	0
frxbax	anammox biomass fraction of total COD	-	0

frxu	unbiodegradable cell products fraction of total COD	-	0
frxbt	poly-hydroxy alkanoates in PAO fraction of total COD	-	0

Inorganic Precipitates

xaloh	aluminum hydroxide	gAl(OH) ₃ /m ³	0
xalpo ₄	aluminum phosphate	gAlPO ₄ /m ³	0
xfeoh	iron hydroxide	gFe(OH) ₃ /m ³	0
xfepo ₄	iron phosphate	gFePO ₄ /m ³	0
xcaco ₃	calcium carbonate	gCaCO ₃ /m ³	0
xcapo ₄	calcium phosphate	gCaPO ₄ /m ³	0
xmgco ₃	magnesium carbonate	gMgCO ₃ /m ³	0
xmgppo ₄	magnesium hydrogen phosphate (newberyite)	gMgHPO ₄ /m ³	0
xmgnh ₄ po ₄	magnesium ammonium phosphate (struvite)	gMgNH ₄ PO ₄ /m ³	0

Soluble Gases

so	dissolved oxygen	gO ₂ /m ³	0
----	------------------	---------------------------------	---

Soluble Gases

sh ₂	dissolved hydrogen gas	gCOD/m ³	0
sn ₂	dissolved dinitrogen gas	gN/m ³	18
sch ₄	dissolved methane	gCOD/m ³	0

Influent Advisor Cachapoal

Influent Composition

cod	total COD	gCOD/m ³	5320
tkn	total TKN	gN/m ³	70
tp	total phosphorus	gP/m ³	20

Nitrogen Compounds

snh	ammonia nitrogen	gN/m ³	10
snoi	nitrite	gN/m ³	3.9
snoa	nitrate	gN/m ³	0.2

Phosphorus Compounds

sp	ortho-phosphate	gP/m ³	1
xpp	stored poly-phosphate in PAO	gP/m ³	0

Influent Fractions

ivsstotss	VSS/TSS ratio	gVSS/gTSS	0.8
-----------	---------------	-----------	-----

Organic Fractions

frsi	soluble inert fraction of total COD	-	0.015
frss	readily biodegradable fraction of total COD	-	0.65
frxi	particulate inert fraction of total COD	-	0.001
frscol	colloidal fraction of slowly biodegradable COD	-	0.01

Nitrogen Fractions

frsnh	ammonium fraction of soluble TKN	-	0.8
insi	N content of soluble inert material	gN/gCOD	0
inxi	N content of inert particulate material	gN/gCOD	0

Phosphorus Fractions

ipsi	P content of soluble inert material	gP/gCOD	0
ipxi	P content of inert particulate material	gP/gCOD	0

Inorganic Compounds

stic	total soluble inorganic carbon	gC/m3	84
sca	total calcium	gCa/m3	75
smg	total magnesium	gMg/m3	31
spot	total potassium	gK/m3	50
scat	other cation	eq/m3	3
sana	other anion	eq/m3	12

Organic Fractions

frsac	acetate fraction of total COD	-	0
frspro	propionate fraction of total COD	-	0
frsmet	methanol fraction of total COD	-	0
frxbh	heterotrophic biomass fraction of total COD	-	0
frxbai	ammonia oxidizer biomass fraction of total COD	-	0
frxbaa	nitrite oxidizer biomass fraction of total COD	-	0
frxbp	phosphate accumulating biomass fraction of total COD	-	0
frxbpro	acetogenic biomass fraction of total COD	-	0
frxbacm	acetoclastic methanogenic biomass fract. of total COD	-	0
frxbh2m	hydrogenotrophic methanogenic biomass fract. of total COD	-	0
frxbmet	methylotrophic biomass fraction of total COD	-	0
frxbf	fermenting biomass fraction of total COD	-	0
frxbax	anammox biomass fraction of total COD	-	0
frxu	unbiodegradable cell products fraction of total COD	-	0
frxbt	poly-hydroxy alkanooates in PAO fraction of total COD	-	0

