



UNIVERSIDAD DE CHILE

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA,

BIOTECNOLOGÍA Y MATERIALES

ESTUDIO DEL SISTEMA DE LODOS ACTIVADOS DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS SERVIDAS DE LOS ÁNGELES PARA EL CONTROL DEL PROBLEMA DE BULKING FILAMENTOSO, UTILIZANDO HERRAMIENTAS DE MODELACIÓN

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL QUÍMICO
E INGENIERO CIVIL EN BIOTECNOLOGÍA

JOSÉ FELIPE ROJAS CATALÁN

PROFESOR GUÍA:

JOSÉ CRISTIAN SALGADO HERRERA

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:

ZIOMARA GERDTZEN HAKIM

LEANDRO HERRERA ZEPPELIN

ALVARO CERONI SALAZAR

SANTIAGO DE CHILE

2020

ESTUDIO DEL SISTEMA DE LODOS ACTIVADOS DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS SERVIDAS DE LOS ÁNGELES
PARA EL CONTROL DEL PROBLEMA DE BULKING FILAMENTOSO, UTILIZANDO HERRAMIENTAS DE MODELACIÓN

El Bulking Filamentoso es un problema operacional que disminuye la eficiencia en los sistemas de lodos activados en las plantas de tratamiento de aguas (PTAS). Su presencia podría generar impactos en materia de gestión hídrica, consumo energético y/o implicancias medioambientales. El origen de estos eventos no se atribuye a una causa específica, sino que varía de acuerdo con la operación de la PTAS, calidad de las aguas servidas, localización geográfica, estacionalidad del clima, entre otras. Sin embargo, la mayoría de los eventos de Bulking se asocian a la predominancia de la bacteria filamentosa *M. parvicella* frente a los otros organismos presentes en el lodo activado.

El objetivo del proyecto es construir un modelo que simule la dinámica del sistema de lodos activados de la PTAS de la ciudad de Los Ángeles, Chile, perteneciente a la empresa sanitaria ESSBIO. El modelo relaciona las principales variables de operación de la planta: F/M, TRC y flujo de aireación, con la formación en exceso de *M. parvicella*. Este se basa en una extensión al modelo ASM3 que incluye la presencia de la bacteria filamentosa, el cual simula los procesos biológicos de los organismos en el lodo activado. A partir de ello, se realiza un ajuste de los parámetros de las constantes de Monod para los organismos heterótrofos, autótrofos y *M. parvicella*, mediante la minimización de los errores absolutos medios entre los datos experimentales recopilados en planta y los resultados de modelación.

Con respecto a los resultados, se identifica una tendencia al aumento de la abundancia relativa de *M. parvicella* ante a: 1) Disminución del indicador F/M, producto de su alta especificidad por sustrato ($K_{M.parvicella}$: 0,1 [gX_{STO}/m³]; $K_{Heterótrofos}$: 1 [gX_{STO}/m³]); 2) Aumento en el TRC, debido a su baja magnitud en la tasa de respiración celular (0,04 [d⁻¹]) en comparación con la de sus competidores (0,8 [d⁻¹]); 3) Aumento en el flujo de aireación por la baja magnitud en su constante de Monod ($K_{M.parvicella}$: 0,01 [gO₂/m³]); $K_{Heterótrofos}$: 0,4 [gO₂/m³]). Por otro lado, de acuerdo con los resultados, la predominancia de *M. parvicella* se vería mermada ante bajas en la aireación, esto sugiere que la formación de Bulking en condiciones microaerofílicas se relacionaría con una posible capacidad de denitrificar de la bacteria, lo cual fue obtenido proponiendo una modificación a la extensión del modelo ASM3, que considera el crecimiento de *M. parvicella* en condiciones anóxicas y el efecto inhibitorio del Nitrato captado como sustrato por parte de los organismos heterótrofos de acuerdo al modelo de crecimiento microbiano de Haldane.

Las simulaciones del modelo permiten proponer medidas para el control del Bulking Filamentoso clasificadas en: medidas correctivas, las que se basan en adición de productos químicos en distintos puntos del proceso, estas mitigarían en un 10% la abundancia relativa de *M. parvicella*; y medidas preventivas, las cuales proponen un control constante de las condiciones de operación de la PTAS, estas reducirían en un 5% la predominancia de la bacteria filamentosa. No obstante, ambas medidas podrían impactar negativamente en la eficiencia del tratamiento de aguas servidas. Se estima que las medidas preventivas serían un 15% menos costosas que las medidas correctivas, aunque estas presentan mayor incertidumbre en su efectividad.

Finalmente, el estudio entrega una estandarización del sistema de lodos activados de la planta a partir del modelo construido, propone proyecciones para la investigación de la fisiología de *Microthrix parvicella* y entrega criterios de operación ante eventos de Bulking Filamentoso, los que podrían ser extrapolables a los sistemas de lodos activados.

En memoria de José Tomás Camacho Orlic...

Tabla de Contenido

Capítulo 1	1
1. Introducción	1
1.1. ESSBIO S.A	1
1.2. El agua en Chile y el mundo.....	1
1.3. Motivación.....	4
1.4. Objetivos.....	6
1.4.1. Objetivos Generales	6
1.4.2. Objetivos Específicos.....	6
Capítulo 2	7
2. Marco Teórico y Antecedentes	7
2.1. El ciclo hídrico urbano	7
2.2. Fuentes de Contaminación del Agua.....	10
2.2.1. Material Orgánico	10
2.2.2. Sólidos Suspensidos.....	10
2.2.3. Nutrientes	11
2.2.4. Microorganismos.....	11
2.3. Proceso de Tratamiento de Aguas Servidas	12
2.3.1. Sistema de Lodos Activados	12
2.3.1.1. Pretratamiento	13
2.3.1.2. Tratamiento Biológico	13
2.3.2. Microbiología de Lodos Activados	17
2.3.3. Bulking Filamentoso	19
2.3.4. Aspectos microbiológicos en la formación de Bulking Filamentoso	20
2.4. <i>Microthrix parvicella</i>	21
2.4.1. Aislamiento.....	22
2.4.2. Fisiología	22
2.4.3. Cinética de Crecimiento, temperatura y pH	23
2.5. Modelación computacional del sistema de lodos activados	24

Capítulo 3	27
3. Metodología	27
3.1. Búsqueda Bibliográfica.....	28
3.2. Comprensión e interpretación del proceso de la PTAS de Los Ángeles	28
3.3. Elección del modelo de Simulación.....	29
3.4. Estructuración del Modelo de Simulación.....	30
3.4.1. Componentes del Sistema.....	30
3.4.2. Procesos Cinéticos del modelo	33
3.4.3. Parámetros del Modelo y coeficientes estequiométricos.....	37
3.4.4. Balances de Masa en el sistema.....	38
3.5. Obtención de los datos experimentales.....	42
3.6. Construcción del modelo y ajuste de parámetros	43
3.7. Análisis de Sensibilidad.....	44
3.8. Propuestas Técnico – Económicas de control operacional	44
Capítulo 4	45
4. Resultados y Discusión.....	45
4.1. Ensayos de Tinción Gram.....	45
4.2. Modelo inicial y análisis de sensibilidad de parámetros.....	48
4.3. Ajuste de parámetros del modelo.....	53
4.4. Simulación del modelo con los valores de los parámetros ajustados	57
4.4.1. Comparación de resultados obtenidos y datos experimentales	57
4.4.2. Abundancia relativa de <i>Microthrix parvicella</i>	65
4.5. Análisis de sensibilidad de las condiciones de operación de la PTAS	68
4.6. Propuestas Técnico- Económicas de control operacional.....	75
Capítulo 5	81
5. Conclusiones	81
Capítulo 6	84
6. Bibliografía.....	84
Capítulo 7	91
7. Anexos.....	91
7.1. Demanda y Oferta hídrica en Chile para el año 2030	91

7.2.	Sistemas de Tratamiento de Aguas Servidas	92
7.2.1.	Lagunas Facultativas	92
7.2.2.	Lagunas Aireadas	94
7.2.3.	Emisarios submarinos	95
7.3.	Tipos de Protozoos en el Sistema de Lodos Activados	96
7.4.	Tipos de Bacterias Filamentosas identificadas en los Lodos Activados	97
7.5.	Matriz Estequiométrica y de Composición del modelo	99
7.6.	Descripción del proceso de Tratamiento de Aguas de la PTAS de Los Ángeles	101
7.7.	Elección del modelo de Simulación y Diferencias de ASM3 con sus versiones anteriores	
	103	
7.8.	Dinámica del funcionamiento del sistema de lodos activados con la inclusión de <i>M. parvicella</i>	104
7.9.	Parámetros Cinéticos y Estequiométricos del modelo escogido	106
7.10.	Obtención de los coeficientes de la Matriz estequiométrica	110
7.11.	Balances de Masa en el sistema	113
7.12.	Protocolos de laboratorio realizados en el estudio	116
7.12.1.	Ensayos de Tinción Gram	116
7.12.2.	Conteo Microscópico en muestra <i>in vivo</i>	119
7.12.3.	Procedimiento de cuantificación de nitrógeno	124
7.13.	Estructura de Modelo de Simulación	124
7.13.1.	Estructuras de tipo <i>Main</i>	124
7.13.2.	Estructura de funciones:	126
7.14.	Condiciones de operación usadas en el modelo de análisis de significancia	128
7.15.	Gráfico de las especies del modelo con el ajuste de parámetros	130
7.16.	Valores de las especies obtenidas a través de la variación de las condiciones de operación de la PTAS en el análisis de sensibilidad	132
7.17.	Medidas propuestas para el control de la proliferación del Bulking Filamentoso	137
7.17.1.	Medidas Correctivas	137
7.17.2.	Medidas Preventivas	139

Índice de Tablas

Tabla 1: Posibles impactos en el tratamiento de aguas debido a la presencia de Bulking Filamentoso.	5
Tabla 2: Resumen de la Norma Chilena 409 de agua potable.....	8
Tabla 3: Resumen de la tabla 1 del decreto 90 de calidad de aguas.....	9
Tabla 4: Parámetros escogidos para el ajuste en sus valores.....	37
Tabla 5: Ponderación de especies para el cálculo del MAE en el ajuste de parámetros.	43
Tabla 6: Sensibilidad de los valores de los parámetros del modelo inicial.	49
Tabla 7: Valores de los parámetros ajustados para organismos heterótrofos.....	53
Tabla 8: Valores de los parámetros ajustados para organismos autótrofos.....	53
Tabla 9: Valores de los parámetros ajustados para <i>Microthrix parvicella</i>	54
Tabla 10: Valores de los flujos de aireación diarios ajustados.....	54
Tabla 11: Descripción de los términos switch en las cinéticas del modelo construido.....	64
Tabla 12: Concentración media de SST obtenidas en el análisis de sensibilidad de las condiciones de operación.....	68
Tabla 13: Concentración media de SSV obtenidas en el análisis de sensibilidad de las condiciones de operación.....	69
Tabla 14: Concentración media de <i>XI</i> obtenidas en el análisis de sensibilidad de las condiciones de operación.....	69
Tabla 15: Concentración media de <i>SS</i> obtenidas en el análisis de sensibilidad de las condiciones de operación.....	70
Tabla 16: Concentración media de <i>XH</i> obtenidas en el análisis de sensibilidad de las condiciones de operación.....	71
Tabla 17: Concentración media de <i>XMIC</i> obtenidas en el análisis de sensibilidad de las condiciones de operación.....	71
Tabla 18: Abundancia relativa de <i>M. parvicella</i> obtenidas en el análisis de sensibilidad de las condiciones de operación.....	72

Tabla 19: Inclusión del término de inhibición por Nitrito/Nitrato en el modelo propuesto.....	73
Tabla 20: Mapa de calor de Abundancia Relativa de <i>M. parvicella</i> obtenido por el modelo propuesto.	74
Tabla 21: Medias propuestas para el control de la formación de Bulking Filamentoso.	75
Tabla 22: Costo de las medidas correctivas propuestas para el control de la formación de Bulking Filamentoso.	75
Tabla 23: Resultados de la simulación del sistema ante la inyección de cloro en el Reactor Biológico.	77
Tabla 24: Costo de las medidas preventivas propuestas para el control de la formación de Bulking Filamentoso.	78
Tabla 25: Balance Oferta y Demanda Hídrica estimada para el año 2030 en el país [Mm ³ /año].	91
Tabla 26: Especies de bacterias filamentosas identificadas en sistemas de Lodos Activados.	97
Tabla 27: Matriz estequiométrica del modelo utilizado en el estudio. En fondo blanco las especies disueltas; en fondo gris, las especies suspendidas.....	99
Tabla 28: Parámetros cinéticos propuestos por el modelo ASM3 + extensión de <i>M. parvicella</i> .	106
Tabla 29: Parámetros Estequiométricos propuestos por el modelo ASM3 + extensión de <i>M. parvicella</i>	108
Tabla 30: Matriz de extensión del ASM3 para la inclusión de <i>Microthrix parvicella</i>	110
Tabla 31: Coeficientes estequiométricos del modelo utilizado en el proyecto.	111
Tabla 32: Condiciones del diseño unitario de los reactores biológicos de la PTAS de Los Ángeles.	113
Tabla 33: Condiciones del diseño unitario de los clarificadores secundarios de la PTAS de Los Ángeles.	113
Tabla 34: Resultados del conteo microscópico, y posterior cálculo de la abundancia relativa de filamentos.	123
Tabla 35: Condiciones de operación usadas en el modelo inicial.	128
Tabla 36: Composición de las especies del caudal afluente usado en el modelo inicial.	128

Tabla 37: Concentraciones de las especies obtenidas a partir de la simulación del modelo inicial.	129
.....	
Tabla 38: Concentración de Oxígeno disuelto según la variación del TRC y el flujo de aireación.	132
.....	
Tabla 39: Concentración de Sólido Inerte Disuelto según la variación del TRC y el flujo de aireación.....	132
.....	
Tabla 40: Concentración de Sustrato de degradación rápida según la variación del TRC y el flujo de aireación.....	133
.....	
Tabla 41: Concentración de Sustrato de Degradación Lenta según la variación del TRC y el flujo de aireación.....	133
.....	
Tabla 42:Concentración de Sustrato Almacenado según la variación del TRC y el flujo de aireación.....	133
.....	
Tabla 43: Concentración de Organismos Autótrofos según la variación del TRC y el flujo de aireación.....	134
.....	
Tabla 44: Concentración de Lípido Suspendido según la variación del TRC y el flujo de aireación.....	134
.....	
Tabla 45: Concentración de Lípidos Almacenados según la variación del TRC y el flujo de aireación.....	134
.....	
Tabla 46: Concentración de Lípido Disuelto según la variación del TRC y el flujo de aireación.	135
.....	
Tabla 47: Concentración de Nitrógeno Amoniacal según la variación del TRC y el flujo de aireación.....	135
.....	
Tabla 48: Concentración de Nitrógeno Gaseoso según la variación del TRC y el flujo de aireación.....	135
.....	
Tabla 49: Concentración de Nitrito y Nitrato según la variación del TRC y el flujo de aireación.	136
.....	
Tabla 50: Alcalinidad según la variación del TRC y el flujo de aireación.....	136
.....	
Tabla 51: Cálculo de costos de las medidas correctivas asociadas a adición de químicos en el sistema.....	138
.....	
Tabla 52: Costos de inversión de equipamiento para implementación de medidas preventivas.	140

Índice de Figuras

Figura 1: Mapa del porcentaje de escasez hídrica en el mundo.	2
Figura 2: Distribución del consumo hídrico industrial en el país.	2
Figura 3: Gráfico de Oferta y Demanda hídrica para el año 2030 en las regiones críticas de Chile.	3
Figura 4: Esquema del ciclo hídrico urbano.	7
Figura 5: Diagrama de flujo típico del sistema del proceso de tratamiento de aguas utilizando lodos activados.	13
Figura 6: Estructura típica del sistema de lodos activados.	14
Figura 7: A la izquierda: Fotografía microscópica de un flóculo del sistema de lodos activados. A la derecha: Esquema de la conformación típica de un flóculo en el sistema de lodos activados..	16
Figura 8: Fotografía de bacterias en el lodo activado. A la izquierda: Bacterias Heterótrofas. A la derecha: Bacterias Autótrofas o nitrificantes.	17
Figura 9: Fotografía en microscopio de protozoos observados en el lodo activado. De izquierda a derecha: a) Ameba b) Flagelado c) Ciliado fijo.	17
Figura 10: Fotografía en microscopio de metazoos observados en el lodo activado. De izquierda a derecha: a) Rotífero b) Nemátodo.	18
Figura 11: Tinción Gram para dos especies de bacterias filamentosas presentes en el lodo activado. De izquierda a derecha: a) <i>Microthrix parvicella</i> b) <i>Nocardia</i> spp.	18
Figura 12: Fotografía en microscopio de la extensión de una bacteria filamentosa entre dos flóculos.	19
Figura 13: A la izquierda: Clarificador Secundario con problemas de Bulking Filamentoso y Foaming (espumamiento). A la derecha: Clarificador Secundario en condiciones normales.	20
Figura 14: Observación de <i>Microthrix parvicella</i> en una prueba de tinción Gram.	21
Figura 15: Estructura química del ácido oleico.	22
Figura 16: Interpretación de la dinámica de microorganismos bacterianos para los modelos ASM1 y ASM3.	25
Figura 17: Metodología propuesta para realizar el estudio.	27

Figura 18: Diagrama de Bloques del proceso de tratamiento de aguas de la PTAS de Los Ángeles.	28
Figura 19: Diagrama resumido de la dinámica microbiológica del modelo.....	29
Figura 20: Esquema del sistema de Lodos Activados de la PTAS de Los Ángeles.....	38
Figura 21: Diagrama de entradas y salidas del modelo construido.	43
Figura 22: Fotografía microscópica a 10X de un ensayo de tinción Gram. Ambas corresponden a distintos flóculos presentes en el lodo activado.....	45
Figura 23: A la izquierda: Fotografía microscópica a 40X de un ensayo de tinción Gram en un flóculo del lodo activado. A la derecha: Fotografía microscópica de tinción Gram obtenida en literatura donde se identifica a <i>M. parvicella</i>	45
Figura 24: A la izquierda: Fotografía microscópica a 10X de un ensayo de tinción Gram en un flóculo del lodo activado. A la derecha: Fotografía microscópica de tinción Gram obtenida en literatura donde se identifica a <i>M. parvicella</i>	46
Figura 25: A la izquierda: Fotografía microscópica a 10X de un ensayo de tinción Gram en un flóculo del lodo activado. A la derecha: Fotografía de un ensayo de tinción Gram obtenida en literatura donde se identifica a la especie type 0914.	46
Figura 26: A la izquierda: Fotografía microscópica a 40X de un ensayo de tinción Gram en un flóculo del lodo activado. A la derecha: Fotografía de un ensayo de tinción Gram obtenida en literatura donde se identifica a la especie type 1851.	47
Figura 27: Gráfico de SST y SSV diarios en la PTAS de Los Ángeles obtenidos utilizando los valores de los parámetros ajustados.....	57
Figura 28:Composición media de los SST y SSV en el sistema de lodos activados obtenida a través del modelo.....	58
Figura 29: Estimadores operacionales diarios en el reactor biológico. Zona superior: Razón F/M; Zona media: Tiempo de Residencia Celular; Zona inferior: Flujo de aireación.	59
Figura 30: Valores diarios obtenidos de las especies ajustadas a los datos experimentales. A la izquierda: Alcalinidad. A la derecha: Oxígeno disuelto.....	60
Figura 31: Dinámica diaria de los organismos heterótrofos en el sistema de lodos activados.....	61
Figura 32: Dinámica diaria de <i>M. parvicella</i> en el sistema de lodos activados.....	62
Figura 33: Valores diarios obtenidos de las especies ajustadas a los datos experimentales. A la izquierda: Amoniaco. A la derecha: Nitrito/Nitrato.	62

Figura 34: Gráfico de evolución de cinéticas aeróbicas y anóxicas con respecto al oxígeno disuelto en el Reactor Biológico.....	64
Figura 35: Gráfico de la dinámica de la Abundancia Relativa diaria de <i>M. parvicella</i> en el sistema de lodos activados.....	65
Figura 36: Evolución de abundancia relativa de <i>M. parvicella</i> en función del TRC y el F/M en el Reactor Biológico	66
Figura 37: Comparación de la Abundancia relativa de <i>M. parvicella</i> y la dinámica de la biomasa total en el Reactor Biológico.	67
Figura 38: Gráfico de variación de abundancia relativa con respecto al TRC y el flujo de aireación.....	73
Figura 39: Esquema de las reacciones generadas en las lagunas facultativas.	92
Figura 40: Fotografía de un sistema de Lagunas Facultativas.	93
Figura 41: Estratificación de zonas y reacciones en una laguna facultativa.	93
Figura 42: Esquema de tipos de operación del sistema de Lagunas Aireadas a) Operación sin etapa de sedimentación (agitación media en el reactor) b) Operación con independización de sedimentación de Lodos.	94
Figura 43: Fotografía de un emisario submarino descargando aguas residuales en el mar.	95
Figura 44: Fotografía en microscopio de protozoos observados en el lodo activado. De izquierda a derecha: a) Ameba b) Flagelado c) Ciliado fijo.....	96
Figura 45: Diagrama de Bloques del proceso de tratamiento de aguas de la PTAS de Los Ángeles.	101
Figura 46: Esquema del sistema de Lodos Activados de la PTAS de Los Ángeles.....	113
Figura 47: Fotografías 3 y 4 de resultados de ensayos de tinción Gram. Cada uno tomado en un flóculo del lodo activado del Reactor Biológico.	117
Figura 48:Fotografías 5 y 6 de resultados de ensayos de tinción Gram. Cada uno tomado en un flóculo del lodo activado del Reactor Biológico.	117
Figura 49: Fotografías 1 y 2 de resultados de ensayos de tinción Gram. Cada uno tomado en un flóculo del lodo activado del Reactor Biológico.	117
Figura 50: Fotografías 7 y 8 de resultados de ensayos de tinción Gram. Cada uno tomado en un flóculo del lodo activado del Reactor Biológico.	118

Figura 51: Fotografías 9 y 10 de resultados de ensayos de tinción Gram. Cada uno tomado en un flóculo del lodo activado del Reactor Biológico.	118
Figura 52: Fotografías 1 y 2 de resultados de los ensayos de conteo de una muestra in vivo. Cada uno tomado en un flóculo del lodo activado del Reactor Biológico.	120
Figura 53: Fotografías 3 y 4 de resultados de los ensayos de conteo de una muestra in vivo. Cada uno tomado en un flóculo del lodo activado del Reactor Biológico.	120
Figura 54: Fotografías 7 y 8 de resultados de los ensayos de conteo de una muestra in vivo. Cada uno tomado en un flóculo del lodo activado del Reactor Biológico.	121
Figura 55: Fotografías 5 y 6 de resultados de los ensayos de conteo de una muestra in vivo. Cada uno tomado en un flóculo del lodo activado del Reactor Biológico.	121
Figura 56: Fotografías 9 y 10 de resultados de los ensayos de conteo de una muestra in vivo. Cada uno tomado en un flóculo del lodo activado del Reactor Biológico.	122
Figura 57: Fotografía de ejemplo de cálculo del conteo e identificación de organismos en un flóculo del lodo activado del reactor biológico.	122
Figura 58: Gráfico de Sólidos Inertes disueltos y suspendidos obtenidos a partir del modelo de simulación con los parámetros ajustados.....	130
Figura 59: Gráfico de Sustratos de degradación lenta y Organismos Autótrofos obtenidos a partir del modelo de simulación con los parámetros ajustados.....	130
Figura 60: Gráfico de Sustratos de degradación rápida y Nitrógeno gaseoso disuelto obtenidos a partir del modelo de simulación con los parámetros ajustados	131
Figura 61:Gráfico de Lípidos Suspendidos y Lípidos Disueltos obtenidos a partir del modelo de simulación con los parámetros ajustados.....	131

Simbología

Símbolo o Abreviación	Significado
F/M	Relación <i>Food vs Mass</i>
A	Área
V	Volumen
DQO	Demanda Química de Oxígeno
DBO	Demanda Bioquímica de Oxígeno
M.O.	Microorganismos
PTAS	Planta de Tratamiento de Aguas Servidas
A.R.	Abundancia Relativa <i>Microthrix parvicella</i>
LM	Licor Mixto
SSVLM	Sólidos Volátiles en el Licor Mixto
RAS	Caudal de Recirculación
WAS	Caudal de Purga
LCFA	Ácidos grasos de cadena larga
g	Gramo
kg	Kilogramo
l	Litro
m^3	Metros cúbicos
Mm^3	Millones de metros cubicos

Símbolo o Abreviación	Significado
d	día
Q	Caudal
S	Concentración de especies disueltas en mezcla
X	Concentración de especies suspendidas en mezcla
ρ	Cinética de Monod
S_O	Concentración de Oxígeno disuelto
S_I	Concentración de Sólidos Inertes disueltos
S_S	Concentración de Sustrato de degradación rápida
X_I	Concentración de Sólidos Inertes suspendidos
X_S	Concentración de Sustrato de degradación lenta
X_H	Concentración de Organismos Heterótrofos
X_{STO}	Concentración de Sustrato Almacenado en organismos heterótrofos
X_A	Concentración de Organismos Autótrofos
X_{LIP}	Concentración de Lípido suspendido
X_{STOLIP}	Concentración de Lípido Almacenado en <i>Microthrix parvicella</i>
X_{MIC}	Concentración de <i>Microthrix parvicella</i>
S_{LIP}	Concentración de Sustrato lipídico disuelto
S_{NH}	Concentración de Nitrógeno amoniacal disuelto
S_{NO}	Concentración de Complejo nitrito/nitrato
S_{HCO}	Alcalinidad en el Reactor Biológico

Símbolo o Abreviación	Significado
X_{ST} ó SST	Concentración de Sólidos suspendidos totales
X_{SV} ó SSV	Concentración de Sólidos suspendidos volátiles
F_{O_2}	Flujo de aireación
i	Parámetro de composición
k	Tasa de almacenamiento de sustrato
K	Constante de saturación de Monod
Y	Rendimiento metabólico
b	Tasa de respiración endógena
$\frac{d}{dt}$	Derivada con respecto al tiempo
μm	Micras
mm	Milímetros
cm	Centímetros
m	metros
h	Hora

Glosario

- **Afluente:** Caudal efluente a tratar.
- **Aguas Servidas:** Estado del agua proveniente del uso doméstico, comercial e industrial. Se compone de variados contaminantes como sólidos en suspensión, materia orgánica, nutrientes, microorganismos, etc.
- **Almacenamiento de sustrato:** Proceso metabólico de los microrganismos donde captan el sustrato disponible en el medio y lo transportan hacia el espacio intracelular (citoplasma).
- **Biomasa:** Materia orgánica de origen vegetal o animal, incluyendo los residuos y desechos orgánicos, susceptible de ser aprovechada energéticamente.
- **Bulking Filamentoso:** Problema operacional percibido en una disminución de la eficiencia de la etapa de clarificación secundaria producto del impedimento de los sólidos en suspensión para ser decantados. Este problema se le otorga a la presencia en exceso de bacterias filamentosas en el lodo activado.
- **Crecimiento celular:** Proceso metabólico de síntesis de biomasa. Para llevarlo a cabo, los microorganismos utilizan el sustrato almacenado internamente para crear nuevas estructuras moleculares que le permitan producir nuevas unidades de organismos.
- **Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO):** cantidad de oxígeno requerido por los microorganismos presentes en las aguas servidas durante la estabilización de la materia orgánica susceptible a descomposición (estos compuestos sirven como sustrato en los procesos metabólicos de los microorganismos) en condiciones aeróbicas.
- **Demanda Química de Oxígeno (DQO):** cantidad de oxígeno necesario, utilizado como agente oxidante, para degradar los compuestos orgánicos e inorgánicos (biodegradables/no biodegradables, disueltos y particulados), que se encuentren susceptibles a la oxidación en las aguas servidas.

- **Denitrificación:** Proceso de remoción de nitrito y/o nitrato en una solución. Este proceso se desarrolla en condiciones anóxicas, donde estas especies nitrogenadas se utilizan como acceptor de electrones en una reacción de oxidación de materia orgánica. El producto de esta reacción corresponde al nitrógeno gaseoso, el cual se transfiere desde el medio líquido.
- **Efluente:** Caudal de un fluido sale del sistema.
- **Eutrofización:** Corresponde a la acumulación excesiva de materia orgánica o inorgánica en un ecosistema determinado. Este fenómeno genera una alteración del medio, cambiando las condiciones simbióticas con las cuales fue formado en un inicio.
- **Food versus Mass:** Relación entre la DBO en el reactor biológico y la biomasa en el sistema. Coloquialmente se le puede interpretar como cuanto alimento se encontrará disponible para los microorganismos presentes en el medio.
- **Flóculo:** Aglomeraciones de materia en suspensión, cuya densidad (> 1 [g/ml]) y masa los hace capaces de ser decantados utilizando operaciones de sedimentación.
- **Hidrolisis:** Reacción química de degradación de materia orgánica o inorgánica de disociación del agua un grupo hidrógeno e hidróxido, trayendo como resultado la obtención de moléculas de estructura mas simple.
- **Licor Mixto:** solución líquida contenida en el Reactor Biológico del sistema de lodos activados. El término se asocia a la mezcla generada entre el lodo activado y las aguas servidas que ingresan a la etapa de tratamiento biológico.
- **Lodo activado:** Consorcio de microorganismos usado para degradar la materia contaminante de las aguas servidas. Estos pueden transformar la materia disuelta en materia suspendida, lo que genera la formación de flóculos y posterior decantación y extracción de estos sólidos.
- **Materia orgánica:** Sustancias compuestas de moléculas orgánicas cuya estructura química se basa en el carbono, lo que la hace susceptible a ser oxidada a CO_2 por diferentes tipos de microorganismos para síntesis celular. Esta proviene desde desechos domésticos, agrícolas y/o industriales.
- **Metabolismo:** Conjunto de los cambios químicos y biológicos que se producen continuamente en las células vivas de un organismo.
- **Nitrificación:** Proceso químico de formación de nitrito y nitrato debido a los procesos metabólicos de los organismos nitrificantes. Este proceso se desarrolla en condiciones aeróbicas, donde los microorganismos utilizan el CO_2 como fuente de carbono inorgánica y el amoniaco como fuente de nitrógeno.

- **Respiración endógena:** Proceso en donde los microorganismos utilizan su protoplasma interno para llevar a cabo sus procesos metabólicos como mantenimiento celular. Este proceso desencadena en una auto-destrucción de los microorganismos por agotamiento de sus compuestos de reserva.
- **Re-suspensión de Lodos:** Problema operacional producido por la formación de reacciones anóxicas o anaeróbicas en los clarificadores secundarios. Producto de esta reacción, los sólidos suspendidos contenidos en la etapa disminuyen su densidad, y por ende, re suspenden sus partículas sin posibilidad de ser decantados y compactados, restando eficiencia en el proceso y perjuicio en la calidad del efluente.
- **Sólidos Suspendedos Totales:** Materia orgánica e inorgánica presente en el sistema de lodos activados que se encuentra en suspensión. Esta puede formar flóculos para ser decantados en el clarificador secundario.
- **Sólidos Suspendedos Volátiles:** Materia orgánica e inorgánica presente en el sistema de lodos activados que puede ser volatilizada en una mufla a 550 [°C]. Típicamente este parámetro se toma como una representación de la biomasa activa en el lodo activado, puesto que esta representa aproximadamente el 50% de los sólidos volátiles.
- **Sistema de operación x + y:** se refiere a la forma de operar continuamente con x bombas e y bombas de respaldo. Por ejemplo, la PTAS opera a un sistema 2 + 1: quiere decir que 2 bombas se encuentran operando, mientras que 1 funciona como respaldo ante cualquier falla de las 2 bombas operativas.
- **Tiempo de Residencia Celular:** Tiempo (en días) en que la biomasa activa reside en el sistema de lodos activados.

Capítulo 1

1. Introducción

1.1. ESSBIO S.A.

ESSBIO es una empresa del servicio sanitario de aguas, cuya presencia permite suplir la demanda hídrica de las regiones del Libertador Bernardo O'Higgins, Biobío y Ñuble. La compañía posee una cobertura nacional de un 99%, 93% y 100% en las demandas de agua potable, alcantarillado y tratamiento de aguas servidas respectivamente [1].

Esta compañía es una de las 11 sociedades anónimas que provienen de la disolución del Servicio Nacional de Obras Sanitarias (SENDOS) en 1977. En la actualidad, la empresa posee una atención hacia más de 800.000 personas distribuidas en 93 localidades del país, dicha asistencia se relaciona principalmente con el uso doméstico del agua procesada, aunque paralelamente ESSBIO ofrece servicios de tratamiento de residuos líquidos industriales bajo el marco legal existente.

En 2018 ESSBIO asume voluntariamente su adhesión a los Objetivos del Desarrollo Sostenible (ODS) de la Organización de las Naciones Unidas (ONU). Destacando su compromiso en materia de saneamiento de agua de acuerdo con las ODS 6.3 y 6.4, las cuales, en líneas generales, exigen que para el año 2030 exista un mejoramiento sustancial en la calidad del agua y un aumento en la eficiencia de la utilización de los recursos hídricos. Esto se busca para apalgar un problema medioambiental futuro como lo es la escasez hídrica [1].

1.2. El agua en Chile y el mundo

La escasez de agua se define como la insuficiencia de recursos hídricos disponibles para satisfacer las demandas humanas de agua en un mediano-largo plazo. Este fenómeno se ve agravado por la sobreexplotación de los recursos hídricos, manifestándose típicamente en la presencia de períodos de sequía en distintas regiones del mundo [2].

El organismo de las Naciones Unidas estima que más de un 40% de la población mundial se ve afectado por la escasez hídrica, es decir, aproximadamente 2.600 millones de personas. Bajo ese contexto, Chile no se encuentra ajeno a esta crisis mundial, donde se incluye a al país dentro de las 30 naciones con mayor riesgo hídrico para el año 2025 [3]. Lo anterior se sustenta en que la extracción de agua en el país se encuentra mayoritariamente entre el 40-80% de las fuentes disponibles de este recurso, encontrándose de esta manera en un índice de estrés hídrico global alto según el instituto de recursos mundiales (WRI) [4, 5] (ver Figura 1).

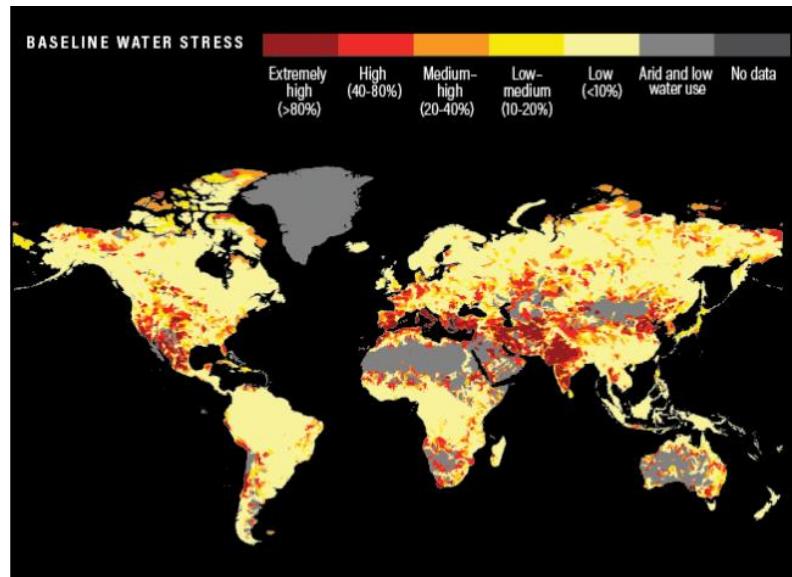


Figura 1: Mapa del porcentaje de escasez hídrica en el mundo [5].

El volumen de extracción de aguas en Chile se divide en 6 principales industrias: servicios sanitarios, agrícola, pecuario, industrial y minería [6]. De acuerdo con lo anterior, se estima que estos sectores generan un consumo anual de agua de aproximadamente 11 miles de millones de metros cúbicos, donde el 8% de esa cifra se destina hacia los procesos de potabilización y saneamiento de agua (ver Figura 2) [7].

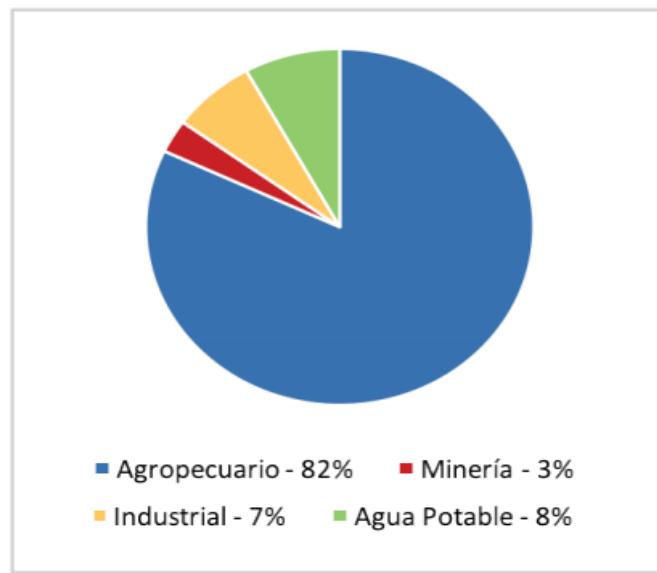


Figura 2: Distribución del consumo hídrico industrial en el país [6].

Debido al crecimiento demográfico y productivo en el mundo y en el país, el volumen de extracción de agua se encontrará en un constante aumento en un futuro. En base a los datos entregados por la Dirección General de Aguas (DGA), para el año 2030 se registrará un déficit en el balance hídrico de oferta y demanda para las regiones desde Arica y Parinacota hasta la Región Metropolitana (ver Figura 3) [8].(en el Anexo 7.1 se detalla el balance de oferta y demanda para el año 2030 en todas las regiones del país)

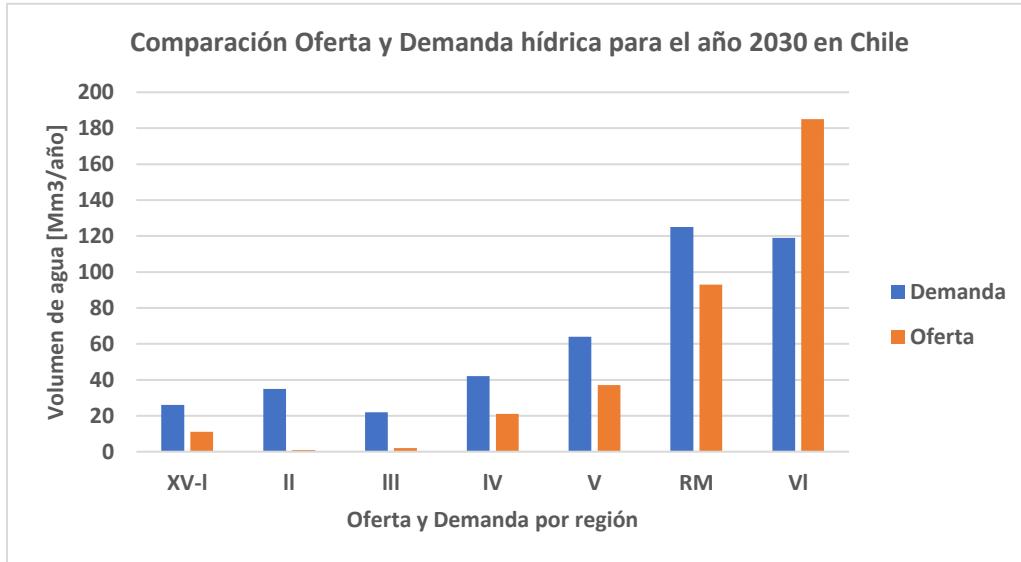


Figura 3: Gráfico de Oferta y Demanda hídrica para el año 2030 en las regiones críticas de Chile [8].

El aumento en la demanda de agua para el año 2030 no deja exento al Servicio Sanitario de aguas. Se proyecta que, para dicho año, este sector presente un crecimiento en la demanda del 16% a nivel país ($1.500.000 [Mm^3/año]$), el cual alcanzará un 26% ($1.600.000 [Mm^3/año]$) para el año 2040 [8]. Ante ese escenario, la VIII Región del Bío-Bío presentará un aumento en la demanda hídrica del 33%, equivalente a requerir un volumen de $49.000 [Mm^3/año]$ de agua.

En la actualidad, ESSBIO se encuentra capacitada estructuralmente para captar aproximadamente $140.000 [Mm^3/año]$ de agua, provenientes de fuentes superficiales y/o subterráneas. De este volumen, se estima que el 57% de agua tratada es devuelta al cauce original desde donde provino [1].

1.3. Motivación

El cambio climático y el crecimiento demográfico acelerado en el mundo, han traído consigo un aumento en la rigurosidad del cuidado del agua dulce. Para lograr este objetivo, es necesario poseer una conciencia de consumo del agua a nivel mundial, junto con estar constantemente desarrollando nuevas estrategias y tecnologías que permitan optimizar los procesos extractivos de este recurso, como lo acontecido en el servicio sanitario[9].

Los procesos de tratamientos de aguas presentan diversas oportunidades de recuperación y optimización en el uso de agua. Su operación compromete no solo las aguas servidas provenientes del consumo humano, sino que también la utilización de agua potable en sus procesos internos como mantenimiento y limpieza de equipos. Sumado a ello, es que la eficiencia en su procesamiento es crucial para el cuidado ecosistémico local, y medioambiental global, ya que la disponibilidad de este recurso en el corto, mediano y largo plazo, depende de la calidad de sus efluentes.

La necesidad de aumentar el grado de conocimiento técnico se hace imprescindible. Donde el control y mitigación de los problemas operacionales, como el Bulking Filamentoso, corresponden a constantes desafíos para la Ingeniería de Procesos, tanto para cumplir con una excelencia operacional y profesional, como para progresar en los hitos del desarrollo sostenible propuestos por la Organización de las Naciones Unidas (ONU).

La ONU clasifica al tratamiento de aguas servidas como un proceso que permite a la población mundial progresar hacia un futuro humano estable y en cohesión con el medio ambiente. Sin embargo, ante la presencia de problemas operacionales como el Bulking Filamentoso, evento presenciado en gran parte (sino todas) de las PTAS del mundo que utilizan la tecnología de lodos activados [10], el cumplimiento del rol en los procesos de tratamiento de aguas se vería obstaculizado [11].

El aporte del tratamiento de biológico aguas servidas identificado por la ONU se compone en 3 hitos fundamentales, los cuales podrían verse afectados por la presencia del Bulking Filamentoso. Es por ello que, a continuación, se presenta la siguiente tabla comparativa:

Tabla 1: Posibles impactos en el tratamiento de aguas debido a la presencia de Bulking Filamentoso.

Hito desarrollo sostenible ONU [11]	Contribución por tratamiento de aguas	Impacto por Bulking Filamentoso [12]
Estabilidad en las condiciones de salubridad	Protección de condiciones de higiene. Prevención de formación acelerada de microorganismos. Obtención de estándares de calidad de aguas para su reutilización.	Crecimiento excesivo de microorganismos filamentosos. Detrimiento en los estándares de calidad de aguas efluentes.
Protección en la disponibilidad de aguas	Abatimiento de nitrógeno y fósforo. Mitigación de la eutrofización. Eliminación de micropolutivos, microplásticos y nanopartículas. Protección de productos acuáticos, flora y fauna de ecosistemas.	Possible acumulación de nitrógeno y/o fósforo en las aguas. Aumento de Sólidos Suspendidos en el efluente. Formación de micropolutivos y posterior descarga al ecosistema.
Optimización de recursos hídricos	Reducción de recursos utilizados en tratamiento de aguas: requerimientos energéticos, materiales, impacto ambiental. Recuperación de recursos provenientes del agua servida: agua, nutrientes, energía, etc.	Aumento de recursos en tratamiento de aguas para abatimiento de Bulking Filamentoso (cloro, polímero, coagulantes, etc). Disminución de la eficiencia de formación de lodos. Impacto en recuperación de agua, nutrientes y energía.

Adicionalmente, el cumplimiento de estos hitos se ha visto detenido por el aumento en los índices de escasez hídrica, por lo que evidentemente al manejo y tratamiento del recurso hídrico se le están añadiendo problemas contextuales de forma paulatina. Ante este escenario las empresas del servicio sanitario destinan sus recursos en mejorar los procesos de tratamiento de aguas. En el caso de ESSBIO, se tiene que en el año 2018, se invirtieron aproximadamente 18.500 [MM\$] en la ampliación de las plantas de tratamiento de aguas en la Región del Biobío, donde gran parte de ellas utiliza el sistema de lodos activados, tecnología impactada de forma crónica por el problema Bulking Filamentoso [1].

De acuerdo con lo anterior es que se identifica la oportunidad en el desarrollo técnico de un proceso que constantemente se encuentra a la necesidad en la optimización en la eficiencia de etapas, manejo de recursos y consumo de materias primas. Aquello es ratificado de acuerdo con las acciones generadas desde un punto de vista medioambiental, económico, social y científico para el mejoramiento de los sistemas de tratamiento de aguas. En esta línea, es que se propone un proyecto que combina diferentes ejes temáticos de la ingeniería de procesos, que inician con la evidencia operacional de un problema generado por la fenomenología de un sistema microbiológico (el Bulking Filamentoso), el cual puede interpretarse bajo el marco teórico de un sistema de modelación. Esto podrá entregar directrices técnicas de mitigación y entendimiento acerca del Bulking Filamentoso, con el objetivo de poder contribuir en el manejo del recurso hídrico y el cumplimiento de los hitos del desarrollo sostenible propuestos por la ONU.

1.4. Objetivos

Los objetivos de este estudio se presentan a continuación:

1.4.1. Objetivos Generales

- Estudiar el funcionamiento del sistema de lodos activados de la planta de tratamiento de aguas servidas de la ciudad de Los Ángeles para evaluar las condiciones de operación que promueven la formación del problema de Bulking Filamentoso.

1.4.2. Objetivos Específicos

- Comprender el funcionamiento operacional de la planta de tratamiento de aguas servidas en estudio, específicamente en la etapa de tratamiento biológico.
- Construir un modelo computacional que simule el funcionamiento del sistema de lodos activados de la planta, enfocándose en la cuantificación de la presencia de la bacteria filamentosa *Microthrix parvicella*.
- Estudiar la población bacteriana presente en el sistema de lodos activados de la planta a través de la realización de ensayos de microscopía.
- Realizar ensayos de laboratorio en la planta para obtener datos experimentales del funcionamiento del proceso de tratamiento de aguas.
- Proponer medidas para controlar el problema de Bulking Filamentoso en base a los resultados obtenidos y las condiciones de operación de la PTAS.
- Proponer una asesoría técnico-económica para controlar el problema de Bulking Filamentoso en la PTAS en estudio.

Capítulo 2

2. Marco Teórico y Antecedentes

2.1. El ciclo hídrico urbano

La necesidad del ser humano de contar con la disponibilidad de agua se ha visto necesaria desde la fundación y expansión de las ciudades del mundo hasta la actualidad. Bajo este contexto, es que desde el año 1888, cuando se crea la Dirección General de Obras Públicas en el país, se ha generado una convivencia directa entre la demanda hídrica doméstica con los procesos del Servicio Sanitario de aguas [13].

Es por ello que paulatinamente se ha avanzado en dar importancia al funcionamiento de la producción y tratamiento de aguas, procesos que funcionan usualmente cercano a un espacio habitado por el ser humano como las ciudades, pueblos, localidades, etc. Estos procesos operan de forma integral y sincrónica, cuya dinámica es presentada en la Figura 4, la cual se puede presentar como un ciclo hídrico urbano regido por la demanda de agua de las personas, el sector comercial e industrial [14].



Figura 4: Esquema del ciclo hídrico urbano [14].

- **Captación:** El ciclo hídrico inicia con la captación del agua cruda, la cual proviene de una fuente natural y/o artificial. El volumen de estas fuentes es recargado debido a 5 actividades hídricas naturales: evaporación, condensación, precipitación, infiltración, transpiración (evaporación del agua contenida en plantas) [15, 16].
- **Potabilización y Almacenamiento:** Este recurso es sometido a un proceso de potabilización que, dependiendo de las condiciones fisicoquímicas del agua cruda, utilizará diferentes tipos de estrategias para producir agua potable según la norma chilena 409 Tabla 2 [17].

Tabla 2: Resumen de la Norma Chilena 409 de agua potable.

Parámetro	Unidad	Valor
Hierro	[mg/l]	0,3
Manganeso	[mg/l]	0,1
Amoniaco	[mg/l]	1,5
pH	-	6,5 – 8
Cloro libre residual	[mg/l]	0,2-2

- **Distribución y Consumo:** Una vez producida el agua potable, esta es suministrada hacia las localidades cercanas a través del uso de un sistema de redes dispuestas a lo largo de todo el área. En esta etapa del proceso se genera el consumo de agua potable, y, en consecuencia, su contaminación. De acuerdo con lo señalado anteriormente, los principales usos del agua son destinados a tres grandes consumidores (agroindustria, procesos industriales varios y uso doméstico) que, producto de la diferencia en el manejo del recurso hídrico, entregarán distintos tipos de contaminantes para la formación de las aguas servidas [18]:

- **Agricultura y Ganadería:** En muchos de los países, la mayor fuente de contaminación del agua es la agricultura. Esta industria es responsable del vertido de grandes cantidades de agroquímicos (fertilizantes, pesticidas, nitratos, etc), materia orgánica, sedimentos y sales en los cuerpos de agua. Junto con ello, se tiene que el sector ganadero, genera altas concentraciones de contaminantes relacionados con la excreción, microorganismos, hormonas provenientes de los animales procesados, entre otros [19].

Los contaminantes provenientes de la actividad agrícola y ganadera, considerados como los más dañinos para la salud humana corresponden a los patógenos de animales, plaguicidas, elementos nitrogenados, oligoelementos metálicos y emergentes, incluidos antibióticos y genes resistentes a ellos [19].

- **Industrial:** Corresponde a una gran fuente de contaminación para las aguas y la salud del ser humano. La mayoría de las industrias utiliza agua potable como servicio y/o materia prima en sus etapas. Esta actividad puede resultar en la acumulación de grandes volúmenes de agua como desechos de producción, la cual puede contener contaminantes industriales que incluso, los propios sistemas de tratamiento de aguas no se encuentran diseñados para abatir. Elementos como el asbestos (cancerígeno), plomo (no biodegradable e inhibidor de enzimas presentes en animales y humanos), mercurio, nitratos, fosfatos, sulfuros, aceites e hidrocarburos son algunas de las especies que deterioran la calidad de las aguas industriales de desecho y que podrían ocasionar daños medioambientales severos de no ser tratados correctamente [20].

- **Residencial:** Los sectores residenciales urbanos y rurales demandan volúmenes de agua potable de aproximadamente 50-700 [l/capita/d] para ser utilizados en los quehaceres diarios como ducha, cocina, necesidades básicas, consumo, riego, etc. En esta categoría no solo se incluyen de forma estricta el gasto producido por un hogar, sino que se pueden incluir agentes como hospitales, cuerpo de bomberos, municipalidades, entre otros; lo que determina que la disponibilidad inmediata de agua potable es esencial para el desarrollo de la humanidad [18].

El uso de material doméstico como sustancias orgánicas, jabones, detergentes, residuos hospitalarios, incluso aceites, son responsables directos de la contaminación del agua potable producida en el área urbana. Sumado a ello, los propios desechos del ser humano (feca y orina), aumentan la cantidad de especies contaminantes del agua servida. Estas últimas, aportan componentes que podrían resultar tóxicos para los ecosistemas ambientales de descarga, y para las condiciones salubres del ser humano, puesto que, contienen la presencia de microbios, patógenos, virus, etc [18].

- **Alcantarillado y Depuración:** El agua potable que ha sido utilizada por los sectores mencionados anteriormente, es desechada y devuelta en estado de aguas servidas. Este recurso es recibido por el sistema de alcantarillado y elevado hacia las plantas de tratamiento de aguas.

En estas plantas se realiza el proceso de descontaminación de aguas, el cual tiene como objetivo tratar este elemento hasta los estándares exigidos por el decreto 90 declarado por la Superintendencia de Servicios Sanitarios (SISS) de acuerdo con el cuerpo receptor involucrado (cuerpos de agua fluviales, marinos, lacustres, etc) [21]. En la Tabla 3 se presentan los límites máximos permitidos para la descarga de residuos líquidos en cuerpos de aguas fluviales (norma aplicada a la PTAS de Los Ángeles que descarga la corriente efluente hacia el Río Quilque) [21].

Tabla 3: Resumen de la tabla 1 del decreto 90 de calidad de aguas.

Parámetros	Unidades	Límite Máximo
DBO ₅	[mg/l]	35
Sólidos Suspensidos Totales	[mg/l]	80
Nitrógeno Total Kjeldahl	[mg/l]	50
Fósforo Total	[mg/l]	10
Aceites y Grasas	[mg/l]	20
Coliformes Fecales	[NMP/100 ml]	1.000

- **Retorno:** El regreso del agua hacia el medio ambiente se realiza a través de la devolución de los caudales efluentes de la PTAS hacia los cuerpos receptores de descarga: ríos, lagos, mares, cauces artificiales, reintegración directa hacia acuíferos, etc.

Es por esta actividad que se considera fundamental la precisión en el control de los procesos de tratamiento de aguas. Su calidad impacta directamente en los ecosistemas donde habita la vida silvestre, la industria pesquera, el turismo y las condiciones salubres en las que vive el ser humano.

2.2. Fuentes de Contaminación del Agua

2.2.1. Material Orgánico

Las aguas servidas se componen de materia orgánica, la cual proviene principalmente de la actividad doméstica (alimentos, fecas, orina, etc) y la actividad agrícola. Esta puede ser removida por la actividad de microorganismos, degradación que requiere de un consumo de oxígeno al ser utilizado este elemento como aceptor de electrones. La materia orgánica en el agua se cuantifica a través de los parámetros de Demanda Química de Oxígeno (DQO) y Demanda Biológica de Oxígeno (DBO). El primero corresponde a la cantidad de oxígeno necesaria para degradar el total de materia orgánica e inorgánica total, mientras que, el segundo, refiere a la cantidad de oxígeno demandada por los microorganismos para degradar la materia orgánica demandada por sus procesos metabólicos [22].

El consumo de oxígeno requerido para degradar el material orgánico en el agua servida se considera fundamental en materia de descargas de efluentes, y los sectores medioambientales que reciben este flujo de agua. Se debe tener en cuenta que, al igual como los microorganismos que tratan las aguas servidas utilizan el oxígeno en sus procesos metabólicos, los que se encuentran presentes en el ecosistema de descarga, ya sea un río, lago, mar, etc; operan de la misma manera. De acuerdo con ello, por ejemplo, si la descarga de una corriente efluente de agua tratada se descarga a un río con bajos niveles de oxígeno, el agua del sector podría volverse séptica y/o putrefacta. Es por esta razón que el Decreto 90 exige distintos tipos de requerimientos de descargas de las aguas servidas, dependiendo del tipo de cuerpo receptor involucrado [22].

2.2.2. Sólidos Suspensidos

Los sólidos suspendidos (SS) son partículas de tamaño mayor a 1,5 [μm] que se encuentran contenidas en las aguas servidas (partículas menores a ese tamaño se consideran como sólidos disueltos). Estas partículas se pueden describir coloquialmente como cualquier sólido que se encuentre en suspensión en el agua, ya sea en forma de sedimento, limo, arena, entre otros. En su mayoría, los sólidos suspendidos son materia inorgánica, sin embargo, la presencia de especies orgánicas de alta masa molecular en descomposición y el desarrollo de microorganismos en las aguas servidas podrían contribuir en el aumento de estas partículas [22].

La reducción de los sólidos suspendidos consiste en un proceso fundamental ya que, ante una eventual descarga de agua tratada, que posea una alta magnitud de SS, hacia un ecosistema específico, podría comprometer los fenómenos de fotosíntesis, alterando de esta forma, el ambiente simbiótico con el cual se forma dicho ecosistema. Hay que señalar que, un alto valor de los SST se relaciona con una gran concentración de la DBO y los nutrientes descargados [23].

2.2.3. Nutrientes

El nitrógeno y el fósforo corresponden a dos elementos presentes en la naturaleza que son esenciales para el crecimiento y reproducción de los organismos vivos del planeta. Estos nutrientes se encuentran de forma natural en los suelos, el aire y el agua. Sin embargo, la invasiva actividad del ser humano en la Tierra ha afectado los ciclos naturales de estos elementos, evidenciado, por ejemplo, en la descarga de aguas servidas compuestas de una alta concentración de nitrógeno y fósforo hacia un ecosistema capacitado biológicamente para contener una menor carga inorgánica de nutrientes [24].

Las altas concentraciones de nitrógeno y fósforo dentro de un ecosistema podrían ocasionar daños medioambientales irreversibles, tales como la eutrofización, reducción de la cantidad de luz solar, disminución del oxígeno disuelto, cambios en el crecimiento y reproducción los organismos presentes y, consecutivamente, un deterioro en la calidad del agua ambiental. Sumado a lo anterior, este impacto podría afectar directamente a industrias como las del sector agropecuario, la minería y los procesos de potabilización de agua, está última, comprometería al consumo humano [25].

La concentración específica de cada nutriente en las aguas servidas debe corresponder a las necesidades de las bacterias en el lodo activado, por ende, debe existir una relación equilibrada entre el carbono (C), nitrógeno (N) y fósforo (P). Esto es crucial para la efectividad de los procesos de biodegradación. Durante el tratamiento aeróbico de aguas residuales, la relación básica C: N: P debe estar en el rango entre 100: 10: 1 y 100: 5: 1 [25].

2.2.4. Microorganismos

El agua servida contiene la presencia de distintos tipos microorganismos. Estos provienen principalmente del suelo y el uso doméstico del agua potable, actividad que aporta con bacterias presentes en el tracto intestinal del ser humano u otro tipo microbios. Normalmente 1 [mL] de aguas servidas contienen entre 100.000 a 1 millón de microorganismos, donde la presencia de ellos, cumplen un rol fundamental en la descomposición de la materia orgánica y el decaimiento celular de organismos patógenos y coliformes fecales, que podrían afectar la salubridad y calidad de vida del ser humano y las especies del planeta [22].

Los análisis realizados para caracterizar la población microbiológica presente en las aguas servidas demuestran la presencia de distintas especies de bacterias en variadas proporciones tales como: *Proteobacteria* (12–59%), *Acidobacteria* (2–35%), *Chloroflexi* (3–38%) y *Bacteroidia* (0.7–19%), entre otras [26].

2.3. Proceso de Tratamiento de Aguas Servidas

El inicio de los procesos de evacuación y transporte de aguas se puede identificar desde las construcciones de ingeniería de la antigua Roma. Esta civilización diferenciaba las aguas servidas de la “potable” por medio de un largo conducto abovedado llamado “*Cloaca Máxima*”, análogo al sistema de alcantarillado actual, el cual descargaba estas aguas en el Río Tíber. Posteriormente, el sistema urbano de drenaje de aguas servidas fue mejorando a través de la instalación directa entre el alcantarillado y las residencias de la ciudad, obras que en un futuro comenzaron a colapsar, trayendo consigo importantes brotes de enfermedades, como el cólera en el Reino Unido en el siglo XIX [27].

Las precarias condiciones salubres del ser humano en esos años, producto de la expansión de ciudades y la incapacidad de tratar las aguas desechadas, demostró la alta necesidad de implementar un sistema de descontaminación de aguas, basado en someter a este recurso a diversos procesos físicos, químicos y biológicos. Con ello, a principios del siglo XX se construyen las primeras PTAS en países como el Reino Unido y Estados Unidos, diseñadas incluso para separar los flujos de agua servida y el aporte aguas lluvias [27].

En el siglo XXI, en Latinoamérica el 70% de las aguas servidas vuelven a su cauce natural sin ser tratadas previamente, una realidad significativamente distinta a la de Chile [28], donde se estima que la cobertura de saneamiento de aguas alcanza un 100% en el país [29]. Estos sistemas no solo evitan las muertes humanas producidas por falta de condiciones higiénicas (objetivo de construcción en el siglo XIX) sino que también permite cumplir con el objetivo contemporáneo de preservar los ecosistemas hídricos y su diversidad biológica de flora y fauna [30].

En la actualidad existen diferentes tecnologías de tratamiento de aguas, tales como el sistema de lodos activados, aireación extendida, lagunas facultativas, emisarios subterráneos, entre otros (para mayor detalle ver el Anexo 7.2). El presente estudio se enfocará únicamente en el sistema de lodos activados, puesto que es en este donde se han presentado los mayores casos de Bulking Filamentoso [31]:

2.3.1. Sistema de Lodos Activados

El sistema de lodos activado corresponde a una forma de procesar el agua servida mediante el aprovechamiento del metabolismo de un consorcio de microorganismos (M.O.) compuesto en un 97% de bacterias denominado el Lodo Activado. Este consorcio es mezclado junto a las aguas servidas en el Reactor Biológico (mezcla denominada coloquialmente como licor mixto), de esta manera, los microorganismos se alimentan de las especies contaminantes en el agua; y con ello, permiten llevar a cabo sus procesos metabólicos internos [32, 33].

Debido a que los contaminantes de las aguas servidas son utilizados como sustrato por parte de los microorganismos, su consumo se traduce en reducir las concentraciones de estas especies. Para lograr ello, el sistema de Lodos Activados remueve los sólidos coloidales no sedimentables y disueltos a través de la transformación de materia disuelta, en materia suspendida (biomasa activa y sólidos inertes), la cual puede ser decantada en el clarificador secundario.

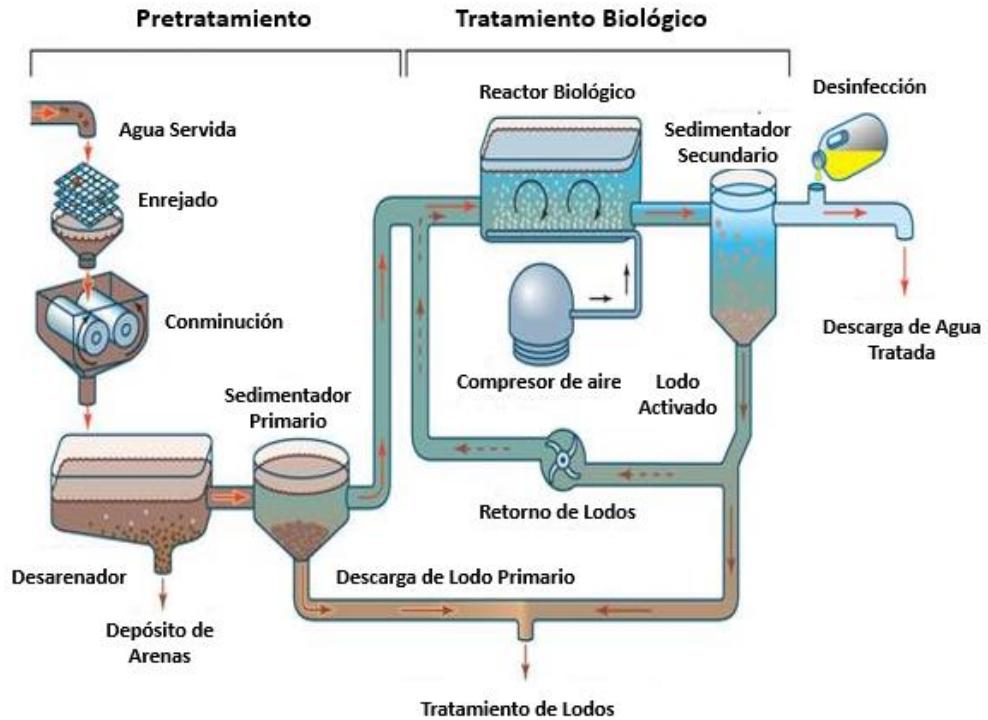


Figura 5: Diagrama de flujo típico del sistema del proceso de tratamiento de aguas utilizando lodos activados [32].

La operación de los sistemas de tratamiento de aguas que utilizan la tecnología de lodos puede ser representada a través del diagrama de la Figura 5, la cual se compone de dos subprocessos fundamentales, el tratamiento primario y secundario:

2.3.1.1. Pretratamiento

El objetivo de esta etapa consiste en eliminar los sólidos de grandes dimensiones, tales como madera, feca, basura, desechos varios, etc, que se encuentran presentes en las aguas servidas. En estas etapas se realizan diferentes procesos de separación sólido-fluido, tales como desbaste, sedimentación, cribado, des arenación, entre otros. Estas etapas, además de limpiar el agua servida, permiten prolongar las vidas útiles de las bombas, cañerías, válvulas, etc, de las PTAS. La eficiencia de esta sección del proceso puede llegar a niveles del 90% de remoción de las arenas con tamaño mayor a 0,2 [mm][31, 34].

2.3.1.2. Tratamiento Biológico

Finalizado el tratamiento primario, el agua es transportada hacia el tratamiento secundario. En esta etapa los sistemas de lodos activados someten al agua servida a distintos procedimientos físicos, químicos y biológicos, cuya tecnología, eficiencia y costo puede ir variando de acuerdo con las capacidades de la PTAS. No obstante, este sistema posee una estructura base, la cual se representa en la Figura 6 [32, 35].

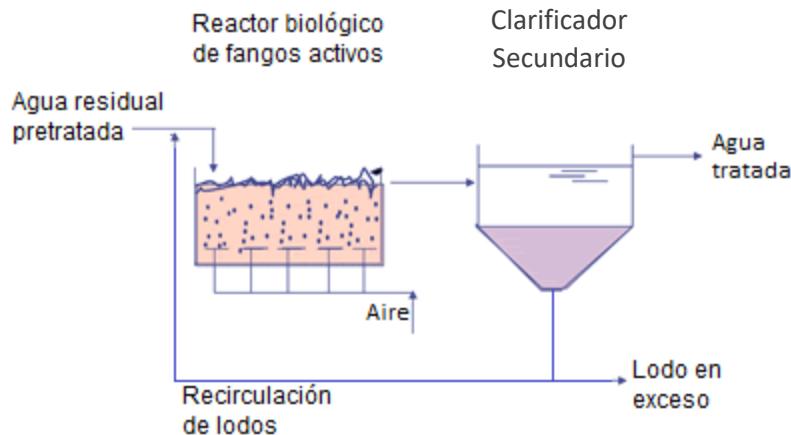
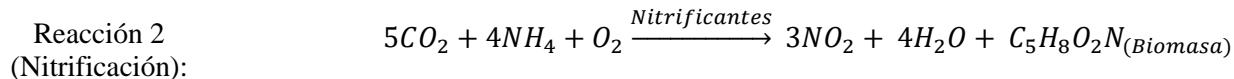
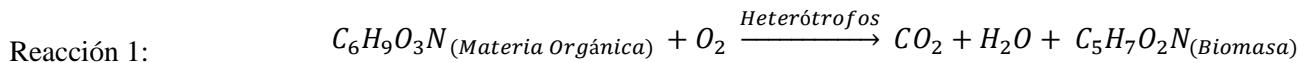


Figura 6: Estructura típica del sistema de lodos activados [35].

- **Reactor Biológico:** La corriente proveniente del pretratamiento, es descargada en el interior de este equipo. En esta etapa se genera la mezcla de las aguas servidas y el lodo activado. Consecutivamente se da paso a que las reacciones metabólicas se lleven a cabo y con ello, la reducción de materia orgánica y nutrientes en el agua a tratar. El lodo activado contiene organismos cuyo metabolismo se promueve en condiciones aeróbicas, por ende, esta etapa posee un sistema de aireación para transferir oxígeno en el reactor. Por otro lado, existen organismos que son capaces de desarrollarse en condiciones anóxicas y/o anaeróbicas, por lo cual, en estos casos se prescinde de un sistema de aireación [32, 35].

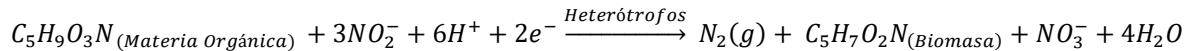
El reactor biológico puede trabajar bajo diferentes condiciones de operación:

- **Aeróbicas:** Bajo estas condiciones, los organismos heterótrofos obtienen energía a partir de una fuente de carbono orgánico. Por otro lado, los organismos nitrificantes, al poseer un metabolismo autótrofo y aeróbico, obtienen energía a través del dióxido de carbono producido por los organismos heterótrofos, y el amoniaco presente en la solución. En ambos casos, la especie aceptora de electrones es el oxígeno, cuyos mecanismos se realizan por medio de las siguientes reacciones[36]:

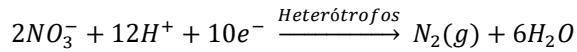


- **Anóxicas:** El operar el reactor biológico en condiciones anóxicas usualmente tiene el objetivo de eliminar las fuentes de Nitrógeno presente en las aguas servidas. En este caso, los aceptores de electrones corresponderán al Nitrito y/o Nitrato disuelto en la mezcla. En esta remoción participan tanto los organismos heterótrofos como autótrofos, cuyo mecanismo se realiza por medio de las siguientes reacciones [36]:

Reacción 4:



Reacción 5:



- **Anaeróbica:** La digestión anaerobia es una fermentación microbiana en ausencia de oxígeno que da lugar a una mezcla de gases (principalmente metano y dióxido de carbono), conocida como biogás y a una suspensión acuosa o lodo que contiene los microorganismos responsables de la degradación de la materia orgánica. El producto principal de la digestión anaerobia es el biogás, mezcla gaseosa de metano (50 a 70 %) y dióxido de carbono (30 a 50 %), con pequeñas proporciones de otros componentes (nitrógeno, oxígeno, hidrógeno, sulfuro de hidrógeno), cuya composición depende tanto de la materia prima como del proceso en sí [37].
- **Clarificador secundario:** El desarrollo de los microorganismos permite formar estructuras floculares compuestas de materia orgánica oxidada, bacterias y/o material particulado mineralizado (ver Figura 7). Estas estructuras presentan una gravedad específica mayor a la del agua, y, por ende, pueden ser decantadas en el clarificador secundario, obteniendo un volumen sobrenadante de agua clarificada denominada corriente efluente. Este flujo es transportado hacia una etapa posterior de desinfección, donde el agua es mezclada con una dosis específica de cloro de tal manera de eliminar todo resto de componentes que no hayan podido ser removidos en la etapa previa, tales como microorganismos, toxinas, especies inertes, etc [32, 35].

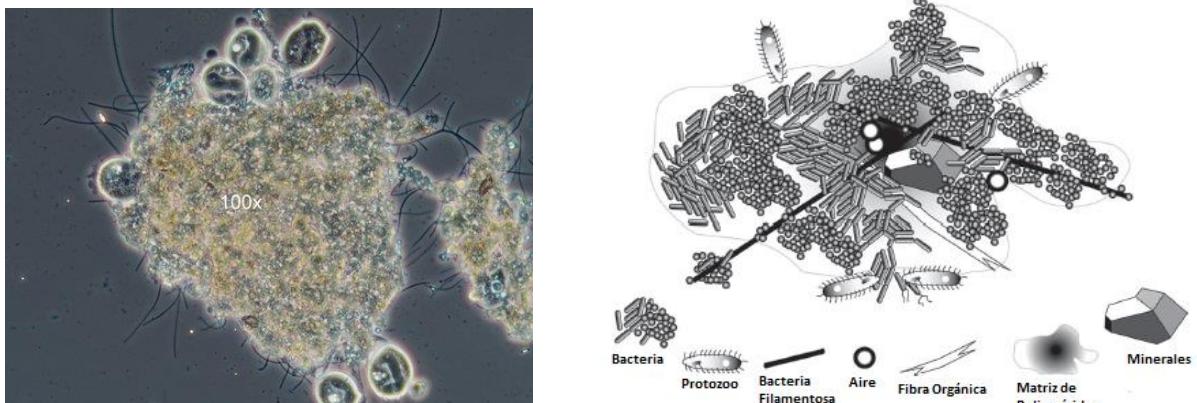


Figura 7: A la izquierda: Fotografía microscópica de un flóculo del sistema de lodos activados. A la derecha: Esquema de la conformación típica de un flóculo en el sistema de lodos activados [32 , 35].

- **Corrientes de reciclo (RAS) y purga (WAS):** El sedimento en el fondo del clarificador contiene altas concentraciones de biomasa en actividad latente (≈ 3.000 [ppm]). Para aprovechar esta latencia, el sistema posee una línea de recirculación (RAS) que permite alimentar con un flujo de biomasa constante al sistema de tal manera de continuar con la remoción de contaminantes en el agua. Para cuantificar dicha concentración, se utiliza el parámetro de Sólidos Suspensos Volátiles (SSV), el cual representa una aproximación de la biomasa latente presente en el lodo activado [32].

La formación de lodos en exceso podría generar inestabilidades en el proceso de remoción de materia orgánica, por ende, al presentarse este caso, el sistema de lodos activados dispone de una corriente de purga (WAS), que permite eliminar dicho exceso hacia el tratamiento de lodos, el cual es un proceso que funciona de forma paralela al tratamiento de aguas, cuyo objetivo es estabilizar el lodo para formar un producto orgánico utilizable como abono para el sector agrícola y forestal [35].

2.3.2. Microbiología de Lodos Activados

El sistema de lodos activados se compone de una microfauna que realiza la remoción de contaminantes presentes en las aguas servidas. Dentro de este consorcio de microorganismos se pueden identificar 5 principales especies [36]:

- **Bacterias:** En el lodo activado existen distintos tipos de bacteria, en su mayoría son aeróbicas Gram negativas y heterótrofas (*Pseudomonas*, *Zoogloea*, *Acliromobacter*), es decir, son capaces de utilizar la materia orgánica como fuente de carbono (fotografía izquierda en la Figura 8). Su tamaño varía entre los 0,5 y 5 [μm], por ende, no pueden ser identificadas en el microscopio [38].

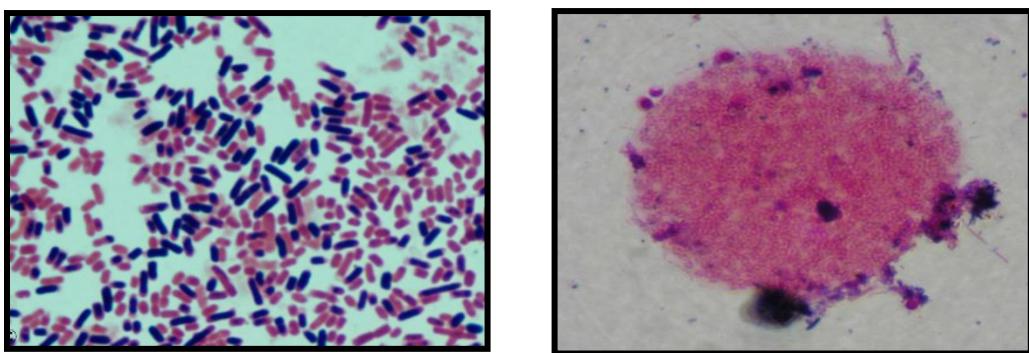


Figura 8: Fotografía de bacterias en el lodo activado. A la izquierda: Bacterias Heterótrofas. A la derecha: Bacterias Autótrofas o nitrificantes [38].

En el lodo activado existen bacterias autótrofas o nitrificantes (fotografía derecha en la Figura 8) las cuales tienen la capacidad de utilizar el CO_2 , una fuente de carbono inorgánica, proveniente de la degradación de materia orgánica en condiciones aeróbicas. De esta forma, estos organismos consumen el nitrógeno amoniacal a través de la reacción de Nitrificación.

- **Protozoos:** Son organismos unicelulares, eucariontes, en algunos casos autótrofos, mientras que en su mayoría poseen un metabolismo heterótrofo y aerobio. Son capaces de degradar la materia orgánica soluble e insoluble presente en el agua servida, y, además, poseen la capacidad de alimentarse de bacterias libres en el lodo activado, por lo cual, cumplen un rol fundamental en la cadena alimenticia del consorcio de microorganismos del sistema de lodos [38]. Existen diversos tipos como amebas, flagelados y ciliados (ver Figura 9), los cuales son presentados con mayor detalle en el Anexo 7.3.



Figura 9: Fotografía en microscopio de protozoos observados en el lodo activado. De izquierda a derecha: a) Ameba b) Flagelado c) Ciliado fijo [38].

- **Metazoos:** Estos organismos multicelulares poseen una longitud mayor en comparación con los protozoos presentes en el reactor. No participan mayormente en los procesos de remoción de material orgánico, sin embargo, pueden alimentarse de bacterias, algas y protozoos. Normalmente, este tipo de organismos se encuentran en los sistemas de lagunas facultativas y aireadas. Su presencia se relaciona con una elevada edad de lodos y una buena calidad de efluente, siendo las especies más comunes de estos organismos presentes en los lodos activados los rotíferos, nematodos y tardígrados (ver Figura 10) [39].

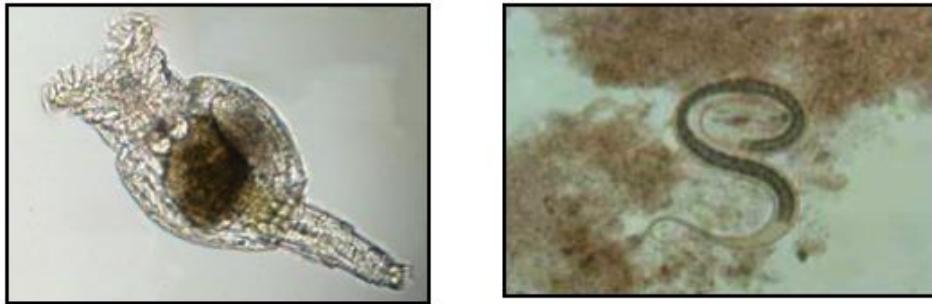


Figura 10: Fotografía en microscopio de metazoos observados en el lodo activado. De izquierda a derecha: a) Rotífero b) Nemátodo [38].

- **Bacterias Filamentosas:** Son bacterias de metabolismo heterótrofo y aeróbico en su mayoría. La mayor característica de estos M.O. corresponde a su morfología alargada (ver Figura 11), la cual es útil para la formación de los flóculos decantables, puesto que su estructura cumple la función de columna vertebral en la acumulación de materia suspendida. Adicionalmente, tienen características hidrofóbicas, lo cual les permite tener una alta afinidad hacia el consumo de sustratos apolares tales como grasas y aceites [40, 41]:

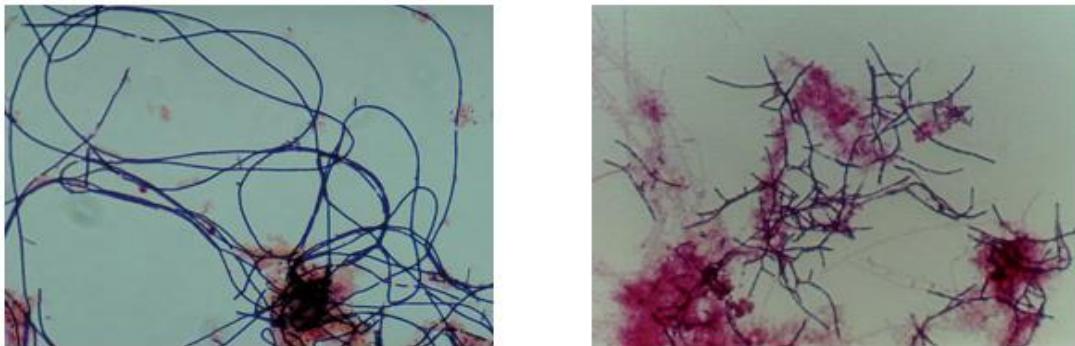


Figura 11: Tinción Gram para dos especies de bacterias filamentosas presentes en el lodo activado. De izquierda a derecha: a) *Microthrix parvicella* b) *Nocardia* spp [41].

Existen casos donde se genera una ausencia de bacterias filamentosas en el aireador, fenómeno que desencadena la formación de un flóculo de baja masa y tamaño (*pin-floc*). Este no tiene la capacidad de ser un soporte para este tipo de bacterias, por lo cual, no puede ser decantado en el clarificador secundario, aumentando de esta manera la turbidez de la corriente efluente. Por otro lado, en ocasiones se produce un crecimiento acelerado de bacterias filamentosas en el sistema, teniendo como resultado la predominancia de estos microorganismos por sobre los que se encuentran presentes en el lodo activado, generando un floculo abierto que genera un efluente turbio de mala capacidad de sedimentación. El crecimiento excesivo de bacterias filamentosas puede propiciar la formación de problemas operacionales como el Bulking Filamentoso y Foaming [42].

2.3.3.Bulking Filamentoso

El Bulking Filamentoso es considerado uno de los mayores problemas que presentan las PTAS que utilizan la tecnología de lodos activados. Este término es usado para describir el crecimiento excesivo de bacterias filamentosas, las cuales, dependiendo de su morfología y el medio en el cual se desarrollan, pueden generar dos tipos de interferencias en el floculo dentro del reactor biológico: cuando los filamentos rompen los flóculos y crean intersticios de gran área formando puentes entre aglomeraciones de materia orgánica (fotografía izquierda en la Figura 12; mientras que, cuando los filamentos crecen hasta los límites del flóculo, evitando que puedan aglomerarse entre los cúmulos de materia circundante (fotografía derecha en la Figura 12) Ambos fenómenos impiden que se formen aglomeraciones, o flóculos de mayor masa, por lo cual la materia suspendida no puede decantarse en los clarificadores secundarios. (ver Figura 13) [44–46].

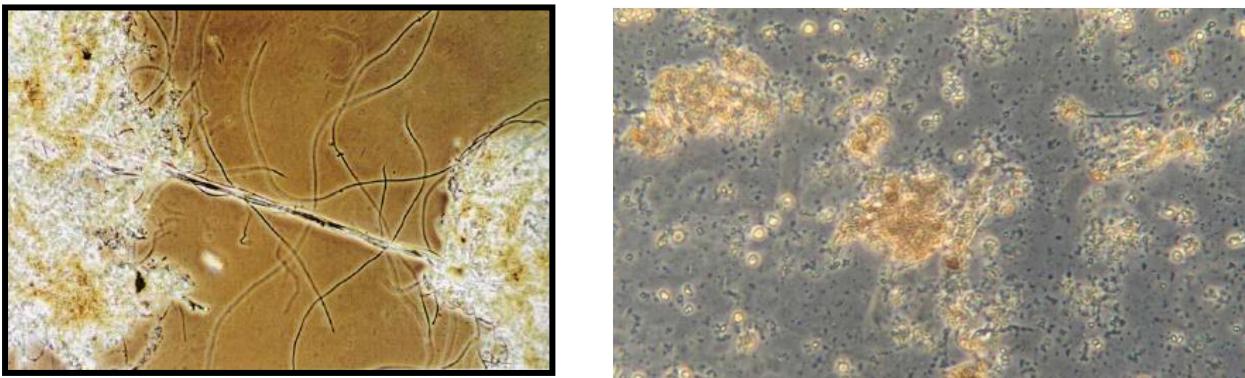


Figura 12: Fotografía en microscopio de la extensión de una bacteria filamentosa entre dos flóculos [38].

Este problema operacional puede ocasionar posibles daños medioambientales y descargas de aguas efluentes con concentraciones que exceden los límites establecidos por la Norma de RILES descargados en aguas marinas y continentales superficiales, junto con ello, la presencia de este problema genera olores molestos en las PTAS (sin demostración de toxicidad), por lo que afecta directamente al personal de la planta y las personas que viven en los sectores aledaños a esta. Para remediar este fenómeno, usualmente se utilizan estrategias operacionales que aumentan los costos del proceso, tales como cloración, adición de químicos aglomerantes de materia sólida, cambios en las condiciones de aireación que aumentan el consumo energético del proceso, entre otros. Sin embargo, estas medidas tienen un carácter correctivo del Bulking Filamentoso, por lo cual, no mitigan el problema microbiológico causante de este fenómeno [10].



Figura 13: A la izquierda: Clarificador Secundario con problemas de Bulking Filamentoso y Foaming (espumamiento). A la derecha: Clarificador Secundario en condiciones normales [43].

2.3.4. Aspectos microbiológicos en la formación de Bulking Filamentoso

Las causas específicas del crecimiento excesivo de estas bacterias son desconocidas, más aún, cuando la gran mayoría de las especies de organismos filamentosos no se han estudiado en cultivos puros, sino que su existencia solo se ha mostrado en sistemas de lodos activados, donde se estima que se requiere de un 20% de presencia de bacterias filamentosas en fracción volumétrica para generar un episodio de Bulking. Sin embargo, existen diversas teorías que aproximan a entender las razones del favorecimiento del crecimiento excesivo de estas bacterias, las cuales, generalmente se enfocan en su metabolismo, morfología y ecofisiología [10].

2.3.4.1. Difusión de Sustrato

Se piensa que la morfología de estos organismos favorece la captación de sustrato en relación con los M.O. restantes del lodo activado. Lo anterior intenta explicar la competencia que existe entre los diferentes tipos de microorganismos presentes en el reactor biológico, lo cual se basa en el hecho que las bacterias filamentosas poseen una mayor razón de área superficial celular con respecto al volumen de contacto en el seno de la solución del reactor (razón A/V) [10]. Por ende, a bajas razones de F/M, las bacterias filamentosas se encontrarán en mayor contacto con el sustrato disponible en comparación con el resto de los organismos, presentando de esta manera una ventaja competitiva para su crecimiento [46].

2.3.4.2. Cinética de Crecimiento de bacterias filamentosas

Los organismos filamentosos poseen tasas de crecimiento máximo y constante de saturación de sustrato en general más bajos en comparación con los organismos restantes del sistema, por ello es que se les cataloga como organismos de crecimiento lento. En base a esto es que se han encontrado relaciones entre la concentración de sustrato de la mezcla líquida en el reactor biológico y el crecimiento de estos organismos [46]. En reactores de mezcla completa, se evita la formación de gradientes de concentración de especies disueltas en solución, por ende, en estos equipos, se pueden presentar casos donde la concentración de sustrato puede llegar a valores de menor magnitud que el K_s (C_s menor a K_s). Es en estos casos donde el crecimiento de estos organismos se ve promovido en relación con los demás M.O. presentes en el lodo activado, puesto que, a menor magnitud de la constante de Monod, la transferencia de masa se ve promovida, más aún, en condiciones de baja

disponibilidad de sustrato, esta característica presentaría una ventaja de crecimiento por sobre otros organismos [10].

2.3.4.3. Almacenamiento de Sustrato

Los organismos no filamentosos tienen la capacidad de almacenar sustratos cuando estos se encuentran en altas concentraciones en el sistema. Sin embargo, estudios revelan que las bacterias filamentosas, como *Microthrix parvicella*, poseen una más alta capacidad de almacenar el sustrato que los organismos no filamentosos en diferentes condiciones (aeróbicas, anóxicas y anaeróbicas). Este material puede ser almacenado y utilizado para la producción de proteínas y/o generación de energía en periodos de hambruna, por lo cual, esto podría entregar una ventaja de estos organismos por sobre los que no poseen dicha capacidad en condiciones donde el sustrato se encuentre en bajas concentraciones. Debido a ello, es que el proceso de almacenamiento de sustrato exhibe un rol importante en el desarrollo de estos organismos y los episodios de Bulking Filamentoso [10].

Con el objetivo de relacionar el Bulking con el crecimiento de diversas especies de bacterias filamentosas, se han realizado diversos estudios basados en la identificación de la morfología de las bacterias involucradas, concluyendo que, en plantas de tratamiento de aguas de lodos activados que han presentado problemas de Bulking Filamentoso, las cuales se encuentran en países como Estados Unidos, Sudáfrica, Francia, Italia, Inglaterra, Argentina, entre otros, la especie identificada con mayor ocurrencia corresponde a *Microthrix parvicella* (en el anexo 7.4 se presentan otros tipos de bacterias filamentosas observados en lodos activados) [10, 48].

2.4. *Microthrix parvicella*

Microthrix parvicella es una larga, delgada y no ramificada bacteria filamentosa. Posee un diámetro aproximado entre 0.6 – 0.8 [μm][46]. Presenta una morfología enrollada, y producto de su estructura celular, responde de forma positiva al someterse a un ensayo de tinción Gram (ver Figura 14) sobre muestras de lodo activado [45].

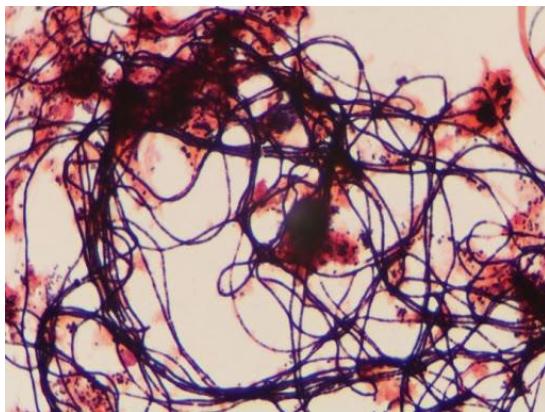


Figura 14: Observación de *Microthrix parvicella* en una prueba de tinción Gram [47].

Los estudios realizados reconocen tres características identitarias de esta bacteria, las cuales se diferencian de la mayoría de los organismos presentes en el lodo activado.

2.4.1. Aislamiento

Diversos intentos se han hecho para aislar a *M. parvicella* desde una muestra de lodo activado. Este organismo se ha podido desarrollar en ambientes compuestos por un 90% CO₂ y 10% de aire a magnitudes de pH menores a 6 utilizando glucosa como fuente de carbono, sin embargo, su identificación en estos casos no ha sido clara, llegando a suponer incluso, que podrían corresponder a otro tipo de microorganismo. Sumado a ello, se han obtenido crecimientos de colonias de 1 [mm²] de área de este organismo posterior a 10 días de cultivo en medios de agar [46].

El aislamiento de *M. parvicella* en medios compuestos por distintas fuentes de carbono han dilucidado características importantes sobre la fisiología de este organismo. De acuerdo con ello, es que se ha demostrado que *M. parvicella* no crece en presencia de sustratos simples, como azúcares u ácidos orgánicos, sino que el desarrollo de su metabolismo requiere de fuentes orgánicas como el ácido oleico (ver Figura 15) o el polisorbato 80 (una solución surfactante no polar). Finalmente, se tiene que el crecimiento excesivo de bacterias filamentosas se genera en presencia de bacterias necróticas o hinchadas, lo cual, refiere a que estos organismos se pueden desarrollar en condiciones en que el medio se encuentra en situaciones de estrés [47, 49].

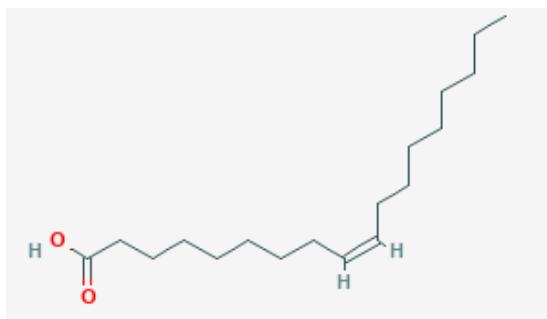


Figura 15: Estructura química del ácido oleico [49].

2.4.2. Fisiología

Los cultivos puros que han logrado estudiar el desarrollo de *M. parvicella* han demostrado que esta bacteria posee un metabolismo aeróbico, heterótrofo y no es fermentativa. Se presume que tiene la capacidad de denitrificar en ciertas condiciones, reduciendo con mayor preponderancia el nitrato en comparación con el nitrito [49].

El crecimiento aislado de *M. parvicella* se ve promovido ante una alta gama de presiones parciales de oxígeno. Particularmente, a concentraciones de oxígeno de alrededor de 0,4 [mg/l] se han producido filamentos estables y de gran longitud por sobre los que se han observado a concentraciones de oxígeno mayores a esta magnitud (2 [mg/l]). Adicionalmente, se tiene que una concentración alta de oxígeno (mayor a 6 [mg/l]) podría ser tóxica para este tipo de bacterias, por lo cual, podría suponer que *M. parvicella* corresponde a un organismo microaerofílico [50].

En cultivos puros, donde *Microthrix parvicella* se ha desarrollado de forma aislada, se evidencia que esta bacteria puede utilizar diferentes tipos de fuentes de carbono, incluyendo ácidos orgánicos, sustratos complejos y ácidos grasos. Sin embargo, en estudios de consumo de sustrato en muestras de lodo activado, demuestran que esta bacteria posee una gran afinidad por ácidos grasos de cadena larga (LCFA), acido palmítico y oleico en su consumo. Esto prevé que, en cultivos puros, un ambiente no competitivo, *M. parvicella* puede consumir distintos tipos de fuentes de carbono; mientras que, en un ecosistema con una alta competencia, como el lodo activado, el consumo de sustrato de este organismo se vuelve específico, demostrando una fisiología funcional [46].

El consumo de sustrato en el lodo activado por parte de *M. parvicella* puede ser llevado a cabo en condiciones anóxicas y aeróbicas, observando la presencia de poli hidroxialcanoatos (PHA) en su estructura intracelular, un poliéster lineal producido a partir de la fermentación de lípidos. Este organismo posee una superficie celular hidrofóbica (más hidrofóbica que las otras especies del lodo activado), esta particularidad le otorga una gran afinidad en la atracción de lípidos, junto con una alta ventaja competitiva en el consumo de este sustrato. Sumado a lo anterior, *M. parvicella* tiene la capacidad de producir esterasas y lipasas, poseyendo la habilidad de hidrolizar los LCFA en lípidos más simples [46].

2.4.3. Cinética de Crecimiento, temperatura y pH

La cuantificación de la cinética de crecimiento de *M. parvicella* es de suma importancia si se desea entender la proliferación de esta bacteria bajo diferentes condiciones. Se tiene que en cultivos batch, este organismo posee una tasa de crecimiento máximo de $0.4 \text{ [d}^{-1}\text{]}$, mientras que, en quimiostatos, el valor de este parámetro asciende a $1.44 \text{ [d}^{-1}\text{]}$. La diferencia entre ambos valores se debe a las distintas condiciones fisicoquímicas de los reactores. El rendimiento de *M. parvicella* posee valores entre 0,3-0,8 [g biomasa/ g sustrato], mientras que, las constantes de saturación, son presentadas como valores aparentes de magnitudes entre 4 y 15 [mg/l] [47, 52].

Los valores de estos parámetros pueden entregar una aproximación a la fisiología de *M. parvicella*, sin embargo, se debe tener en cuenta que estos no consideran una posible interacción competitiva entre microorganismos, tal como sucede en sistemas de lodos activados [46].

Durante el crecimiento de *M. parvicella* la alcalinidad decrece, teniendo que, a valores del pH entre 6,7 – 8, este no influye significativamente en la tasa de crecimiento de esta bacteria. Sumado a ello, se ha determinado que el crecimiento óptimo de este organismo se encuentra a temperaturas de 25 [°C] [46].

2.5. Modelación computacional del sistema de lodos activados

En 1983 la *International Water Association* (IWA) formó un grupo para desarrollar un modelo para el diseño y operación de los sistemas de tratamiento de aguas que utilizan el sistema de lodos activados. El principal objetivo fue el de realizar un consenso de los procesos que controlan este sistema, de tal manera de mejorar la capacidad de predicción de la degradación de materia orgánica, nitrificación y denitrificación [52].

Adicionalmente, el grupo de investigación identificó las especies representativas del sistema de lodos activados, las cuales son descritas a través de una nomenclatura específica, y que su diferenciación radica en la forma en que se encuentran presentes en el sistema. Estas se clasifican en dos grupos, especies disueltas y suspendidas, donde las primeras se componen principalmente de los sustratos útiles para los procesos metabólicos de los microorganismos, mientras que, las suspendidas se componen de la biomasa activa y partículas inertes, las que provienen en mayor proporción de la muerte y el decaimiento celular [52].

La transformación de estas especies es generada por una relación de estequiometría, condición que es descrita mediante la construcción de una matriz estequiométrica que relaciona los procesos cinéticos de la biomasa del lodo, y las especies identificadas en el sistema. En el interior de la matriz se cuantifican los coeficientes estequiométricos de transformación de la especie i realizada por el proceso j . Para conocer con mayor detalle el uso de la matriz, ver anexo 7.5. [53, 54]-

El primer modelo construido corresponde al *Activated Sludge Model n°1* (ASM1) que, con el pasar de los años, fue siendo editado y reinterpretado de manera de enfocar el modelo en la descripción de otros procesos, como denitrificación, nitrificación, remoción de fósforo, crecimiento de una bacteria en particular, etc. Estos modelos consecutivos son descritos a continuación [54]:

- **ASM1:** Es considerado como una referencia para los modelos posteriores. Este fue desarrollado primordialmente para describir la remoción de la materia orgánica y el nitrógeno, identificando al oxígeno y el nitrato como aceptores de electrones. Junto con ello, estipula las variables de operación de las PTAS a considerar para llevar a cabo la modelación, como factores de dilución, volumen de reactor, caudales de purga y recirculación, entre otros [53, 54].
- **ASM2:** Este modelo se considera como una extensión de su antecesor, puesto que, utiliza como base el modelo ASM1 al que se le incluye una descripción de la remoción de fósforo en el sistema [33, 55].
- **ASM2d:** Es construido en base al ASM2, adicionando la descripción del proceso de denitrificación llevada a cabo por los organismos que acumulan moléculas de polifosfato (PAO) [33, 55].
- **ASM3:** Corresponde al modelo más utilizado en la actualidad (y el más reciente). Dentro de las consideraciones más importantes en este modelo, se encuentran la inclusión de las expresiones cinéticas de los microorganismos heterótrofos en los procesos de remoción de nitrógeno y la influencia de la alcalinidad del sistema. Toma en consideración el almacenamiento de sustrato por parte de los microorganismos, diferenciando explícitamente el metabolismo de los organismos autótrofos y heterótrofos [55, 56].