Inorganic Precipitates

xaloh	aluminum hydroxide	gAl(OH)3/m3	0
xalpo4	aluminum phosphate	gAlPO4/m3	0
xfeoh	iron hydroxide	gFe(OH)3/m3	0
xfepo4	iron phosphate	gFePO4/m3	0
xcaco3	calcium carbonate	gCaCO3/m3	0
xcapo4	calcium phosphate	gCaPO4/m3	0
xmgco3	magnesium carbonate	gMgCO3/m3	0
xmgppo4	magnesium hydrogen phosphate (newberyite)	gMgHPO4/m3	0
xmgnh4po4	magnesium ammonium phosphate (struvite)	gMgNH4PO4/m3	0

Soluble Gases

so	dissolved oxygen	gO2/m3	0
----	------------------	--------	---

Soluble Gases

sh2	dissolved hydrogen gas	gCOD/m3	0
sn2	dissolved dinitrogen gas	gN/m3	18
sch4	dissolved methane	gCOD/m3	0

Anexo C: Resultados simulación

C.1: Resultados simulación condición actual.

MBR

Tabla 9.3: Caudales MBR condición actual.

Variable	Unidad	Afluente	Overflow	Permeado	WAS
Flow	m3/d	331,4	0	299,4	32

Tabla 9.4: Resultados simulación MBR condición actual.

Variable	Unidad	Afluente	Reactor	Permeado
MLSS	mg/L	1.239,3	11.160,8	1,1
MLVSS	mg/L	983,7	7.243,8	0,7
Soluble COD	mg/L	3.226,7	91,3	82,5
Ammonia N	mgN/L	49,1	0,3	0,3
Nitrite N	mgN/L	3,5	0,2	0,2
Nitrate N	mgN/L	0,2	0,0	0,0
Soluble PO4-P	mgP/L	30,8	4,4	4,4
Total Alkalinity	mgCaCO3/L	477,5	69,9	69,9
pH	-	7,0	7,0	7,0
HRT	h	-	39,8	-
DO	mgO2/L	-	0,9	-
Total OUR	mgO2/(L.h)	-	89,9	-
Nitrification Rate	mgN/(L.h)	-	6,0	-
Nitrate Util. Rate	mgN/(L.h)	-	0,0	-
Biological Air Flow	m3/h	-	1.400,0	-
Cleaning Air Flow	m3/h	-	320,0	-
SOTE - Biological Air	%	-	30,0	-
SOTE - Cleaning Air	%	-	10,0	-
Total Actual OTR	kg/h	-	49,4	-

Tabla 9.5: Flujos máxicos MBR condición actual.

Variable	Unidad	Afluente	Overflow	Permeado	WAS	Total In	Total Out
TSS	kg/d	410,8	0,0	0,3	357,1	410,8	357,5
COD	kg/d	1.615,2	0,0	25,0	348,3	1.615,2	373,3
TN	kg/d	79,7	0,0	0,4	23,1	79,7	23,5
TP	kg/d	16,6	0,0	1,3	15,0	16,6	16,3

Efluente

Tabla 9.6: Resultados simulación efluente condición actual.

Variable	Unidad	Permeado
Flow	m ³ /d	299,4
TSS	mg/L	1,1
VSS	mg/L	0,7
cBOD5	mg/L	2,5
COD	mg/L	83,5
Ammonia N	mgN/L	0,3
Nitrite N	mgN/L	0,2
Nitrate N	mgN/L	0,0
TKN	mgN/L	1,2
TN	mgN/L	1,4
Soluble PO4-P	mgP/L	4,4
TP	mgP/L	4,5
Total Alkalinity	mgCaCO ₃ /L	69,9
pH	-	7,0

Lodos

Tabla 9.7: Resultados simulación lodos condición actual.

Variable	Unidad	Efluente
Flow	m ³ /d	1,6
TSS	mg/L	218.333,3
VSS	mg/L	141.706,3
cBOD5	mg/L	76.828,0
COD	mg/L	211.251,0
Ammonia N	mgN/L	0,3
Nitrite N	mgN/L	0,2
Nitrate N	mgN/L	0,0
TKN	mgN/L	14.075,2
TN	mgN/L	14.075,4
Soluble PO ₄ -P	mgP/L	4,4
TP	mgP/L	9.074,0
Total Alkalinity	mgCaCO ₃ /L	69,9
pH	-	7,0

Tabla 9.8: Flujos máxicos lodo condición actual.