Los procesos consensuados por la IWA, los cuales son la base de los modelos ASM, se pueden representar mediante la Figura 16, la cual presenta una comparación entre los modelos ASM1 y ASM3. Se hace esta comparación puesto que ambos poseen una diferencia en la interpretación de la dinámica de los organismos del lodo activado [33]:

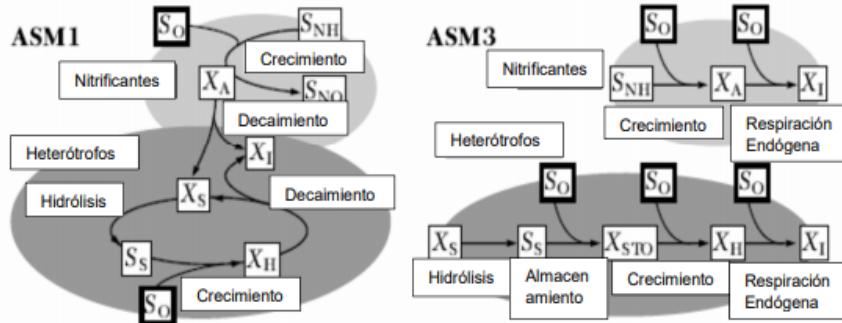


Figura 16: Interpretación de la dinámica de microorganismos bacterianos para los modelos ASM1 y ASM3. [56]

Las ventajas y limitaciones de la simulación del sistema de lodos activados a través de los modelos ASM son:

- Permiten predecir la composición del efluente, la demanda de oxígeno y la producción de lodo en respuesta a las fluctuaciones en tiempo real de la carga y/o del caudal afluente [55, 56].
- La fase final de la construcción del modelo corresponde al ajuste de parámetros del sistema en estudio. Una vez logrado aquello, el modelo permite proyectar, diagnosticar, comparar variantes, cambios en las condiciones de operación de la planta, entre otros [55, 56].
- Se puede prescindir de generar pruebas en laboratorio para simular el funcionamiento de la etapa de clarificación secundaria en la planta de tratamiento de aguas [55, 56].
- Su estructura entrega la posibilidad de optimizar las condiciones de operación de la planta de tratamientos, tomando en cuenta diferentes estados que podrían impactar en la composición del agua en el efluente como la presencia de bacterias filamentosas en el reactor biológico [55, 56].

El modelo ASM3 ha sido utilizado en diversos estudios para el control, simulación, optimización, etc, de los sistemas de lodos activados. Este modelo ha sido estructurado de distintas formas para que su aplicación sea consecuente con la tecnología de lodos activados y los procesos que realizan estos sistemas para remover la materia contaminante de las aguas, aquello, generado por plantas industriales, piloto, de laboratorio, etc. A continuación, se presentan ejemplos de implementación del modelo ASM3, notar que, en los últimos dos casos, el modelo ha sido utilizado para la simulación de crecimiento de *Microthrix parvicella*:

- Con el uso del modelo ASM3 se ha logró simular el funcionamiento de una PTAS ubicada en el norte de Italia (Región de Venecia). Obteniendo datos experimentales de pruebas Batch de respirometría para las fases anóxicas y aeróbicas que se generan el proceso, se ajustó el valor de los parámetros del modelo. Posteriormente, este ajuste fue validado a través del uso de datos experimentales reales del sistema de lodos activados de la planta, obteniendo resultados exitosos en la predicción de DQO, consumo de oxígeno y formación de lodo en el efluente [56].
- La alternancia de fases anóxicas y aeróbicas que generan algunos sistemas de lodos activados es fundamental para la remoción de nitrógeno amoniacal, potencial contaminante de los ecosistemas receptores. Con datos experimentales de una planta piloto, el modelo ha sido utilizado para simular esta alternancia a través de un ajuste en sus parámetros originales. Esto ha podido proyectar y diseñar la implementación de leyes de control para regular el funcionamiento del sistema de lodos activados, de tal manera de cumplir con la norma de concentraciones de nitrógeno en el efluente [33].
- Los procesos de tratamiento de aguas servidas que utilizan el sistema de lodos activados pueden emitir concentraciones no despreciables de óxido nitroso, lo cual podría resultar en un aumento de contaminantes contenidos en la atmósfera. Para simular la emisión de este gas, se ha usado el modelo ASM3 como base para la predicción de formación, consumo y emisión de N_2O en una PTAS. La producción de N_2O fue monitoreada a través de técnicas de espectroscopía infrarroja, lo cual fue correlacionado con el metabolismo biológico de bacterias oxidantes de nitrógeno amoniacal y organismos heterótrofos denitrificantes [57].
- La suposición del modelo original de considerar el nitrito y nitrato como una especie única ha sido motivo para que se realicen estudios de mejora al modelo ASM3 original. Se han realizado propuestas para diferenciar la presencia de ambas moléculas por medio de la simulación de los procesos de nitrificación y denitrificación de forma independiente. [58]
- Se ha estudiado la presencia de bacterias filamentosas, como *Microthrix parvicella*, incluyendo dentro del modelo ASM3 los procesos que simulan el metabolismo de esta dentro del lodo activado. Estos sistemas se basan en construir el modelo en base a las características que diferencian a *Microthrix parvicella* de las otras especies que coexisten en el lodo, vale decir, consumo y tipo de sustrato preferente para esta bacteria, temperatura óptima para el crecimiento, entre otros [48].
- Se ha utilizado el modelo ASM3 para caracterizar la dinámica del consumo de sustratos por parte de las bacterias del sistema. Esto se logra incluyendo el proceso de adsorción de sustratos, adheridos a la membrana celular de los microorganismos bacterianos. Sumado a ello, se toma en cuenta un crecimiento de bacterias teniendo la materia oxidable adsorbida en su estructura celular. [59]

Capítulo 3

3. Metodología

En la Figura 17 se presenta un esquema de la metodología seguida para realizar el estudio propuesto. Las actividades se detallan en las páginas siguientes:

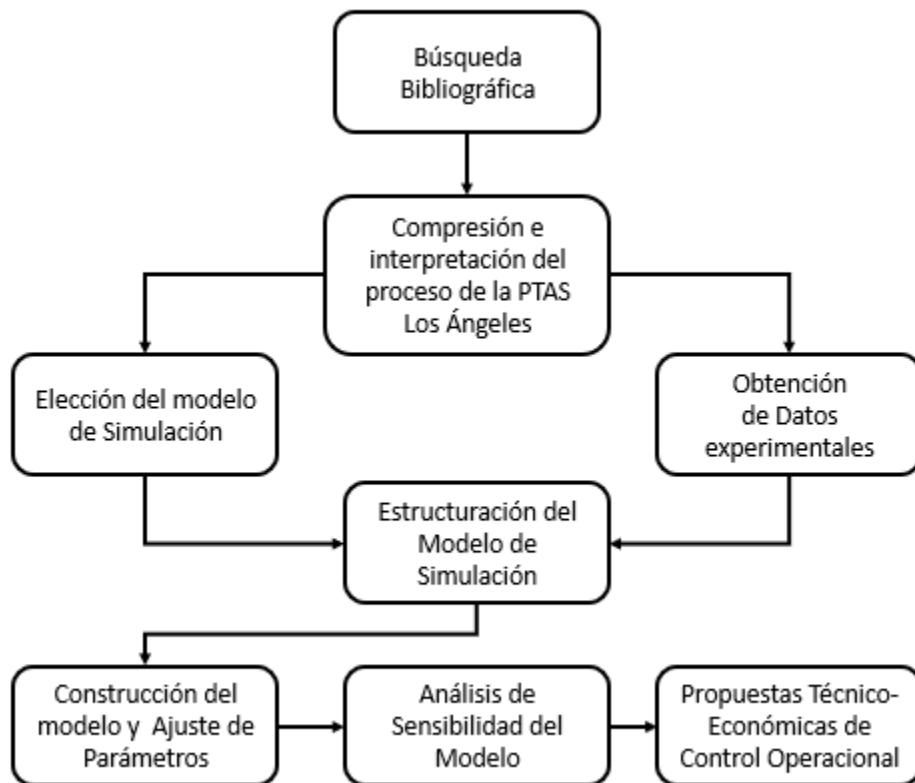


Figura 17: Metodología propuesta para realizar el estudio.

3.1. Búsqueda Bibliográfica

El trabajo comienza con la búsqueda bibliográfica para comprender el sistema de lodos activados, junto con las posibles causas de la formación del problema de Bulking Filamentoso. Adicionalmente, se estudió el funcionamiento teórico de la Planta de Tratamiento de Aguas de la ciudad de Los Ángeles a través de la lectura del manual de operación de esta, de tal forma de entender las variables del control de operación y de diseño de la planta.

3.2. Comprensión e interpretación del proceso de la PTAS de Los Ángeles

Durante enero del 2020 se realizó este trabajo en la PTAS de Los Ángeles. En este periodo se pudieron observar los procesos que llevan a cabo la operación de la planta, junto con la identificación del personal responsable de tomar distintas decisiones que impacten directamente el proceso de tratamiento de aguas. Adicionalmente, se realiza una comparación entre la información estudiada en el manual de operación, y el funcionamiento real de esta. Finalmente, se realizan ensayos de laboratorio para obtener una recopilación de datos experimentales de concentración de nitrógeno en el reactor biológico, realizar una observación microscópica del lodo activado y recopilar información del control de los valores de las especies del sistema (DQO, SST, flujos volumétricos, pH, temperatura, entre otros) realizados diariamente por el analista químico de la planta.

En la Figura 18 se presenta un diagrama de la totalidad de las etapas de la PTAS de Los Ángeles. Estas etapas son descritas con mayor detalle en el anexo 7.6.

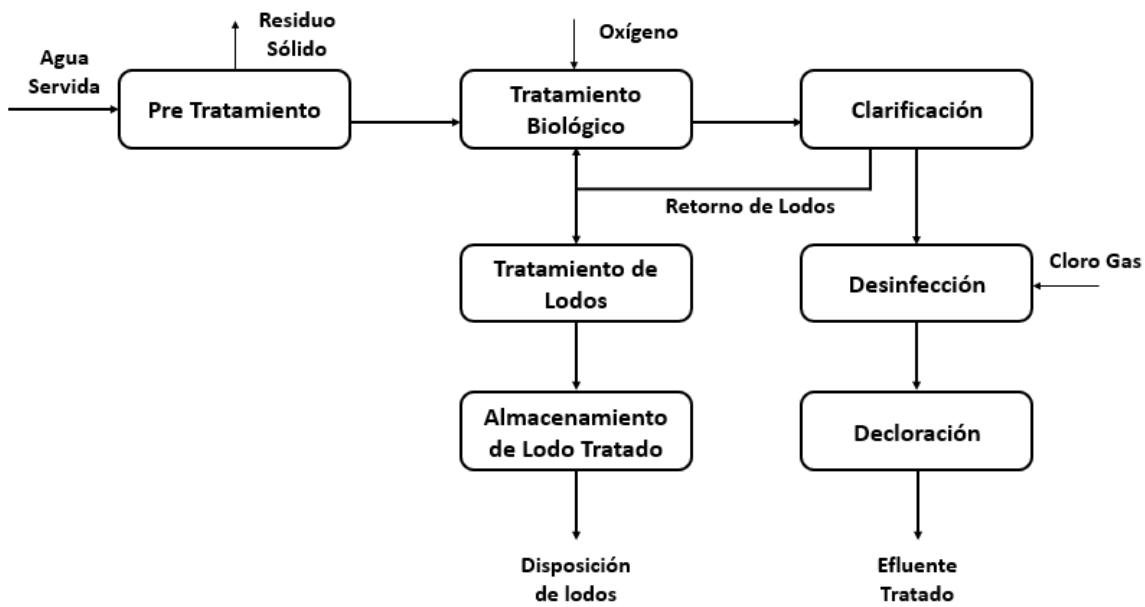


Figura 18: Diagrama de Bloques del proceso de tratamiento de aguas de la PTAS de Los Ángeles.

3.3. Elección del modelo de Simulación

Se escoge trabajar con una extensión del modelo ASM3 proveniente de una publicación científica de la IWA. Esta incluye la cinética de la bacteria *Microthrix parvicella*, organismo que se encuentra presente en la mayoría de los casos de Bulking Filamentoso junto con las cinéticas originales del modelo ASM3. Las razones de la elección del modelo se detallan en el anexo 7.7. El modelo simulará la dinámica esquematizada en la Figura 19 la cual es detallada en el Anexo 7.8. [49, 56].

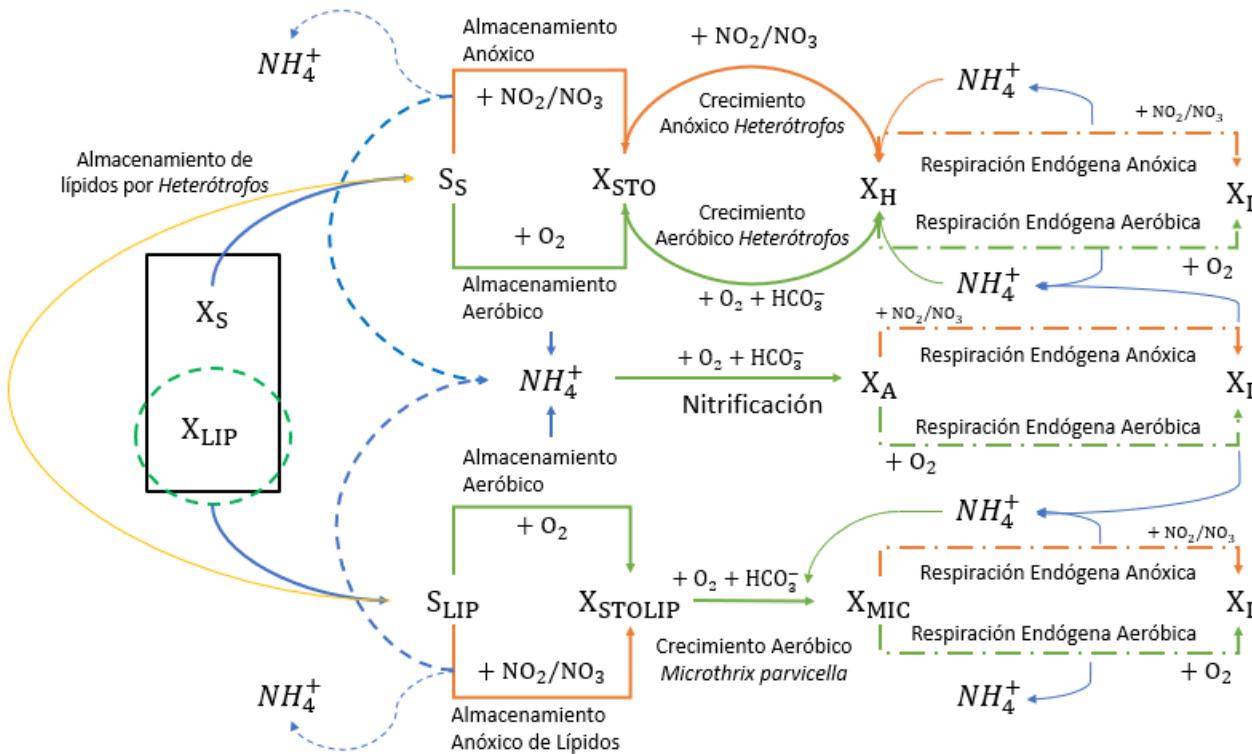


Figura 19: Diagrama resumido de la dinámica microbiológica del modelo.

El modelo construido servirá como herramienta de simulación del sistema de lodos activados de la PTAS de Los Ángeles. De esta manera serán identificadas las variables operacionales responsables de la formación de Bulking Filamentoso en el proceso, la correlación de este fenómeno con la fisiología estudiada de *Microthrix parvicella* y los indicadores de operación del proceso de tratamiento de Los Ángeles.

En el caso de no encontrar coherencias con el metabolismo de la bacteria filamentosa, será necesario revisar las cinéticas del modelo, aquello, se considera fundamental en la obtención de resultados, puesto que podría considerarse como un aporte significativo en el entendimiento del funcionamiento biológico de la bacteria cuyo aislamiento en laboratorio ha sido dificultoso.

3.4. Estructuración del Modelo de Simulación

Una vez escogido el modelo computacional, se procede a identificar los procesos y las especies que participan dentro del sistema [48].

3.4.1. Componentes del Sistema

3.4.1.1. Componentes suspendidos

Este tipo de materia se encuentra suspendida en las aguas del reactor biológico. Por ende, se asume que, en condiciones ideales, una vez que el flujo de salida en esta etapa del proceso sea descargado en el clarificador secundario, este tipo de partículas decante totalmente obteniendo de esta manera un volumen de sobrenadante de agua clarificada sin concentración de estas especies.

- **Concentración de Sustrato de degradación lenta (X_S):** Son sustratos orgánicos de alto peso molecular. Estos pueden ser degradados debido a una hidrólisis generada en el espacio extracelular antes de encontrarse dispuesto a ser degradado. Se asume que el producto de la hidrólisis de estos componentes son sustratos fácilmente degradables o partículas inertes disueltas.
- **Concentración de Partículas suspendidas inertes (X_I):** Este material no es degradado dentro del sistema de lodos activados. Puede encontrarse dentro de la corriente afluente y/o generarse producto de un decaimiento de la biomasa presente.
- **Concentración de Organismos Heterótrofos (X_H):** Estos organismos pueden crecer en condiciones aeróbicas y anóxicas (denitrificación). Son responsables de hidrolizar los sustratos de degradación lenta.
- **Concentración de Organismos Autótrofos (X_A):** Corresponden a organismos nitrificantes, es decir, son responsables del proceso de nitrificación en el sistema. Crecen únicamente en condiciones aeróbicas; sumado a ello, poseen un metabolismo quimiolitoautotrofo, es decir, no requieren de una fuente de carbono orgánico para sus procesos vitales, dicho elemento lo consiguen a partir del CO_2 (especie no considerada en el modelo) producido por los organismos heterótrofos.
- **Concentración de Sustrato Almacenado (X_{STO}):** Son especies almacenadas intracelularmente en los organismos heterótrofos. Contemplan especies como polihidroxialcanoides, glicógeno, etc. Se interpreta como un componente funcional en la modelación del sistema, sin embargo, no es identificable de manera experimental.
- **Concentración de Lípidos de degradación lenta (X_{LIP}):** Son componentes análogos a los sustratos de degradación lenta (X_S), sin embargo, poseen la diferencia que corresponden únicamente a moléculas lipídicas de alta masa molecular. Estas moléculas pueden ser hidrolizadas de forma exclusiva por *Microthrix parvicella*.

- **Concentración de Lípidos almacenados (X_{STOLIP}):** Corresponde al lípido almacenado dentro de las células, tanto de los organismos heterótrofos como de *M.parvicella*. Es análogo al sustrato almacenado (X_{STO}); para que se formen estas especies, el lípido de degradación lenta (X_{LIP}) debió haber sido sometido por un proceso de hidrólisis previa.
- **Concentración de *Microthrix parvicella* (X_{MIC}):** Esta especie cuantifica la concentración de *Microthrix parvicella* en el sistema de lodos activados. Esta bacteria crece únicamente en condiciones aeróbicas. Posee un metabolismo heterótrofo que permite consumir los lípidos presentes en el sistema, utilizando el oxígeno como acceptor de electrones y el nitrato como fuente de nitrógeno.
- **Concentración de Sólidos Suspensivos Totales (X_{ST}):** Son introducidos en los modelos cinéticos para estimar su dinámica en el tiempo de forma estequiométrica.
- **Concentración de Sólidos Suspensivos Volátiles (X_{SV}):** Al igual que los Sólidos Suspensivos Totales, estos son introducidos para modelar su dinámica en el tiempo de forma estequiométrica. Normalmente este parámetro corresponde al 80% de los SST.

3.4.1.2. Componentes disueltos

Los componentes disueltos son solubles en el agua, por ende, se toma el supuesto de que estos se encontrarán con la misma concentración entre el líquido clarificado y los lodos decantados.

- **Concentración de Oxígeno Disuelto (S_O):** Oxígeno disuelto en la mezcla. Este puede ser medido y se encuentra determinado por la trasferencia de masa de este gas.
- **Concentración de Partículas disueltas inertes (S_I):** El modelo supone que esta especie no puede ser degradada en el proceso de tratamiento de aguas. Se asume que esta materia se encuentra presente en el afluente del reactor y puede ser generado producto de la hidrólisis del sustrato de degradación lenta.
- **Concentración de Sustrato de Degradación Rápida (S_S):** Esta fracción de la DQO se encuentra disponible para ser biodegradada por los organismos heterótrofos.
- **Concentración de Lípidos de degradación Rápida (S_{LIP}):** Corresponden a los lípidos de bajo peso molecular (como el ácido oleico) formado a partir de la hidrólisis de los lípidos de degradación lenta (X_{LIP}).
- **Concentración de Amoniaco/Amonio (S_{NH}):** Se compone de la suma de amoniaco e ión amonio ($NH_4^+ + NH_3-N$). Para efectos de balance de carga iónica, se considera todo como NH_4^+ .

- **Concentración de Nitrito/Nitrato (S_{NO}):** Al igual que el amoníaco, este componente representa la suma de nitrato y nitrito ($\text{NO}_3^- \text{N} + \text{NO}_2^- \text{N}$). Aquello asume el no incluir el nitrito como una especie separada, sino que lo identifica como un intermediario entre las reacciones de nitrificación y denitrificación.
- **Concentración de Nitrógeno Gaseoso (S_{N2}):** Se asume que esta especie se produce únicamente como producto de la denitrificación. Este gas puede ser intercambiado desde la mezcla hacia el medio ambiente de forma paralela al oxígeno. El cuantificar la cantidad de esta especie es de utilidad para evaluar posibles problemas debido a la sobresaturación de N_2 en los clarificadores secundarios.
- **Alcalinidad en el agua servida (S_{ALK}):** Se cuantifica para aproximar la conservación de la carga iónica en las reacciones biológicas. Esta especie se introduce para generar detecciones tempranas de posibles condiciones de pH bajo (menor a 5,5), condición que puede inhibir algunos procesos biológicos. Para cálculos estequiométricos, esta especie se interpreta como bicarbonato, HCO_3^- .

3.4.2. Procesos Cinéticos del modelo

A continuación, se presentan los procesos metabólicos a considerar en el modelo de simulación. Junto con su explicación, se presenta su expresión cinética con respecto a Monod:

- **Hidrólisis de sustrato de degradación lenta:** Este proceso simula la fragmentación de los sustratos de degradación lenta (X_s) debido a la capacidad de hidrólisis que poseen los organismos heterótrofos del lodo activado. Producto de este proceso se generan sustratos de degradación rápida (S_s), disponibles para desarrollar los diferentes procesos metabólicos presentes en el lodo activado.

$$\rho_1 = k_H \cdot \frac{\frac{X_s}{X_H}}{K_X + \frac{X_s}{X_H}} \cdot X_H$$

- **Almacenamiento Aeróbico de Sustrato de Degradación Rápida:** Describe el almacenamiento de los sustratos de degradación rápida (S_s) en forma de productos intracelulares almacenados (X_{sto}). Este proceso requiere energía en forma de ATP, la cual es obtenida en la respiración aeróbica. Se asume que, todos los sustratos son almacenados inicialmente, para luego ser convertidos en biomasa.

$$\rho_2 = k_{sto} \cdot \frac{S_o}{K_o + S_o} \cdot \frac{S_s}{K_s + S_s} \cdot X_H$$

- **Almacenamiento Anóxico de Sustrato de Degradación Rápida:** Este proceso es idéntico al almacenamiento aeróbico de Sustratos, sin embargo, la energía es obtenida producto del proceso de denitrificación.

$$\rho_3 = k_{sto} \cdot \eta_{no} \cdot \frac{K_o}{K_o + S_o} \cdot \frac{S_{no}}{K_{no} + S_{no}} \cdot \frac{S_s}{K_s + S_s} \cdot X_H$$

- **Crecimiento Aeróbico de Organismos Heterótrofos:** Corresponde al proceso en donde los organismos heterótrofos (X_H) utilizan el sustrato almacenado intracelularmente (X_{STO}) para la producción de biomasa.

$$\rho_4 = \mu_H \cdot \frac{S_O}{K_O + S_O} \cdot \frac{S_{NH}}{K_{NH} + S_{NH}} \cdot \frac{S_{HCO}}{K_{HCO} + S_{HCO}} \cdot \frac{\frac{X_{STO}}{X_H}}{K_{STO} + \frac{X_{STO}}{X_H}} \cdot X_H$$

- **Crecimiento Anóxico de Organismos Heterótrofos:** Es similar al crecimiento aeróbico de organismos, sin embargo, este proceso genera una reacción de denitrificación.

$$\rho_5 = \mu_H \cdot \eta_{NO} \cdot \frac{K_O}{K_O + S_O} \cdot \frac{S_{NO}}{K_{NO} + S_{NO}} \cdot \frac{S_{NH}}{K_{NH} + S_{NH}} \cdot \frac{S_{HCO}}{K_{HCO} + S_{HCO}} \cdot \frac{\frac{X_{STO}}{X_H}}{K_{STO} + \frac{X_{STO}}{X_H}} \cdot X_H$$

- **Respiración Endógena Aeróbica:** Este proceso describe todos los requerimientos de la biomasa que no se asocian con un crecimiento. Es decir, refiere a simular los procesos de mantención, lisis, depredación, motilidad, muerte, etc.

$$\rho_6 = b_{H,O2} \cdot \frac{S_O}{K_O + S_O} \cdot X_H$$

- **Respiración Endógena Anóxica:** Este proceso es similar a la Respiración Endógena Aeróbica, pero típicamente es más lento.

$$\rho_7 = b_{H,NO} \cdot \frac{K_O}{K_O + S_O} \cdot \frac{S_{NO}}{K_{NO} + S_{NO}} \cdot X_H$$

- **Respiración Aeróbica de sustrato almacenado:** Este proceso es análogo a la respiración endógena aeróbica. Este asegura que el producto almacenado decaiga junto con la muerte celular.

$$\rho_8 = b_{STO,O2} \cdot \frac{S_O}{K_O + S_O} \cdot X_{STO}$$

- **Respiración Anóxica de sustrato almacenado:** Este proceso es análogo al proceso anterior, pero en condiciones de denitrificación.

$$\rho_9 = b_{STO,NO} \cdot \frac{K_O}{K_O + S_O} \cdot \frac{S_{NO}}{K_{NO} + S_{NO}} \cdot X_{STO}$$

- **Nitrificación:** Los organismos autótrofos tienen la capacidad de nitrificar en condiciones aeróbicas dentro del sistema. En este proceso, las bacterias nitrificantes oxidan el nitrógeno amoniaco transformándolo en nitrato y así, internalizar parte de este amoniaco dentro de sus células para luego aumentar su biomasa.

$$\rho_{10} = \mu_A \cdot \frac{S_O}{K_O + S_O} \cdot \frac{S_{NH}}{K_{NH} + S_{NH}} \cdot \frac{S_{HCO}}{K_{HCO} + S_{HCO}} \cdot X_A$$

- **Respiración endógena aeróbica de organismos autótrofos:** Este proceso es análogo a la respiración endógena aeróbica de organismos heterótrofos.

$$\rho_{11} = b_{A,O2} \cdot \frac{S_O}{K_O + S_O} \cdot X_A$$

- **Respiración endógena anóxica de organismos autótrofos:** Este proceso es análogo a la respiración endógena anóxica de organismos heterótrofos.

$$\rho_{12} = b_{A,NO} \cdot \frac{K_O}{K_O + S_O} \cdot \frac{S_{NO}}{K_{NO} + S_{NO}} \cdot X_A$$

- **Hidrolisis de Lípidos:** Los lípidos en suspensión, de degradación lenta (X_{LIP}) pueden ser hidrolizados por las enzimas que posee *M.parvicella* en su superficie celular. Debido al alto carácter hidrofóbico de este organismo en comparación con sus pares en el lodo activado, permite asumir que este proceso es llevado a cabo únicamente por *M.parvicella*.

$$\rho_{13} = k_{H,LIP} \cdot \frac{\frac{X_{LIP}}{X_{MIC}}}{K_{X,LIP} + \frac{X_{LIP}}{X_{MIC}}} \cdot X_{MIC}$$

- **Almacenamiento Aeróbico de Lípidos (X_H):** Este proceso es análogo al almacenamiento aeróbico de sustrato de degradación rápida por parte de los organismos heterótrofos, diferenciando que, en este caso, el sustrato almacenado corresponde al lípido de degradación rápida (S_{LIP}).

$$\rho_{14} = k_{STOLIP,H} \cdot \frac{S_O}{K_O + S_O} \cdot \frac{S_{LIP}}{K_{SLIP,H} + S_{LIP}} \cdot X_H$$

- **Almacenamiento Anóxico de Lípidos (X_H):** Este proceso es análogo al almacenamiento anóxico de sustrato de degradación rápida por parte de los organismos heterótrofos, diferenciando que, en este caso, el sustrato almacenado corresponde al lípido de degradación rápida (S_{LIP}).

$$\rho_{15} = k_{STO} \cdot \eta_{NO} \cdot \frac{K_O}{K_O + S_O} \cdot \frac{S_{NO}}{K_{NO} + S_{NO}} \cdot \frac{S_{LIP}}{K_{SLIP,H} + S_{LIP}} \cdot X_H$$

- **Almacenamiento Aeróbico de Lípidos (X_{MIC}):** Este proceso corresponde a la tasa de almacenamiento de lípidos de degradación rápida generado por *M. parvicella* en condiciones aeróbicas.

$$\rho_{16} = k_{STOLIP,MIC} \cdot \frac{S_O}{K_{O2,MIC} + S_O} \cdot \frac{S_{LIP}}{K_{SLIP,MIC} + S_{LIP}} \cdot X_{MIC}$$

- **Almacenamiento Anóxico de Lípidos (X_{MIC}):** Este proceso corresponde a la tasa de almacenamiento de lípidos de degradación rápida generado por *M. parvicella* en condiciones anóxicas.

$$\rho_{17} = k_{STOLIP,MIC} \cdot \eta_{NO} \cdot \frac{K_O}{K_{O2,MIC} + S_O} \cdot \frac{S_{NO}}{K_{NO,MIC} + S_{NO}} \cdot \frac{S_{LIP}}{K_{SLIP,MIC} + S_{LIP}} \cdot X_{MIC}$$

- **Crecimiento Aeróbico de *M. parvicella*:** Corresponde al proceso cuando *M. parvicella* utiliza el lípido almacenado para producir biomasa en condiciones aeróbicas.

$$\rho_{18} = \mu_{MIC} \cdot \frac{S_O}{K_{O2,MIC} + S_O} \cdot \frac{S_{NH}}{K_{NH,MIC} + S_{NH}} \cdot \frac{S_{HCO}}{K_{HCO,MIC} + S_{HCO}} \cdot \frac{\frac{X_{STOLIP}}{X_{MIC}}}{\frac{X_{STOLIP}}{X_{MIC}} + \frac{X_{STOLIP}}{X_{MIC}}} \cdot X_{MIC}$$

- **Respiración Endógena Aeróbica de *M. parvicella*:** Este proceso es análogo a la Respiración Endógena Aeróbica de Organismos heterótrofos, pero para el caso de *M. parvicella*.

$$\rho_{19} = b_{MIC,O2} \cdot \frac{S_O}{K_{O2,MIC} + S_O} \cdot X_{MIC}$$

- **Respiración Endógena Anóxica de *M. parvicella*:** Este proceso es análogo a la Respiración Endógena Anóxica de Organismos heterótrofos, pero para el caso de *M. parvicella*.

$$\rho_{20} = b_{MIC,NO} \cdot \frac{K_O}{K_{O2,MIC} + S_O} \cdot \frac{S_{NO}}{K_{NO,MIC} + S_{NO}} \cdot X_{MIC}$$

- **Respiración Endógena Aeróbica de Lípidos (X_{MIC}):** Este proceso es análogo a la Respiración Endógena Aeróbica de sustrato de Organismos heterótrofos, pero para el caso de *M. parvicella*.

$$\rho_{21} = b_{STOLIP,O2} \cdot \frac{S_O}{K_{O2,MIC} + S_O} \cdot X_{STOLIP}$$

- **Respiración Endógena Anóxica de Lípidos (X_{MIC}):** Este proceso es análogo a la Respiración Endógena Anóxica de sustrato de Organismos heterótrofos, pero para el caso de *M. parvicella*.

$$\rho_{22} = b_{STOLIP,NO} \cdot \frac{K_O}{K_{O2,MIC} + S_O} \cdot \frac{S_{NO}}{K_{NO,MIC} + S_{NO}} \cdot X_{STOLIP}$$

3.4.3. Parámetros del Modelo y coeficientes estequiométricos

El modelo cuenta con 61 parámetros de los cuales se escoge ajustar 20. La estimación inicial de los parámetros corresponderán a los recomendados por la IWA en la presentación del modelo ASM3 [55]. Los parámetros por ajustar se presentan en la Tabla 4, estos se escogen con el motivo inicial que se identifican como los más fundamentales en el crecimiento de los organismos y como estos podrían mostrar una competencia entre las especies para el caso particular del Reactor Biológico de la PTAS.

Tabla 4: Parámetros escogidos para el ajuste en sus valores.

Organismos Heterótrofos	Organismos Autótrofos	<i>Microthrix parvicella</i>
k_{STO}	$K_{A,NH}$	$K_{STOLIP,H}$
K_O	$K_{A,O}$	$K_{STOLIP,MIC}$
K_S	$K_{A,HCO}$	$K_{SLIP,MIC}$
K_{STO}	$b_{A,O2}$	$K_{O2,MIC}$
K_{NH}	$b_{A,NO}$	K_{STOLIP}
K_{HCO}		$K_{NH,MIC}$
$b_{H,O2}$		$K_{HCO,MIC}$
$b_{H,NO}$		

En el anexo 7.9 se presentan los parámetros cinéticos y estequiométricos por omisión del modelo, cabe destacar que, en el caso parámetros que no se muestran en la Tabla 4 y que si se encuentran en el anexo 7.9, se utilizará el valor recomendado por la IWA en la publicación del modelo escogido. Adicionalmente, en el Anexo 7.10 se presentan los cálculos realizados para obtener los coeficientes de la matriz estequiométrica del sistema, la cual fue presentada anteriormente en el Anexo 7.5.

3.4.4. Balances de Masa en el sistema

El proceso de tratamiento de aguas de la planta de Los Ángeles opera utilizando el sistema de lodos activados por medio de la configuración de equipo que se esquematiza en la Figura 20. La nomenclatura de cada corriente se explica en el Anexo 7.11.

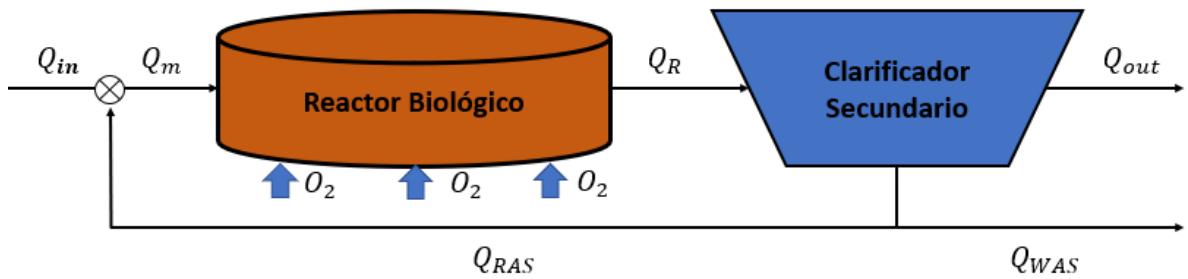


Figura 20: Esquema del sistema de Lodos Activados de la PTAS de Los Ángeles.

Con esta nomenclatura declarada se procede a realizar los balances de masa del sistema. En el Anexo 7.11 se presentan los balances de masa por etapas y los supuestos tomados para realizar estos cálculos. Con estos resultados se procede a determinar el balance de masa por especie del modelo, el cual se presenta a continuación:

1. Concentración de Oxígeno Disuelto (S_O)

$$\frac{dS_O}{dt} = \frac{Q_{in}}{V_R} \cdot (S_{O,in} - S_O) + x_2 \cdot \rho_2 + x_4 \cdot \rho_4 + x_6 \cdot \rho_6 + x_8 \cdot \rho_8 + x_{10} \cdot \rho_{10} + x_{11} \cdot \rho_{11} + x_{14} \cdot \rho_{14} + x_{16} \cdot \rho_{16} + x_{18} \cdot \rho_{18} + x_{19} \cdot \rho_{19} + x_{21} \cdot \rho_{21} + F_{O2}$$

Donde el término F_{O2} corresponde al flujo de aireación injectado en el reactor biológico. La composición de este término se explicará en el Anexo 7.11 [60].

2. Concentración de Sólidos Inertes Disueltos (S_I)

$$\frac{dS_I}{dt} = \frac{Q_{in}}{V_R} \cdot (S_{I,in} - S_I) + f_{SI} \cdot \rho_1 + f_{SI,LIP} \cdot \rho_{13}$$

3. Concentración de Sustrato de Degradación Rápida (S_S)

$$\frac{dS_S}{dt} = \frac{Q_{in}}{V_R} \cdot (S_{S,in} - S_S) + x_1 \cdot \rho_1 - \rho_2 - \rho_3$$

4. Concentración de Sólidos Inertes Suspensos (X_I)

$$\frac{dX_I}{dt} = \frac{Q_{in} \cdot X_{I,in}}{V_R} - \frac{Q_{WAS} \cdot X_I}{V_R} + f_{XI} \cdot (\rho_6 + \rho_7 + \rho_{11} + \rho_{12} + \rho_{19} + \rho_{20})$$

5. Concentración de Sustrato de Degradación Lenta (X_S)

$$\frac{dX_S}{dt} = \frac{Q_{in} \cdot X_{S,in}}{V_R} - \frac{Q_{WAS} \cdot X_S}{V_R} - \rho_1$$

6. Concentración de Organismos Heterótrofos (X_H)

$$\frac{dX_H}{dt} = \frac{Q_{in} \cdot X_{H,in}}{V_R} - \frac{Q_{WAS} \cdot X_H}{V_R} + \rho_4 + \rho_5 - \rho_6 - \rho_7$$

7. Concentración de Sustrato Almacenado (X_{STO})

$$\begin{aligned} \frac{dX_{STO}}{dt} = & \frac{Q_{in} \cdot X_{STO,in}}{V_R} - \frac{Q_{WAS} \cdot X_{STO}}{V_R} + Y_{STO,O2} \cdot \rho_2 + Y_{STO,NO} \cdot \rho_3 - \frac{1}{Y_{H,O2}} \cdot \rho_4 - \frac{1}{Y_{H,NO}} \cdot \rho_5 \\ & - \rho_8 - \rho_9 + Y_{STOLIP,H,O2} \cdot \rho_{14} + Y_{STOLIP,H,NO} \cdot \rho_{15} \end{aligned}$$

8. Concentración de Organismos Autótrofos (X_A)

$$\frac{dX_A}{dt} = \frac{Q_{in} \cdot X_{A,in}}{V_R} - \frac{Q_{WAS} \cdot X_A}{V_R} + \rho_{10} - \rho_{11} - \rho_{12}$$

9. Concentración de Lípido Suspendedo (X_{LIP})

$$\frac{dX_{LIP}}{dt} = \frac{Q_{in} \cdot X_{LIP,in}}{V_R} - \frac{Q_{WAS} \cdot X_{LIP}}{V_R} - \rho_{13}$$

10. Concentración de Lípido Almacenado (X_{STOLIP})

$$\frac{dX_{STOLIP}}{dt} = \frac{Q_{in} \cdot X_{STOLIP,in}}{V_R} - \frac{Q_{WAS} \cdot X_{STOLIP}}{V_R} + Y_{STOLIP,MIC,O2} \cdot \rho_{16} + Y_{STOLIP,MIC,NO} \cdot \rho_{17} - \frac{1}{Y_{MIC}} \cdot \rho_{18} - \rho_{21} - \rho_{22}$$

11. Concentración de *Microthrix parvicella* (X_{MIC})

$$\frac{dX_{MIC}}{dt} = \frac{Q_{in} \cdot X_{MIC,in}}{V_R} - \frac{Q_{WAS} \cdot X_{MIC}}{V_R} + \rho_{18} - \rho_{19} - \rho_{20}$$

12. Concentración de Lípido Disuelto (S_{LIP})

$$\frac{dS_{LIP}}{dt} = \frac{Q_{in}}{V_R} \cdot (S_{LIP,in} - S_{LIP}) + x_{13} \cdot \rho_{13} - \rho_{14} - \rho_{15} - \rho_{16} - \rho_{17}$$

13. Concentración de Amoniaco Disuelto (S_{NH})

$$\begin{aligned} \frac{dS_{NH}}{dt} = & \frac{Q_{in}}{V_R} \cdot (S_{NH,in} - S_{NH}) + \rho_1 + \rho_2 + \rho_3 + \rho_4 + \rho_5 + \rho_6 + \rho_7 + \rho_{10} + \rho_{11} + \rho_{12} \\ & + \rho_{18} + \rho_{19} + \rho_{20} \end{aligned}$$

14. Concentración de Nitrógeno Gaseoso (S_{N2})

$$\begin{aligned} \frac{dS_{N2}}{dt} = & \frac{Q_{in}}{V_R} \cdot (S_{N2,in} - S_{N2}) - x_3 \cdot \rho_3 - x_5 \cdot \rho_5 - x_7 \cdot \rho_7 - x_9 \cdot \rho_9 - x_{12} \cdot \rho_{12} - x_{15} \cdot \rho_{15} \\ & - x_{17} \cdot \rho_{17} - x_{20} \cdot \rho_{20} - x_{22} \cdot \rho_{22} \end{aligned}$$

15. Concentración de Nitrito/Nitrato Disuelto (S_{NO})

$$\begin{aligned} \frac{dS_{NO}}{dt} = & \frac{Q_{in}}{V_R} \cdot (S_{NO,in} - S_{NO}) + x_3 \cdot \rho_3 + x_5 \cdot \rho_5 + x_7 \cdot \rho_7 + x_9 \cdot \rho_9 + x_{12} \cdot \rho_{12} + x_{15} \cdot \rho_{15} \\ & + x_{17} \cdot \rho_{17} + x_{20} \cdot \rho_{20} + x_{22} \cdot \rho_{22} \end{aligned}$$

16. Concentración de Bicarbonato (S_{HCO})

$$\frac{dS_{HCO}}{dt} = \frac{Q_{in}}{V_R} \cdot (S_{HCO,in} - S_{HCO}) + z_1 \cdot \rho_1 + z_2 \cdot \rho_2 + z_3 \cdot \rho_3 + z_4 \cdot \rho_4 + z_5 \cdot \rho_5 + z_6 \cdot \rho_6 + z_7 \cdot \rho_7 \\ + z_9 \cdot \rho_9 + z_{10} \cdot \rho_{10} + z_{11} \cdot \rho_{11} + z_{12} \cdot \rho_{12} + z_{15} \cdot \rho_{15} + z_{17} \cdot \rho_{17} + z_{18} \cdot \rho_{18} + z_{19} \\ \cdot \rho_{19} + z_{20} \cdot \rho_{20} + z_{22} \cdot \rho_{22}$$

17. Concentración de Sólidos Suspensidos Totales (X_{ST})

$$\frac{dX_{ST}}{dt} = \frac{Q_{in} \cdot X_{ST,in}}{V_R} - \frac{Q_{WAS} \cdot X_{ST}}{V_R} + t_1 \cdot \rho_1 + t_2 \cdot \rho_2 + t_3 \cdot \rho_3 + t_4 \cdot \rho_4 + t_5 \cdot \rho_5 + t_6 \cdot \rho_6 + t_7 \\ \cdot \rho_7 + t_8 \cdot \rho_8 + t_9 \cdot \rho_9 + t_{10} \cdot \rho_{10} + t_{11} \cdot \rho_{11} + t_{12} \cdot \rho_{12} + t_{13} \cdot \rho_{13} + t_{14} \cdot \rho_{14} \\ + t_{15} \cdot \rho_{15} + t_{16} \cdot \rho_{16} + t_{17} \cdot \rho_{17} + t_{18} \cdot \rho_{18} + t_{19} \cdot \rho_{19} + t_{20} \cdot \rho_{20} + t_{21} \cdot \rho_{21} \\ + t_{22} \cdot \rho_{22}$$

18. Concentración de Sólidos Suspensidos Volátiles (X_{SV})

$$\frac{dX_{SV}}{dt} = \frac{Q_{in} \cdot X_{SV,in}}{V_R} - \frac{Q_{WAS} \cdot X_{SV}}{V_R} + s_1 \cdot \rho_1 + s_2 \cdot \rho_2 + s_3 \cdot \rho_3 + s_4 \cdot \rho_4 + s_5 \cdot \rho_5 + s_6 \cdot \rho_6 + s_7 \\ \cdot \rho_7 + s_8 \cdot \rho_8 + s_9 \cdot \rho_9 + s_{10} \cdot \rho_{10} + s_{11} \cdot \rho_{11} + s_{12} \cdot \rho_{12} + s_{13} \cdot \rho_{13} + s_{14} \cdot \rho_{14} \\ + s_{15} \cdot \rho_{15} + s_{16} \cdot \rho_{16} + s_{17} \cdot \rho_{17} + s_{18} \cdot \rho_{18} + s_{19} \cdot \rho_{19} + s_{20} \cdot \rho_{20} + s_{21} \cdot \rho_{21} \\ + s_{22} \cdot \rho_{22}$$

3.5. Obtención de los datos experimentales

Para realizar el ajuste de parámetros se utilizó un set de datos experimentales cuya metodología de obtención se presenta a continuación:

- **Observación microscópica:** Los ensayos inician con la realización de una prueba de tinción de gram. El objetivo de esta prueba fue observar y verificar la presencia de la especie *Microthrix parvicella* en el lodo activado del reactor biológico. Para ello se hicieron comparaciones entre una identificación de *M. parvicella* encontrada en literatura, y la que se observó de forma experimental. El protocolo de estos ensayos se presenta en el Anexo 7.12.1.

Posteriormente, se realizó una observación *in vivo* del lodo activado, con ello, se capturaron fotografías para identificar y contar los diferentes organismos presentes en el lodo activado (incluyendo los filamentos de las bacterias). Esta información obtenida, sirve para cuantificar una abundancia relativa de *M. parvicella* en el lodo activado. El protocolo de estos ensayos es presentado en el Anexo 7.12.2.

- **Obtención de parámetros de operación:** En la PTAS de Los Ángeles se realiza un control diario de parámetros de operación del proceso. Este trabajo es llevado a cabo por el analista químico de la planta, cuya información es registrada en un Sistema en línea (SIPT). Esta información fue recopilada, discriminando las variables útiles para ser incluidas en el proceso, las cuales se presentan a continuación:
 - DQO en el caudal afluente.
 - SST en el caudal afluente, efluente y corriente WAS.
 - SSV en el caudal efluente y recirculación (RAS).
 - Flujos del caudal efluente, afluente y corriente WAS.
 - pH de la corriente afluente y efluente.
 - Oxígeno disuelto en el reactor biológico.
 - Volumen del Reactor Biológico (se asume constante).
 - Temperatura de operación.
- **Ensayos de cuantificación de Nitrógeno:** El SIPT no posee un control de la concentración de nitrógeno presente en el proceso de tratamiento de aguas de la planta. Por ende, se hizo necesario realizar ensayos para obtener los valores de esta especie en la corriente afluente (previa al reactor biológico) y en el reactor biológico. El protocolo de estos ensayos es presentado en el Anexo 7.12.3.

3.6. Construcción del modelo y ajuste de parámetros

El modelo se implementa en MATLAB, el que simulará las 22 ecuaciones diferenciales ordinarias no lineales correspondientes a las cinéticas del sistema y los respectivos balances de masa. El integrador utilizado para esta resolución será ode45 basado en la fórmula explícita de Runge-Kutta, admitiendo el tiempo de los datos experimentales obtenidos (16 días).

El ajuste de parámetros se basa en la minimización del indicador de error, compuesto de la suma ponderada de los errores absolutos (MAE) de las especies representativas del sistema: óxigeno, nitrógeno amoniacial, pH y Sólidos suspendidos volátiles, de las cuales se tienen datos experimentales. Cada componente en la sumatoria total de los errores es ponderada por un factor de peso (Tabla 5), asignado de acuerdo con el grado de conocimiento e interpretación del sistema:

Tabla 5: Ponderación de especies para el cálculo del MAE en el ajuste de parámetros.

Especie	Ponderación (%)
Oxígeno disuelto	47,5
Nitrógeno amoniacial	5
pH	47,5
Sólidos Suspendedos Volátiles	0,5

La estructura del modelo se compone 7 main y 9 funciones, cuyas entradas y salidas se representan en el diagrama de la Figura 21 (para más detalle de esta estructura ir al Anexo 7.13).

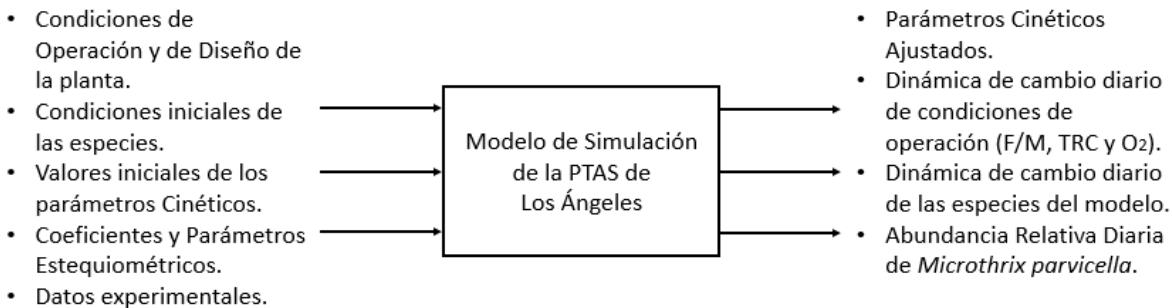


Figura 21: Diagrama de entradas y salidas del modelo construido.

3.7. Análisis de Sensibilidad

Al obtener los resultados entregados por el modelo, se procederá a utilizar esta información para realizar un análisis de sensibilidad de resultados. La metodología de este análisis consiste en cambiar la magnitud de las variables de operación más importantes del proceso, Flujo de aireación y TRC, y evaluar cómo cambian las especies consideradas en el modelo, junto con la abundancia relativa de *Microthrix parvicella*.

La dimensión de la variación realizada tendrá coherencia con las capacidades de la PTAS de Los Ángeles para estos parámetros, en el caso del TRC, los valores tendrán un rango de 2-10 [d], mientras que, en el caso de la aireación, se utilizarán flujos de aireación por sobre el mínimo y por debajo del máximo flujo de aireación establecido por el diseño de la PTAS.

3.8. Propuestas Técnico – Económicas de control operacional

Con los resultados del ajuste de parámetros y el análisis de sensibilidad se podrán evaluar las condiciones de operación y etapas del proceso críticas que promueven el aumento de la abundancia relativa de *Microthrix parvicella*. De esta manera, se podrán proponer acciones para controlar y evitar la formación de Bulking Filamentoso, desde un punto de vista preventivo y correctivo, y el costo necesario para implementar dichas medidas.

Capítulo 4

4. Resultados y Discusión

4.1. Ensayos de Tinción Gram

Para verificar la presencia de la bacteria filamentosa *M. parvicella* se realizaron ensayos de tinción Gram. Los resultados de estos experimentos se presentan en las Figuras 22, 23 y 24, en ellas, se incluyen fotografías de ensayos de tinción Gram recopiladas en literatura, las cuales muestran la identificación de bacterias *Microthrix parvicella* y type 0914 [40, 62].

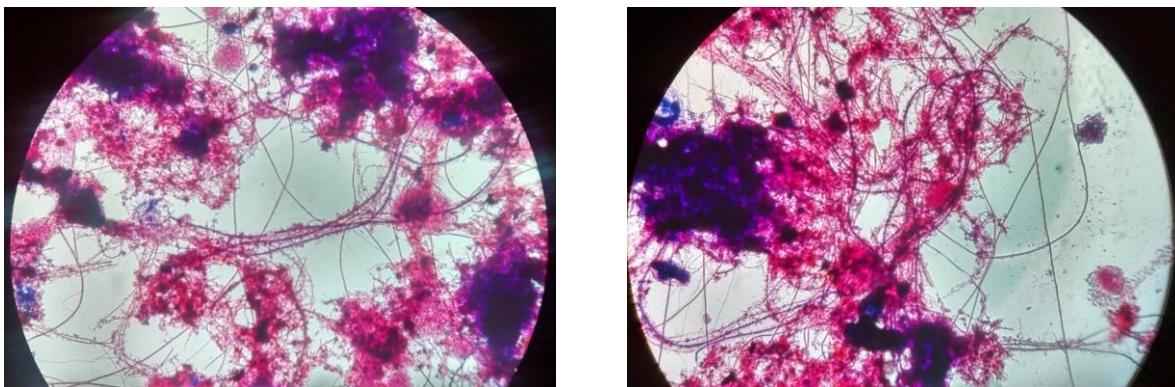


Figura 22: Fotografía microscópica a 10X de un ensayo de tinción Gram. Ambas corresponden a distintos flóculos presentes en el lodo activado.

La bacteria filamentosa *Microthrix parvicella* corresponde a una especie que responde de forma positiva a este ensayo, por ello, en la observación microscópica, esta debe identificarse con un color morado/azulado al ser sometida a esta tinción. Sumado a lo anterior, esta bacteria se reconoce por su estructura alargada, la cual forma filamentos enrollados, largos, finos, de curvas suaves, sin ramificaciones ni presencia de vaina (un recubrimiento externo sobre la célula) en el lodo activado [36]. Aquellas características se pueden observar en la Figura 22 y más detalladamente en las fotografías de la izquierda de las Figuras 23 y 24.

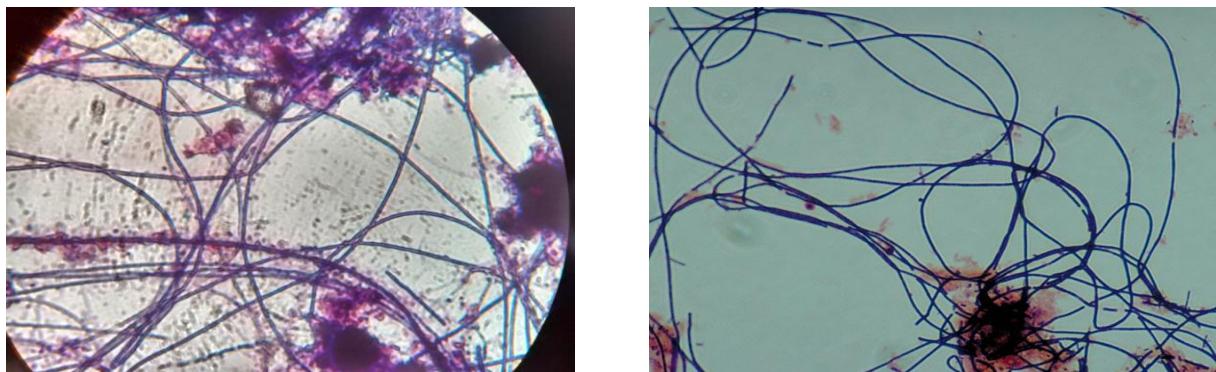


Figura 23: A la izquierda: Fotografía microscópica a 40X de un ensayo de tinción Gram en un flóculo del lodo activado. A la derecha: Fotografía microscópica de tinción Gram obtenida en literatura donde se identifica a *M. parvicella*

Esta bacteria posee una capa extracelular de exopolisacáridos (sobre la pared celular) que le permite concentrar la materia orgánica en dicha área de la célula [46], por ende, en las observaciones microscópicas, *M. parvicella* puede presentarse junto a conjuntos de lodo (Figura 22). Aquello, corresponde a una característica que propicia la formación de un flóculo estable en condiciones ideales, no así cuando existe una abundancia excesiva de esta especie, puesto que puede generar rupturas en el flóculo, que se perciben como micro aglomeraciones de materia orgánica (fotografía izquierda de la Figura 22).

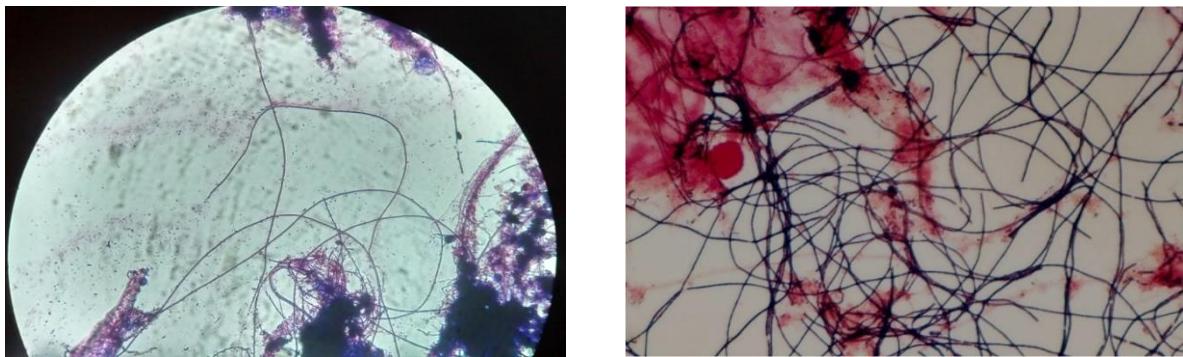


Figura 25: A la izquierda: Fotografía microscópica a 10X de un ensayo de tinción Gram en un flóculo del lodo activado. A la derecha: Fotografía microscópica de tinción Gram obtenida en literatura donde se identifica a *M. parvicella*.

Existen casos en donde el crecimiento excesivo de *M. parvicella* desencadena en que la estructura celular de esta bacteria sobresalga en el flóculo en formación [45]. En estos casos, la presencia de *Microthrix parvicella* se observa en distintos filamentos aislados al flóculo (ambas fotografías en la Figura 25), fenómeno que genera un aislamiento del flóculo carente de estabilidad, impidiendo que las aglomeraciones de lodo en formación se cohesionen entre sí para formar una partícula de mayor masa.

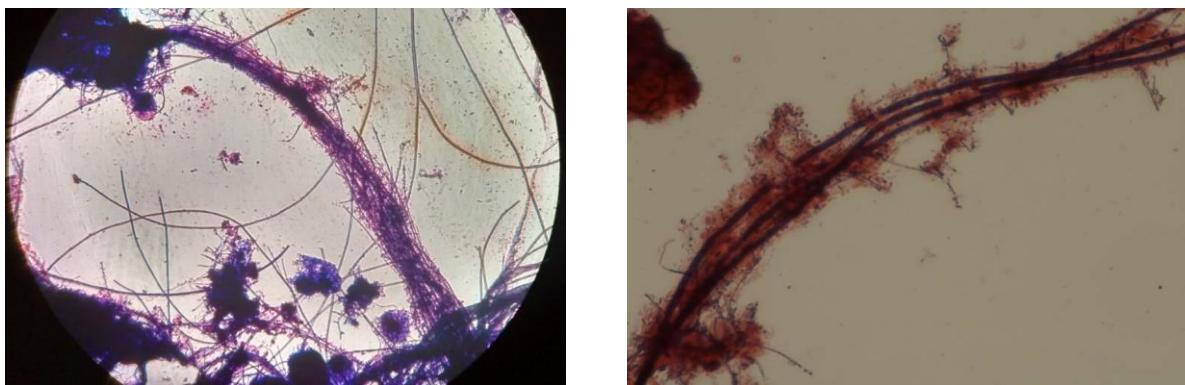


Figura 24: A la izquierda: Fotografía microscópica a 10X de un ensayo de tinción Gram en un flóculo del lodo activado. A la derecha: Fotografía de un ensayo de tinción Gram obtenida en literatura donde se identifica a la especie type 0914.

Los resultados podrían dilucidar la presencia de otras especies de bacterias filamentosas formadoras de Bulking como tipo 0914 (*type 0914*) y tipo 0041 (*type 0041*), cuya morfología es similar a la de *Microthrix parvicella* (fotografía derecha en la Figura 24) al momento de identificarlas en este tipo de ensayos. Estas especies se catalogan como bacterias de respuesta Gram variable, ya que en algunos casos se presentan de color morado, mientras que, en otras ocasiones pueden mostrarse de color rojizo. No obstante, en el caso de *0041*, esta se caracteriza por mostrar una estructura recta y/o ligeramente curvada, donde en algunos casos desarrolla crecimiento epífito, lo cual no fue identificado en estos ensayos [36]. Por otro lado, la identificación de *0914* se puede sustentar en que esta bacteria genera en la mayoría de los casos gránulos de sulfuro, estructuras que tampoco fueron identificadas [62]. De igual forma, dentro de los flóculos del reactor biológico podrían coexistir otras especies de bacterias filamentosas, como *type 1851*, especie que forma aglomeraciones de materia entre sus largas cadenas al igual que *Microthrix parvicella*, característica que puede coincidir con lo mostrado en la Figura 26 [63].

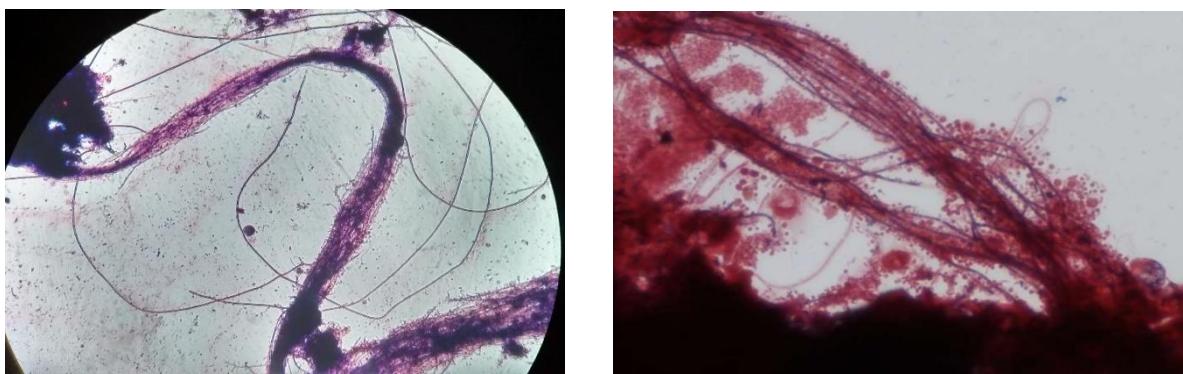


Figura 26: A la izquierda: Fotografía microscópica a 40X de un ensayo de tinción Gram en un flóculo del lodo activado. A la derecha: Fotografía de un ensayo de tinción Gram obtenida en literatura donde se identifica a la especie *type 1851*.

La tinción Gram realizada permite evidenciar la presencia de *M. parvicella* en el reactor biológico, sin embargo, a través de este mismo ensayo, se puede discutir acerca de la presencia de otras bacterias filamentosas formadoras de Bulking, e incluso, otras especies que no pudieron ser identificadas. Adicionalmente, se debe tener en cuenta que este ensayo depende exclusivamente de la calidad de la observación en el microscopio, y de la efectividad con que la tinta penetró la estructura celular de los microorganismos en el lodo, por lo cual, las conclusiones realizadas dependen de un resultado cualitativo y que podría estar sujeto a errores de medición que impacten luego en la inclusión de la cinética de *M. parvicella* en el modelo (recordar que el modelo se sustenta en que el Bulking Filamentoso se produce únicamente por la presencia de *M. parvicella*). Ante ese escenario, sería importante reevaluar la técnica de caracterización microbiológica utilizada en esta etapa del proyecto, existiendo variantes como los ensayos de 16S, qPCR, FISH, citometría de flujo, entre otras [65, 66] donde se podrían obtener resultados precisos con respecto de la microfauna del lodo, y las concentraciones relativas de cada especie, no obstante, aquellas herramientas mencionadas, son significativamente más costosas que la tinción Gram y sus resultados de medición aumentan en tiempo [46]. Sin perjuicio de lo anterior, quedarán propuestas como opciones de medición para estudios futuros en el conocimiento del sistema de lodos activados.

4.2. Modelo inicial y análisis de sensibilidad de parámetros

La modelación del sistema inicia con una simulación utilizando los valores de los parámetros recomendados por el sistema ASM3 (Anexo 7.9). Los procesos del sistema se describieron simulando los procesos cinéticos de la sección 3.4.2.

Las condiciones de operación corresponden a los valores promedio de los datos experimentales recopilados en la planta durante el periodo de estudio en terreno (16 días), estos se presentan en el Anexo 7.14. La obtención de las concentraciones de las especies corresponde a las del sistema cuando alcanza el estado estacionario en el modelo (60 días).

Posteriormente, se realizó un análisis de sensibilidad de los parámetros del sistema. La metodología consistió en variar los valores de los parámetros originales, aumentándolos y disminuyéndolos en una orden de magnitud, para comparar como estas variaciones incidían en los valores de las especies una vez alcanzado el estado estacionario.

Para evaluar la incidencia de los cambios en los valores de los parámetros, se construyó la siguiente estandarización. Los valores originales que son mencionados a continuación se encuentran en el Anexo 7.14:

- **Sensibilidad baja (Verde):** Al cambiar el valor del parámetro, la especie presenta una variación entre el [50% 150%] con respecto a su valor original.
- **Sensibilidad media (Amarillo):** Al cambiar el valor del parámetro, la especie presenta una variación por entre [-30% -50%] y/o [150% 200%] con respecto a su valor original.
- **Sensibilidad alta (Rojo):** Al cambiar el valor del parámetro, la especie presenta una variación bajo el 30% y por sobre el 200% con respecto a su valor original.

La Tabla 6 muestra el análisis de esta evaluación de sensibilidad de los parámetros del modelo inicial. Esta se encuentra ordenada desde el parámetro que presenta el indicador de sensibilidad más alto (Flujo O₂) hasta el que presenta el indicador más bajo (K_{HCO,MIC}).

Tabla 6: Sensibilidad de los valores de los parámetros del modelo inicial.

Parámetro	S_o	S_I	S_s	X_i	X_S	X_H	X_{STO}	X_A	X_{LIP}	X_{STOLIP}	X_{MIC}	S_{LIP}	S_{NH}	S_{N2}	S_{NO}	S_{HCO}	SST	SSV	AR
Flujo O_2	Orange	Green	Orange		Green	Yellow	Orange	Green			Orange					Orange	Yellow	Green	Orange
$b_{H,02}$	Orange				Orange	Yellow								Yellow		Orange	Yellow	Green	
k_{STO}	Orange		Yellow												Yellow				Orange
K_{HCO}	Green				Yellow	Orange												Green	Orange
$b_{H,NO}$	Green								Yellow		Yellow				Yellow				Orange
$K_{A,o}$	Orange						Orange												
$b_{A,02}$																			
K_o	Orange								Yellow	Orange									
$K_{STOLIP,H}$																			Orange
$K_{STOLIP,MIC}$																			
$K_{SLIP,MIC}$																			
$K_{A,HCO}$	Orange						Yellow												
$b_{A,NO}$	Orange								Yellow										
$K_{O2,MIC}$	Green							Orange											
$K_{A,NH}$	Yellow																		
K_s	Green		Orange																
K_{STOLIP}										Orange									
K_{NH}																			
K_{HCO}																			
$K_{NH,MIC}$																			
$K_{HCO,MIC}$																			

El análisis de sensibilidad revela lo siguiente con respecto a los parámetros estudiados (se sugiere al lector apoyarse con la Tabla 6):

$k_{STO} / K_o / K_s$: Los cambios en la magnitud de estos parámetros determinan la dinámica de captación de sustrato fácilmente degradable (S_s) de los organismos heterótrofos. Este material orgánico puede ser almacenado en condiciones tanto aeróbicas como anóxicas, cuya diferencia radica en la especie aceptora de electrones que utilizan los microorganismos: Oxígeno disuelto (S_o) y el complejo Nitrito/Nitrato (S_{NO}), es por ello que los valores de estos parámetros presentan una sensibilidad media/alta en la concentración de estas especies.

El control de los procesos de almacenamiento de sustrato representa la competencia que se genera en el sistema entre los organismos heterótrofos y *M. parvicella*. La fisiología de esta bacteria evidencia la capacidad de almacenar sustrato lipídico en condiciones aeróbicas y anóxicas, por lo cual, utiliza el oxígeno y el nitrato como especies aceptoras de electrones [46]. Es por ello que, como los parámetros cinéticos de los organismos heterótrofos, definen las concentraciones de estas especies reductoras, es que influyen con una sensibilidad alta en su mayoría, en la presencia de lípidos en el sistema, ya sea en su forma suspendida (X_{LIP}), almacenada (X_{STOLIP}) o disuelta (S_{LIP}), ya que se encuentran condicionadas por la disponibilidad de las especies reductoras utilizadas por *Microthrix parvicella*.

$K_{STO}/K_{NH}/K_{HCO}/K_O/b_{A,O2}/b_{A,NO}$: Los cuatro primeros parámetros determinan los procesos de crecimiento aeróbico y crecimiento anóxico de los organismos heterótrofos. Por ende, su magnitud condiciona la síntesis de biomasa de estas especies en el sistema. El metabolismo heterótrofo de una especie requiere de una fuente de carbono orgánica para obtener energía, la cual en el modelo se representa por medio de los sustratos que ya fueron almacenados previamente en el interior de las células (X_{STO}), por ende, es que la sensibilidad de los valores de estos parámetros en la concentración de esta especie es alta.

Estos organismos utilizan el nitrógeno amoniacal como fuente de nitrógeno para la síntesis de moléculas esenciales en su organismo (proteínas, ácidos nucleicos, vitaminas, etc). Estas estructuras son altamente funcionales en la síntesis de biomasa. Aquello puede explicar la sensibilidad alta que presenta específicamente el parámetro de K_O sobre el oxígeno y el nitrógeno amoniacal, ya que su magnitud define el consumo de ambas especies para el crecimiento celular. Por otro lado, este parámetro tiene injerencia en la denitrificación de los organismos heterótrofos, ya que modera la búsqueda de un nuevo aceptor de electrones por parte de estos M.O., en este caso, el complejo Nitrito/Nitrato, especie que depende de una sensibilidad alta de este parámetro. Cabe notar que las magnitudes de los valores de K_{NH}/K_{HCO} no influyen de forma significativa en la cuantificación de todas las especies, incluyendo a las más representativas de estos parámetros, S_{NH} y S_{HCO} respectivamente, esto se debe a la baja demanda estequiométrica que exigen los procesos de crecimiento celular en el consumo de amoniaco y alcalinidad (ver Tabla 27).

El sistema de lodos activados opera en torno el estado estacionario en condiciones ideales. Es por esto que los parámetros que están relacionados directamente con el crecimiento de los organismos heterótrofos, poseen una sensibilidad baja en cuanto a la concentración de estas especies, ya que el metabolismo de estos organismos se podría encontrar en una fase estacionaria por sobre una etapa de crecimiento en este análisis particular, lo anterior se sustenta con la nula sensibilidad que presentan estos parámetros en la concentración de oxígeno, ya que, si es que el proceso de crecimiento de los microorganismos predominara en el sistema, existiría un alto consumo según lo presentado en la matriz estequiométrica (Anexo 7.5). Para el caso de la operación de la planta de tratamiento la situación es distinta, puesto que se tiene que esta trabaja con un TRC entre 1-3 días, por lo cual, la fase de crecimiento de microrganismos se vería promovida. Por esta razón, es que será necesario incluir a estos parámetros en el ajuste de parámetros, a pesar de su baja sensibilidad en esta sección del proyecto.

La operación por lodos activados busca mantener una biomasa constante y latente en el proceso, cuyo metabolismo se centre en la degradación de DQO sin aumentar los niveles de sólidos suspendidos, fenómeno que logra impidiendo el crecimiento excesivo de microorganismos, y el equilibrio con la respiración celular. Este proceso se encuentra representado por los parámetros de $b_{A,O2}/b_{A,NO}$, cuyas magnitudes reflejan una sensibilidad alta tanto en la concentración de sustrato, como la de biomasa, puesto que describe la forma en que los microorganismos degradan el sustrato almacenado en su interior, comprometiendo procesos como lisis, catabolismo, anabolismo, depredación, motilidad y competencia, este último, corresponde a un factor esencial en la cuantificación de la abundancia relativa de *M. parvicella* (sensibilidad alta) y por ende una representación de los episodios de Bulking Filamentoso.

$K_{A,NH}/K_{A,O}/K_{A,HCO}/b_{A,O2}/b_{A,NO}$: La inclusión de estos parámetros permiten realizar una descripción del metabolismo de los organismos autótroficos. Según el análisis de sensibilidad, se puede observar que los cambios en la magnitud de estos parámetros influyen únicamente en la dinámica de las especies que se encuentran involucradas con el desarrollo de los organismos autótroficos. El metabolismo de ellos utiliza una fuente de carbono inorgánica, el CO_2 (especie no considerada en el modelo), el Oxígeno como especie aceptora de electrones y una fuente de nitrógeno como el amoniaco. Este desarrollo metabólico consiste en el proceso de nitrificación, el cual corresponde al proceso que presenta la mayor demanda de oxígeno y nitrógeno amoniacal según la matriz estequiométrica del sistema. En solución acuosa, el amoniaco puede formar el ion amonio (NH_4^+), el cual se comporta como una base en el sistema [66]. Por ende, al generarse la reacción de nitrificación y con ello, el consumo de amoniaco, la alcalinidad del medio disminuirá, por lo cual, se explicaría la sensibilidad alta del valor de estos parámetros sobre la alcalinidad del sistema (S_{HCO}). Finalmente, la reacción de nitrificación se encuentra acoplada con la formación de NO_3^- , y consecutivamente la de nitrógeno gaseoso; teniendo en cuenta que, la generación de NO_3^- sigue una relación estequiométrica del inverso del rendimiento de estos organismos nitrificantes con respecto al amoniaco, la sensibilidad de esta especie será alta, y también lo será para el S_{N2} . Se debe notar que, el diseño de la PTAS de Los Ángeles no contempla el llevar a cabo un proceso de nitrificación, por lo cual, se esperaría que el ajuste de estos parámetros se dirija en torno a que el desarrollo de estos microorganismos no interfiera en el desarrollo de las otras especies del medio, más aún, cuando se obtiene una sensibilidad nula en la abundancia relativa de *M. parvicella*.

$K_{STOLIP,H} - K_{STOLIP,MIC} - K_{SLIP,MIC} - K_{O2,MIC} - K_{STOLIP} - K_{NH,MIC} - K_{HCO,MIC}$: Los procesos metabólicos de *M. parvicella* se encuentran representados a través de estos parámetros. Los cambios en la magnitud de estos solo afectan con una sensibilidad alta a las especies involucradas con el desarrollo de esta bacteria, y, por ende, controlan en gran parte la abundancia de relativa de esta especie. Es importante notar que, estos parámetros afectan con una alta sensibilidad a la concentración de organismos autótroficos, esto puede deberse a la alta afinidad que tiene esta bacteria con el consumo de oxígeno, representado en una baja magnitud de la constante de saturación de esta especie en comparación con la de los organismos autótroficos. Por lo cual, la magnitud de este parámetro ($K_{O2,MIC}$) sea una referencia de la competencia entre estas especies en la captación de oxígeno.

Los parámetros del sistema incluyen una manera de simular la competencia entre *M. parvicella* y los organismos heterótrofos a través de los valores de $K_{STOLIP,H}$ y $K_{STOLIP,MIC}$, los cuales corresponden a la tasa con que cada especie almacena los lípidos disponibles para ser degradados (S_{LIP}). El valor original de ellos muestra una igualdad entre la afinidad de ambas especies, lo cual podría estar sujeta a cambios de acuerdo con la literatura, que estipula que esta bacteria filamentosa posee una alta afinidad con este tipo de material orgánico. Finalmente, se tiene que las especies de amoniaco disuelto (S_{NH}) y bicarbonato (S_{HCO}) no dependen de los parámetros de $K_{NH,MIC}/K_{HCO,MIC}$ cómo podría esperarse, esto puede deberse debido a la bajo consumo de estas especies cuando se desarrollan los procesos cinéticos de *M. parvicella* (Anexo 7.5).

Flujo O₂: Se puede apreciar que el flujo de aireación influye con una sensibilidad alta en todos los procesos que comprometen un consumo de oxígeno. Por lo cual, al entender que la PTAS en estudio opera en condiciones aeróbicas, se espera que el ajustar el valor de este parámetro permitirá simular el sistema a valores cercanos a los experimentales y de forma importante, al entendimiento de los posibles cambios en la abundancia relativa de *Microthrix parvicella*. Lo anterior concuerda con las estrategias adoptadas por el personal de la planta, donde el flujo de inyección de oxígeno corresponde a unos de los criterios de control más significativos en el funcionamiento de la planta, y de los episodios de Bulking Filamentoso.

El análisis anterior se sustenta en la evaluación de la incidencia de los cambios en los valores de los parámetros en la magnitud de las especies hasta llegar al estado estacionario. Esta consideración en el estudio se realiza puesto que, la PTAS opera continua e idealmente en el estado estacionario, por lo cual, el analizar el modelo de forma preliminar, en este estado de operación, podría dilucidar de forma más clara las dimensiones de los valores de los parámetros y las especies consideradas en el sistema. Este análisis se puede complementar a través del estudio del cambio de la magnitud de los parámetros y la incidencia en el tiempo en que se alcanzaría el estado estacionario. Adicionalmente, se podría verificar como estos valores inciden ante perturbaciones que alteren el estado estacionario y su comportamiento frente al modelamiento en la parte dinámica del sistema. Estas dos aristas podrían ser de gran utilidad para una predicción del funcionamiento del sistema ante posibles discontinuidades del proceso, fenómenos que ocurren con frecuencia en los procesos de tratamiento de aguas, por ejemplo, en casos de fallas y/o mantenimiento de equipos.

4.3. Ajuste de parámetros del modelo

El ajuste de parámetros se realiza en torno a minimizar el error absoluto medio entre los resultados de la simulación del modelo y los datos experimentales recopilados en la PTAS, correspondientes a las especies de oxígeno disuelto, nitrógeno amoniacal, pH y Sólidos Suspensos Volátiles. Por ende, los parámetros elegidos para realizar el ajuste de sus valores corresponden a las constantes de saturación de Monod que presentan una alta sensibilidad (Tabla 6) y, que, según el grado de conocimiento fenomenológico del problema, poseen una alta importancia en el consumo y variación de las concentraciones en estas especies. Adicionalmente, estos parámetros componen las cinéticas de Monod de forma desacoplada entre ellas, por lo cual su ajuste disminuirá los grados de libertad del problema y entregará información específica de cada microorganismo, lo que visualizará el comportamiento individual de la especie en el sistema de lodos activados.

Las Tablas 7, 8 y 9 presentan los valores ajustados de los parámetros seleccionados, estos corresponden a los organismos heterótrofos, autótrofos y *M. parvicella*:

Tabla 7: Valores de los parámetros ajustados para organismos heterótrofos.

Parámetro	Unidad	Valor Inicial	Valor Ajustado	σ^2	Intervalo Confianza ($\alpha=0,05$)	Valor ≠ 0 ($\alpha=0,05$)
k_{STO}	[g Ss / g X _H d]	5	4,5	0,29	[3,7 5,2]	SI
K_O	[g O ₂ / m ³]	0,2	0,4	0,17	[0,37 0,42]	SI
K_S	[g DQO / m ³]	2	4	0,02	[3,95 4,04]	SI
K_{STO}	[g XSTO / g X _H]	1	2	0,07	[1,92 2,07]	SI
K_{NH}	[g N / m ³]	0,01	0,02	85	[-4,32 4,36]	NO
K_{HCO}	[mol HCO ₃ ⁻ /m ³]	0,1	0,15	9,2	[-0,85 1,15]	SI
$b_{H,02}$	[d ⁻¹]	0,2	0,80	0,01	[0,59 1,00]	SI
$b_{H,NO}$	[d ⁻¹]	0,2	0,40	0,01	[0,37 0,42]	SI

Tabla 8: Valores de los parámetros ajustados para organismos autótrofos.

Parámetro	Unidad	Valor Inicial	Valor ajustado	σ^2	Intervalo Confianza ($\alpha=0,05$)	Valor ≠ 0 ($\alpha=0,05$)
$K_{A,NH}$	[g N / m ³]	1	1,75	0,01	[1,74 1,75]	SI
$K_{A,O}$	[g O ₂ / m ³]	0,5	0,875	0,07	[0,87 0,88]	SI
$K_{A,HCO}$	[mol HCO ₃ ⁻ /m ³]	0,5	0,875	0,03	[0,87 0,88]	SI
$b_{A,02}$	[d ⁻¹]	0,15	0,255	0,18	[0,24 0,251]	SI
$b_{A,NO}$	[d ⁻¹]	0,05	0,085	0,08	[0,84 0,851]	SI

Tabla 9: Valores de los parámetros ajustados para *Microthrix parvicella*.

Parámetro	Unidad	Valor Inicial	Valor ajustado	σ^2	Intervalo Confianza ($\alpha=0,05$)	Valor ≠ 0 ($\alpha=0,05$)
$K_{STOLIP,H}$	[gS _{LIP} /gX _H d]	12	6	0,03	[5,81 6,18]	SI
$K_{STOLIP,MIC}$	[gS _{LIP} /gX _{MIC} d]	12	9,6	19	[8,99 10,20]	SI
$K_{SLIP,MIC}$	[gDQO /m ³]	10	8	37	[5,48 10,50]	SI
$K_{O2,MIC}$	[gO ₂ / m ³]	0,016	0,016	0,01	[0,0155 0,0168]	SI
K_{STOLIP}	[gX _{STO} /m ³]	0,1	0,1	4,68	[-1,58 1,78]	SI
$K_{NH,MIC}$	[g N/ m ³]	0,01	0,01	193	[-0,05 0,07]	SI
$K_{HCO,MIC}$	[mol HCO ₃ ⁻ /m ³]	0,1	0,10	0,77	[0,05 0,25]	SI

El modelo ajusta los valores de los flujos de aireación diarios inyectados en el reactor biológico (Tabla 10). La obtención de la magnitud de esta condición de operación entrega información importante relacionada con la inyección de aire en la planta, puesto que, en la actualidad no existe un control concreto del flujo máscico diario de oxígeno que se añade en el sistema de la PTAS.

Tabla 10: Valores de los flujos de aireación diarios ajustados.

Flujo de Aireación	Fecha enero 2020															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
$\left[\frac{kg\ O_2}{d} \right]$	6.223	5.532	8.298	6.915	9.335	8.989	5.877	5.877	6.947	7.606	5.877	7.606	6.569	4.840	3.475	4.840

Como se puede apreciar en las Tablas 7,8 y 9, los valores ajustados de los parámetros difieren en comparación con los usados como adivinanza inicial. Para el caso de los organismos heterótrofos y autótrofos, se identifica que las constantes de Monod relacionadas con su crecimiento aumentaron en magnitud, al igual que las tasas de respiración endógena. Ambos resultados reflejan fenómenos diferentes, ya que, si se relaciona el valor de la constante de saturación de Monod con un proceso de transferencia de masa, estos presentan una razón de proporción inversa entre sí, es decir, debido al aumento de los valores de la constante de Monod, el crecimiento de estos organismos se vería mermado, producto de una inhibición en la transferencia de sustratos al interior de la célula [68, 69]. El aumento en la magnitud de las tasas de respiración endógena hace suponer que en el sistema se promueve este proceso metabólico por sobre el crecimiento celular, lo cual, tendría coherencia con el objetivo de la inclusión de este parámetro en modelo original de ASM3 [48]. Este parámetro representa no solo los procesos de catabolismo, anabolismo y muerte celular (entre otros) sino que, también valoriza la competencia entre microorganismos dentro del lodo activado, fenómeno que caracteriza la formación de Bulking Filamentoso

Los parámetros que toman en consideración la presencia de *M. parvicella* que presentan un cambio de magnitud, muestran una afinidad al consumo de lípidos de esta bacteria por sobre los organismos heterótrofos. En ese sentido, se observa que el sistema asigna un valor mayor a la tasa de consumo de lípidos en *Microthrix* en comparación con la de los organismos heterótrofos, por otra parte, la constante de saturación de Monod de lípidos para la bacteria filamentosa tendrá una magnitud menor (recordar que $K_{SLIP,H}=10$ [g DQO / m³]). Lo anterior tiene concordancia con la literatura, que postula que *M. parvicella* se caracteriza por ser un organismo altamente afín al consumo de sustrato lipídico, característica que se explica por la hidrofobicidad de la estructura extracelular de la bacteria que permite atraer a la materia apolar como los lípidos [46].

Con respecto a las constantes de saturación de las demás especies para *M. parvicella*, el ajuste no presenta una variación en los valores con respecto a la adivinanza inicial. Esto puede deberse a que estos parámetros poseen una baja sensibilidad en el cambio de las especies del sistema, salvo la constante de saturación de oxígeno, la que presenta una orden de magnitud más baja con respecto a la de los organismos heterótrofos desde la adivinanza inicial en sus valores ($K_0=0,2$ [g DQO / m³] vs $K_{O2,MIC}=0,016$ [g DQO/m³]), alejando la diferencia entre estas una vez ajustados los parámetros ($K_0=0,4$ [g DQO / m³] vs $K_{O2,MIC}=0,016$ [g DQO/m³]). El ajuste de los valores de los parámetros sugiere que *Microthrix* requiere de menor concentración de oxígeno para que su crecimiento se vea promovido en comparación con los organismos heterótrofos, lo cual concuerda con las evidencias que demuestran una ventaja competitiva de esta bacteria en ambientes microaerofílicos.

Como resultado adicional, al inhibir en un 100% el crecimiento de *M. parvicella*, los parámetros cinéticos de la bacteria aumentarían en un 200%, mientras que, para el caso de los organismos autótrofos y heterótrofos disminuirían en un 7% y 24% respectivamente en comparación con los valores obtenidos en el ajuste original. Aquello demuestra la interpretación funcional de las constantes de Monod que, ante magnitudes más altas, el metabolismo de el microorganismo correspondiente se vería inhibido. En caso contrario, al inhibir en un 50% el crecimiento en los organismos heterótrofos y autótrofos, los valores de sus parámetros disminuirían en menor magnitud en comparación con los de la filamentosa ($K_{Autótrofos}:-10\%$, $K_{Heterótrofos}:-3\%$ y $K_{M.parvicella}:-35\%$) lo cual sugiere que el modelo reflejaría el proceso de inhibición a través de la promoción en la cinética de *M. parvicella*, cuantificado en la alta disminución de sus parámetros cinéticos en comparación con el modelo ajustado original. No obstante, es importante señalar que, a pesar de la limitación impuesta en el crecimiento para estos organismos, de igual forma la magnitud de sus parámetros disminuye y, por consiguiente, las cinéticas aumentarían en su magnitud. Aquello se explicaría debido a que el consorcio del lodo activado se compone en gran parte por organismos heterótrofos, por ende, al ajustar con respecto a los datos experimentales, el modelo compensaría la alta inhibición propuesta, a través de la promoción de los procesos cinéticos, sin dejar de lado un aumento en la abundancia relativa producto del aumento en el crecimiento de la filamentosa.

De acuerdo con el análisis estadístico, se destaca que la mayoría de los parámetros presenta un intervalo de confianza al 95% acotado, y que el valor ajustado se encuentra dentro de este rango de valores. En aquellos casos, se tiene que la varianza obtenida posee valores significativamente bajos, por lo que sugieren que las magnitudes de los parámetros estarían representando de forma confiable la actividad microbiológica concerniente con la cinética de Monod, más aún, cuando en el test de significancia, estos presentan valores distintos de 0 con una confianza del 95%. Sin embargo, los parámetros K_{NH} K_{HCO} $K_{STOLIP,MIC}$ $K_{SLIP,MIC}$ K_{STOLIP} $K_{NH,MIC}$, presentan una sobresaliente varianza, por lo cual el valor ajustado se identifica como discutible:

K_{NH}: El intervalo de confianza obtenido para este parámetro posee rango elevado en comparación con el valor ajustado. Sumado a ello, se tiene que, en el test de significancia, su valor podría ser significativamente igual cero y, según el análisis de sensibilidad, su impacto en las especies del sistema es baja. Por ende, la dispersión del intervalo de confianza, y la inclusión de este parámetro en el ajuste no conllevaría a una mayor desviación de los resultados, además, de acuerdo con la operación de la PTAS, el consumo de nitrógeno amoniacal no representaría el objetivo principal del diseño de la planta, por lo que su funcionalidad en la fenomenología del tratamiento de aguas, y la del Bulking Filamentoso, no sería la más significativa.

K_{HCO}: El análisis estadístico para este parámetro es similar al anterior, sin embargo, tiene la única diferencia que el test de significancia, su valor sería significativamente distinto de cero. Se debe recordar que todo proceso de degradación de materia orgánica conlleva una alteración en el pH en el reactor, por lo cual, la inclusión del valor de este parámetro en el ajuste si bien no cumple con un rol de impacto importante en el cambio de las especies, lo que es coherente con el análisis de sensibilidad, la presencia de este tendría la función de sustento en la dinámica de la carga iónica del sistema

K_{STOLIP} - K_{NH,MIC}: Ambos parámetros poseerían un valor significativamente distinto de cero. La dispersión de su intervalo de confianza del segundo no es tan alta en comparación del primero y su sensibilidad en el cambio de las concentraciones de las especies es baja, por ende, su inclusión en el ajuste de parámetros podría ser despreciable, sin cambiar de forma notoria los resultados obtenidos.

K_{STOLIP,MIC}: Este parámetro posee una alta sensibilidad en la dinámica de las especies que comprometen los procesos de *Microthrix parvicella*, por lo cual, el ajuste de este parámetro se hace necesario. En este caso el intervalo de confianza no presenta una magnitud significativa de alejamiento con respecto al valor ajustado, a lo que suma que el parámetro es distinto de cero mediante el test de significancia. Ambos resultados aumentan la certidumbre del valor de este parámetro, el cual posee una alta sensibilidad en los procesos concernientes a la especie de *M. parvicella*, por lo que su ajuste corresponde a una gran herramienta para simular el sistema. Sin embargo, la magnitud de su varianza no es despreciable, lo cual podría ser un factor importante en el valor del parámetro ante distintos escenarios y la cuantificación final de la abundancia relativa.

Ante el análisis presentado anteriormente, se tiene suma consideración que el ajuste en los valores de los parámetros se realiza para las constantes comprendidas como las más importantes e incidentes en la magnitud de las especies que poseen un control experimental de sus valores en la planta. Esta observación se plantea ya que, la discusión realizada se construye en torno a que otros parámetros del modelo no se consideran para el ajuste, los cuales, de igual forma podrían impactar en el cambio en la magnitud de las especies en estudio (como por ejemplo los parámetros de los procesos anóxico). En base a lo anterior, es que la sensibilidad de parámetros entregada en la sección 4.2 es un gran sustento en el presente análisis, donde los resultados de esta se entregan evaluando el sistema el estado estacionario, debido a que el proceso de tratamiento de aguas opera idealmente en esta condición, sin embargo, este podría operar bajo un régimen transiente, a lo cual los parámetros ajustados en esta sección no responderían de la misma forma, por ende, se identifica y resalta la idealidad con que se interpreta la operación del proceso, correspondiendo a un supuesto fuerte en el proyecto. Adicionalmente, para el ajuste se tomaron ponderaciones para las especies con el fin de MAE entre los datos experimentales y los simulados, esta decisión se basa únicamente en el conocimiento e interpretación del sistema, por lo cual, podrían existir ciertas consideraciones que no se están tomando al momento de asumir estos ponderadores.

4.4. Simulación del modelo con los valores de los parámetros ajustados

4.4.1. Comparación de resultados obtenidos y datos experimentales

El modelo es simulado utilizando los valores de los parámetros ajustados junto con las condiciones de operación reales de la PTAS. Los resultados son comparados con los datos experimentales y graficados para observar el comportamiento del modelo construido. Para ver los resultados de las especies del modelo que no son incluidos en esta sección, ir a Anexo 7.15.

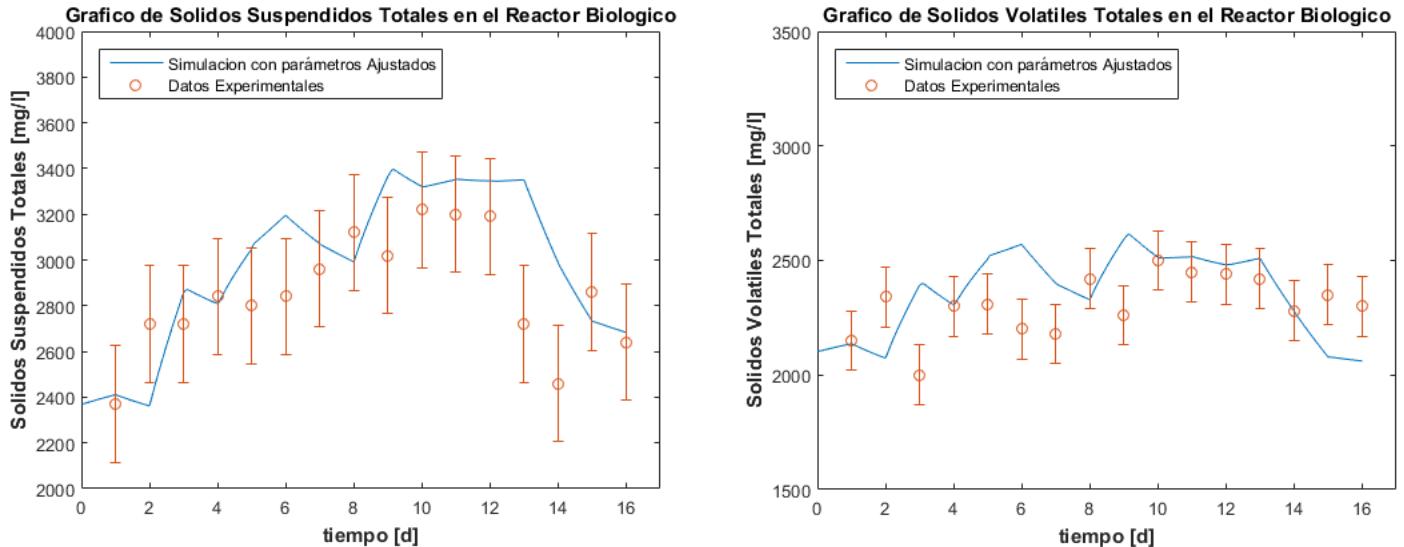


Figura 27: Gráfico de SST y SSV diarios en la PTAS de Los Ángeles obtenidos utilizando los valores de los parámetros ajustados.

La Figura 27 muestra los cambios diarios entre los SST y lo SSV en el modelo. A partir de estos se puede observar un comportamiento similar entre los resultados de simulación y los datos experimentales. Para el caso de los Sólidos Suspensos, se obtiene un error absoluto medio de aproximadamente $218 \text{ [g } X_{TS} / m^3]$ con una desviación estándar de los datos reales de $258 \text{ [g } X_{TS} / m^3]$, por lo cual, si bien los resultados simulados reflejan una discrepancia con los experimentales, se tiene que el modelo entrega valores de los SST dentro de las magnitudes de lo que se podría presentar en la PTAS, por ende, la información entregada por el modelo podrían ser usado como estimación de este parámetro operacional. Por otro lado, en el caso de los Sólidos Volátiles se obtiene un error absoluto medio de $168 \text{ [g } X_{SV} / m^3]$ entre los resultados del modelo y los experimentales, los cuales presentan una desviación estándar de $128 \text{ [g } X_{SV} / m^3]$. Aquello refleja que la simulación presenta una discrepancia más alta con respecto a los datos reales en comparación con los SSV puesto que estos se encuentran por sobre la desviación estándar calculada.