Variable	Unidad	Efluente
TSS	kg/d	340,2
COD	kg/d	329,1
TN	kg/d	21,9
TP	kg/d	14,1

C.2: Resultados simulación condición futura.

MBR

Tabla 9.9: Caudales MBR condición futura.

Variable	Unidad	Afluente	Overflow	Permeado	WAS
Flow	m3/d	442,5	0	399,5	43

Tabla 9.10: Resultados simulación MBR condición futura.

Variable	Unidad	Afluente	Reactor	Permeado
MLSS	mg/L	1238,6	11.200,5	1,1
MLVSS	mg/L	982,3	7.101,3	0,7
Soluble COD	mg/L	3222,7	91,4	82,6
Ammonia N	mgN/L	51,0	0,3	0,3
Nitrite N	mgN/L	3,5	0,2	0,2
Nitrate N	mgN/L	0,2	0,0	0,0
Soluble PO4-P	mgP/L	31,8	0,3	0,3
Total Alkalinity	mgCaCO3/L	477,8	68,6	68,6
pH	-	7,0	7,0	7,0
HRT	h	-	40,7	-
DO	mgO2/L	-	1,0	-
Total OUR	mgO2/(L.h)	-	90,1	-
Nitrification Rate	mgN/(L.h)	-	6,0	-
Nitrate Util. Rate	mgN/(L.h)	-	0,0	-
Biological Air Flow	m3/h	-	1.900,0	-
Cleaning Air Flow	m3/h	-	500,0	-
SOTE - Biological Air	%	-	30,0	-
SOTE - Cleaning Air	%	-	10,0	-
Total Actual OTR	kg/h	-	67,7	-

Tabla 9.11: Flujos máxicos MBR condición futura.

Variable	Unidad	Afluente	Overflow	Permeado	WAS	Total In	Total Out
TSS	kg/d	548,1	0,0	0,4	481,6	548,1	482,1
COD	kg/d	2153,5	0,0	33,4	458,9	2.153,5	492,3
TN	kg/d	107,1	0,0	0,5	30,4	107,1	30,9
TP	kg/d	22,8	0,0	0,1	22,7	22,8	22,8

Efluente

Tabla 9.12: Resultados simulación efluente condición futura.

Variable	Unidad	Permeado
Flow	m ³ /d	399,5
TSS	mg/L	1,1
VSS	mg/L	0,7
cBOD5	mg/L	2,6
COD	mg/L	83,6
Ammonia N	mgN/L	0,3
Nitrite N	mgN/L	0,2
Nitrate N	mgN/L	0,0
TKN	mgN/L	1,2
TN	mgN/L	1,4
Soluble PO ₄ -P	mgP/L	0,3
TP	mgP/L	0,3
Total Alkalinity	mgCaCO ₃ /L	68,6
pH	-	7,0

Lodos

Tabla 9.13: Resultados simulación lodos condición futura.

Variable	Unidad	Efluente
Flow	m ³ /d	1,9
TSS	mg/L	246.666,7
VSS	mg/L	156.392,1
cBOD5	mg/L	83.375,7
COD	mg/L	233.124,8
Ammonia N	mgN/L	0,3
Nitrite N	mgN/L	0,2
Nitrate N	mgN/L	0,0
TKN	mgN/L	15.537,6
TN	mgN/L	15.537,8
Soluble PO4-P	mgP/L	0,3
TP	mgP/L	11.613,5
Total Alkalinity	mgCaCO ₃ /L	68,6
pH	-	7,0

Tabla 9.14: Flujos máxicos lodo condición futura.

Variable	Unidad	Efluente
TSS	kg/d	458,6
COD	kg/d	433,4
TN	kg/d	28,9
TP	kg/d	21,6

Anexo D: Métodos utilizados para caracterización de RIL.

Tabla 9.15: Métodos utilizados para realizar mediciones de calidad del RIL.

Parámetro	Nombre Método	Código Standard Methods
DQO	Closed Reflux, Colorimetric Method	5220 D
SST	Total Suspended Solids Dried at 103–105°C	2540 D
Nitrógeno	Persulfate Method	4500-N C
Fósforo	Vanadomolybdophosphoric Acid Colorimetric Method	4500-P C