Esto puede tener una explicación relacionada con el modelo construido, puesto que, los parámetros seleccionados para realizar el ajuste no presentan una sensibilidad significativa sobre las concentraciones de estas especies, por lo cual, el ajuste no apuntaría mayoritariamente a minimizar el error entre los resultados de simulación y los experimentales de estas especies, y su diferencia sería más alta en comparación con las restantes del modelo. A lo anterior se añade la baja magnitud en la ponderación propuestas para los SSV en la minimización del MAE, por lo que la importancia impuesta para esta especie podría estar subvalorada, y con ello, presentaría una diferencia entre los datos experimentales y los simulados. De igual forma, se tiene que las especies restantes controlan

la dinámica de los componentes del reactor e influyen en la magnitud final de los SST y SSV, por ende, es que los resultados de estas especies se encuentran en coherencia con los datos experimentales.

Para obtener una estimación de estas especies, se encuentran los parámetros estequiométricos en el modelo, estos determinan el aporte de cada especie suspendida en el sistema hacia la cuantificación de los Sólidos Suspensos Totales, y con ello, a los Volátiles. Por esta razón es que se proponen los valores de estos parámetros para simular el modelo ajustado, basado en el conocimiento e interpretación del sistema, teniendo en cuenta que el mayor aporte hacia estas especies la constituye la biomasa en actividad ($i_{TS,BM} = 0,8 [g X_{TS}/X_{BM}]$ e $i_{VS,BM} = 0,75 [g X_{VS}/X_{BM}]$).

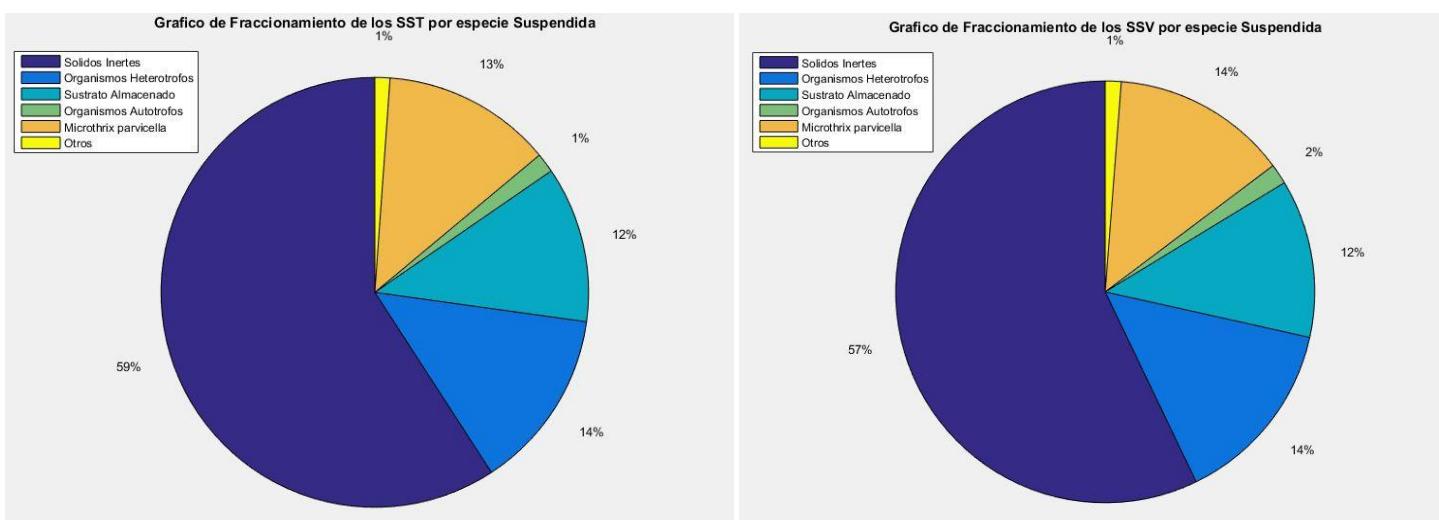


Figura 28: Composición media de los SST y SSV en el sistema de lodos activados obtenida a través del modelo.

El estimador operacional de los SSV se interpreta a modo de dimensionar la cantidad de biomasa latente que se encuentra en el reactor, donde estudios han determinado que esta representaría entre un 40-50% de los sólidos suspendidos [69], lo que se encuentra en coherencia con lo presentado en la Figura 28 (40% para SST y 44% para SSV). Sin embargo, para sistemas de tratamiento de aguas que operan con un TRC de 4 días, como el la PTAS Los Ángeles, los sólidos suspendidos se compondrían en un 55-60% de biomasa [70], por ende, es que la propuesta de los valores de los parámetros estequiométricos de biomasa y sólidos inertes $i_{VS,XI} = 0,7$ en sólidos suspendidos podría estar sobredeterminada, haciendo necesario disminuir su magnitud. Lo anterior, sustentaría que los valores estimados de los sólidos suspendidos se encuentren en gran mayoría por sobre los datos experimentales. Adicionalmente, en el caso de los parámetros estequiométricos del aporte de los sustratos almacenados a los sólidos suspendidos, su valor fue propuesto ($i_{SV,XTO}=0,55 [g X_{SV}/g X_{STO}]$ e $i_{SV,XSTOLIP}=0,27 [g X_{SV}/g X_{STOLIP}]$) debido a la dificultad en su medición experimental, cuyos valores supuestos de igual forma podrían encontrarse sobredeterminados, influyendo en la cuantificación final de los sólidos suspendidos por parte del modelo. Para estudios futuros de aplicación del modelo en estudio, el ajuste de parámetros podría enfocarse en los valores de los parámetros estequiométricos por sobre los cinéticos.

Se debe considerar la existencia de errores de medición de este parámetro en la planta, lo cual podría estar aportando en aumentar la diferencia de los resultados obtenidos. Se puede observar a partir de la Figura 27 que los valores de los días 13 y 14 de enero, poseen una diferencia abrupta en su magnitud en comparación con los días restantes, y que ellos no siguen la tendencia con la cual estaría operando el reactor, posiblemente, sus valores deberían presentar una magnitud más alta. En cuando a los sólidos volátiles se aprecia que entre los días 1 al 9 de enero, se obtuvieron valores fluctuantes de este estimador, comportamiento que el modelo no pudo simular de forma fidedigna. Es por ello que se aprecia un posible error en el seguimiento de los valores experimentales de los SSV, y esto se debe a que solo se realiza un muestreo diario de estos parámetros.

La DQO total de entrada al sistema fue obtenida de forma experimental. El cambio diario de entrada de este parámetro se puede representar por medio del estimador de F/M, presentado en la Figura 29 (gráfico superior). Este resultado permite evidenciar las fluctuaciones de sustrato diario disponible para los microorganismos y, de acuerdo con su utilización, los cambios en las especies consideradas en el sistema. El modelo tiene la capacidad de calcular una fragmentación teórica de la DQO de entrada al reactor, esto lo genera de tal manera de mantener una relación constante entre los SSV y SST de entrada y salida en el tratamiento biológico, donde los sólidos volátiles corresponderían a un 80% del valor de los sólidos totales. Esta proporción es un indicador de referencia que maneja el personal de la planta, y que sería específico para el proceso de tratamiento de aguas de la PTAS de Los Ángeles. El incluir esta información se considera un supuesto importante, que podría acercar al modelo a la realidad del sistema de lodos activados, sin embargo, se tiene en cuenta que esta relación podría presentar fluctuaciones y que no necesariamente tendría que ser un valor constante. Por consiguiente, este supuesto influye de forma consecuente con la cuantificación de sustrato disponible para los microorganismos en el modelo, y con ello su crecimiento celular.

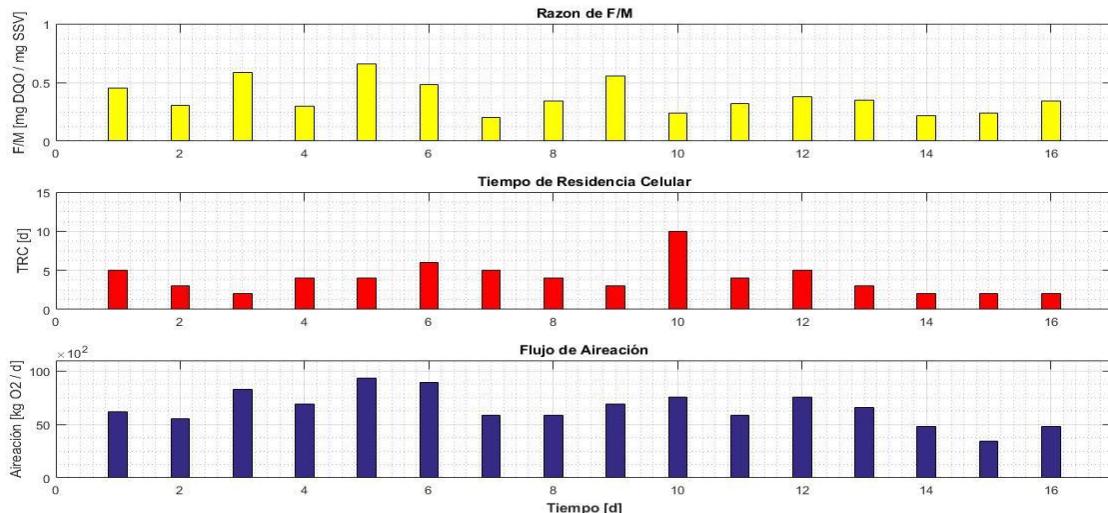


Figura 29: Estimadores operacionales diarios en el reactor biológico. Zona superior: Razón F/M; Zona media: Tiempo de Residencia Celular; Zona inferior: Flujo de aireación.

Las Figuras 30 y 31 presentan una comparación entre los resultados obtenidos por medio de la simulación con los parámetros ajustados, y los datos experimentales recopilados en planta. La dinámica de estos resultados se puede interpretar combinando tres ejes: Microbiológico, Operacional y de Modelación.

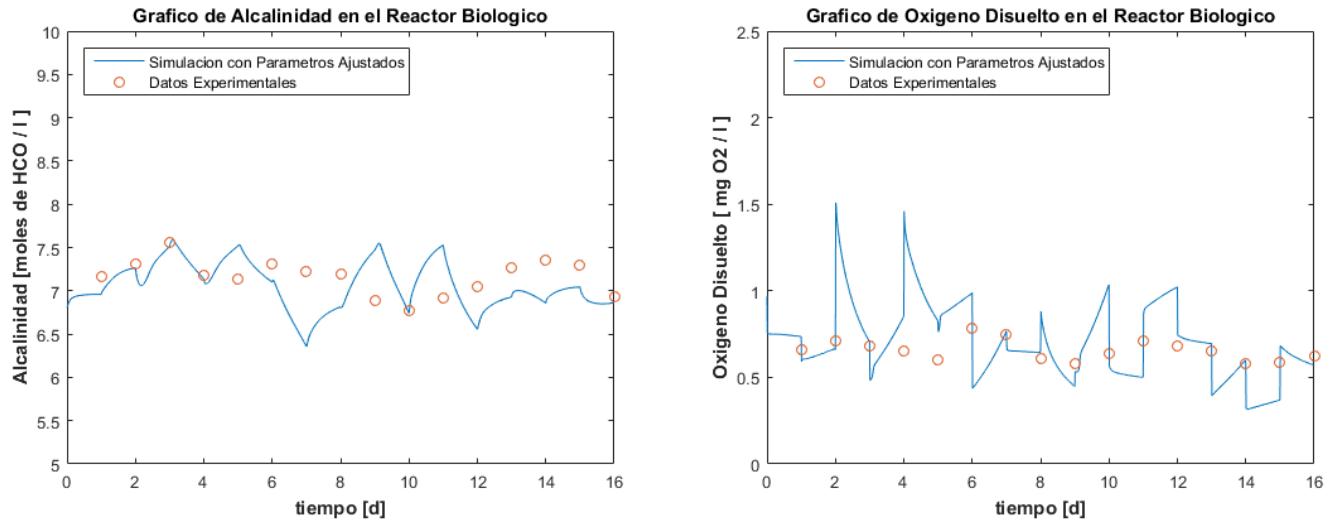


Figura 30: Valores diarios obtenidos de las especies ajustadas a los datos experimentales. A la izquierda: Alcalinidad. A la derecha: Oxígeno disuelto.

Todo proceso de fluctuación de la concentración de oxígeno disuelto se debe a un cambio en el metabolismo de los microorganismos. Como se puede apreciar en la Figura 30 (gráfico derecho) entre los días 1 y 2 de enero, el oxígeno disuelto obtenido mediante la simulación del modelo discrepa significativamente de los datos experimentales. Esto se debe principalmente a la disminución en la concentración de sustrato de entrada y el tiempo de retención celular (Figura 29). El primero limita el crecimiento celular, y el segundo disminuye el tiempo en que la biomasa reside en el sistema, por lo cual, la concentración de esta disminuye en un 5% (Figuras 31 y 32). Adicionalmente, se tiene que el flujo de aireación ajustado percibió una baja del 12%, cantidad de oxígeno insuficiente para ser consumida ante la disminución de M.O., por ende, existe una acumulación de este elemento en el reactor durante un periodo de 1 [h], siendo un instante de tiempo inmedible por el equipo de control de la planta. La misma lógica sigue para el periodo entre el 3 y 4 de enero: la cantidad de sustrato disponible en el afluente disminuye (Figura 29) junto con una baja del 17% en el flujo de aireación, lo cual afecta al crecimiento de la biomasa (Figuras 31 y 32) hasta el punto de predominar la muerte celular.

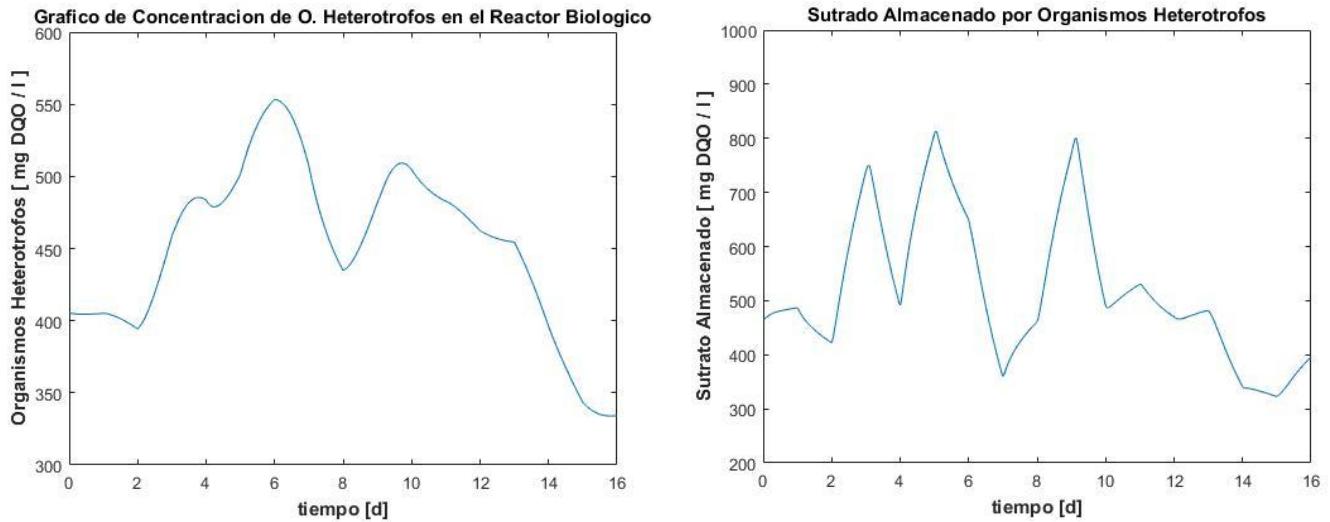


Figura 31: Dinámica diaria de los organismos heterótrofos en el sistema de lodos activados.

Este resultado demuestra una variación del consorcio durante un día de operación en el sistema, la cual podría estar sobre determinada debido a que normalmente los cambios en este tipo de plantas podrían conllevar un tiempo de operación mayor, en ese sentido, se cuestionaría la magnitud de los parámetros correspondientes a la muerte y crecimiento celular de los organismos, ya que estarían cuantificando una dinámica más rápida de la que se esperaría en este proceso. Sin embargo, si se observa el control experimental de las condiciones de operación, se puede identificar una diferencia aún más grande entre los datos reales y los del modelo en un tiempo de un día. En el caso de los SSV, variable operativa que representaría la biomasa del sistema, entre el día 1 y 2 de enero, se tiene una variación experimental de 200 [mg/l], mientras que, el modelo entrega una diferencia de 50 [mg/l]. Lo mismo ocurre para el día entre el 3-4 de enero donde la diferencia experimental es de 300 [mg/l] y la simulada de 100 [mg/l], con ello, sin dejar de lado la discusión de la magnitud de las constantes cinéticas, se suman posibles datos experimentales que demostraría una dinámica aún más variable en la PTAS. Adicional a la idea anterior, se tiene que considerar que todo proceso de cambio de oxígeno, por ende, la modelación de su consumo, se realiza asumiendo que la transferencia de masa de oxígeno desde los sopladores en el reactor biológico posee una eficiencia del 100% y que su control operacional posee una efectividad de la misma magnitud

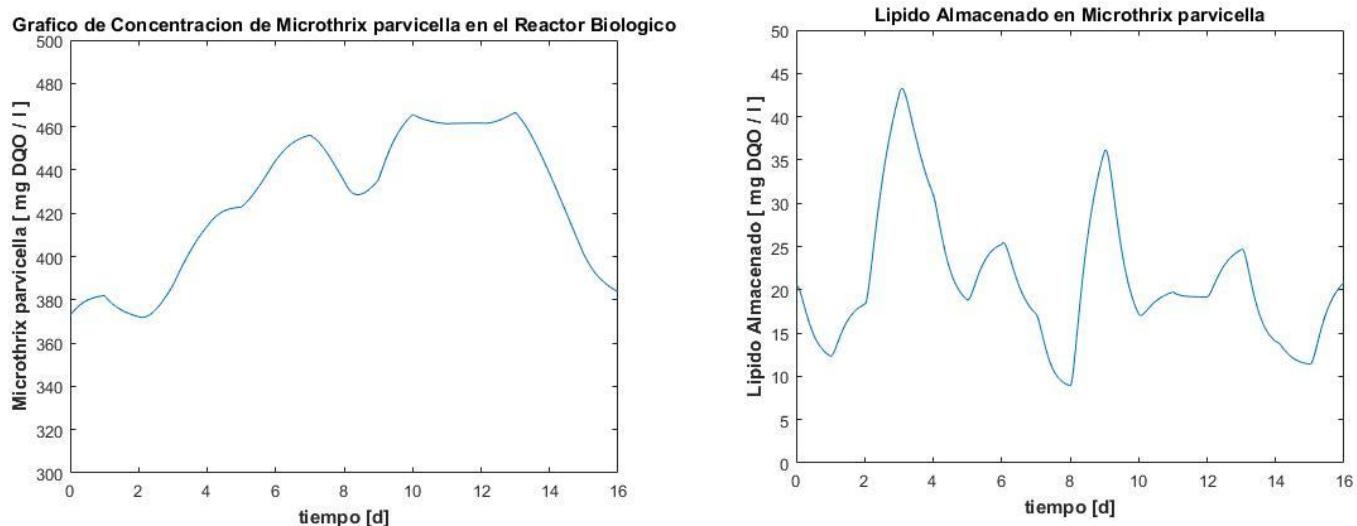


Figura 32: Dinámica diaria de *M. parvicella* en el sistema de lodos activados.

Es importante notar que todo proceso de cambio en el complejo del nitrato y nitrito tiene una relación directa con el comportamiento diario del oxígeno disuelto. Como se puede apreciar en la Figura 33 (gráfico de la derecha), cuando la concentración de oxígeno disminuye, el complejo de nitrato/nitrito lo hace de igual forma (por ejemplo: entre los días 3 y 4 de enero). Esto se explica mediante la formación de la reacción de nitrificación y los procesos anóxicos de los organismos heterótrofos y *M. parvicella*. Los organismos autótrofos utilizan el nitrógeno amoniacoal como fuente de nitrógeno para ser utilizado en su metabolismo interno. Al descomponerse el amoníaco, se forma el complejo nitrito/nitrato, especie utilizable por los organismos heterótrofos como acceptor de electrones en condiciones anóxicas. Por ende, si se comparan las Figuras 31 y 32, la biomasa en crecimiento requiere de un consumo de oxígeno, por lo cual, los niveles de esta especie en el reactor comienzan a descender.

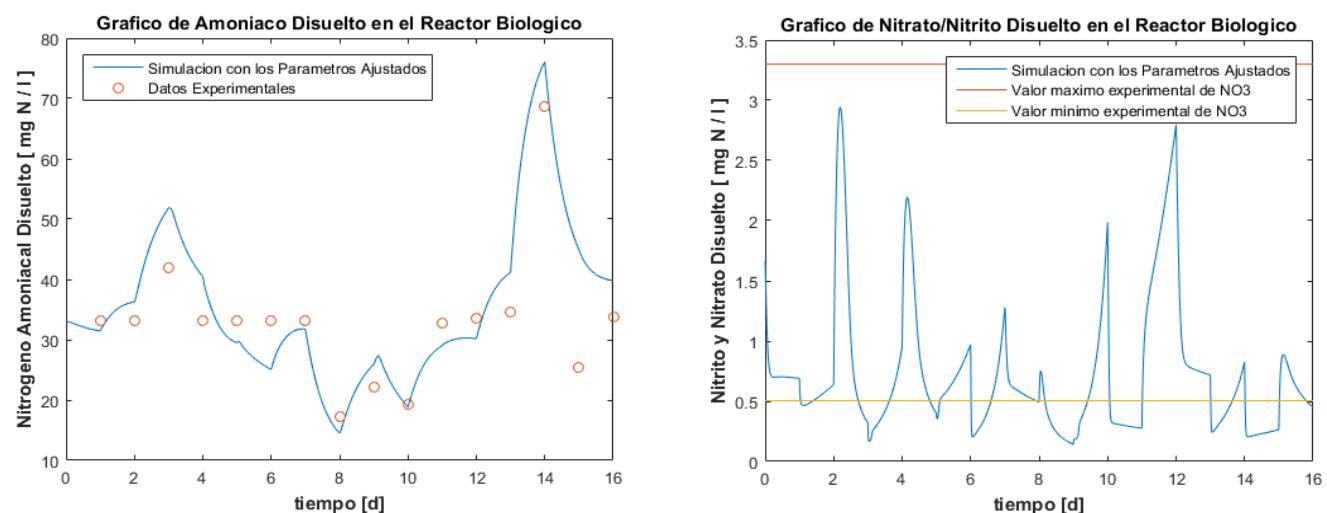


Figura 33: Valores diarios obtenidos de las especies ajustadas a los datos experimentales. A la izquierda: Amoniaco. A la derecha: Nitrito/Nitrato.

Se puede observar que entre los días 6-8 de enero, el pH modelado presenta una discrepancia notoria con los datos experimentales, esto se debe principalmente a la disminución de la concentración de NH_4 en el afluente, y su degradación posterior por los M.O. Se debe tener en cuenta que la única especie cuyo consumo disminuye la alcalinidad en el sistema es el nitrógeno amoniacal (gráfico de la izquierda en la Figura 33). Junto con ello, se puede apreciar que, durante esos días, la DQO de entrada disminuyó (gráfica superior en Figura 29), al igual que el tiempo de retención celular de la planta. Por ende, esto explica que la biomasa presente una disminución en su concentración (Figuras 31 y 32). A este fenómeno se suma la disminución de las tasas de almacenamiento de sustrato (Figuras 31 y 32), proceso que desencadenaría en un aumento de la alcalinidad del sistema según la matriz estequiométrica, lo cual, coincide con lo presentado en la Figura 30.

Según la Figura 33 (gráfico de la derecha), se observa que el modelo obtiene resultados por debajo de la concentración mínima de nitrito/nitrato obtenida experimentalmente. Estos valores pueden deberse a que los valores de las constantes de Monod del modelo, que describen a los procesos anóxicos de los organismos comprometidos no fueron ajustados, por ende, la dinámica de estos procesos se encuentre sobrevalorada en el modelo construido, puesto que presentan un consumo de NO_3^- mayor a lo que se presenta en el sistema. El ajuste de parámetros realizado no considera estas especies debido a que el modelo intenta dar mayor importancia a los procesos aeróbicos, de tal manera de ser coherente con el funcionamiento operacional de la planta.

El modelo considera a todo proceso anóxico como un estado en donde el oxígeno disminuye hasta una concentración específica para que dichos procesos comiencen a predominar por sobre los aeróbicos. Este fenómeno es representado en el gráfico de la Figura 34, donde se aprecia que, a medida que el oxígeno disuelto en el Reactor Biológico disminuye, los procesos anóxicos crecen en su magnitud, mientras que los aeróbicos decaen. Es decir, la estructura de las cinéticas del modelo correspondientes a los procesos de anoxia no significan trabajar a una concentración de oxígeno disuelto nula, sino que, esta funciona como un "switch" para los eventos donde la concentración de esta especie disminuye paulatinamente (ver Tabla 11), lo cual sería una herramienta útil de simulación para condiciones microaerofílicas de mezcla. En base a lo anterior, es que a medida que el oxígeno disminuye, producto de los procesos aeróbicos considerados en el modelo, los organismos utilizarán otra especie aceptora de electrones en simultaneo al consumo de oxígeno, y, por ende, la concentración del complejo del nitrato/nitrito comienza a descender (comparación figuras oxígeno y nitrito). De forma contraria, todo aumento del oxígeno disuelto tiene relación con una detención en los procesos metabólicos de los organismos, los cuales se relacionan en su mayoría con las fluctuaciones de DQO en el caudal afluente y/o el tiempo de retención celular [39, 56].

Tabla 11: Descripción de los términos *switch* en las cinéticas del modelo construido.

Procesos	Switch por aerobicidad en la cinética de Monod	Descripción funcional del término
Aeróbicos	$\frac{S_o}{K_o + S_o}$	Con el aumento de la concentración de oxígeno disuelto en el sistema, el término switch aeróbico se ve promovido, y, por ende, los procesos en que el oxígeno es aceptor de electrones. Sin embargo, de igual forma las cinéticas anóxicas poseen una preponderancia inversa a la concentración de oxígeno, es decir, a concentraciones altas de este elemento, el término switch disminuye en su magnitud; en el caso opuesto, este factor aumenta de valor cuando el oxígeno disuelto en el Reactor disminuye (ver Figura 34).
Anóxicos	$\frac{K_o}{K_o + S_o}$	

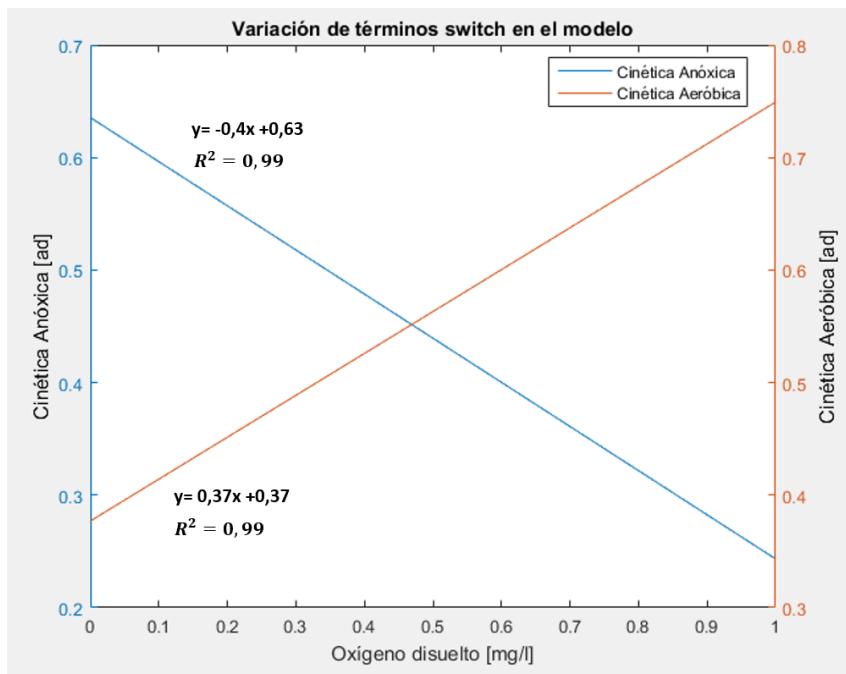


Figura 34: Gráfico de evolución de cinéticas aeróbicas y anóxicas con respecto al oxígeno disuelto en el Reactor Biológico.

4.4.2. Abundancia relativa de *Microthrix parvicella*

Para focalizar los resultados hacia el cumplimiento de objetivos del proyecto, es necesario interpretar los valores de abundancia relativa durante los días 2,4,7,8 y desde el 12 de enero en adelante. Como se puede apreciar según la Figura 35, estos días presentan los porcentajes más altos en cuanto a la concentración relativa de *M. parvicella*. Al contrastar dichos resultados con los obtenidos en la Figura 29, se puede encontrar una relación directa entre el aumento de la presencia de la bacteria filamentosa con el sustrato afluente al sistema, una disminución en el caudal de purga (TRC) y los flujos de aireación insuflados.

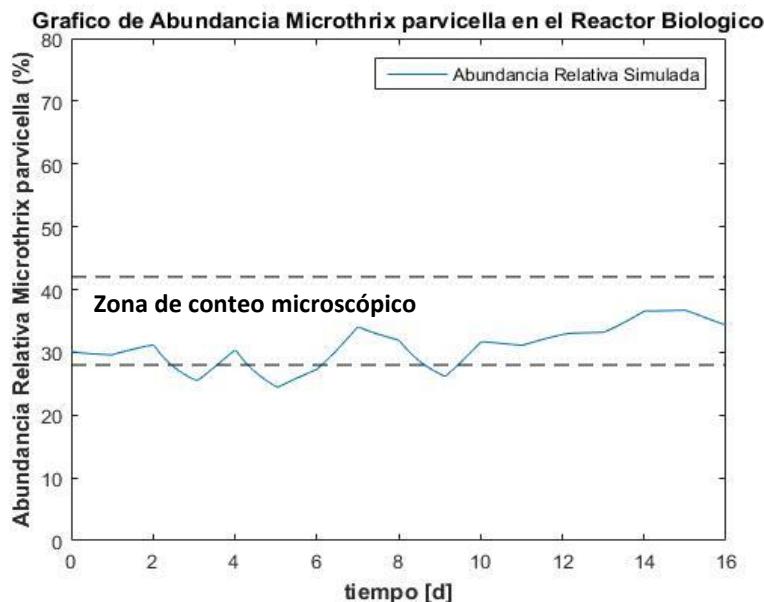


Figura 35: Gráfico de la dinámica de la Abundancia Relativa diaria de *M. parvicella* en el sistema de lodos activados.

El estudio bibliográfico determina que la morfología de *M. parvicella*, le entrega una ventaja competitiva en comparación con los organismos coexistentes en el lodo activado. Aquello se debe a que estas bacterias poseen un área superficial en contacto con el seno de la solución líquida del reactor biológico de mayor magnitud en comparación con el resto de los organismos, por ende, presentan mayores probabilidades de promover la transferencia de masa hacia el interior de la célula [10]; esta característica se potencia en períodos de hambruna o escasez de alimento, como por ejemplo, en condiciones donde el sistema posee bajas concentraciones de sustrato en comparación con la biomasa demandante de esta especie (bajo F/M) en el reactor [42, 47]. Esta condición permite que *M. parvicella* crezca de forma predominante dentro del consorcio de M.O, lo cual se observa en los resultados correspondientes a los días mencionados anteriormente, aquello podría relacionarse con los episodios de Bulking vistos en la planta. No obstante, se debe tener en cuenta que este análisis se basa en que la constante de Monod se relaciona con el área de transferencia de la célula en contacto con el volumen de la mezcla (relación A_{celula}/V_{mezcla}), sin embargo, si esta constante se relaciona con una funcionalidad de las enzimas presentes en la capa extracelular de la bacteria, esta interpretación no tendría la misma implicancia [10].

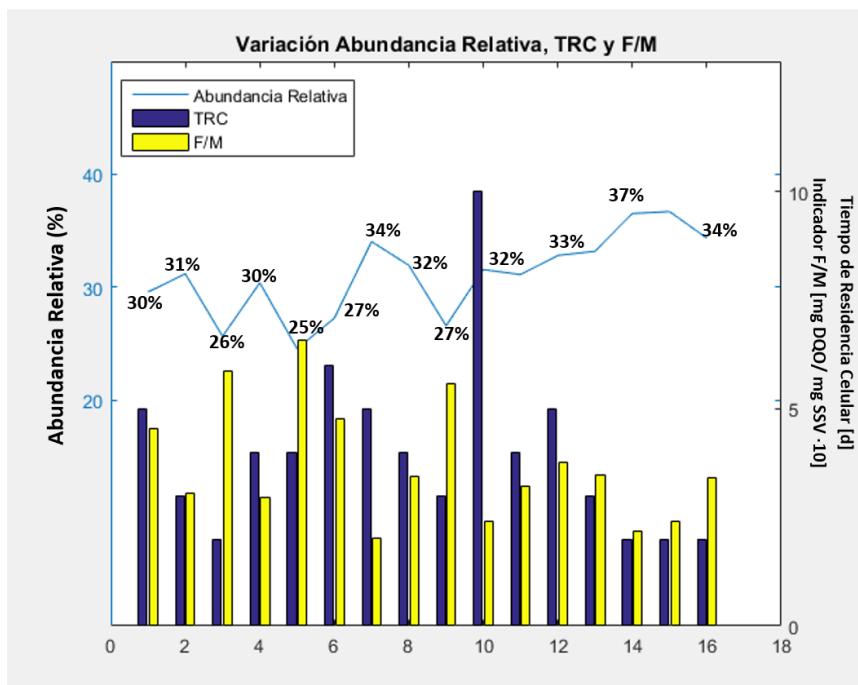


Figura 36: Evolución de abundancia relativa de *M. parvicella* en función del TRC y el F/M en el Reactor Biológico.

El día 9 de enero se presenta una disminución en la abundancia relativa de *Microthrix*, efecto que podría producirse debido a que la concentración de sustrato en la entrada aumenta, y con ello, un aumento en la actividad de crecimiento de los organismos heterótrofos (ver Figura 36). Aquello concuerda con lo estudiado en literatura, que propone que el desarrollo de los organismos se compondría de la suma de dos procesos metabólicos: crecimiento celular y transferencia de masa de sustrato hacia la célula [67]. Cuando se presentan condiciones donde la concentración de sustrato se encuentra en exceso (o en aumento), se promueve el crecimiento celular de la biomasa por sobre el transporte de sustrato, este último, relaciona de forma inversa la constante de saturación de Monod con un factor de transferencia de masa y de forma directa con la morfología de la célula, es por esta razón que, en este día señalado, prepondera el crecimiento de los organismos heterótrofos, que poseen una tasa de crecimiento celular máximo 4,7 veces mayor en comparación con *M. parvicella* dentro del modelo. A este fenómeno se le suma la baja en el tiempo de residencia celular de aquel día en el sistema, lo cual limita aún más el tiempo de crecimiento de las bacterias filamentosas, que son considerados como organismos de crecimiento lento, por ende, se identifica que un aumento de la DQO afluente junto con una disminución del tiempo de residencia celular corresponden a dos factores que promoverían la contención del Bulking Filamentoso [10].

La tasa de respiración celular es un parámetro que marca la diferencia en los resultados a partir del día 10 en adelante. Como se aprecia en la Figura 37, la concentración de biomasa comienza a descender en dicho período, mientras que, para el caso de *Microthrix*, su concentración permaneció relativamente constante, aumentando de esta manera la abundancia relativa de la bacteria. Con el aumento del TRC, se da paso a que esta bacteria se multiplique sin verse afectada por la lentitud de su crecimiento. Probablemente, esto le da paso a que traspase la fase exponencial y su metabolismo se centre en generar energía que no se destina hacia la síntesis de nuevas células. Esta tasa de respiración es 20 veces menor a la de su competencia directa, los O. heterótrofos, los cuales muestran un decaimiento constante en su concentración, lo que se relaciona a su vez con la disminución del sustrato de entrada en los días posteriores. Es así, como estos últimos organismos utilizan su energía en el mantenimiento celular, sin embargo, lo realizan a una mayor tasa. Es importante destacar que este parámetro en el modelo incluye un factor ligado a la competencia en el lodo, por lo que durante este periodo, se estaría visualizando, además del mantenimiento celular, una susceptibilidad de los organismos heterótrofos a la competencia, lo cual concuerda con la literatura, que expone que el metabolismo de *M. parvicella* se comporta como un fuerte almacenador de sustrato en ambientes competitivos para mantener su biomasa activa [71], fenómeno que se obtiene en el gráfico de la Figura 32 (a la derecha) donde entre los días 10 y 13, el almacenamiento de lípidos aumenta, no así, el almacenamiento de sustrato para los organismos heterótrofos.

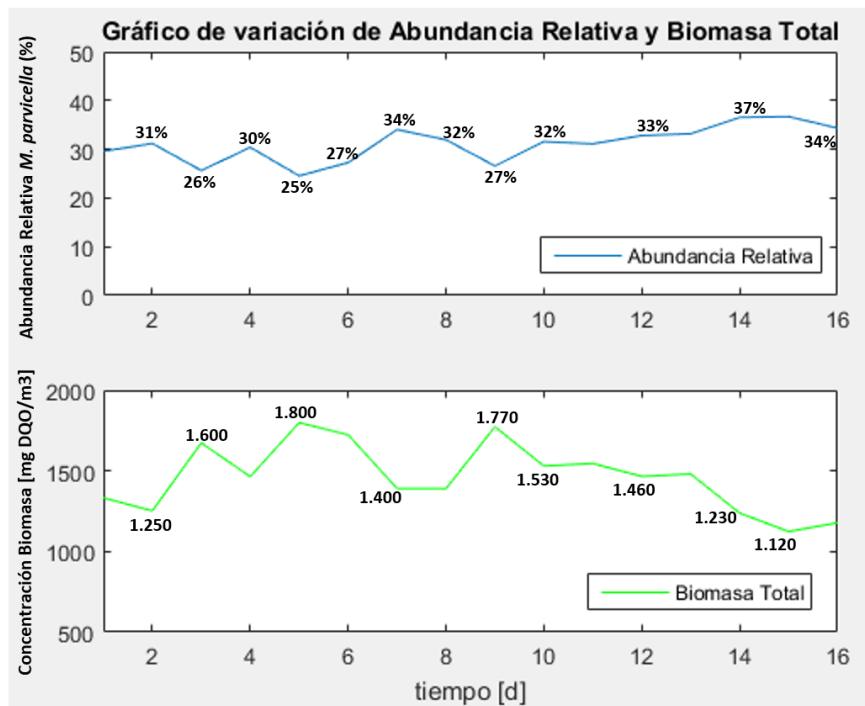


Figura 37: Comparación de la Abundancia relativa de *M. parvicella* y la dinámica de la biomasa total en el Reactor Biológico.

A partir de los días del 12 de enero de adelante, el modelo entrega un aumento paulatino de la abundancia relativa en el sistema. A pesar de que el tiempo de residencia celular fue disminuido hacia sus magnitudes más bajas en el reactor (Figura 29), esto no fue suficiente para apalear el crecimiento excesivo de la bacteria filamentosa. Sin embargo, este resultado tiene relación con la disminución en la concentración de sustrato (explicada anteriormente) junto con una diminución en el flujo de aireación ajustado, particularmente el día 15 de enero, instante en que se presenta el mayor porcentaje de abundancia relativa de la bacteria filamentosa en los resultados de la simulación. Este hecho posee la misma implicancia que con la DQO de entrada en el sistema; el oxígeno molecular actúa como aceptor de electrones en los procesos metabólicos de *M. parvicella* y de los organismos heterótrofos, existe una competencia por este sustrato, que, al igual que la materia orgánica, podría presentar un favorecimiento en su transferencia debido a la morfología de la bacteria filamentosa, este competencia se cuantifica a través de la constante de Monod del oxígeno ajustada, cuyo parámetro en los organismos heterótrofos es 25 veces mayor que el de la bacteria filamentosa, por ende, se explica que en periodos donde esta especie escasea, exista una predominancia en el crecimiento de *Microthrix parvicella*.

4.5. Análisis de sensibilidad de las condiciones de operación de la PTAS

El modelo ajustado se utilizó para generar un análisis de impacto de las condiciones de operación manipulables en planta sobre la dinámica de las especies del sistema (las especies que no son mostradas en esta sección se encuentran en Anexo 7.16). Esto significa que se varió el tiempo de residencia celular desde los 3 a los 10 días, mientras que se evaluó el modelo bajo 3 condiciones de flujo de aireación diferentes:

- **Flujo Neutro:** Se utilizó el flujo de aireación medio ajustado ($6.915 \text{ [kg O}_2/\text{d]}$).
- **Flujo Mínimo:** Se disminuyó en un 50% el flujo neutro.
- **Flujo Máximo:** Se aumentó en un 50% el flujo neutro.

Tabla 12: Concentración media de SST obtenidas en el análisis de sensibilidad de las condiciones de operación.

Sólidos Suspendidos Totales [mg/l]	Flujo de Aireación			
	Tiempo de Residencia Celular [d]	Mínimo	Neutro	Máximo
3	3	3.048	2.719	2.656
4	4	3.454	3.057	2.967
5	5	3.740	3.298	3.185
6	6	3.952	3.477	3.346
7	7	4.115	3.616	3.346
8	8	4.244	3.726	3.566
9	9	4.349	3.815	3.645
10	10	4.435	3.889	3.710

Tabla 13: Concentración media de SSV obtenidas en el análisis de sensibilidad de las condiciones de operación.

Sólidos Suspensos Volátiles [mg/l]		Flujo de Aireación		
Tiempo de Residencia Celular [d]		Mínimo	Neutro	Máximo
3		2.463	2.152	2.092
4		2.795	2.420	2.335
5		3.030	2.612	2.506
6		3.205	2.755	2.632
7		3.339	2.866	2.728
8		3.445	2.955	2.805
9		3.531	3.027	2.867
10		3.602	3.086	2.918

Los resultados del análisis de sensibilidad del impacto de las condiciones de operación, TRC y flujo de aireación, sobre las especies del sistema inician con la presentación de las Tablas 12, 13 y 14. Como se puede apreciar en ellas, se tiene que los valores de los SST y los SSV en el sistema aumentan conforme se disminuye el flujo de aireación y aumenta el tiempo de residencia celular en el sistema. Esto concuerda con lo percibido por los operadores de la PTAS, y su razón se puede relacionar con el mecanismo de transformación de la biomasa activa hacia su forma inerte, causado principalmente por la muerte celular.

Tabla 14: Concentración media de X_I obtenidas en el análisis de sensibilidad de las condiciones de operación.

Sólido Inerte Suspensido [mgDQO/l]		Flujo de Aireación		
Tiempo de Residencia Celular [d]		Mínimo	Neutro	Máximo
3		1.859	2.016	2.037
4		2.125	2.308	2.336
5		2.314	2.515	2.549
6		2.455	2.668	2.708
7		2.563	2.786	2.830
8		2.649	2.880	2.927
9		2.719	2.956	3.006
10		2.777	3.019	3.072

La disminución del flujo de aireación genera un descenso en el oxígeno disponible para los organismos del sistema, por lo cual, según la matriz estequiométrica, los procesos metabólicos que consumen esta especie en menor cantidad se verán promovidos, en este caso, el crecimiento celular por sobre la respiración endógena. Según el modelo construido, la biomasa latente aporta en una composición mayor hacia la suma de los SST y SSV en comparación con su forma inerte, por ende, bajo estas condiciones, los SST y SSV se componen principalmente microorganismos activos. Esto se ratifica con lo presentado en la Tabla 14, donde se puede apreciar que, una disminución en el flujo de aireación disminuye los X_I del sistema, lo cual demuestra que los procesos de respiración endógena se encuentran inhibidos puesto que no poseen el oxígeno suficiente en el sistema para llevarse a cabo. Por consiguiente, este hecho genera un detrimiento en la degradación de materia orgánica (Tabla 15), la cual se encuentra principalmente almacenada en el interior de las células,

generando una pérdida de eficiencia en el tratamiento de aguas servidas. Por otro lado, si se aumenta el flujo de aireación, ocurre el proceso contrario, debido a que se presentarían las condiciones para que los procesos de respiración se realicen, sin embargo, esta condición impacta negativamente en la etapa de decantación, ya que al aumentar la aireación se favorece formación de la reacción de nitrificación y, seguido de ello, los productos de esta reacción al encontrarse en una zona anóxica como la del clarificador, promoverán la formación de la reacción de denitrificación, y en consecuencia, la resuspensión de lodos, condición que fue ratificada por los operadores de la PTAS.

Tabla 15: Concentración media de S_S obtenidas en el análisis de sensibilidad de las condiciones de operación.

Sustrato de degradación Rápida [mg DQO/l]		Flujo de Aireación		
Tiempo de Residencia Celular [d]		Mínimo	Neutro	Máximo
3		148	11,95	9,6
4		148	10,64	7,86
5		149	9,97	7,01
6		149	9,56	6,53
7		150	9,3	6,21
8		150	9,11	5,99
9		150	8,97	5,83
10		150	8,8	5,7

El aumento en el tiempo de residencia celular promueve el desarrollo de todos los procesos metabólicos de los microorganismos, tanto en el crecimiento celular como su mantenimiento y decaimiento. Aquello se ratifica comparando las Tablas 16 y 17, que demuestran que tanto la concentración de biomasa heterótrofa y de *Microthrix*, como los sólidos inertes disueltos, aumentan ante el ascenso de esta condición. Este hecho se debería a que una mayor permanencia de los microorganismos en el sistema extendería el desarrollo de su metabolismo hasta el punto donde el mantenimiento celular y el crecimiento entren en un estado estacionario, condición ideal en la operación de un reactor de flujo continuo. No obstante, como se aprecia en las Tablas 12 y 13, el aumentar el TRC genera un ascenso en los sólidos suspendidos, lo cual podría ocasionar una sobrecarga de lodo en el sistema de clarificadores. Por otro lado, si se disminuye el TRC, por ejemplo, hasta los 3 días, se occasionaría un descenso drástico de los sólidos suspendidos, lo cual podría conllevar a una pérdida excesiva de lodo en la planta, inactivando los ciclos celulares de los microorganismos, y con ello, una baja en la eficiencia de la degradación de materia orgánica. Este fenómeno que fue obtenido a través de la simulación del modelo fue confirmado por los operadores de la planta.

Tabla 16: Concentración media de X_H obtenidas en el análisis de sensibilidad de las condiciones de operación.

Organismos Heterótrofos [mg DQO/l]	Flujo de Aireación		
Tiempo de Residencia Celular [d]	Mínimo	Neutro	Máximo
3	572	420	371
4	646	460	391
5	698	490	403
6	737	512	412
7	766	530	419
8	789	545	424
9	808	557	428
10	824	567	431

Tabla 17: Concentración media de X_{MIC} obtenidas en el análisis de sensibilidad de las condiciones de operación.

<i>Microthrix parvicella</i> [mg DQO/l]	Flujo de Aireación		
Tiempo de Residencia Celular [d]	Mínimo	Neutro	Máximo
3	434	384	379
4	495	438	431
5	537	476	468
6	568	504	495
7	592	525	515
8	610	542	531
9	626	555	544
10	638	566	554

Se ha evidenciado en cultivos axénicos que la bacteria *M. parvicella* posee un metabolismo microaerofílico [46], lo cual se relaciona con la magnitud de la constante de saturación de oxígeno de Monod explicada anteriormente. Como se aprecia en la Tabla 17, a medida que disminuye el flujo de aireación, la concentración de *Microthrix parvicella* aumenta, lo cual concuerda con la literatura. Sin embargo, en el caso de los organismos heterótrofos (Tabla 16) este fenómeno ocurre de forma más significativa, es decir, el aumento de organismos heterótrofos en condiciones donde el flujo de aireación es bajo es más marcado en comparación a la bacteria filamentosa, un organismo que debiese desarrollarse con ventaja en ambientes donde el oxígeno desciende. Mas aún, este hecho se ve representado en la Tabla 18 que muestra los valores de la abundancia relativa de *Microthrix* en el sistema, donde el disminuir el flujo de aireación incide negativamente en la presencia de la bacteria filamentosa.

Tabla 18: Abundancia relativa de *M. parvicella* obtenidas en el análisis de sensibilidad de las condiciones de operación.

Abundancia Relativa (%)	Flujo de Aireación [kg O₂/l]				
Tiempo de Residencia Celular [d]	3.475	6.223	6.915	7.260	9.335
3	23	27	30	31	34
4	23	28	31	32	34
5	23	28	31	33	35
6	23	28	32	33	36
7	23	28	32	34	37
8	23	28	32	34	37
9	23	28	32	34	38
10	23	28	32	34	38

Las estrategias adoptadas en la PTAS para apalear el Bulking Filamentoso tienen como objetivo mantener los niveles de oxígeno altos, dentro de los rangos de los datos experimentales utilizados en este estudio (0,7 [mg O₂/l] promedio), lo cual no estaría siendo coherente con los resultados presentados en la Tabla 18. Esto podría deberse a que, en el modelo construido, el crecimiento de la bacteria filamentosa solo se desarrolla en condiciones aeróbicas, no así en los organismos heterótrofos que pueden crecer tanto en condiciones aeróbicas como anóxicas. Como se menciona anteriormente, el modelo ASM3 cuantifica la alternancia de fases a través del uso del término "switch". De acuerdo con esto, es que se propone la inclusión de una cinética de crecimiento para *M. parvicella* en condiciones anóxicas, proceso que se sustenta en las hipótesis que proponen que las bacterias filamentosas pueden desarrollar etapas de denitrificación, lo que supondría un crecimiento de estas en el reactor ante las condiciones anóxicas consideradas en el modelo. Sumado a ello, en estas condiciones *M. parvicella* presentaría una ventaja competitiva frente a los organismos heterótrofos, ya que, estos últimos almacenarían el óxido nítrico (NO), uno de los intermediarios del proceso del proceso de denitrificación, lo cual les impactaría negativamente en su metabolismo ya que la acumulación de esta especie inhibiría su crecimiento. En cuanto a las bacterias filamentosas como *Microthrix*, se evidencia que estas no poseen la capacidad de almacenar el NO, sino que solo denitrificarían hasta la formación de nitrito, por lo cual, su crecimiento en estas condiciones no se vería mermado [10, 46].

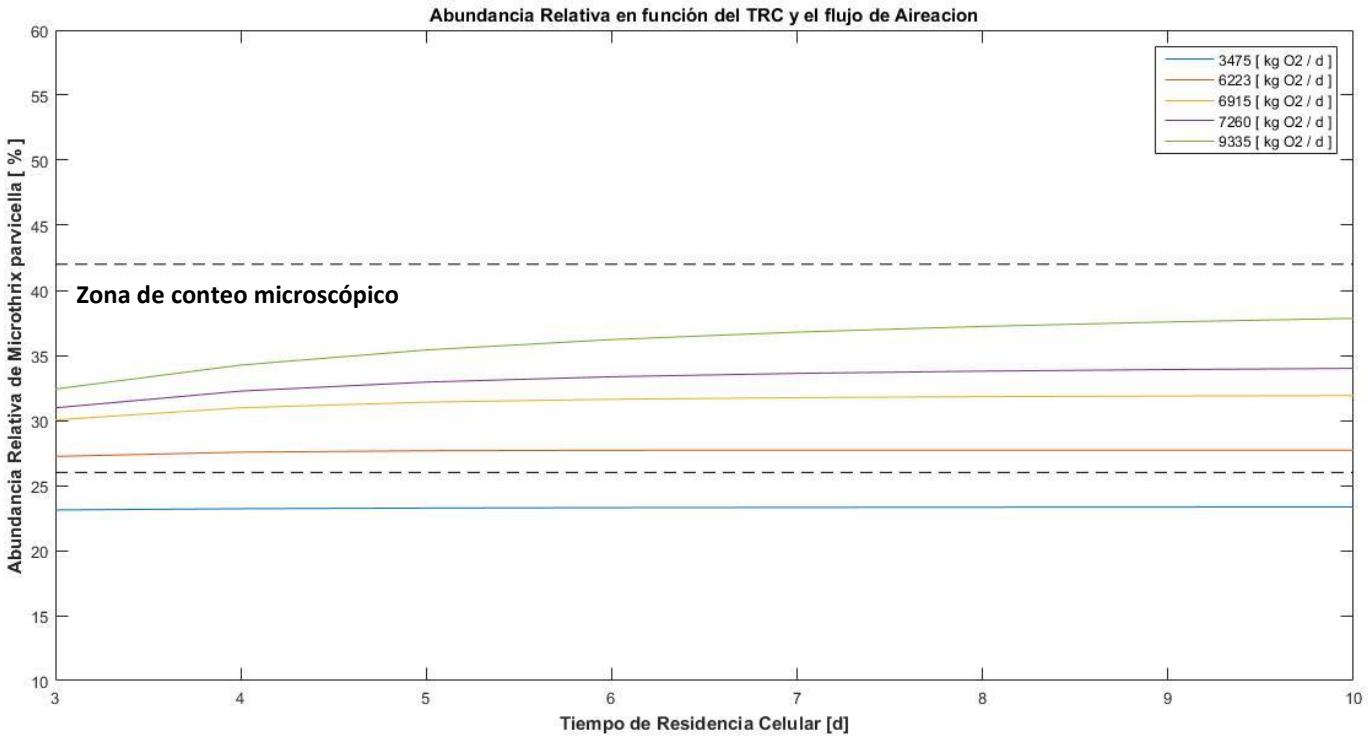


Figura 38: Gráfico de variación de abundancia relativa con respecto al TRC y el flujo de aireación.

Este último análisis estaría mostrando que el supuesto de no incluir una cinética de crecimiento en anoxia posee una gran fortaleza en los resultados presentados en la Tabla 18 y la Figura 38. Ante este escenario, se construye una extensión al modelo construido, añadiendo una cinética de crecimiento anóxico para *M. parvicella* (ρ_{23}):

$$\rho_{23} = \mu_{MIC} \cdot \eta_{NO} \cdot \frac{K_{O2,MIC}}{K_{O2,MIC} + S_O} \cdot \frac{S_{NO}}{K_{NO,MIC} + S_{NO}} \cdot \frac{S_{NH}}{K_{NH,MIC} + S_{NH}} \cdot \frac{S_{HCO}}{K_{HCO,MIC} + S_{HCO}} \cdot \frac{\frac{X_{STOLIP}}{X_{MIC}}}{\frac{X_{STOLIP}}{X_{MIC}} + \frac{X_{MIC}}{X_{MIC}}} \cdot X_{MIC}$$

De forma complementaria, a los procesos anóxicos de los organismos heterótrofos (ρ_3 , ρ_5 y ρ_{15}) se incluye un término de inhibición por sustrato de acuerdo con el modelo de crecimiento microbiano de Haldane [73, 74]. En este caso, la especie inhibitoria sería el complejo Nitrito/Nitrato:

Tabla 19: Inclusión del término de inhibición por Nitrito/Nitrato en el modelo propuesto.

Término sin inhibición (modelo original)	Término con inhibición (modelo propuesto)
$\frac{S_{NO}}{K_{NO} + S_{NO}}$	$\frac{S_{NO}}{K_{NO} + S_{NO} + S_{NO}^2 \cdot K_{IH}}$

Las condiciones de operación y los valores de los parámetros corresponden a los ajustados por el modelo original. Sumado a esto, se toma el supuesto de eliminar los términos asociados a la respiración celular con el fin de simplificar el modelo. Posteriormente, se varía el valor de la constante de inhibición propuesta (K_{IH}) con respecto a distintas magnitudes en el flujo de aireación. En la Tabla 20 se obtienen los resultados del modelo propuesto:

Tabla 20: Mapa de color de Abundancia Relativa de *M. parvicella* obtenido por el modelo propuesto.

Flujo de aireación [kg O ₂ /d]	Constante de inhibición por Nitrito/Nitrato [mg/l]				
	0,1	0,5	1	2	5
3.475	Yellow	Orange	Orange	Orange	Orange
6.223	Green	Green	Green	Yellow	Yellow
6.915	Green	Yellow	Yellow	Yellow	Green
7.260	Green	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow
9.335	Yellow	Orange	Orange	Orange	Orange

La Tabla 20 corresponde a un mapa de color construido a partir de la normalización de los resultados obtenidos. Las casillas rojas representan una abundancia relativa de *M. parvicella* mayor en comparación con las celdas verdes. Como se puede observar, se presenta una tendencia al aumento de la predominancia de la bacteria filamentosa en ambientes microaerofílicos, lo cual coincide con lo estudiado en literatura. Al igual que los resultados presentados en la Tabla 18 y la Figura 38, de igual manera ante mayores flujos de aireación, la abundancia relativa aumenta (razones explicadas anteriormente). Es preciso notar que la metodología de este análisis se basa en mantener la constante de saturación de oxígeno para *M. parvicella* en un valor fijo. Según el análisis de sensibilidad, este parámetro no presentaría mayor injerencia en un cambio en la concentración de la bacteria filamentosa. Con ello, al aumentar el valor de la constante de inhibición por Nitrato/Nitrito, la abundancia relativa aumentaría, lo cual representaría el fenómeno de inhibición por sustrato propuesta por el modelo de Haldane percibida por los organismos heterótroficos. Este resultado sugiere que la relación operacional atribuida a que los episodios de Bulking Filamentoso se originan cuando se presentan bajas en el oxígeno disuelto en los Reactores Biológicos, se podría generar debido a la capacidad de denitrificar *M. parvicella* (para este caso) y la inhibición por sustrato generada en el interior de las células heterótrofas. Aquel fenómeno sería complementario a la alta especificidad que tendría la bacteria filamentosa a la captación de oxígeno, lo que es representable a través de la constante de saturación de Monod correspondiente a esta especie.

Este resultado se construye en base a la eliminación de los procesos de respiración endógena de los organismos, los cuales, según las bases del modelo ASM3, representan un fenómeno de competencia en el lodo activado. Al despreciar estos factores, se podría estar subvalorando las magnitudes de la abundancia relativa de la Tabla 20, puesto que, según el modelo ajustado, este proceso tiene un alto impacto en los organismos heterótroficos. Adicionalmente, se tendría que validar la magnitud en la constante de inhibición por sustrato de tal manera de que esta se encuentre en un rango confiable y representativo del proceso simulado; el fenómeno de inhibición por Nitrato/Nitrito en los organismos heterótroficos aún no posee una evidencia científica clara [10], por lo cual, posiblemente se estaría sobre determinando este proceso y, por ende, los valores de abundancia relativa; sin embargo, se tiene que el modelo propuesto anteriormente puede ser utilizado como punto de inicio para un estudio posterior acerca de la fisiología de *M. parvicella*, su capacidad de denitrificar en comparación con los organismos competidores en el lodo, y si esto afecta de forma considerable en los eventos de Bulking Filamentoso en la PTAS.

4.6. Propuestas Técnico- Económicas de control operacional

Los resultados del modelo de simulación permiten identificar las etapas y condiciones de operación del proceso que se deben controlar con el objetivo de evitar la proliferación del Bulking Filamentoso. Cada una de estas condiciones puede incidir en más de una etapa del proceso, por ende, se presenta en la Tabla 21 una serie de medidas, correctivas y preventivas, que permitiría controlar de mejor manera la proliferación de bacterias filamentosas y en qué etapa cada medida se hace presente. En el Anexo 7.17 se presenta el detalle y acción de cada medida propuesta.

Tabla 21: Medias propuestas para el control de la formación de Bulking Filamentoso.

Medidas/Etapa	Afluente	Reactor Biológico	Clarificador Secundario	RAS/WAS y Efluente
Correctivas		<ul style="list-style-type: none"> • Cloración. • Adición Nitrato de Sodio. 	<ul style="list-style-type: none"> • Polímero. • Coagulante. • Producto Comercial. 	<ul style="list-style-type: none"> • Aumento de caudal RAS. • Retención de sólidos en el clarificador. • Cloración.
Preventivas	<ul style="list-style-type: none"> • Medición de DQO. 	<ul style="list-style-type: none"> • Control Oxígeno Disuelto. • Medición SSVLM. • Observación Microscópica • Medición Ácidos Orgánicos. 	<ul style="list-style-type: none"> • Test de Jarras. 	<ul style="list-style-type: none"> • Medición de Sólidos Volátiles en RAS. • Control de Tiempo de Residencia Celular. • Medición Sólidos Totales en Efluente.

Posteriormente, la Tabla 22 presenta una estimación de los costos que significarían la implementación de cada medida correctivas¹:

Tabla 22: Costo de las medidas correctivas propuestas para el control de la formación de Bulking Filamentoso.

Acción	Efectividad	Costo [\$ CLP/m ³]	Costo PTAS Los Ángeles [\$ CLP]
Cloración	Alta	240	1.102.013
Polímero	Media	1.923	8.847.208
Producto Comercial	Media	70 ²	2.596.580
Coagulante	Media	218	1.002.587
Aumento del Caudal RAS	Baja	-	-
Retención de Sólidos en el clarificador	Baja	-	-
Nitrado de Sodio	Desconocida	-	-

¹ Los costos asociados a las medidas correctivas corresponden a los destinados para mitigar un evento de 7 días de presencia de Bulking Filamentoso.

² La medida de adición de producto comercial se basa en el precio unitario por m³ de caudal RAS.

Las medidas propuestas se enfocan en estudiar principalmente las condiciones de operación del reactor biológico y los caudales de salida del clarificador secundario. Esto se debe a que estas etapas del proceso controlan la biomasa que reside en el sistema, el reactor controla los procesos metabólicos de los organismos, mientras que los caudales RAS/WAS controlan la concentración de biomasa que compone el lodo activado.

Las medidas correctivas se consideran acciones de corto plazo, la cuales son ejecutadas al momento en que el problema de Bulking Filamentoso ya se presenta en el sistema, por ende, su efectividad depende de la calidad en la sedimentación que se genera en el clarificador secundario, es por ello que, se proponen medidas de adición de químicos que promuevan la aglomeración de materia, y con ello, la formación de flóculos decantables en la etapa de clarificación. La efectividad señalada para cada medida es obtenida a través de la asesoría del supervisor de la PTAS, el cual ha presenciado en variadas ocasiones la aplicación de estas medidas [10, 75].

Con respecto a la información presentada en la Tabla 22 se aprecia que la efectividad de las medidas correctivas varía, y que la adición de químicos no asegura una solución definitiva al problema de Bulking, es por ello que se consideran tanto de respuesta rápida como de corto efecto. La gran en la adición de productos coagulantes y floculantes es que la acción de estos se enfoca únicamente en corregir mediante un comportamiento físico de la materia y no biológico, por lo cual, si bien su respuesta permite compactar la materia suspendida en los clarificadores, la abundancia relativa de bacterias filamentosas se mantiene constante, y su efecto en el reactor biológico se mantendrá vigente una vez que los químicos sean diluidos por el funcionamiento del proceso. Sumado a ello, es que estas acciones son al menos 200% y 800% veces más costosas en comparación con el cloro, para el caso del producto comercial y el polímero respectivamente. En el caso del coagulante, su costo es similar al del método de cloración, sin embargo, adicional a su efectividad media, no existe registro de una dosis precisa de este elemento que permita reducir los problemas de Bulking, sino más bien, su adición es particular para cada caso, este hecho podría aumentar los costos de esta medida debido al tiempo que se requeriría para encontrar la dosis precisa para el caso de la PTAS en estudio [74].

El aumento en el caudal RAS y la compactación de lodos en el clarificador son medidas con un enfoque opuesto, el primero propone disminuir el flujo RAS de tal manera de alivianar la carga de sólidos en el clarificador, y de esta manera, evitar que en efluente aumente la concentración de esta especie; mientras que, el segundo, propone el aumentar la cantidad de lodo en el clarificador, disminuyendo el caudal RAS y de tal forma promover la compactación de sólidos debido a la gran cantidad de esta especie que residiría en el equipo. Estas medidas no han tenido un efecto positivo en el control de Bulking Filamentoso según la información recopilada, sino, por el contrario, su ejecución podría traer consigo problemas en el clarificador, puesto que, la primera medida podría alimentarla con mayor biomasa al reactor biológico, y con ello aumentar la cantidad de Sólidos Volátiles en el sistema, especie que podría sobrecargar la capacidad de sedimentación en el clarificador. Por otro lado, la segunda medida, podría de igual manera sobrecargar el clarificador debido a la acumulación excesiva de sólidos en la etapa y con ello, la disminución de volumen de sobrenadante efluente. Ambos fenómenos se verían promovidos de existir una presencia excesiva de bacterias filamentosas, por ende, su efecto podría ser contraproducente. El costo de ambas estrategias se relacionaría con la energía necesaria para mover un volumen determinado de caudal RAS por parte de las bombas de recirculación [75].

La medida de adición de nitrato de sodio se basa en lo investigado en la literatura. En el reactor biológico podrían generarse espacios microaerofílicos, estado que promovería el crecimiento de bacterias filamentosas. De acuerdo con ello, la adición de nitrato de sodio en estos espacios aumentaría la capacidad oxidante que presentaría el sistema (potencialmente hasta llegar a concentraciones $> 0,10 [mgN/DQO]$), puesto que esta especie podría ser utilizada como aceptor de electrones por parte de organismos heterótrofos y, en algunos casos, nitrificantes. Estos resultados solo se han obtenido a nivel laboratorio, y se desconoce el impacto económico y de eficiencia que podría tener en una planta de tratamiento de aguas servidas, es por esta razón que en la Tabla 22, las columnas de efectividad y costo implicado se dejan sin información [76].

La cloración es una medida que se declara con una alta efectividad. Sin embargo, se debe tener en cuenta que la acción del cloro en la reducción del Bulking Filamentoso se debe a que esta especie promueve la lisis celular de los organismos. Así como destruye la estructura de las bacterias filamentosas, lo hace para la biomasa restante, tales como organismos heterótrofos y nitrificantes. Si bien la cloración pareciese ser la medida óptima en cuanto a precio, efectividad e inmediatez, su ejecución deteriora el proceso de tratamiento de aguas servidas producto de la destrucción de la biomasa del lodo activado, por lo que, durante su acción, los niveles de nitrógeno, alcalinidad y DQO se elevarían en la corriente efluente [42].

Es por ello que se utilizó el modelo construido para simular el efecto correctivo de la adición de cloro para mitigar el problema de Bulking Filamentoso. Los resultados se basan en estudios que han demostrado que la cloración como método de corrección de estos eventos, alcanza un porcentaje de inhibición del 70% de bacterias filamentosas [42, 45]. Con ello, se obtienen resultados en base a una limitación en el crecimiento de estas bacterias de esa magnitud, y se cuantifica la abundancia relativa en el sistema de lodos activados ante diferentes escenarios de inhibición del crecimiento de los organismos restantes: 0%, 10%, 25%, 50 y 70%. Los resultados de este ejercicio se presentan a continuación:

Tabla 23: Resultados de la simulación del sistema ante la inyección de cloro en el Reactor Biológico.

Prueba	Inhibición Organismos	Parámetros	Abundancia Relativa media	Error absoluto medio	Variación en el flujo O ₂ c/r al modelo ajustado (%)	Variación en SST c/r al modelo ajustado
Ajuste original	0%	-	30%	27	6.915 [kg O ₂ /d]	2.359 [mg/l]
1	0%	0%	19%	27	-4%	0%
2	10%	-9%	22%	27	-6%	-0,25%
3	25%	-9%	26%	32	-9%	-1,3%
4	50%	-27%	35%	47	-13%	1,4%
5	70%	10%	38%	66	0%	1,3%

Los resultados presentados determinan que la inhibición del crecimiento generada por la medida de cloración genera una disminución en la abundancia relativa del sistema, y con ello, una posible mitigación del Bulking Filamentoso. Al asumir un porcentaje de inhibición del 0%, 10% y 25% para los organismos heterótrofos y autótrofos, la abundancia relativa se encontraría por debajo de la zona porcentual de observación microscópica obtenida en los ensayos de laboratorio, por lo que estos valores podrían encontrarse dentro de los resultados esperados de corrección del Bulking, teniendo en cuenta que, en base a la experiencia operacional, esta medida si lograría mejorar las condiciones microbiológicas de los lodos activados.

Es preciso notar que, el error absoluto medio y los SST obtenidos en estos casos por el ajuste de parámetros presenta iguales magnitudes (o cercanas para la prueba con inhibición al 50%) en comparación con los resultados del ajuste original presentado en la sección 4.3. Este fenómeno es de suma importancia, puesto que sugeriría que los resultados de estos ensayos serían valorables en cuanto a la magnitud del flujo de aireación cuantificado, el que indica que, en todos los casos, la aireación disminuiría entre un 4% a un 9% en comparación con el ajuste original. Lo anterior, podría transformarse en una posibilidad de ahorro monetario en el proceso, donde se debería realizar la comparación entre el costo de aplicación de cloro en el reactor considerando la ganancia por diminución del flujo de aireación, versus el continuar la operación de los sopladores de la PTAS con la oxigenación recomendada para el control del Bulking. Con respecto a los Sólidos Suspensos, no se presentaría una variación significativa debido a la medida de mitigación en comparación el ajuste original del modelo.

Las pruebas restantes demuestran que la abundancia relativa excede a la obtenida mediante el ajuste original, por lo que esto sugiere que la medida de cloración no corregiría el problema del Bulking, lo cual sería incongruente con la evidencia experimental. Es por esto que, estos porcentajes de inhibición podrían descartarse, tomando como valorables las correspondientes al 0%, 10% y 25%. Esta conclusión puede sostenerse en que, hay estudios que demuestran que la cloración impacta en mayor medida a las bacterias filamentosas producto de que su morfología generaría un mayor contacto entre estas bacterias y el cloro, promoviendo la lisis celular en sus estructuras [77]. En cuanto a la variación de parámetros, se obtiene una disminución de los valores en comparación el ajuste original. Esta disminución es válida para los parámetros correspondientes a los organismos inhibido: autótrofos y heterótrofos, cuyo resultado se podría explicar de acuerdo a que, ante una inhibición de la cinética de crecimiento de los organismos, el modelo buscará la manera de contrarestar esta limitación disminuyendo las constantes de Monod, y de esta forma, aumentar la sensibilidad de las cinéticas ante los cambios de sustrato en el sistema. En base a esto, se debe considerar una posible sobredeterminación en la disminución de los valores de los parámetros, y con ello, posiblemente la abundancia relativa de *M. parvicella* podría ser mayor.

Las medidas preventivas, presentadas en la Tabla 24, se sustentan principalmente en los resultados obtenidos por el modelo con ajuste de parámetros y el análisis de sensibilidad posterior. Como se puede apreciar se pone énfasis en aumentar la cantidad de mediciones de la DQO de afluente y la concentración de Sólidos Volátiles en el Reactor Biológico y la corriente RAS, de tal forma, estas mediciones permitirán cuantificar el parámetro de F/M el cual, a partir de los resultados de la simulación, corresponde a un indicador que podría predecir, o alertar, de forma certera una posible formación en exceso de bacterias filamentosas (alrededor de una magnitud de 0,2 según la Figura 29)

Tabla 24: Costo de las medidas preventivas propuestas para el control de la formación de Bulking Filamentoso.

Acción	Costo [\$ CLP]
<ul style="list-style-type: none"> • Medición de relación F/M (DQO afluente). • Control Oxígeno. • Medición SSVLM. • Observación Microscópica. • Medición Ácidos Orgánicos. • Test de Jarras. • Medición de Sólidos Volátiles en Recirculación. • Control del Tiempo de Residencia Celular. 	OPEX: 937.520 CAPEX: 9.408.600
	Total
	10.346.120

En cuanto a la concentración de oxígeno, se propone el mejoramiento de los instrumentos de medición para llevar un monitoreo más preciso de esta especie a lo largo del día. Esta determinación se basa en que, de acuerdo con el ajuste del flujo de aireación, se aprecia que la inyección aire en el reactor permite manejar la dinámica de la biomasa en el sistema y con ello la degradación de contaminantes en el agua, lo cual es corroborado en el análisis de sensibilidad. Sumado a ello, según lo mostrado en el gráfico de la derecha de Figura 30, existen diferencias entre los cambios de concentración de oxígeno simulados a lo largo del día y los datos registrados en el SIPT. Esta anomalía se relaciona con que, los datos experimentales corresponden a valores promedio de la concentración de oxígeno en un punto del reactor, por ende, podrían existir sesgos en la medición experimental en este elemento. Al implementar la medida preventiva, mediante la instalación de sensores de oxígeno, se podría suprimir esta desinformación y de esta manera, tener un control de la concentración disuelta de este elemento en el reactor biológico, donde en etapas en que decae este parámetro podría generarse una promoción en el crecimiento de filamentosas.

La medición preventiva del TRC corresponde a una medida importante puesto que, de acuerdo con los resultados de la simulación, esta condición controla la permanencia de la biomasa total del lodo activo y, con ello, controla las fases con que se esté desarrollando el metabolismo de los microrganismos. Sin embargo, es importante que este parámetro sea controlado en combinación con otra condición de operación medida (flujo de aireación y/o F/M) puesto que, el manejo del TRC afecta en la totalidad de los organismos. De forma contraria, si la línea de tratamiento de lodos sufre alguna avería en alguna etapa de su proceso, esta podría desencadenar en el control del TRC, y con ello, podría generar un impacto en la línea principal de tratamiento de aguas como la promoción de formación de Bulking filamentoso.

El estudio realizado se sustenta fuertemente en los ensayos de observación microscópica realizado, tinción gram y conteo de organismos *in vivo*, de esta manera es que dentro de las medidas preventivas se sugiere que la realización de estos ensayos se haga de forma habitual (diaria o semanalmente) puesto que, es en estos ensayos donde se puede apreciar de forma tangible la presencia excesiva de bacterias filamentosas y, junto con ello, la estructura de formación de flóculos. Finalmente, se deben seguir realizando test sedimentométricos para la evaluación de la compactación de lodo en los sedimentadores ya que este fenómeno es una representación directa del impacto de la presencia de Bulking. En cuanto a la medición de ácidos orgánicos, esta se propone como nueva medida, ya que en la actualidad no existe metodología ni realización de este ensayo en el laboratorio. Según literatura, la presencia de ácidos orgánicos disueltos en el reactor biológico demostraría que el ambiente en el que se están desarrollando los microorganismos del lodo activado sería propicio para el aumento de bacterias filamentosas. Esto concuerda con el supuesto con el cual el modelo fue sustentado, que determina que *Microthrix parvicella* utiliza únicamente un sustrato lipídico como el ácido oleico para llevar a cabo sus procesos metabólicos.

La inversión propuesta en las medidas preventivas corresponde principalmente al gasto necesario para acondicionar al laboratorio con los equipos requeridos para llevar a cabo los análisis realizados por el analista químico de la planta, cuyo gasto se encuentra dentro de la estimación del OPEX. Este último indicador toma en cuenta los reactivos utilizados en la realización de los análisis de las especies en el sistema (DQO, SSV, Ácidos orgánicos, etc) durante un mes de operación. Es importante notar que el OPEX es un 15% más barato que la medida correctiva más eficiente, la cloración. Si bien, esta última soluciona en cortos tiempos el problema de la disminución en la compactación de lodos, no lo hace con el problema de Bulking, más aún, podría traer deterioro en la eficiencia de tratamiento de aguas y con ello, una multa de un costo aún mayor que el OPEX de las medidas preventivas.

Finalmente, se pueden proponer como medidas preventivas, cambios estructurales en la PTAS, como la instalación de un estanque selector previo a la entrada al reactor biológico. La presencia de este equipo hace que el afluente y el RAS se mezcla en condiciones anóxicas, impidiendo el crecimiento de bacterias filamentosas, puesto que promueve el consumo de sustrato por parte de otros organismos, como los heterótrofos. Además, se propone la instalación de un equipo desengrasador que retire las grasas presentes en el afluente, y así disminuir el sustrato disponible por la bacteria filamentosa [10]. Estas propuestas no fueron incluidas en la Tabla 52 Debido a su complejidad en la implementación, puesto que conllevan estudios de ingeniería de detalles, diseño y factibilidad económica

Capítulo 5

5. Conclusiones

El objetivo principal de este proyecto consistió en estudiar el sistema de lodos activados de la Planta de Tratamiento de Aguas de la ciudad de Los Ángeles, enfocándose específicamente en identificar las condiciones de operación que promueven el aumento en la abundancia relativa de *M. parvicella*, de tal manera de relacionar los resultados con eventos de formación de Bulking Filamentoso en la PTAS. Para lograr ello, se implementó un modelo computacional que simula el funcionamiento del sistema, el cual corresponde a una extensión del modelo ASM3 publicado por la IWA.

El proyecto entrega un modelo que fue construido y sustentado en base a la interpretación de los procesos y etapas que operan en la planta, donde se estandarizan las especies que coexisten en la dinámica del lodo activado a través de una nomenclatura que diferencia los componentes del sistema entre 8 especies suspendidas y 10 disueltas. Dentro de las especies suspendidas se encuentran los 3 grupos de microorganismos que representan la biomasa latente del sistema: Los organismos heterótrofos, autótrofos y *M. parvicella* donde el desarrollo de su metabolismo se describe a partir de la simulación de 22 cinéticas del tipo Monod. De acuerdo con estas cinéticas se pudo simular la transformación de materia orgánica e inorgánica disuelta en especies suspendidas. La transformación fue cuantificada en base al uso de una matriz y parámetros de estequiometría, donde se obtuvieron coeficientes estequiométricos que definen las razones de cambio de las especies en relación directa con los balances de masas realizados en las etapas del proceso y el sistema completo.

Se logró realizar una observación microscópica, que permitió verificar la presencia de *M. parvicella* en el lodo activado episodios de Bulking Filamentoso, adicionalmente, se observaron otro tipo de bacterias filamentosas a través de la realización de ensayos de tinción Gram, tales como *type 0914* y *type 1851*, lo cual entrega más información acerca de la microfauna existente en el lodo activado de la planta y potenciales razones de la formación de Bulking de acuerdo con el metabolismo de las especies identificadas. Junto con ello, se pudo implementar una metodología de conteo de microrganismos, que puede ser replicable en un futuro, cuyos resultados obtenidos muestran que durante los eventos de Bulking Filamentoso, la abundancia relativa de la bacteria observada ronda en aproximadamente entre el 20-40% en comparación con los demás organismos presentes los flóculos del sistema.

Para obtener los resultados de simulación, se construye un sistema de modelación compuesto por 7 estructuras de main y 9 funciones en el lenguaje MATLAB. Este sistema permite ajustar las constantes de saturación del Monod consideradas en las cinéticas de los procesos metabólicos de los microorganismos, cuyas especificidades de sustrato se relacionan con las especies que pudieron ser medidas experimentalmente: Oxígeno disuelto, alcalinidad, nitrógeno amoniacial, nitrito/nitrato y sólidos suspendidos volátiles, especies que se podrían considerar como las más representativas en cuanto a la operación de una planta de tratamiento de aguas como la de Los Ángeles. De acuerdo con ello, se implementa un ajuste de estos parámetros, cuya estructura del modelo compara los resultados de simulación con las especies señaladas anteriormente, con el objetivo de minimizar el error absoluto medio entre ellas a través de la variación de la magnitud de los parámetros a ajustar.

Por otro lado, se identifica que, una de las variables del proceso que requiere de un control preciso en la operación corresponde al flujo de aireación inyectado en los reactores biológicos, por ende, es que el modelo aprovecha este análisis y ajusta el valor diario utilizado de esta variable para obtener un dimensionamiento de la injerencia del oxígeno en el sistema sobre el lodo activado. En base a lo anterior, es que se identifica la potencial funcionalidad del modelo construido, el cual podría ser implementable para la programación de un lazo de control específico de la PTAS que permita controlar los flujos de aireación, e incluso la operación del consorcio de microorganismos a través del manejo de las cinéticas producto de la obtención de las magnitudes en los parámetros.

Los resultados de simulación obtenidos demuestran que los parámetros más importantes dentro del sistema para describir el cambio de abundancia relativa de la bacteria filamentosa corresponden a los relacionados con la de almacenamiento de sustrato y la tasa de respiración endógena para el caso de los organismos heterótrofos, mientras que, para el caso de *M. parvicella*, se tiene que los parámetros que definen una ventaja competitiva para la promoción de su crecimiento corresponden a la tasa de almacenamiento de lípidos y la constante de saturación de oxígenos. En el caso de los organismos autótrofos, se tiene que su presencia no influye significativamente con el comportamiento del lodo, y esto concuerda con que el diseño de la planta de tratamiento de aguas no fue construido para la formación de organismos nitrificantes.

Se puede concluir que *M. parvicella* es una bacteria que posee un sistema de almacenamiento de sustrato acondicionado para que este organismo sobreviva en condiciones de hambruna. Esto se sustenta en las bajas magnitudes de la tasa de respiración endógena de esta bacteria en comparación con los organismos coexistentes en el lodo. Esta particularidad le permite a la bacteria filamentosa mantenerse activa en situaciones donde el parámetro operacional de F/M disminuye, por lo cual, ante estos casos, aumenta la probabilidad de presentarse un evento de Bulking Filamentoso. Es importante tener presente el rol que cumple la variable operacional del tiempo de residencia celular (TRC). Este parámetro controla las fases del proceso metabólico de biomasa, donde se demuestra que, a mayores tiempos de retención, se promueve el crecimiento de microrganismos, lo cual impacta directamente en la cantidad de sólidos suspendidos que debe manejar la planta. En términos de Bulking, el modelo identifica que, *M. parvicella*, al poseer un crecimiento máximo de crecimiento menor que los otros organismos, los tiempos elevados de retención de células le favorecen su presencia, sumado a la baja tasa de decaimiento que posee, por lo cual, ante un estado de disminución de F/M y aumento del tiempo de retención, la bacteria filamentosa tendrá una alta ventaja competitiva de aumentar su abundancia relativa. Como última condición de operación estudiada se tiene al flujo de aireación, cuyos resultados demuestran que, el aumento en la magnitud de esta variable promovería un crecimiento en la abundancia relativa de la filamentosa. De forma contraria, la disminución del flujo de aireación demostraría una disminución en la predominancia de *M. parvicella*, lo cual sería contradictorio con respecto a lo estudiado en literatura. Es por esto que, se propone un modelo para estudios futuros, donde se incluye el crecimiento anóxico de la bacteria filamentosa y un fenómeno de inhibición por sustrato (Nitrito/Nitrato) en los organismos heterótrofos a través del uso del modelo de crecimiento microbiano de Haldane. Esta propuesta mostraría una tendencia al aumento en la abundancia relativa de *M. parvicella* en condiciones donde el flujo de aireación disminuye, lo que sugeriría que los eventos de Bulking Filamentoso presenciados operacionalmente en condiciones microaerofílicas se generarían debido a la capacidad de denitrificar de la bacteria filamentosa, su especificidad en el consumo de oxígeno y la desventaja competitiva que presentarían los organismos heterótrofos debido a la inhibición en el crecimiento por Nitrato. Este resultado se deja propuesto para estudios futuros para comprender de mejor forma la fisiología de *M. parvicella* y su relación con los eventos de Bulking Filamentoso.

Se plantean medidas de control en la formación del Bulking Filamentoso y los costos que estos significarían. Donde dichas propuestas se dividen en dos categorías distintas: las correctivas y preventivas. Las primeras tienen como objetivo solucionar el evento de Bulking Filamentosos en el momento en que este se presente mediante la adición de químicos en distintos puntos del proceso. Si bien estas medidas solucionarían de forma inmediata el problema de deficiencia en la decantación de lodos, su resultado no mitigaría de raíz el problema microbiológico que significan los episodios de Bulking Filamentoso, sino más bien su acción generaría una destrucción y/o deterioro de la totalidad de la biomasa del lodo activado, lo cual sería perjudicial para la operación y eficiencia del proceso de tratamiento de aguas. Lo anterior incluso podría traer problemas medioambientales, aumento en los costos del proceso y posibles multas por infracción en la calidad de efluentes. Los gastos monetarios asociados a estas medidas se relacionan únicamente con los costos de los insumos y su debido uso con las dosis recomendadas. Por otro lado, se proponen medidas preventivas, relacionadas con el aumento en el control diario de las variables de operación identificadas como críticas en la formación de Bulking Filamentoso según los resultados del modelo de simulación (F/M, TRC y flujo de aireación) y los ensayos de microscopía, donde su ejecución depende en generar un gasto monetario relacionado con una inversión que permita instalar los equipos necesarios en el laboratorio (CAPEX) y la operación de estos (OPEX). Como desventaja de las medidas preventivas es que su implementación no asegura con certeza que no se presenten eventos de Bulking en la planta, más aún, de no presentarse este problema operacional, tampoco se podría relacionar este hecho con la implementación de las medidas preventivas.

El proyecto estandariza la operación del sistema de lodos activados de la PTAS a partir del modelo construido. Relaciona las variables de operación con los eventos de Bulking Filamentoso desde un punto de vista operacional, microbiológico y de modelación, donde se concluye que la formación de estos eventos se debe a causa de múltiples factores que desencadenan en una perturbación en la estabilidad con la que deberían trabajar los sistemas de lodos activados. Estos factores se componen desde las estrategias adoptadas en la planta hasta el metabolismo de las especies. Por medio de este trabajo se proponen herramientas para estudios futuros relacionadas con la fisiología de *Microthrix parvicella*, una potencial estructura del modelo ASM3 para la simulación de eventos de Bulking Filamentoso que permitan desarrollar estrategias de mitigación de este problema que sean específicos de cada PTAS y los sistemas de lodos activados. En base a ello se concluye que este trabajo aporta en el conocimiento del funcionamiento de la PTAS ante eventos críticos que perturbarían el tratamiento de aguas, con ello, ante escenarios futuros, se podrán tomar acciones de control de forma eficiente, de esta manera, se estaría promoviendo el cuidado de los recursos hídricos y la importancia de este en el desarrollo sostenible en la sociedad.

Capítulo 6

6. Bibliografía

- [1] ESSBIO S.A., “Reporte Sostenibilidad ESSBIO 2018,” 2018.
- [2] Future Water, “Escasez de agua y sequías.” [Online]. Available: <https://www.futurewater.es/experiencia/escasez-de-agua-y-sequia/>.
- [3] Organization Nations United, “Agua.” [Online]. Available: <https://www.un.org/es/sections/issues-depth/water/index.html>.
- [4] BBC, “¿Cuán probable es que tu país sufra escasez de agua?” [Online]. Available: <https://www.bbc.com/mundo/noticias-49251961>.
- [5] Water Resource Institute, “Baseline Water Stress.” [Online]. Available: https://www.researchgate.net/figure/Baseline-Water-Stress-WRI-AQUEDUCT-Project_fig1_312497750.
- [6] S. Jiménez, S. J. Tomas, and S. Jiménez, “SERIE INFORME ECONÓMICO Realidad del Agua en Chile: ¿Escasez o falta de infraestructura?,” 2017.
- [7] H. Maureira and C. Jaramillo, “Radiografía del Agua. Brecha y riesgo hídrico en Chile.” *J. Chem. Inf. Model.*, vol. 53, no. 9, pp. 1689–1699, 2013.
- [8] F. Pérez, J. Vargas, J. Castillo, M. Gibbs, and K. Beltrán, “Estimación de la demanda actual, proyecciones futuras y caracterización de la calidad de los recursos hídricos en Chile,” 2017.
- [9] Flow Control, “5 key trends that will shape the future of water & wastewater.” [Online]. Available: <https://www.flowcontrolnetwork.com/home/article/15562818/5-key-trends-that-will-shape-the-future-of-water-wastewater>.
- [10] A. M. P. Martins, K. Pagilla, J. J. Heijnen, and M. C. M. Van Loosdrecht, “Filamentous bulking sludge - A critical review,” *Water Res.*, vol. 38, no. 4, pp. 793–817, 2004.
- [11] ONU, “Objetivos del desarrollo sostenible: Saneamiento de Aguas,” 2019. [Online]. Available: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/water-and-sanitation/>.
- [12] Institute of Water Association, “Wastewater treatment of the future: Health, water and resource protection.” [Online]. Available: https://www.iwapublishing.com/sites/default/files/9781780408361_537.pdf.
- [13] M. A. Alegria and E. Celedon, “Historia del sector sanitario chileno,” pp. 1–68, 2006.
- [14] N. Geographic, “The Urban Water Cycle,” 2019. [Online]. Available: <https://www.nationalgeographic.org/media/urban-water-cycle/>.
- [15] S. Direct, “Groundwater Recharge.” [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/topics/earth-and-planetary-sciences/groundwater-recharge>.
- [16] Z. Şen, “Climate Change, Droughts, and Water Resources,” *Appl. Drought Model. Predict. Mitig.*, pp. 321–391, 2015.
- [17] Instituto nacional de normalización, “NCh409/1.Of2005. Agua potable - Parte 1 -

Requisitos,” p. 13, 2005.

- [18] S. D. F. Water, “Water Consumption.” [Online]. Available: <https://www.safewater.org/fact-sheets-1/2017/1/23/water-consumption>.
- [19] FAO, “Contaminación agrícola de los recursos hídricos,” 2019. [Online]. Available: <http://www.fao.org/3/W2598S/w2598s03.htm>.
- [20] USGS, “Industrial Water Use,” 2015.
- [21] Ministerio Secretaría General de la Presidencia (MINSEGPRES), “Decreto n°90 SISS,” 2001.
- [22] E. Britannica, “Source of Water Pollution.” [Online]. Available: <https://www.britannica.com/technology/wastewater-treatment/Sources-of-water-pollution>.
- [23] FONDRIEST, “Turbidity, Total Suspended Solids & Water Clarity.” [Online]. Available: <https://www.fondriest.com/environmental-measurements/parameters/water-quality/turbidity-total-suspended-solids-water-clarity/>.
- [24] O. S. Encyclopedia, “Enviromental Science.” [Online]. Available: <https://oxfordre.com/environmentalscience/view/10.1093/acrefore/9780199389414.001.0001/acrefore-9780199389414-e-495>.
- [25] NIWA, “Nutrients and Wastewater.” [Online]. Available: https://niwa.co.nz/our-science/freshwater/tools/kaitiaki_tools/impacts/nutrients/causes-of-nutrient-overloading/nutrients-and-waste-water-treatment.
- [26] B. Zhang and X. Xu, “Activated sludge bacterial communities of typical wastewater treatment plants: distinct genera identification and metabolic potential differential analysisle.”
- [27] E. Britannica, “Wastewater Treatment.” [Online]. Available: <https://www.britannica.com/technology/wastewater-treatment>.
- [28] Banco Mundial, “Un 70% de las aguas residuales de Latinoamérica vuelven a los ríos sin ser tratadas.” [Online]. Available: <https://www.bancomundial.org/es/news/feature/2014/01/02/rios-de-latinoamerica-contaminados>.
- [29] Superintendencia de Servicios Sanitarios, “Informe de Coberturas Sanitarias,” p. siss.gob.cl, 2016.
- [30] Organización de Naciones Unidas, “Objetivo 6. Agua Limpia Y Saneamiento: Por Que Es Importante,” *Organ. las Nac. Unidas*, pp. 1–2, 2015.
- [31] E. Britannica, “Primary Treatment.” [Online]. Available: <https://www.britannica.com/technology/wastewater-treatment/Primary-treatment>.
- [32] D. D. (David D. Mara *et al.*, “Explaining the Activated Sludge Process,” *Water (Switzerland)*, vol. 3, no. 2, pp. 806–818, 2011.
- [33] L. Cegarra, “Regulación de un proceso biológico para tratamiento de aguas residuales utilizando el modelo de lodos activados ASM3,” 2014.

- [34] ORGANICA, “PRIMARY, SECONDARY, AND TERTIARY WASTEWATER TREATMENT: HOW DO THEY WORK?” [Online]. Available: <https://www.organicawater.com/primary-secondary-tertiary-wastewater-treatment-work/>.
- [35] Institute of Water Association, “Activated Sludge Process.” [Online]. Available: <https://www.iwapublishing.com/news/activated-sludge-process>.
- [36] G. Moeller and A. C. Tomasini, “Microbiología de lodos activados,” *J. Chem. Inf. Model.*, pp. 148–208, 2013.
- [37] O. A. M. C. Lorenzo Acosta Yaniris, *La Digestión Anaerobia. Aspectos teóricos. Parte I.* 2005.
- [38] D. Theobald, “Microorganisms in activated sludge.” [Online]. Available: <https://www.watertechonline.com/wastewater/article/15545467/microorganisms-in-activated-sludge>.
- [39] Y. Arcos and Universidad de Antioquia, “Microbiology of the activated sludge,” *Hechos Microbiológicos*, vol. 4, no. 2, pp. 117–122, 2013.
- [40] “Microthrix parvicella & Occurrence in activated sludge.” [Online]. Available: <https://www.asissludge.com/Scripts/F22211210.htm>.
- [41] “Rising Sludge, foaming & filamentous microorganism.” [Online]. Available: <http://web.deu.edu.tr/atiksu/ana52/ani4094.html>.
- [42] M. Richard and D. Ph, “Activated sludge: Microbiology & their control,” *20th Annu. USEPA Natl. Oper. Trainers Conf.*, pp. 1–21, 2003.
- [43] N. Diaz, “Importancia de los organismos filamentosos en el sistema de tratamiento de aguas residuales por lodos activados.” [Online]. Available: <http://eris.ingenieria.usac.edu.gt/revistaERIS/index.php/2016/04/24/importancia-de-los-microorganismos-filamentosos-en-el-sistema-de-tratamiento-de-aguas-residuales-por-lodos-activados/>.
- [44] “Sedimentation Facilities for the Activated-Sludge Process.” [Online]. Available: <http://web.deu.edu.tr/atiksu/ana52/ani4091.html>.
- [45] M. D. Group, “Activated Sludge Microbiology Problems And Solutions Real Science . Trusted Process . Proven Success .”
- [46] S. Rossetti, M. C. Tomei, P. H. Nielsen, and V. Tandoi, “‘Microthrix parvicella’, a filamentous bacterium causing bulking and foaming in activated sludge systems: A review of current knowledge,” *FEMS Microbiol. Rev.*, vol. 29, no. 1, pp. 49–64, 2005.
- [47] J. Wanner, *Activated Sludge: Bulking and Foaming Control*. Elsevier, 1994.
- [48] T. Hug, W. Gujer, and H. Slegrist, “Modelling seasonal dynamics of ‘Microthrix parvicella,’” *Water Sci. Technol.*, vol. 54, no. 1, pp. 189–198, 2006.
- [49] V. Tandoi, S. Rossetti, L. L. Blackall, and M. Majone, “Some physiological properties of an Italian isolate of ‘Microthrix parvicella,’” *Water Sci. Technol.*, vol. 37, no. 4–5, pp. 1–8, 1998.
- [50] H. Slijkhuis, “Phisiology of the filamentous bacterium Microthrix parvicella.”

- [51] J. L. Nielsen, P.H., Roslev, P., Dueholm, T. and Nielsen, “Microthrix parvicella, a specialized lipid consumer in anaerobic – aerobic activated sludge plants. *Water Sci. Technol.*,” pp. 46, 73–80., 2002.
- [52] M. Henze, C. P. L. G. Jr, W. Gujer, G. v. R. Marais, and T. Matsuo, “Activated sludge model no. 1 by IAWPRC,” no. 1, 1986.
- [53] A. J. J. Suárez, “Tema Modelación Dinámica de Fangos activos ASM1 - IWA,” pp. 1–28, 1970.
- [54] M. Mulas, “Modelling and control of the activated sludge process,” *J. Environ. Conserv. Eng.*, vol. 13, no. 9, pp. 661–665, 2006.
- [55] W. Gujer, M. Henze, M. Takahashi, and van L. Mark, “Activated Sludge Model NO.3,” *Water Sci. Technol.*, vol. 39, no. September, pp. 183–193, 1999.
- [56] M. E. De Arana-Sarabia, I. A. Vasiliadou, R. Vitanza, A. Cortesi, and V. Gallo, “Mathematical Simulation and Validation of a Wastewater Treatment Plant in Northern Italy,” *Environ. Eng. Sci.*, vol. 35, no. 10, pp. 1136–1147, 2018.
- [57] K. Blomberg *et al.*, “Development of an Extended ASM3 Model for Predicting the Nitrous Oxide Emissions in a Full-Scale Wastewater Treatment Plant,” *Environ. Sci. Technol.*, vol. 52, no. 10, pp. 5803–5811, 2018.
- [58] D. Kaelin, R. Manser, L. Rieger, J. Eugster, K. Rottermann, and H. Siegrist, “Extension of ASM3 for two-step nitrification and denitrification and its calibration and validation with batch tests and pilot scale data,” *Water Res.*, vol. 43, no. 6, pp. 1680–1692, 2009.
- [59] J. Makinia, K. H. Rosenwinkel, and L. C. Phan, “Modification of ASM3 for the determination of biomass adsorption/storage capacity in bulking sludge control,” *Water Sci. Technol.*, vol. 53, no. 3, pp. 91–99, 2006.
- [60] F. Yáñez, “Transferencia de oxígeno y aireación.” p. 67, 2000.
- [61] Feralco Lab, “Microthrix parvicella.” [Online]. Available: http://lab.feralco.com/index.php?id=8&tx_news_pi1%5Bnews%5D=35&cHash=ab2782dc6e1af464dbd0ad9ccbbcb673.
- [62] Eviromental Leverage, “Type 0914.” [Online]. Available: <https://www.environmentalleverage.com/Type 0914.htm>.
- [63] T. Glymph and W. Microbiologist, “Identification & Control of Filamentous Bacteria.”
- [64] N. Fan, M. Yang, S. Rossetti, C. Levantesi, and R. Qi, “Monitoring, isolation and characterization of Microthrix parvicella strains from a Chinese wastewater treatment plant,” *Water Sci. Technol.*, vol. 79, no. 7, pp. 1406–1416, 2019.
- [65] C. Levantesi *et al.*, “Phylogeny, physiology and distribution of ‘Candidatus Microthrix calida’, a new Microthrix species isolated from industrial activated sludge wastewater treatment plants,” *Environ. Microbiol.*, vol. 8, no. 9, pp. 1552–1563, 2006.
- [66] M. Barillo, “How alkalinity affects nitrification,” 2015. [Online]. Available: <http://cweawaternews.org/how-alkalinity-affects-nitrification/>.
- [67] Y. Liu, “Overview of some theoretical approaches for derivation of the Monod equation,”

- Appl. Microbiol. Biotechnol.*, vol. 73, no. 6, pp. 1241–1250, 2007.
- [68] Y. Liu, Y. M. Lin, and S. F. Yang, “A thermodynamic interpretation of the Monod equation,” *Curr. Microbiol.*, vol. 46, no. 3, pp. 233–234, 2003.
- [69] J. E. Alleman, J. Barnard, and J. A. Oleszkiewicz, “Density and Activity Characterization of Activated,” vol. 9372, no. October, 2006.
- [70] IWA, “Sludge Production.” [Online]. Available: <https://www.iwapublishing.com/news/sludge-production>.
- [71] S. J. Mcilroy *et al.*, “Metabolic model for the filamentous ‘Candidatus Microthrix parvicella’ based on genomic and metagenomic analyses,” *ISME J.*, vol. 7, no. 6, pp. 1161–1172, 2013.
- [72] N. Bertola, “Capítulo III.1. Cinética de Reacciones Biológicas,” no. May, 2014.
- [73] U. N. de Colombia, “Descripción matemática y análisis de procesos fermentativos.” [Online]. Available: <https://revistas.unal.edu.co/index.php/dyna/article/view/10251/13419>.
- [74] D. Mamais, E. Kalaitzi, and A. Andreadakis, “Foaming control in activated sludge treatment plants by coagulants addition,” *Glob. Nest J.*, vol. 13, no. 3, pp. 237–245, 2011.
- [75] D. of environmental Conservation, “Practical controls methods for activated sludge bulking and foaming,” *20th Annual USEPA National Operator Trainers Conference*, 2020. [Online]. Available: <https://www.dec.ny.gov/chemical/34373.html>.
- [76] E. V. Musvoto, M. T. Lakay, T. G. Casey, M. C. Wentzel, and G. A. Ekama, “Filamentous organism bulking in nutrient removal activated sludge systems. Paper 8: The effect of nitrate and nitrite,” *Water SA*, vol. 25, no. 4, pp. 397–407, 1999.
- [77] Z. N. Caravelli A., Contreras E., Giannuzzi L., “Evaluación de la toxicidad del cloro en microorganismos filamentosos y floculantes mediante técnicas respirométricas,” *Ing. Sanit. y Ambient.*, vol. 54, no. May 2014, pp. 37–40, 2001.
- [78] T. Matsumoto, “EFICIENCIA DEL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES POR LAGUNAS FACULTATIVAS E IMPLICACIONES EN LA SALUD PÚBLICA.” [Online]. Available: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0124-71072010000100009.
- [79] Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico del Agua, “Lagunas facultativas,” *Lagunas Fac.*, pp. 3-4-5-9, 2013.
- [80] S. Rolim, “Lagunas Aireadas Mecanicamente.” p. 42, 1999.
- [81] T. Irwin, “Lagunas aireadas. Fundamentos.” [Online]. Available: <http://www.engineeringfundamentals.net/LagunasAireadas/fundamentos.htm>.
- [82] Fundación Chile, “Tecnología de Lagunas Aireadas,” *FundacionChile*, p. 5, 2004.
- [83] AGUASRESIDUALES.INFO, “Usos y reparación de los emisarios submarinos.” [Online]. Available: <https://www.aguasresiduales.info/revista/blog/usos-y-reparacion-de-los-emisarios-submarinos>.
- [84] J. Mateo, “Emisarios Submarinos. ¿Solución o problema?” [Online]. Available:

<https://www.iagua.es/blogs/juan-mateo-horrhach/emisarios-submarinos-solucion-o-problema>.

- [85] P. Videau, “*Beggiatoa* sp. filaments.”
- [86] G. Klaudiusz, “*Nocardia pinensis*.” [Online]. Available: https://www.researchgate.net/figure/Nocardia-sp-J-27-authors-Fig-5-Nocardia-pinensis-authors_fig3_313628923.
- [87] M. Wagner, “*S. natans*.” [Online]. Available: https://www.researchgate.net/figure/S-natans-IF4-producing-long-unbranched-and-ensheathed-filaments-magnification-284_fig3_13415224.
- [88] AQUAFIX, “Common Filaments in Wastewater.” [Online]. Available: <https://team aquafix.com/common-wastewater-filaments/>.
- [89] ESSBIO, “Protocolo para observación microscópica de lodos activados Elementos de protección personal,” 2000.
- [90] D. A. Still, G. A. Ekama, M. C. Wentzel, T. G. Casey, and G. R. Marais, “Filamentous organism bulking in nutrient removal activated sludge systems. Paper 2: Stimulation of the selector effect under aerobic conditions,” *Water SA*, vol. 22, no. 1, pp. 97–114, 1996.
- [91] P. Pal, K. Khairnar, and W. Paunikar, “Causes and remedies for filamentous foaming in activated sludge treatment plant,” *Glob. NEST*, vol. 16, no. 1, pp. 1–11, 2014.
- [92] TEQUIPMENT, “Memmert UF110-230V Heating and Drying Ovens.” [Online]. Available: <https://www.tequipment.net/Memmert/UF110-230V/Laboratory-Oven/?rrec=true>.
- [93] IKA, “IKA Oven 125 basic dry.” [Online]. Available: <https://www.ika.com/en/Products-Lab-Eq/Drying-Ovens-csp-275/IKA-Oven-125-basic-dry-cpdt-20003215>.
- [94] VWR, “DRB200 Digital Reactor Block, 15 x 16 mm Vial Wells, Hach.” [Online]. Available: <https://us.vwr.com/store/product/12038204/dr200-digital-reactor-block-15-x-16-mm-vial-wells-hach>.
- [95] Forestry Suppliers, “Hach® DR 900 Multiparameter Portable Colorimeter.” [Online]. Available: https://www.forestry-suppliers.com/product_pages/products.php?mi=33180&itemnum=78136.
- [96] D. Diprolab, “Balanza Dig Elec-Econo 300G.” [Online]. Available: https://www.diprolab.cl/Productos_Listado.aspx?sSearch=balanza.
- [97] TEQUIPMENT, “Motic BA310 LED Binocular Compound Microscopes.” [Online]. Available: https://www.tequipment.net/Motic/BA310-LED-Binocular/Compound-Microscopes/?Source=googleshopping&gclid=EAIAIQobChMI7K20to_Q6AIVUwWRCh0YlwdREAQYASABEgJw6PD_BwE.
- [98] D. Diprolab, “Tinción Gram 4x1000ml.” [Online]. Available: https://www.diprolab.cl/Venta_TINCION_GRAM_4X1000ML_DIPROLAB-MTcwNDA=.aspx.
- [99] D. Diprolab, “Camara Neubauer doble retículo.” [Online]. Available:

https://www.diprolab.cl/Venta_CAMARA_NEUBAUER_DOBLE_RETICULO_SIMPLE_M0090-MTA5MjQ=.aspx.

- [100] HACH, “Hach LCK365 Organic Acids Cuvette Test 50-2500 mg/L.” [Online]. Available: <https://www.delagua.org/products/details/11628-Hach-LCK365-Organic-Acids-Cuvette-Test-50-2500-mgL>.
- [101] LabShop, “Hach Lange.” [Online]. Available: <https://www.lab-shop.co.uk/water-testing-4598/hach-lange-lck-cuvette-4527/lck365-organic-cuvette-426337.htm>.

Capítulo 7

7. Anexos

7.1. Demanda y Oferta hídrica en Chile para el año 2030

La Tabla 25 presenta una descripción en detalle de la demanda y oferta hídrica en todas las regiones del país para el año 2030. Como se puede apreciar en esta, el balance oferta demanda correspondiente a las regiones desde Arica y Parinacota hasta la Región Metropolitana, presenta valores negativos.

Tabla 25: Balance Oferta y Demanda Hídrica estimada para el año 2030 en el país [Mm³/año].

Región	Demanda	Oferta	Balance
XV-I	26	11	-17
II	35	1	-34
III	22	2	-20
IV	42	21	-21
V	64	37	-37
RM	125	93	-52
VI	119	185	36
VII	185	690	505
VIII	246	1.474	1.228
IX	38	937	899
XIV-X	18	4.640	4.622
XI	27	10.134	10.107
XII	16	10.124	10.108
Total País	963	28.349	27.386

7.2. Sistemas de Tratamiento de Aguas Servidas

En la industria de los Servicios Sanitarios de Aguas existen diferentes tecnologías para realizar el proceso de tratamiento de aguas servidas. Estas varían de acuerdo con diversos factores, como costo en la operación, antigüedad de la implementación del proceso, calidad del agua servida, entre otro. A continuación, se presentan 3 ejemplos de los sistemas más utilizados en la industria.

7.2.1. Lagunas Facultativas

Las lagunas facultativas corresponden a un sistema de degradación de materia orgánica mediante el aprovechamiento de un estado simbiótico de vida. Este estado lo llevan a cabo bacterias y algas, las cuales conviven en la laguna, considerada como un reactor biológico, de tal manera que los desechos de una especie, generados a partir de su metabolismo interno, sean los sustratos o el alimento de la otra especie.

En ese contexto, las bacterias tienen la naturaleza de ser heterótrofas y facultativas, es decir, pueden desarrollarse tanto en presencia o ausencia de oxígeno disuelto en el reactor. La presencia de oxígeno es ventajosa para el crecimiento de las bacterias (por sobre las condiciones anóxicas o anaeróbicas) por lo cual, también promueve la degradación de la materia, y con ello, el saneamiento de aguas servidas. Es por esta razón que, el diseño de los sistemas de lagunas facultativas prioriza generar una oxygenación adecuada del medio, proceso que se lleva a cabo mediante la fotosíntesis de las algas y/o la aeración generada desde el ambiente externo hacia el reactor.

En resumen, se entiende que el proceso simbiótico entre ambas especies se realiza mediante el consumo de materia orgánica por parte de las bacterias en condiciones aeróbicas. El metabolismo de estos microorganismos produce compuestos como nitratos, fosfatos y dióxido de carbono en grandes cantidades, los cuales son enviados hacia el medio extracelular. Estos componentes son utilizados por las algas para llevar a cabo su crecimiento, y de forma cíclica, la producción de oxígeno útil para las bacterias. El proceso descrito anteriormente, se puede esquematizar con el diagrama presentado en la Figura 39 [78].

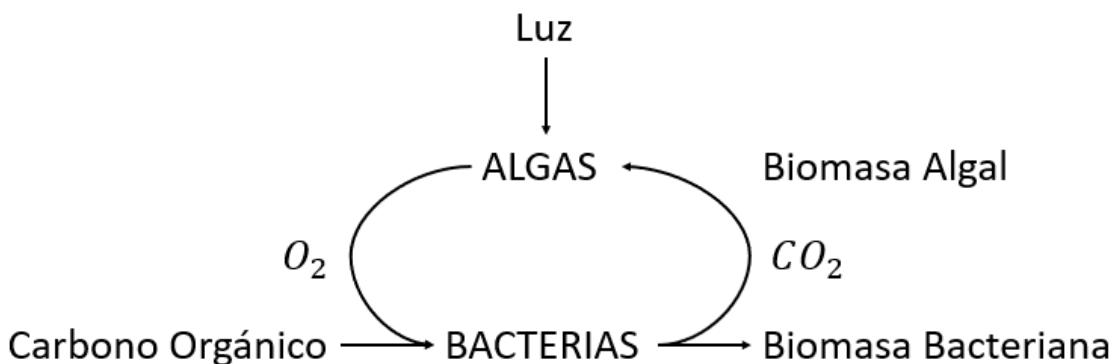


Figura 39: Esquema de las reacciones generadas en las lagunas facultativas. [79]

El buen funcionamiento de una laguna facultativa se puede observar a través de el desarrollo de un color verde en el medio acuoso del reactor (ver Figura 40), producido por la actividad fotosintética de las algas. Estas especies requieren de luz para generar oxígeno, y la difusión de este en el agua es muy lenta. La profundidad de un reactor biológico que utiliza el sistema de laguna facultativa posee una profundidad entre 1-2 metros para promover un ambiente oxigenado y evitar de esta manera la generación de una estratificación significativa en los niveles de disolución de este elemento (ver Figura 41). La eficiencia de este sistema corresponde a un 70-90% en la remoción de DBO₅ [79].



Figura 40: Fotografía de un sistema de Lagunas Facultativas [80].

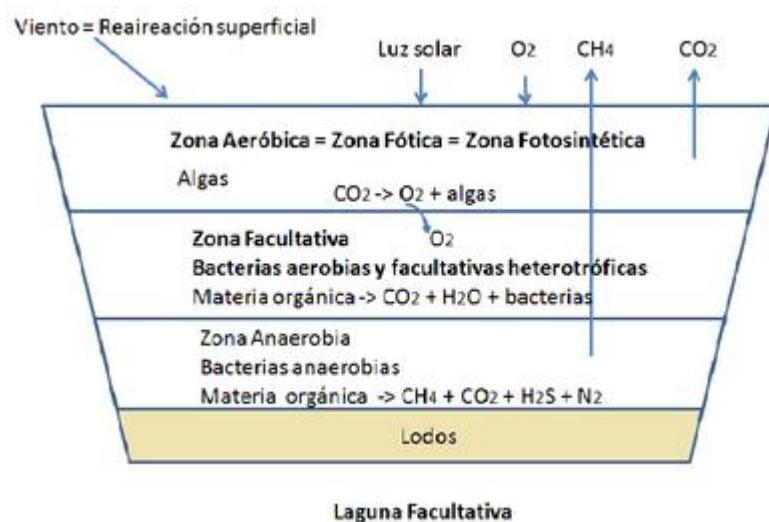


Figura 41: Estratificación de zonas y reacciones en una laguna facultativa [80].

7.2.2. Lagunas Aireadas

Los sistemas de lagunas aireadas se pueden entender como un mecanismo de transición entre los sistemas naturales, como las lagunas facultativas, y los sistemas convencionales como el de lodos activados. Este proceso opera con oxigenación mecánica, ya sea con aireadores flotantes, laterales o difusores fijos situados en el fondo del reactor. Esta aireación permite entregar el oxígeno necesario a las bacterias presentes en la laguna, las cuales son responsables de llevar a cabo el proceso de degradación de materia orgánica, inorgánica, producto del funcionamiento de su metabolismo interno.

Típicamente estos sistemas operan en flujo continuo, sin recirculación de lodos y, en algunos casos, prescinden de la presencia de una etapa de tratamiento primario. Lo anterior corresponde a una variable de decisión fundamental en materia de diseño de estos reactores biológicos, puesto que, en algunos casos se opera en base que la aireación genere una mezcla media, que permita producir una decantación de lodos en la misma laguna (esquema superior en la Figura 42), sin comprometer la degradación de materia orgánica, mientras que, también pueden operar a través de una aireación mayor que genere una mezcla completa, en aquellos casos, es necesario implementar una etapa de decantación de lodos (esquema inferior en la Figura 42) [80].

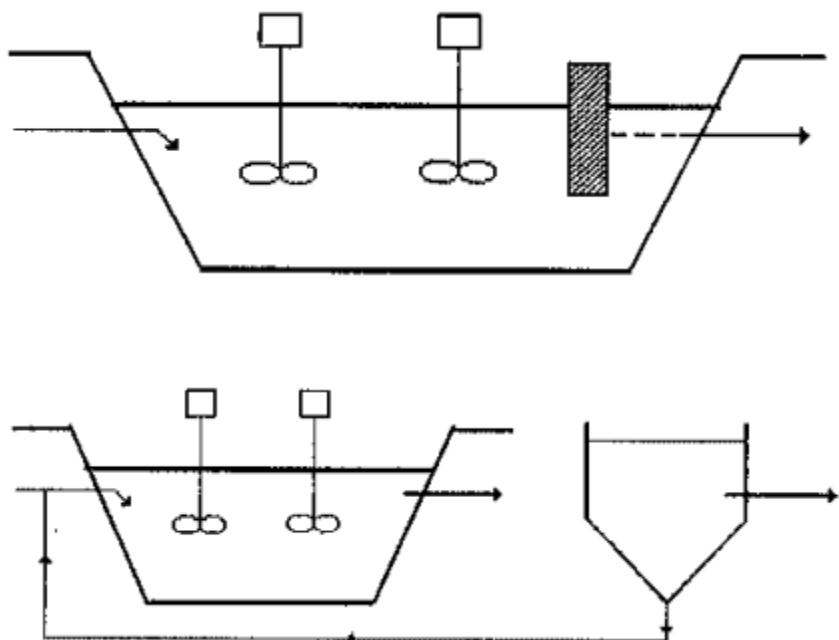


Figura 42: Esquema de tipos de operación del sistema de Lagunas Aireadas a) Operación sin etapa de sedimentación (agitación media en el reactor) b) Operación con independización de sedimentación de Lodos [81].

Se hace la distinción entre lagunas facultativas y aireadas puesto que, en la primera la oxigenación es producida por las algas, mientras que, en la segunda, se abastece de oxígeno de forma mecánica. La eficiencia de este sistema de lagunas corresponde a tener un porcentaje de remoción de DBO_5 de aproximadamente entre el 50-60%, presentando la desventaja de que en la corriente efluente existe una alta concentración de sólidos [82, 83].

7.2.3. Emisarios submarinos

Los emisarios corresponden a tuberías que conectan una captación de agua servida o pluvial terrestre hacia un punto de descarga en el fondo marino (ver Figura 43). El objetivo de este sistema es transportar la corriente efluente hacia distintos puntos de un cuerpo de agua infinito, en este caso el mar, de tal manera de reducir el impacto ambiental generado por las aguas recibidas. Para llevar a cabo esto, normalmente las tuberías se componen de múltiples orificios difusores, así, el sistema se aprovecha de la dispersión de la materia contaminante a través de la dispersión de la concentración de estas especies en los diferentes puntos de descarga. Este tipo de tecnología se basa en la difusión de la materia orgánica y la simbiosis con los organismos marinos. [84, 85]



Figura 43: Fotografía de un emisario submarino descargando aguas servidas en el mar [84].

En primera instancia, los emisores submarinos deberían ser utilizados para descargar una corriente efluente de agua, la cual haya pasado por un tratamiento anterior. Sin embargo, existen casos donde este sistema no contempla el saneamiento previo, y por ende, el agua servida se descarga directamente hacia el mar. Esta práctica podría ser riesgosa para la naturalidad del medioambiente involucrado, y su construcción e implementación se justifica cuando se prioriza el cuidado del sector costero, ya sea por efectos estéticos, turísticos, protección de ecosistemas como arrecifes de coral o cuidado de zonas de pesca y/o recolección de mariscos y otros productos del mar, en adición con la reducción de costos que implicaría la no implementación de una planta de tratamiento de aguas [84, 85].

El funcionamiento de un emisario submarino requiere de constante fiscalización de la calidad del efluente que se descarga hacia el medio que, en gran parte de los casos, no se realiza puesto que se confía en que el volumen de agua es de magnitudes significativamente altas en comparación con los caudales de descarga. Aquello ha traído de forma consecutiva el impacto hacia corrientes marinas, flora y fauna, la temperatura del agua, uso de costa y el caso más emblemático, la degradación de la posidonia oceánica en el mar mediterráneo Adicionalmente, pueden afectar al medio terrestre de existir anomalías en colapsos en la entrada, como inundación pluvial o rotura de tuberías [84, 85].

Esta propuesta de solución de descarga de aguas servidas se encuentra en coherencia con los años en los cuales estos sistemas fueron implementados, el siglo XX, en donde el planeta se desarrollaba en torno a una economía lineal y no se concebía la reutilización de residuos como una opción factible. En la actualidad, y junto con los avances de la ingeniería de procesos, esta tendencia se ha transformado en torno al vivir bajo una economía circular, en la cual los desechos presentes en el agua servida puedan ser tratados y, mejor aún, reutilizados, como se realiza por medio del sistema de lodos activados [84, 85].

7.3. Tipos de Protozoos en el Sistema de Lodos Activados

Los tipos de protozoos presentes en este sistema de tratamiento de aguas se dividen en 3 principales grupos:

1. **Ameba:** Corresponden a microorganismos con una forma indefinida. Se encuentran rodeadas por una capa transparente llamada *ecdoplasma* y una interna granular llamada *endoplasmas*. Cumplen un rol menor en los procesos de tratamiento donde usualmente su concentración decrece drásticamente junto con la disponibilidad de sustrato. Por ende, su presencia se encuentra en aguas con altas concentraciones de materia orgánica y baja eficiencia de depuración (fotografía izquierda en la Figura 44).
2. **Flagelados:** Son organismos que poseen un tamaño entre 5-20 um. Presentan estructuras ovaladas cuya movilidad se genera por sus flagelos. En procesos donde se genera una adecuada degradación de materia orgánica, estos microorganismos no presentan altas magnitudes de abundancia, por ende, su presencia se relaciona con el funcionamiento de lodos inestables (fotografía del medio en la Figura 44).
3. **Ciliados:** En los lodos activados existen diferentes subespecies de protozoos ciliados, tales como: *Epistylis sp*, cuya presencia se relaciona con una carga orgánica media de lodos activados; *Vorticella convalaria*, habitando sistemas con funcionamiento estable y buena sedimentabilidad, siendo la especie más frecuente de protozoos en las Plantas de Tratamiento de Aguas Servidas; *Opercularia sp*, siendo colonias de ciliados, con tallos ramificados, vacuolas y núcleos visibles, se encuentra típicamente en la entrada de efluentes industriales y procesos con baja sedimentación (fotografía derecha en la Figura 44).

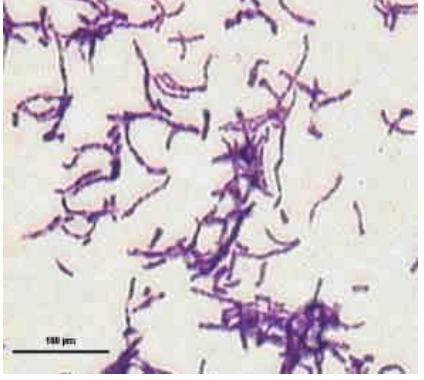
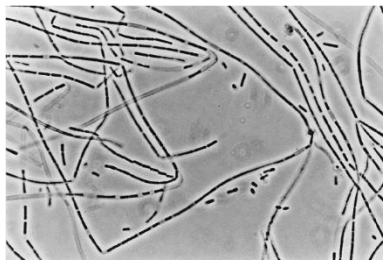


Figura 44: Fotografía en microscopio de protozoos observados en el lodo activado. De izquierda a derecha: a) Ameba b) Flagelado c) Ciliado fijo.

7.4. Tipos de Bacterias Filamentosas identificadas en los Lodos Activados

En observaciones de microscopía se han observado diversos tipos de bacterias filamentosas aparte de *M. parvicella*, estas presentan descripciones específicas para cada especie, las cuales son detalladas en la Tabla 26 [36].

Tabla 26: Especies de bacterias filamentosas identificadas en sistemas de Lodos Activados.

Nombre	Descripción	Fotografía
<i>Beggiatoa</i> sp. [85]	<ul style="list-style-type: none"> Bacteria constituida por filamentos rectos, móviles por deslizamiento y a partir de pequeñas sacudidas. Presenta acumulaciones de azufre, en forma de gránulos esféricos. No disponen de vaina, ni crecimiento epítito asociado. Esta bacteria es Gram negativo. 	
<i>Nocardia</i> sp. [86]	<ul style="list-style-type: none"> Pertenece al grupo de las microbacterias, constituida por filamentos cortos, irregularmente formados y muy ramificados. No presentan vaina exterior. Bacteria Gram positiva. 	
<i>Sphaerotilus natans</i> [87]	<ul style="list-style-type: none"> Bacteria relativamente larga, delgada, recta o débilmente curvada, compuesta de células redondeadas, y con una fina vaina que recubre el filamento. No presenta ramificaciones y cuando existen son falsas, sin citoplasma contiguo. Bacterias Gram negativas. 	
<i>Thiothrix I</i> [36]	<ul style="list-style-type: none"> Filamento recto o ligeramente curvado que se proyecta desde el flóculo. Presenta gránulos de azufre con forma esférica "in situ". Las células son rectangulares, con un diámetro del tricoma entre 1,4 y 2,5 [μm] 	

<i>Tipo 0041.</i> [88]	<ul style="list-style-type: none"> • Filamento recto o ligeramente curvado de grandes dimensiones. • Puede presentar abundante crecimiento epífito que dificulta la observación de sus células con forma rectangular o cuadrada. 	
<i>Tipo 0092.</i> [88]	<ul style="list-style-type: none"> • Presenta tricomas cortos, insertos en los flóculos, que normalmente no se observan en vivo. 	
<i>Tipo 0914.</i> [88]	<ul style="list-style-type: none"> • Bacteria constituida por filamentos rectos o curvados e inmóviles. • Los filamentos no presentan vaina ni ramificaciones. • Las células son cuadradas o rectangulares y no presentan constricciones. 	
<i>Tipo 1701.</i> [88]	<ul style="list-style-type: none"> • Bacteria constituida por individuos de longitud variable, inmóviles y a veces ligeramente curvados. • Presentan un abundante crecimiento epífito que dificulta la observación de las células. • Las células son bacilares y los filamentos Gram negativos. 	

7.5. Matriz Estequiométrica y de Composición del modelo

En la siguiente sección se presenta la matriz estequiométrica y de composición definida en el modelo a utilizar (ver Tabla 27). En el interior de la matriz se encuentran los coeficientes estequiométricos de transformación de las especies i realizada por los procesos j [48].

Tabla 27: Matriz estequiométrica del modelo utilizado en el estudio. En fondo blanco las especies disueltas; en fondo gris, las especies suspendidas.

$j \downarrow$	Especie $i \rightarrow$	1 S_O	2 S_I	3 S_S	4 S_{NH}	5 S_{N_2}	6 S_{NO}	7 S_{HCO}	8 X_I	9 X_S	10 X_H	11 X_{STO}	12 X_A	13 X_{ST}
Proceso		DQO	DQO	N	N	N	Mol	DQO	DQO	DQO	DQO	DQO	DQO	SST
Unidad \rightarrow														
1	Hidrólisis		f_{SI}	x_1	y_1			z_1		-1				$-i_{XS}$
Organismos Heterótrofos. Denitrificación														
2	Almacenamiento Aeróbico	x_2		-1	y_2			z_2					$Y_{STO,O2}$	t_2
3	Almacenamiento Anóxico			-1	y_3	$-x_3$	x_3	z_3					$Y_{STO,NO}$	t_3
4	Crecimiento Aeróbico	x_4			y_4			z_4			1	$-1/Y_{H,O2}$		t_4
5	Crecimiento Anóxico				y_5	$-x_5$	x_5	z_5			1	$-1/Y_{H,NO}$		t_5
6	Respiración Endógena Aeróbica	x_6			y_6			z_6	f_I		-1			t_6
7	Respiración Endógena Anóxica				y_7	$-x_7$	x_7	z_7	f_I		-1			t_7
8	Respiración Aeróbica de XSTO	x_8										-1		t_8
9	Respiración Anóxica de XSTO					$-x_9$	x_9	z_9				-1		t_9
Organismos Autótrofos. Nitrificación														
10	Nitrificación	x_{10}			y_{10}		$1/Y_A$	z_{10}					1	t_{10}
11	Respiración Endógena Aeróbica	x_{11}			y_{11}			z_{11}	f_I				-1	t_{11}
12	Respiración Endógena Anóxica				y_{12}	$-x_{12}$	x_{12}	z_{12}	f_I				-1	t_{12}
Matriz de Composición $l_{k,i}$														
k	Conservativos													
1	DQO [g DQO]	-1	1	1		-1,71	-4,57		1	1	1	1	1	-
2	Nitrógeno [g N]		i_{NSI}	i_{NSS}	1	1	1		i_{NXI}	i_{NXS}	i_{NBM}		i_{NBM}	-
3	Carga Iónica Mol +				1/14		1/14	-1						-
	Observables													
4	SST [g SST]								i_{STXI}	i_{STXS}	i_{STBM}	0,60	i_{STBM}	-

La matriz debe ser leída de la siguiente forma: $l_{k,i}$ es ubicada con el símbolo de i_{NSS} , lo cual indica que cada gramo de DQO en forma de Ss contiene i_{NSS} gramos de nitrógeno (N). El índice $k = 2$ se refiere al segundo componente, Nitrógeno; mientras que, el índice $i = 3$ corresponde a la tercera especie, el sustrato de degradación rápida (Ss). En el modelo, Ss se miden con unidades de DQO, por otro lado, el nitrógeno se mide con unidades de N. por ende, el parámetro estequiométrico i_{NSS} indica la composición relativa de nitrógeno presente en cada gramo de Ss.

Todos los elementos vacíos de la matriz poseen un valor igual a cero. Los valores de los parámetros x_j , y_j y z_j pueden ser obtenidos a través de la ecuación de conservación, válida para los tres elementos de conservación: DQO, Nitrógeno y la carga iónica:

$$\sum_i v_{j,i} * l_{k,i} = 0$$

$$\forall i \in [1,1]$$

Donde el término $v_{j,i}$ podrá corresponder a cada parámetro estequiométrico x_j , y_j o z_j .

Los coeficientes estequiométricos para X_{ST} pueden ser obtenidos a partir de la ecuación de composición:

Para Sólidos Suspendidos totales (X_{ST}):

$$v_{j,13} = \sum_i v_{j,i} \cdot l_{4,i}$$

$$\forall i \in [8,12]$$

De igual forma, si se requiere cuantificar la concentración de sólidos volátiles en el sistema, se pueden obtener los coeficientes estequiométricos para esta especie. Para lograr ello, es necesario definir los parámetros $l_{5,i}$ de la matriz de composición de las especies suspendidas del sistema al aporte en los sólidos volátiles:

$$v_{j,14} = \sum_i v_{j,i} \cdot l_{5,i}$$

$$\forall i \in [8,16]$$

Notar que, para obtener los parámetros $v_{j,14}$ a la matriz estequiométrica se le agregará una nueva columna.

7.6. Descripción del proceso de Tratamiento de Aguas de la PTAS de Los Ángeles

En la Figura 45 se presenta un diagrama de la totalidad de las etapas de la PTAS de Los Ángeles. Estas etapas son descritas a continuación de la figura.

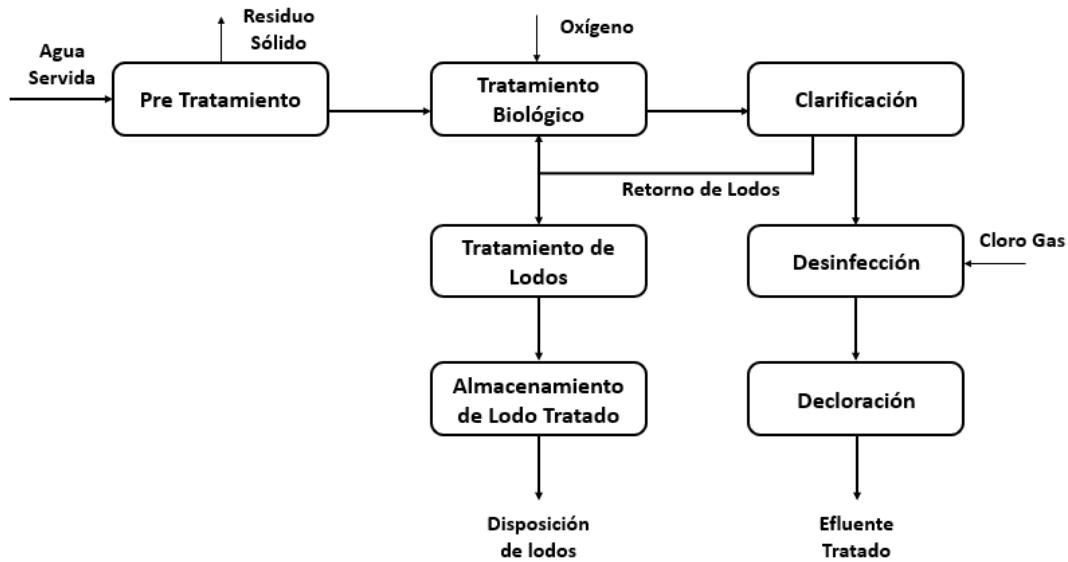


Figura 45: Diagrama de Bloques del proceso de tratamiento de aguas de la PTAS de Los Ángeles.

- 1. Pretratamiento:** Las aguas servidas ingresan a una Planta Elevadora de Aguas Servidas (PEAS), la cual contiene en su entrada un sistema de rejillas gruesas mecánicas, cuyo fin es la de impedir el paso de sólidos de tamaño mayor que pudieran obstruir las bombas del sistema. Una vez que estos sólidos son separados, el flujo efluente es elevado hacia el tratamiento primario de la PTAS por medio del uso de un sistema 2 + 1 de bombas. El caudal proveniente de la PEAS ingresa al tratamiento primario, cuya sección del proceso se compone de dos equipos que permiten realizar distintas operaciones mecánicas como desbasto fino mecanizado, compactación de basura, desarenado y lavado de arenas. El diseño de esta sección estima un tratamiento máximo de 720 [l/s] de agua.
- 2. Tratamiento Biológico:** Una vez concluido el tratamiento primario, el caudal de agua servida es sometido a un tratamiento biológico. Este tratamiento utiliza la tecnología de lodos activados, el cual se compone de un sistema de 4 reactores que poseen un volumen unitario de aproximadamente 4.600 [m³]. Todos los reactores operan en condiciones aeróbicas, estado que se logra a través del uso de un sistema de sopladores centrífugos de oxígeno instalados en el fondo de cada reactor. Estos se encuentran diseñados para insuflar un flujo de aire medio de 1.900 [kg O₂/h] (en condiciones estándar).

- 3. Clarificación:** Al concluir el tiempo de residencia en los reactores (≈ 12 [h]), el caudal saliente es descargado hacia una etapa de clarificación. El flujo de salida proveniente de los cuatro reactores es contenido en 4 clarificadores secundarios. Estos poseen un barredor de lodos de tipo aspirante en el Underflow para extraer el lodo compactado y así poder controlar los caudales de recirculación (RAS) y purga (WAS).

Para impulsar el flujo de RAS la planta posee un sistema de 4+2 bombas, las cuales se elevan el flujo hacia dos cámaras de recirculación y purga (2+1 bombas para cada sistema). Luego para impulsar el flujo WAS, cada cámara posee un sistema de 1+1 bombas que purgan el exceso de lodos hacia la línea de tratamiento de este.

- 4. Desinfección:** El sobrenadante extraído desde el overflow del clarificador secundario es impulsado hacia la etapa de desinfección. Este flujo es tratado a través de la adición de cloro gas, donde se añade una dosis de cloro de 5 [ppm] (máximo 10[ppm]) a caudal de máximo horario según el diseño de la planta. Esta mezcla se genera en una cámara de contacto, la cual envía este volumen de agua hacia un sistema de canales que permiten aumentar el tiempo de contacto entre el cloro y el agua tratada.
- 5. Declaración:** Finalmente se adiciona 3 ppm de SO₂ para eliminar el cloro residual en el agua. Completado este proceso, el caudal efluente es descargado hacia el Rio Quilque.

7.7. Elección del modelo de Simulación y Diferencias de ASM3 con sus versiones anteriores

La elección del modelo que simule el proceso de tratamiento de aguas de la planta de Los Ángeles se propone a partir de la interpretación del funcionamiento de esta [55]:

1. La PTAS de Los Ángeles corresponde a una planta de tratamiento que utiliza el sistema de lodos activados en sus etapas. En el tratamiento secundario, esta se compone de cuatro reactores biológicos, los cuales funcionan en condiciones aeróbicas. Junto con ello, la planta se compone por dos clarificadores secundarios, los cuales permiten compactar y separar los sólidos correspondientes al lodo activado.
2. El sistema de lodos activados de la PTAS de Los Ángeles posee una corriente de WAS y RAS.
3. El lodo activado en ningún momento es operado en condiciones anóxicas ni aeróbicas.
4. La PTAS no se encuentra diseñada para nitrificar, sin embargo, existen condiciones que generan una tasa de nitrificación a considerar.
5. La PTAS no se encuentra diseñada para remover el fósforo presente en el agua servida.
6. La remoción de nitrógeno amoniacial genera una disminución en la alcalinidad del sistema, condición que debe ser modelada.
7. La temperatura media diaria de la ciudad de Los Ángeles oscila entre los 10 y los 25 [°C].

El modelo ASM3 posee las siguientes características en comparación con las versiones anteriores de estos modelos (en particular con ASM1) [55]:

- ASM1 no incluye las cinéticas que simulan la variación de nitrógeno y alcalinidad debido al desarrollo de organismos heterótrofos.
- ASM1 incluye la cuantificación del nitrógeno en su forma disuelta y suspendida. Obtener este dato experimental no corresponde a un ensayo trivial, lo cual podría resultar complejo al momento generar una simulación.
- El modelo ASM1 incluyen el proceso de ammonificación en el sistema, lo cual no puede realmente ser cuantificado experimentalmente. En diversas versiones de ASM1 se ha eliminado la consideración de este proceso.
- ASM1 diferencia el tipo de material particulado inerte (X_i) proveniente del afluente o el decaimiento de biomasa. Realizar dicha diferenciación en dos fracciones resulta prácticamente imposible.
- El almacenamiento celular de polihidroxialcanoatos (PHA) se ha observado bajo condiciones aeróbicas y anóxicas en los sistemas de lodos activados. Este proceso no es considerado en el modelo ASM1
- ASM1 no está capacitado para predecir directamente los sólidos suspendidos presentes en el sistema de lodos activados.
- El modelo de ASM2 enfoca su estructura considerando la remoción de fósforo biológico, consideración que no ocurre en ASM3.
- Los procesos celulares en condiciones anaeróbicas no son considerados en ASM3.
- El modelo ASM3 permite diferenciar estrictamente el desarrollo celular de los organismos autótrofos y heterótrofos presentes en el lodo activado.
- El modelo ASM3 tiene la capacidad de simular el proceso de lodos activados entre los 10 – 20 [°C] como temperatura de operación.

7.8. Dinámica del funcionamiento del sistema de lodos activados con la inclusión de *M. parvicella*

1. La bacteria filamentosa responsable de generar el problema de Bulking Filamentoso presente en la PTAS es únicamente *Microthrix parvicella* [48].
2. El crecimiento de *M. parvicella* se genera exclusivamente en condiciones aeróbicas y su metabolismo corresponde al de un organismo heterótrofo [48].
3. De acuerdo con la literatura, *M. parvicella* posee una alta afinidad por moléculas lipídicas en comparación con los otros organismos presentes en el lodo activado. Por ende, la simulación de consumo de sustrato por parte de esta bacteria se realiza en función de que este organismo solo almacena ácido oleico [48].
4. Para almacenar el ácido oleico, *M. parvicella* debe hidrolizar las estructuras lipídicas de alta masa molecular, las cuales se encuentran presentes en la corriente afluente de aguas servidas. Al hidrolizar estas moléculas, se forma el ácido oleico, el cual posee una estructura molecular más simple y que se encuentra disponible para ser utilizado como sustrato por parte de la bacteria filamentosa. Por ende, se asume que en la corriente afluente no existen concentraciones de ácido oleico [48].
5. El almacenamiento de lípidos por parte de la bacteria filamentosa puede ser llevado a cabo en condiciones anóxicas y aeróbicas [48].
6. Los organismos heterótrofos no filamentosos pueden almacenar los sustratos lipídicos disponibles en el reactor biológico, sin embargo, estos no pueden hidrolizar los lípidos de alta masa molecular presentes en la corriente afluente [48].

Se debe tener suma consideración en que el diagrama de la Figura 19, intenta esquematizar de forma simple la dinámica del lodo activado, presentándolo como un proceso que ocurre de forma lineal. Sin embargo, se debe tener en cuenta que este desprecia diversos procesos de manera de ser más explicativo, y que, en el lodo activado, los procesos ocurren de forma simultánea y paralela. Este diagrama se puede explicar de la siguiente manera:

1. La totalidad sustrato de degradación lenta ($X_s + X_{LIP}$) posee un componente lipídico, el cual puede ser hidrolizado por *Microthrix parvicella* (X_{MIC}) para formar sustrato lipídico disuelto (S_{LIP}). Este tipo de sustrato puede ser consumido tanto por los organismos heterótrofos como por la bacteria filamentosa [48].
2. El resto de sustrato de degradación lenta, el no lipídico (X_s), es hidrolizado por los organismos heterótrofos para formar sustratos de degradación rápida (S_s). Este sustrato solo puede ser consumido por los organismos heterótrofos [48].

3. Posteriormente el modelo simula una etapa de almacenamiento de sustrato por parte de los organismos heterótrofos y *M. parvicella*, esto lo hace para poder cuantificar el aumento de material suspendido en la mezcla producto de este almacenaje (X_{STO} y X_{STOLIP}). Estos procesos se pueden realizar en condiciones anóxicas y aeróbicas, en ambos casos, se obtiene como producto nitrógeno amoniacial y un aumento en la alcalinidad del medio [48].
4. Paralelamente, los organismos nitrificantes realizan el proceso de nitrificación el cual exige un consumo de nitrógeno amoniacial, oxígeno y alcalinidad. Esto permite a los organismos autótrofos reproducirse y aumentar su biomasa [48].
5. Una vez almacenados los sustratos, estos pueden ser utilizados para producir nuevas unidades de biomasa heterótrofa y filamentosa. Es por ello que se da paso a los procesos de crecimiento celular, los cuales puede desarrollarse en condiciones anóxicas y aeróbicas. La primera exige un consumo de nitrito y nitrato en el modelo, mientras que, el segundo compromete un consumo de oxígeno. Se tiene que el crecimiento en condiciones anóxicas posee un rendimiento menor que el aeróbico y esto se debe a la diferencia del potencial reductor entre el oxígeno y el nitrito/nitrato [48].
6. Una vez desarrollado el crecimiento celular y alcanzar una fase estacionaria (recordar que el modelo simula el metabolismo de los microorganismos según la cinética de Monod) los procesos de respiración endógena empiezan a predominar. Estos procesos se desarrollan en condiciones aeróbicas y anóxicas, y están presentes en los 3 tipos de microorganismos considerados en el modelo. Estos procesos comprometen el consumo de oxígeno y nitrito/nitrato según las condiciones, cuyo desarrollo produce la muerte y decaimiento celular. Además, este proceso en el modelo, toma en cuenta un factor asociado a la convivencia los M.O. en el lodo activado. La muerte celular significa la formación de materia inerte suspendida (X_I), y con ello una acumulación de Sólidos Suspensivos decantables en el clarificador [48].

Es importante tener en cuenta que, la transformación de sustrato de degradación lenta (X_S), pasando por biomasa activa (X_H , X_A y X_{MIC}) a Sólidos inertes (X_I), disminuye la concentración de Sólidos Suspensivos y los contaminantes en el agua. Este hecho corresponde a la gran funcionalidad que posee el uso de la tecnología de lodos activados.

7.9. Parámetros Cinéticos y Estequiométricos del modelo escogido

En la siguiente sección se presentan los parámetros propuestos por el modelo escogido. Cabe destacar que los valores de estos corresponden a una primera aproximación de magnitud real, y no representan un valor estricto. En la Tabla 28 se presentan los parámetros cinéticos, mientras que, en la Tabla 29 los estequiométricos [48].

Tabla 28: Parámetros cinéticos propuestos por el modelo ASM3 + extensión de *M. parvicella*.

Parámetros Cinéticos			
Caracterización	Nomenclatura	Unidad	Valor ASM3
Hidrolisis de Sustrato por Organismos Heterótrofos			
Tasa de Hidrolisis de Sustrato	k_H	[g Xs / g XH d]	3
Constante de Saturación de Hidrolisis de Sustrato	K_X	[g Xs / g XH]	1
Organismos Heterótrofos			
Tasa de Almacenamiento de Sustrato	k_{STO}	[g Ss / g XH d]	5
Factor de Reducción Anóxica	η_{NO}	-	0,6
Constante de Saturación de Oxígeno	K_O	[g O ₂ / m ³]	0,2
Constante de Saturación de Nitrito/Nitrato	K_{NO}	[g NO ₃ ⁻ /m ³]	0,5
Constante de Saturación de Sustrato de degradación rápida	K_S	[g DQO / m ³]	2
Constante de Saturación de Almacenamiento de Sustrato	K_{STO}	[g XSTO / g XH]	1
Tasa de Crecimiento máximo de Organismos Heterótrofos	μ_H	[d ⁻¹]	2
Constante de Saturación de Amoniaco	K_{NH}	[g N / m ³]	0,01
Constante de Saturación de Bicarbonato	K_{HCO}	[mol HCO ₃ ⁻ /m ³]	0,1
Tasa de Respiración Endógena de O. Heterótrofos	$b_{H,02}$	[d ⁻¹]	0,2
Tasa de Respiración Endógena Anóxica de O. Heterótrofos	$b_{H,NO}$	[d ⁻¹]	0,1
Tasa de Respiración Endógena Aeróbica de Sustrato Almacenado	$b_{STO,02}$	[d ⁻¹]	0,2

Tasa de Respiración Endógena Anóxica de Sustrato Almacenado	$b_{STO,NO}$	$[d^{-1}]$	0,1
Tasa de Almacenamiento de Lípidos	$K_{STOLIP,H}$	$[g SLIP/g XH d]$	12
Constante de Saturación de Almacenamiento de Lípidos	$K_{SLIP,H}$	$[g DQO / m^3]$	10
Organismos Autótrofos			
Tasa de Crecimiento Máxima de Organismos Autótrofos	X_A	$[d^{-1}]$	1
Constante de Saturación de Amoniaco	$K_{A,NH}$	$[g N / m^3]$	1
Constante de Saturación de Oxígeno	$K_{A,O}$	$[g O_2 / m^3]$	0,5
Constante de Saturación de Bicarbonato	$K_{A,HCO}$	$[mol HCO_3^-/m^3]$	0,5
Tasa de Respiración Endógena Aeróbica	$b_{A,o2}$	$[d^{-1}]$	0,15
Tasa de Respiración Endógena Anóxica	$b_{A,NO}$	$[d^{-1}]$	0,05
Hidrolisis de Lípidos por <i>Microthrix parvicella</i>			
Tasa de Hidrolisis de Lípidos	$k_{H,LIP}$	$[d^{-1}]$	9
Constante de Saturación de Hidrolisis de Lípidos	K_{XLIP}	$[g XLIP / g(XH + XMIC)]$	1
Factor de reducción anóxico	η_{NO}	-	0,5
Tasa de Almacenamiento de Lípidos	$K_{STOLIP,MIC}$	$[g SLIP / g XMIC d]$	12
Constante de Saturación de Lípidos	$K_{SLIP,MIC}$	$[g DQO / m^3]$	10
Constante de Saturación de Oxigeno	$K_{O2,MIC}$	$[g O_2 / m^3]$	0,016
Constante de Saturación de Nitrito/Nitrato	$K_{NO,MIC}$	$[g N / m^3]$	0,04
Tasa de Crecimiento Máximo de <i>Microthrix parvicella</i>	μ_{MIC}	$[d^{-1}]$	0,42
Constante de Saturación de Lípido Almacenado	K_{STOLIP}	$[g XSTO/m3]$	0,1
Constante de Saturación de Amoniaco	$K_{NH,MIC}$	$[g N / m^3]$	0,01
Constante de Saturación de Bicarbonato	$K_{HCO,MIC}$	$[mol HCO_3^-/m^3]$	0,1
Tasa de Respiración Endógena	$b_{MIC,o2}$	$[d^{-1}]$	0,042

Aeróbica de <i>Microthrix parvicella</i>			
Tasa de Respiración Endógena Anóxica de <i>Microthrix parvicella</i>	$b_{MIC,NO}$	[d^{-1}]	0,021
Tasa de Respiración Endógena Aeróbica de Lípido Almacenado	$b_{STOLIP,O2}$	[d^{-1}]	0,042
Tasa de Respiración Endógena Anóxica de Lípido Almacenado	$b_{STOLIP,NO}$	[d^{-1}]	0,021

Tabla 29: Parámetros Estequiométricos propuestos por el modelo ASM3 + extensión de *M. parvicella*.

Parámetros Estequiométricos			
Caracterización	Nomenclatura	Unidad	Valor ASM3
Producción de S_I por Hidrolisis	f_{SI}	[$g S_I / g X_s$]	0
Producción de f_{XI} por respiración endógena de biomasa	f_{XI}	[$g X_I / g X_{H,A,MIC}$]	0,2
Rendimiento Aeróbico de almacenamiento por S_s	$Y_{STO,O2}$	[$g X_{STO} / g S_s$]	0,85
Rendimiento Anóxico de almacenamiento por S_s	$Y_{STO,NO}$	[$g X_{STO} / g S_s$]	0,80
Rendimiento Aeróbico de crecimiento de biomasa Heterótrofa	$Y_{H,O2}$	[$g X_H / g X_{STO}$]	0,63
Rendimiento Anóxico de crecimiento de biomasa Heterótrofa	$Y_{H,NO}$	[$g X_H / g X_{STO}$]	0,54
Rendimiento de crecimiento de biomasa Autótrofa	Y_A	[$g X_A / g S_{NO}$]	0,24
Nitrógeno contenido en S_I	i_{NSI}	[$g N / g S_I$]	0,01
Nitrógeno contenido en S_s	i_{NSS}	[$g N / g S_s$]	0,03
Nitrógeno contenido en X_I	i_{NXI}	[$g N / g X_I$]	0,02
Nitrógeno contenido en X_s	i_{NXS}	[$g N / g X_s$]	0,04
Nitrógeno contenido en X_{LIP} , S_{LIP} y X_{STOLIP}	i_{NLIP}	[$g N / g LIP$]	0
Nitrógeno contenido en biomasa (X_H , X_A y X_{MIC})	i_{NBM}	[$g N / g X_{H,A,MIC}$]	0,07
Aporte de X_I en X_{ST}	i_{TSXI}	[$g X_{ST} / g X_I$]	0,75

Aporte de X_s en X_{ST}	i_{TSXS}	$[g\ X_{ST} / g\ X_s]$	0,75
Aporte de XLIP y XSTOLIP en X_{ST}	i_{TSXLIP}	$[g\ X_{ST} / g\ LIP]$	0,346
Aporte de X_H, X_A y X_{MIC} en X_{ST}	i_{TSBM}	$[g\ X_{ST} / g\ X_{H,A,MIC}]$	0,9
Aporte de X_{STO} en X_{ST}	i_{TSSTO}	$[g\ X_{ST} / g\ X_{STO}]$	0,6
Rendimiento Aeróbico de almacenamiento de SLIP por X_H	$Y_{STOLIP,H,O2}$	$[g\ X_{STO} / g\ S_{LIP}]$	0,8
Rendimiento Anóxico de almacenamiento de SLIP por X_H	$Y_{STOLIP,H,NO}$	$[g\ X_{STO} / g\ S_{LIP}]$	0,7
Rendimiento Aeróbico de almacenamiento de SLIP por X_{MIC}	$Y_{STOLIP,MIC,O2}$	$[g\ X_{STOLIP} / g\ S_{LIP}]$	0,85
Rendimiento Anóxico de almacenamiento de SLIP por X_{MIC}	$Y_{STOLIP,MIC,NO}$	$[g\ X_{STOLIP} / g\ S_{LIP}]$	0,74
Rendimiento Aeróbico de crecimiento de X_{MIC} a partir de X_{STOLIP}	Y_{MIC}	$[g\ X_{MIC} / g\ X_{STOLIP}]$	0,8

7.10. Obtención de los coeficientes de la Matriz estequiométrica

Para incluir la presencia de la bacteria filamentosa *Microthrix parvicella* se utiliza la extensión presentada en la Tabla 30. Esta matriz se añade de tomar complementaria con lo presentado en la Tabla 27. Los SST y SSV corresponden a las especies 17 y 18 respectivamente.

Los coeficientes presentados en las Tablas 27 y 30 son calculados por medio de la ecuación de conservación presentada anteriormente, válida para calcular los coeficientes de transformación de DQO (x), Nitrógeno (y), alcalinidad (z), Sólidos Suspensos Totales (t) y Volátiles (s). Estos valores se muestran en la Tabla 31 [48, 55].

Tabla 30: Matriz de extensión del ASM3 para la inclusión de *Microthrix parvicella*.

$j \downarrow$	Especie $i \rightarrow$ Proceso Unidad \rightarrow	1 S_O O_2	2 S_I DQO	3 S_S DQO	4 S_{NH} N	5 S_{N2} N	6 S_{NO} N	7 S_{HCO} Mol	8 X_I DQO	11 X_{STO} DQO	13 X_{LIP} DQO	14 S_{LIP} DQO	15 X_{STOLIP} DQO	16 X_{MIC} DQO	
13	Hidrólisis lípidos				y_{13}				z_{13}				x_{13}		t_{13}
14	Almacenamiento Aeróbico lípidos Heterótrofos	x_{14}		-1	y_{14}				z_{14}						t_{14}
15	Almacenamiento Anóxico lípidos Heterótrofos			-1	y_{15}	$-x_{15}$	x_{15}	z_{15}							t_{15}
16	Almacenamiento Aeróbico lípidos <i>M.P</i>	x_{16}			y_{16}			z_{16}							t_{16}
17	Almacenamiento Anóxico lípidos <i>M.P</i>				y_{17}	$-x_{17}$	x_{17}	7							t_{17}
18	Crecimiento Aeróbico <i>M.P</i>	x_{18}			y_{18}			z_{18}							t_{18}
19	Respiración Endógena Aeróbica <i>M.P</i>	x_{19}			y_{19}			z_{18}							t_{19}
20	Respiración Endógena Anóxica <i>M.P</i>				y_{20}	$-x_{20}$	x_{20}	z_{19}							t_{20}
21	Respiración Aeróbica de XSTO <i>M.P</i>	x_{21}			y_{21}			z_{20}							t_{21}
22	Respiración Anóxica de XSTO <i>M.P</i>				y_{22}	$-x_{22}$	x_{22}	z_9							t_{22}

Tabla 31: Coeficientes estequiométricos del modelo utilizado en el proyecto.

x	y	z	t	s
$x_1 = 1 - f_{SI}$ $x_1 = 1$	$y_1 = i_{NXS} - x_1 \cdot i_{NSS}$ $- f_{SI} \cdot i_{NSI}$ $y_1 = 0,01$	$z_1 = \frac{y_1}{14}$ $z_1 = 0,001$	$t_1 = -1 \cdot i_{TSXI}$ $t_1 = -0,75$	$s_1 = -1 \cdot i_{SVXI}$ $s_1 = -0,75$
$x_2 = Y_{STO,O2} - 1$ $x_2 = -0,15$	$y_2 = i_{NSS}$ $y_2 = 0,03$	$z_2 = \frac{y_2}{14}$ $z_2 = 0,002$	$t_2 = Y_{STO,O2} \cdot 0,6$ $t_2 = 0,51$	$s_2 = Y_{STO,O2} \cdot 0,6$ $s_2 = 0,51$
$x_3 = \frac{Y_{STO,NO} - 1}{2,86}$ $x_3 = 0,07$	$y_3 = i_{NSS}$ $y_3 = 0,03$	$z_3 = \frac{y_3 - x_3}{14}$ $z_3 = 0,0071$	$t_3 = Y_{STO,NO} \cdot 0,6$ $t_3 = 0,48$	$s_3 = Y_{STO,NO} \cdot 0,6$ $s_3 = 0,48$
$x_4 = 1 - \frac{1}{Y_{H,O2}}$ $x_4 = -0,8$	$y_4 = -i_{NBM}$ $y_4 = -0,07$	$z_4 = \frac{y_4}{14}$ $z_4 = -0,005$	$t_4 = i_{TSBM} - \frac{0,6}{Y_{H,O2}}$ $t_4 = -0,05$	$s_4 = i_{SVBM} - \frac{0,6}{Y_{H,O2}}$ $s_4 = -0,2$
$x_5 = \frac{1 - \frac{1}{Y_{H,NO}}}{2,86}$ $x_5 = -0,28$	$y_5 = -i_{NBM}$ $y_5 = -0,07$	$z_5 = \frac{y_5 - x_5}{14}$ $z_5 = 0,016$	$t_5 = i_{TSBM} - \frac{0,6}{Y_{H,NO}}$ $t_5 = -0,21$	$s_5 = i_{SVBM} - \frac{0,6}{Y_{H,NO}}$ $s_5 = -0,36$
$x_6 = f_{SI} - 1$ $x_6 = -0,8$	$y_6 = i_{NBM} - f_I \cdot i_{NXI}$ $y_6 = 0,066$	$z_6 = \frac{y_6}{14}$ $z_6 = 0,005$	$t_6 = f_I \cdot i_{TSXI} - i_{TSBM}$ $t_6 = -0,75$	$s_6 = f_I \cdot i_{SVXI} - i_{SVBM}$ $s_6 = -0,6$
$x_7 = \frac{f_I - 1}{2,86}$ $x_7 = -0,28$	$y_7 = i_{NBM} - f_I \cdot i_{NXI}$ $y_7 = 0,066$	$z_7 = \frac{y_7 - x_7}{14}$ $z_7 = 0,025$	$t_7 = f_I \cdot i_{TSXI} - i_{TSBM}$ $t_7 = -0,75$	$s_7 = f_I \cdot i_{SVXI} - i_{SVBM}$ $s_7 = -0,6$
$x_8 = -1$	$y_8 = 0$	$z_8 = 0$	$t_8 = -0,6$	$s_8 = -0,6$
$x_9 = -\frac{1}{2,86}$ $x_9 = -0,35$	$y_9 = 0$	$z_9 = \frac{-x_9}{14}$ $z_9 = 0,025$	$t_9 = -0,6$	$s_9 = -0,6$
$x_{10} = 1 - \frac{4,57}{Y_A}$ $x_{10} = -18,04$	$y_{10} = -(\frac{1}{Y_A} + i_{NBM})$ $y_{10} = -4,24$	$z_{10} = \frac{y_{10}}{14} - \frac{1}{14 \cdot Y_A}$ $z_{10} = -0,6$	$t_{10} = i_{TSBM}$ $t_{10} = -0,9$	$s_{10} = i_{SVBM}$ $s_{10} = -0,75$
$x_{11} = f_I - 1$ $x_{11} = -0,8$	$y_{11} = i_{NBM} - f_I \cdot i_{NXI}$ $y_{11} = 0,066$	$z_{11} = \frac{y_{11}}{14}$ $z_{11} = 0,005$	$t_{11} = f_I \cdot i_{TSXI} - i_{TSBM}$ $t_{11} = -0,75$	$s_{11} = f_I \cdot i_{SVXI} - i_{SVBM}$ $s_{11} = -0,6$
$x_{12} = \frac{f_I - 1}{2,86}$ $x_{12} = -0,28$	$y_{12} = i_{NBM} - f_I \cdot i_{NXI}$ $y_{12} = 0,066$	$z_{12} = \frac{y_{12} - x_{12}}{14}$ $z_{12} = 0,025$	$t_{12} = f_I \cdot i_{TSXI} - i_{TSBM}$ $t_{12} = -0,75$	$s_{12} = f_I \cdot i_{SVXI} - i_{SVBM}$ $s_{12} = -0,6$
$x_{13} = 1 - f_{SI,LIP}$ $x_{13} = 1$	$y_{13} = -f_{SI} \cdot i_{NSI}$ $y_{13} = 0$	$z_{13} = \frac{y_{13}}{14}$	$t_{13} = -i_{TS,XLIP}$ $t_{13} = -0,35$	$s_{13} = -i_{SV,XLIP}$ $s_{13} = -0,35$

$x_{14} = -(1 - Y_{STOLIP,H,O2})$ $x_{14} = -0,2$	$y_{14} = 0$	$z_{13} = 0$ $z_{14} = \frac{y_{14}}{14}$ $z_{14} = 0$	$t_{14} = Y_{STOLIP,H,O2} \cdot i_{TS,XLIP}$ $t_{14} = 0,48$	$s_{14} = Y_{STOLIP,H,O2} \cdot i_{SV,XLIP}$ $s_{14} = 0,48$
$x_{15} = \frac{-(1 - Y_{STOLIP,H,NO})}{2,86}$ $x_{15} = -0,105$	$y_{15} = 0$	$z_{15} = \frac{y_{15} - x_{15}}{14}$ $z_{15} = 0,0075$	$t_{15} = Y_{STOLIP,H,NO} \cdot i_{TS,XLIP}$ $t_{15} = 0,42$	$s_{15} = Y_{STOLIP,H,NO} \cdot i_{SV,XLIP}$ $s_{15} = 0,42$
$x_{16} = -(1 - Y_{STOLIP,MIC,O2})$ $x_{16} = -0,15$	$y_{16} = 0$	$z_{16} = \frac{y_{16}}{14}$ $z_{16} = 0$	$t_{16} = Y_{STOLIP,MIC,O2} \cdot i_{TS,XLIP}$ $t_{16} = 0,24$	$s_{16} = Y_{STOLIP,MIC,O2} \cdot i_{SV,XLIP}$ $s_{16} = 0,24$
$x_{17} = \frac{-(1 - Y_{STOLIP,MIC,NO})}{2,86}$ $x_{17} = -0,091$	$y_{17} = 0$	$z_{17} = \frac{y_{17} - x_{17}}{14}$ $z_{17} = 0,0065$	$t_{17} = Y_{STOLIP,H,NO} \cdot i_{TS,XLIP}$ $t_{17} = 0,20$	$s_{17} = Y_{STOLIP,H,NO} \cdot i_{SV,XLIP}$ $s_{17} = 0,20$
$x_{18} = \frac{-(1 - Y_{MIC})}{Y_{MIC}}$ $x_{18} = -0,25$	$y_{18} = -i_{NBM}$ $y_{18} = -0,07$	$z_{18} = \frac{y_{18}}{14}$ $z_{18} = -0,005$	$t_{18} = i_{TSBM} - \frac{i_{TS,XLIP}}{Y_{MIC}}$ $t_{18} = 0,55$	$s_{18} = i_{SVBM} - \frac{i_{SV,XLIP}}{Y_{MIC}}$ $s_{18} = 0,4$
$x_{19} = -(1 - f_{XI})$ $x_{19} = -0,8$	$y_{19} = 1 - f_{XI} \cdot i_{NXI}$ $y_{19} = 0,066$	$z_{19} = \frac{y_{19}}{14}$ $z_{19} = 0,005$	$t_{19} = f_{XI} \cdot i_{TSXI} - i_{TSBM}$ $t_{19} = -0,75$	$s_{19} = f_{XI} \cdot i_{SVXI} - i_{SVBM}$ $s_{19} = -0,6$
$x_{20} = -\frac{(1 - f_{XI})}{2,86}$ $x_{20} = 0,28$	$y_{20} = 1 - f_{XI} \cdot i_{NXI}$ $y_{20} = 0,066$	$z_{20} = \frac{y_{20}}{14}$ $z_{20} = 0,025$	$t_{20} = f_{XI} \cdot i_{TSXI} - i_{TSBM}$ $t_{20} = -0,75$	$s_{20} = f_{XI} \cdot i_{SVXI} - i_{SVBM}$ $s_{20} = -0,6$
$x_{21} = -1$	$y_{21} = 0$	$z_{21} = 0$	$t_{21} = -i_{TS,XLIP}$ $t_{21} = -0,28$	$s_{21} = -i_{SV,XLIP}$ $s_{21} = -0,28$
$x_{22} = -\frac{1}{2,86}$ $x_{22} = -0,35$	$y_{22} = 0$	$z_{22} = \frac{-x_{22}}{14}$ $z_{22} = 0,025$	$t_{22} = -i_{TS,XLIP}$ $t_{22} = -0,28$	$s_{22} = -i_{SV,XLIP}$ $s_{22} = -0,28$

7.11. Balances de Masa en el sistema

La Tabla 32 y la Tabla 33 presentan las variables de diseño del reactor biológico y el clarificador secundario respectivamente. Estos valores serán útiles para la modelación del proceso y entregarán referencias de escalas de los parámetros representativos del sistema.

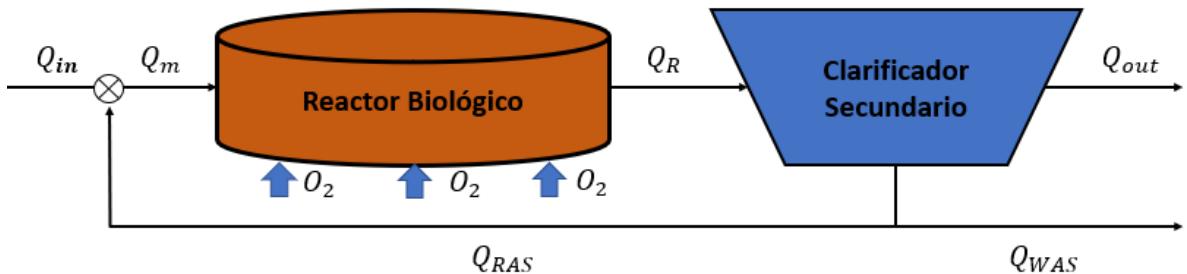


Figura 46: Esquema del sistema de Lodos Activados de la PTAS de Los Ángeles.

Notar que la nomenclatura adoptada en la Figura 20, refiere a las siguientes especies:

Q_{in} : Caudal afluente. [m^3/d]

Q_{RAS} : Caudal de Recirculación (RAS). [m^3/d]

Q_m : Caudal de mezcla entre el caudal afluente y el caudal RAS. [m^3/d]

Q_R : Caudal efluente del reactor biológico. [m^3/d]

Q_{WAS} : Caudal de purga (WAS). [m^3/d]

Q_{out} : Caudal efluente del clarificador secundario. [m^3/d]

Tabla 32: Condiciones del diseño unitario de los reactores biológicos de la PTAS de Los Ángeles.

Condición de operación	Unidad	Valor medio de diseño
Volumen unitario	[m^3]	4.600
Edad del lodo	[d]	5
Sólidos Suspensados	[mg/l]	3.130
Flujo de Aireación	[$kg O_2 / d$]	

Tabla 33: Condiciones del diseño unitario de los clarificadores secundarios de la PTAS de Los Ángeles.

Condición de Operación	Unidad	Valor medio de diseño
Caudal de entrada	[m^3/d]	19.212
Caudal de Recirculación	[m^3/d]	19.066
SST en efluente	[mg/l]	20
SST en el fondo	[mg/l]	6.236
Masa de lodos en Purga	[kg/d]	2.692
Concentración de Purga	[mg/l]	6.236

Para implementar el modelo se requiere hacer un balance de masa por etapa del proceso. El balance por equipo diferenciará las especies particuladas (X) de las especies disueltas (S).

Para obtener los balances de masa es necesario tomar los siguientes supuestos:

1. El reactor biológico se considera de mezcla completa.
2. Las reacciones del sistema ocurren únicamente en el reactor biológico de la PTAS. Esto excluye una posible reacción dentro del clarificador secundario y las corrientes de RAS y WAS.
3. Se considera que la eficiencia del clarificador secundario es del 100%, es decir, en la corriente efluente no existen componentes suspendidos puesto que todo el lodo es compactado en esta etapa.
4. El balance de masa no considera un factor que simule la compactación de lodos en el clarificador.

Hay que recordar que la nomenclatura utilizada para referirse a los equipos involucrados será la siguiente:

- Para denotar una condición en el Reactor Biológico se utilizará la letra R .
- Para denotar una condición en el Clarificador Secundario se utilizará la letra C .

Posteriormente, se realiza el balance de masa por etapas. Iniciando con las especies disueltas:

- Balance de masa en el clarificador secundario

$$S_R = S_C$$

- Balance de masa en el mezclador

$$Q_{in} \cdot S_{in} + Q_{RAS} \cdot S_{RAS} = Q_m \cdot S_m$$

- Balance de masa en el reactor biológico

- Componentes Disueltos:

El balance de masa en el reactor comienza con la siguiente expresión:

$$\frac{dS}{dt} = \frac{Q_m}{V_R} \cdot S_m - \frac{Q_R}{V_R} \cdot S + R_X$$

Reemplazando la expresión de balance de masa en el mezclador y clarificador

$$\frac{dS}{dt} = \frac{Q_{in} \cdot S_{in} + Q_{RAS} \cdot S}{V_R} - \frac{Q_R}{V_R} \cdot S + R_X$$

Luego, teniendo en cuenta que $Q_{RAS} = Q_m - Q_{in}$ y $Q_m = Q_R$:

$$\frac{dS}{dt} = \frac{Q_{in} \cdot S_{in} + (Q_m - Q_{in}) \cdot S}{V_R} - \frac{Q_m}{V_R} \cdot S + R_X$$

Haciendo la resta se obtiene el balance final para las especies disueltas disueltos:

$$\frac{dS}{dt} = \frac{Q_{in}}{V_R} \cdot (S_{in} - S) + R_X$$

Para el caso del oxígeno disuelto, el balance de masa para esta especie deberá incluir un término de transferencia de masa (F_{O_2}), el cual corresponderá a la siguiente expresión válida para aguas servidas [60]:

$$F_{O_2} = SOR \cdot \frac{[\alpha \cdot (C_{se} \cdot \beta \cdot P - C) \cdot 1,024^{(T-20)}]}{C_{S,20}}$$

Donde:

F_{O_2} : Flujo de aire entregado a la mezcla. $\left[\frac{mg}{l \cdot d} \right]$

SOR : Flujo aire insuflado. $\left[\frac{mg}{l \cdot d} \right]$

C_{se} : Concentración de saturación de oxígeno para aguas residuales. $[mg/l]$

$C_{S,20}$: Concentración de saturación de oxígeno para aguas claras a 20 $^{\circ}C$. $[mg/l]$

C : Concentración de oxígeno en la mezcla. $[mg/l]$

T : Temperatura del sistema. $[^{\circ}C]$

P : Factor de corrección por presión. $[ad]$

α : Factor de corrección alfa.

β : Factor de corrección beta.

- Componentes Suspensidos:

Para los componentes suspendidos se hace un balance de masa global tomando en cuenta la entrada al sistema (Q_{in}) y las salidas (Q_{out} y Q_{WAS}). En este punto se hacen presentes los supuestos 1, 2, 3 y 4. Recordar que en el efluente no existen componentes suspendidos (supuesto 2)

$$\frac{dX}{dt} = \frac{Q_{in} \cdot X_{in}}{V_R} - \frac{Q_{WAS} \cdot X}{V_R} + R_X$$

7.12. Protocolos de laboratorio realizados en el estudio

7.12.1. Ensayos de Tinción Gram

En la presente sección se presenta el procedimiento para realizar el ensayo de tinción Gram [89].

7.12.1.1. Materiales

- Cristal Violeta.
- Lugol.
- Alcohol.
- Safranina.
- Microscopio Motic modelo B310.
- Pipeta desechable
- Portaobjetos de microscopio
- Placa de vidrio para microscopio

7.12.1.2. Metodología

1. Tomar una gota de la muestra a estudiar con una pipeta desechable y depositarle sobre un portaobjetos limpio y seco.
2. Espesar la gota de la muestra hasta quedar de forma homogénea.
3. Flamear el portaobjetos por la cara opuesta a donde está depositada la muestra, evitando que se caliente en exceso.
4. Repetir hasta que la muestra quede totalmente seca sobre el vidrio.
5. Teñir la muestra con 1 a 2 gotas de Cristal violeta. Dejar incubar por 2 minutos. Lavar suavemente con agua destilada.
6. Fijar la muestra con 1 a 2 gotas de Lugol. Dejar incubar por 1 minuto. Lavar suavemente con agua destilada.
7. Lavar con alcohol por no más de 30 segundos, para eliminar el exceso de colorante.
8. Teñir con 1 a 2 gotas de Safranina. Dejar incubar por un minuto y luego
9. lavar con agua destilada. Si la muestra estudiada queda de color azul, corresponde a un microorganismo Gram positivo (Gram +). Si la muestra queda de color rojo, corresponde a un microorganismo gram negativo (Gram -).
10. Para identificación de microorganismos y/o filamentos, observar la muestra a 100x bajo inmersión.

7.12.1.3. Resultados

Los resultados de los ensayos de tinción Gram se presentan a continuación:

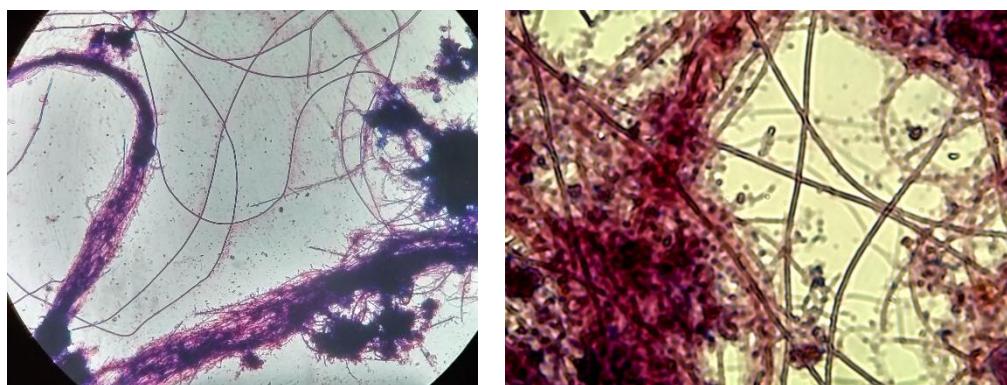


Figura 49: Fotografías 1 y 2 de resultados de ensayos de tinción Gram. Cada uno tomado en un flóculo del lodo activado del Reactor Biológico.

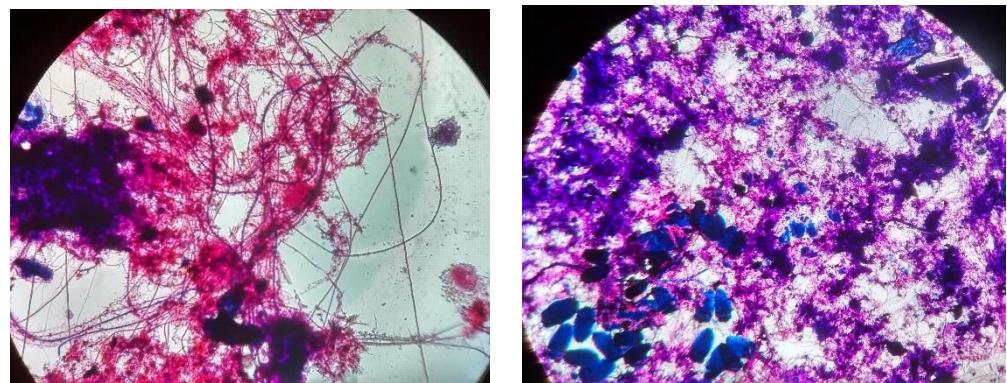


Figura 47: Fotografías 3 y 4 de resultados de ensayos de tinción Gram. Cada uno tomado en un flóculo del lodo activado del Reactor Biológico.

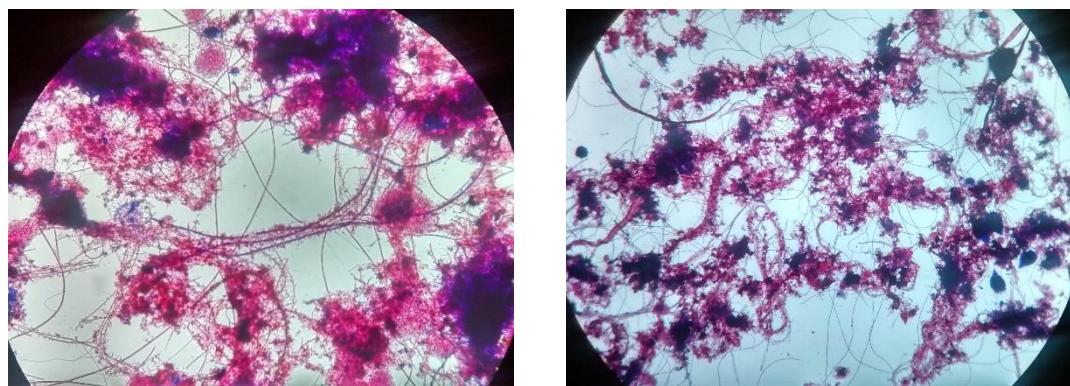


Figura 48: Fotografías 5 y 6 de resultados de ensayos de tinción Gram. Cada uno tomado en un flóculo del lodo activado del Reactor Biológico.

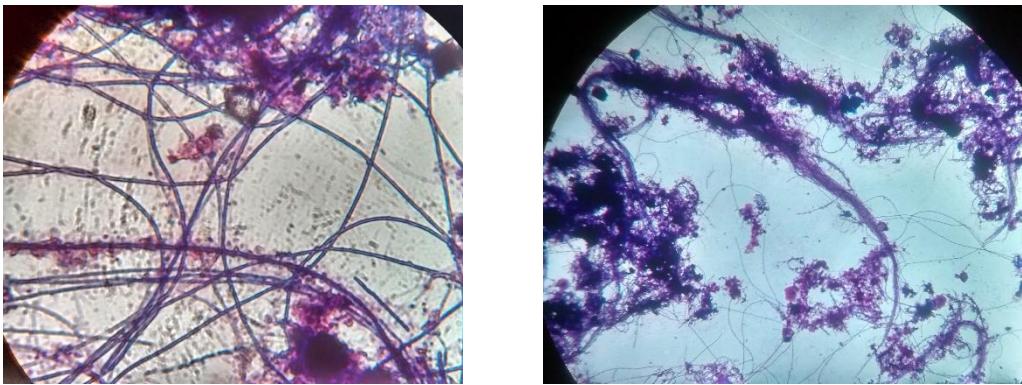


Figura 50: Fotografías 7 y 8 de resultados de ensayos de tinción Gram. Cada uno tomado en un flóculo del lodo activado del Reactor Biológico.

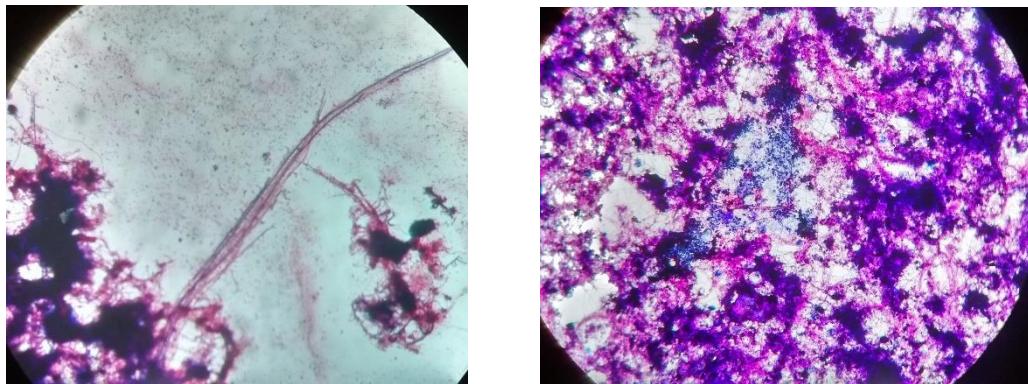


Figura 51: Fotografías 9 y 10 de resultados de ensayos de tinción Gram. Cada uno tomado en un flóculo del lodo activado del Reactor Biológico.

7.12.2. Conteo Microscópico en muestra *in vivo*

En la siguiente sección se presenta la metodología para realizar el conteo de organismos en una muestra *in vivo* del lodo activado del reactor biológico de la PTAS.

7.12.2.1. Materiales

- Microscopio Motic modelo B310
- Lente de microscopio en 10x para observación con aceite de inmersión
- Pipeta desechable
- Portaobjetos de microscopio
- Placa de vidrio para microscopio
- Cámara Neubauer
- Aceite de inmersión

7.12.2.2. Metodología

1. Tomar una muestra fresca del reactor biológico.
2. Homogeneizar la mezcla procurando que los flóculos formados la muestra no se rompan y que su concentración se perciba homogénea en el medio.
3. Con la pipeta desechable tomar una muestra de la mezcla, esta debe tener un volumen que pueda ser contenido en la cámara Neubauer junto con el cubremuestra.
4. Depositar la muestra en la Cámara Neubauer.
5. Insertar la Cámara Neubauer con la muestra en el sitio de observación del microscopio.
6. Utilizar la lente del microscopio en 10x para aceite de inmersión. Esta debe ser previamente instalada y calibrada, para luego ser untada en aceite de inmersión y así, mejorar la calidad de observación.
7. Enfocar un flóculo en suspensión que se encuentre idealmente dentro de las casillas centrales de la cámara. Una vez enfocado, empezar el conteo.
8. El conteo consiste en identificar los organismos que se encuentren activos en el flóculo. Para observarlos, puede ser de ayuda estudiar las especies que podrían existir en el lodo, detallados en la sección 2.3.2.
9. En cuanto al conteo de bacterias filamentosas, tomar como una unidad de organismo, el comienzo de un filamento encontrado en el flóculo.
10. Sumar todos los organismos contados, representando el total de ellos. Luego el conteo total de filamentos, dividirlo por el total de organismos, obteniendo de esta forma un valor aproximado experimental de la abundancia relativa de la presencia de bacterias filamentosas en el lodo.

7.12.2.3. Resultados

Inicialmente se presentan las fotografías obtenidas a un enfoque de 10x en el microscopio. Estas son tomadas en muestras de lodo activado en el reactor.

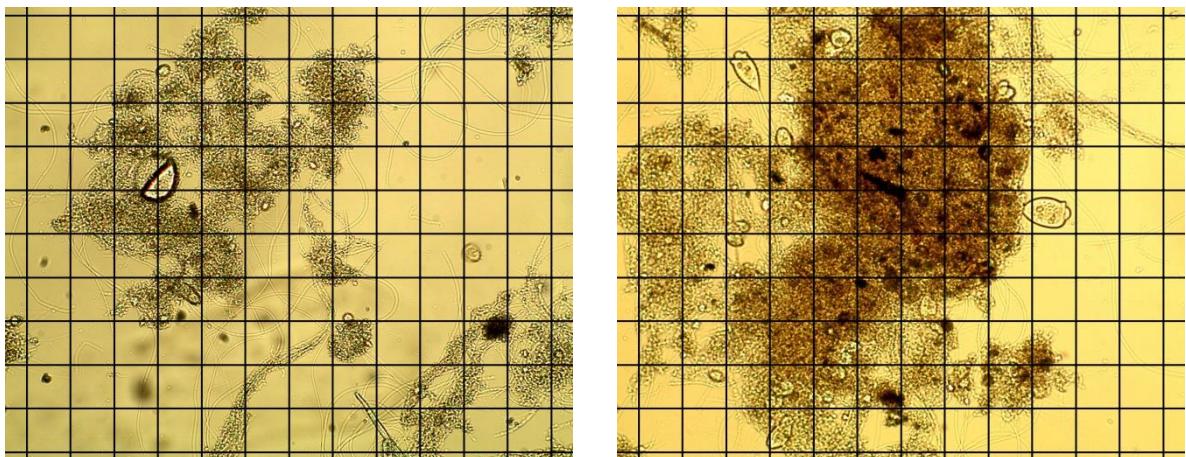


Figura 52: Fotografías 1 y 2 de resultados de los ensayos de conteo de una muestra in vivo. Cada uno tomado en un flóculo del lodo activado del Reactor Biológico.

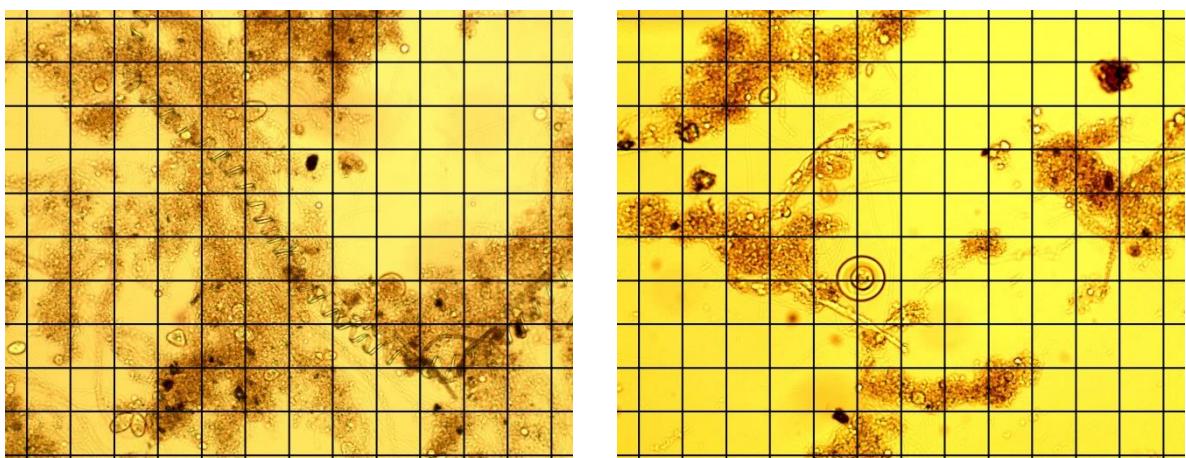


Figura 53: Fotografías 3 y 4 de resultados de los ensayos de conteo de una muestra in vivo. Cada uno tomado en un flóculo del lodo activado del Reactor Biológico.

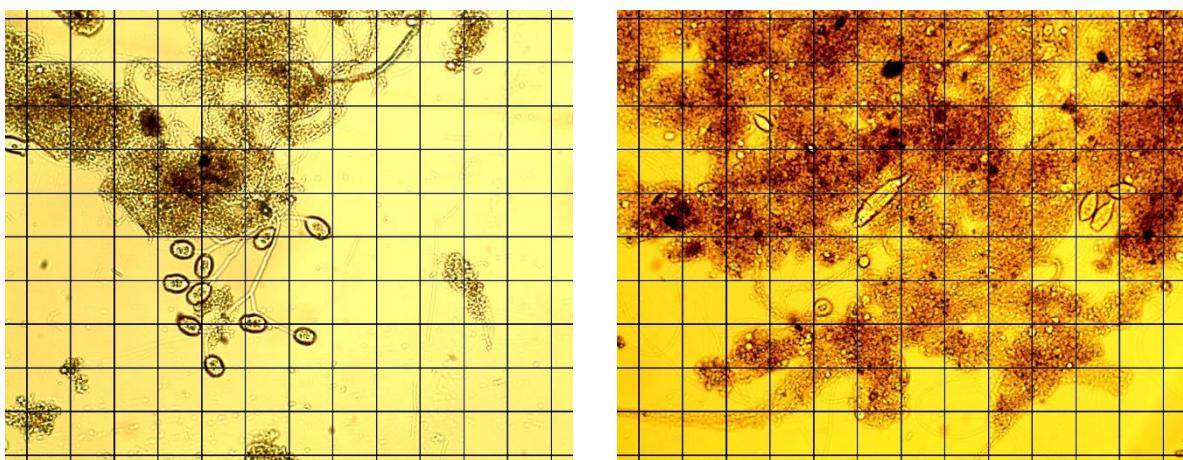


Figura 55: Fotografías 5 y 6 de resultados de los ensayos de conteo de una muestra in vivo. Cada uno tomado en un flóculo del lodo activado del Reactor Biológico.

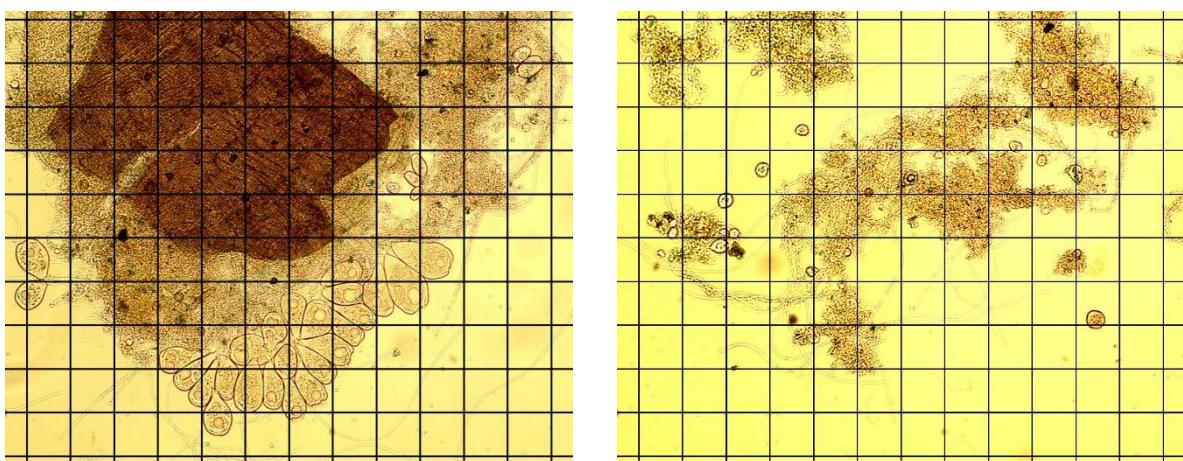


Figura 54: Fotografías 7 y 8 de resultados de los ensayos de conteo de una muestra in vivo. Cada uno tomado en un flóculo del lodo activado del Reactor Biológico.

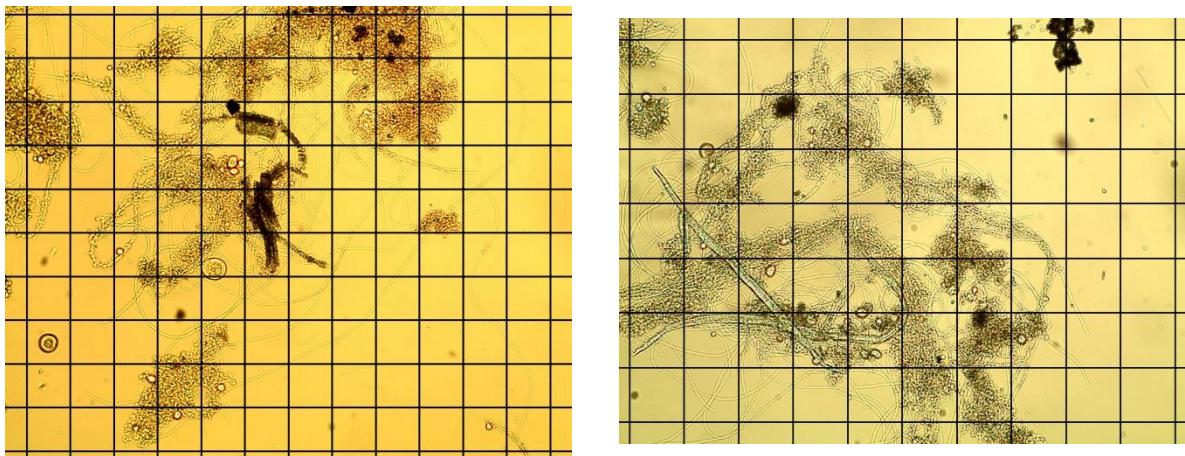


Figura 56: Fotografías 9 y 10 de resultados de los ensayos de conteo de una muestra *in vivo*. Cada uno tomado en un flóculo del lodo activado del Reactor Biológico.

Posteriormente, se presenta un ejemplo de cálculo del conteo microscópico, junto con una cuantificación de la abundancia relativa de filamentos en el flóculo.

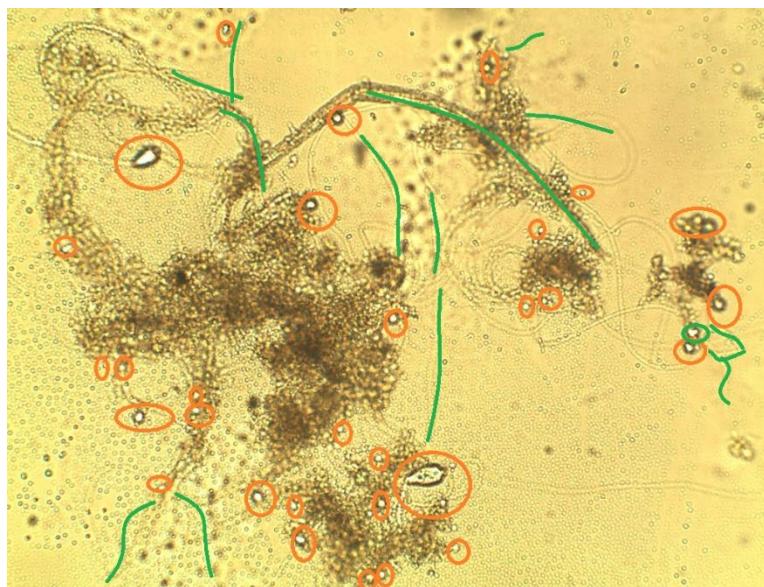


Figura 57: Fotografía de ejemplo de cálculo del conteo e identificación de organismos en un flóculo del lodo activado del reactor biológico.

En la Figura 57 se muestran dos tipos de reconocimientos. Las líneas verdes corresponden a los filamentos individuales que se lograron observar. En este ejemplo, se identificaron 13 filamentos; mientras que, los círculos rojos, corresponden a organismos varios, o restantes, presentes en la muestra *in vivo*, los cuales, en este ejemplo suman 31. Por ende, al ser 44 estructuras las identificadas, se tiene que la abundancia de filamentos sobre la totalidad de organismos será $14/44 \approx 30\%$.

Cabe destacar que, para realizar estos ensayos, se hizo el reconocimiento de organismos vivos durante la observación en el laboratorio, la identificación y conteo, se hizo a través de las capturas fotográficas.

Tabla 34: Resultados del conteo microscópico, y posterior cálculo de la abundancia relativa de filamentos.

Muestra	Organismos varios	Filamentosos contados	Total	Abundancia
1	36	7	43	19%
2	27	11	38	41%
3	51	9	60	18%
4	27	12	39	44%
5	27	10	37	37%
6	35	13	48	37%
7	35	12	47	34%
8	17	6	23	35%
9	32	13	45	41%
10	34	12	46	35%
11	18	6	24	33%
12	18	7	25	39%
13	25	7	32	28%
14	22	7	29	32%
Promedio	29	9	38	34%

Como se aprecia en la Tabla 34 el promedio de la abundancia relativa de filamentos es 34%, mientras que el máximo observado corresponde a 44%, mientras que, el mínimo, 19. Cabe destacar que este procedimiento podría estar sesgando la presencia de otro microrganismo o filamento. De forma contraria, estar sobre determinando la presencia de algún organismo. Por ende, el procedimiento podría presentar errores de medición que alejan lo obtenido de la realidad.

7.12.3. Procedimiento de cuantificación de nitrógeno

7.12.3.1. Metodología Nitrógeno Amoniacal

Para cuantificar el Nitrógeno amoniacal del sistema, se procedió realizar la metodología 10072 de la empresa *HACH*, utilizando los reactivos y los equipos mencionados en aquel protocolo, los cuales se encontraban disponibles en el laboratorio de la planta. Las muestras utilizadas se extrajeron desde la corriente afluente al reactor, y una muestra de la solución líquida del reactor biológico tomadas al medio día.

7.12.3.2. Metodología Nitrito

Para cuantificar el Nitrito del sistema, se procedió realizar la metodología 8507 de la empresa *HACH*, utilizando los reactivos y los equipos mencionados en aquel protocolo, los cuales se encontraban disponibles en el laboratorio de la planta. Las muestras utilizadas se extrajeron desde la corriente afluente al reactor, y una muestra de la solución líquida del reactor biológico tomadas al medio día.

7.12.3.3. Metodología Nitrato

Para cuantificar el Nitrato del sistema, se procedió realizar la metodología 8039 de la empresa *HACH*, utilizando los reactivos y los equipos mencionados en aquel protocolo, los cuales se encontraban disponibles en el laboratorio de la planta. Las muestras utilizadas se extrajeron desde la corriente afluente al reactor, y una muestra de la solución líquida del reactor biológico tomadas al medio día.

7.13. Estructura de Modelo de Simulación

En la siguiente sección se describen los códigos construidos en Matlab que estructuran el modelo de simulación del proyecto.

7.13.1. Estructuras de tipo *Main*

- ***Main_Coeficientes***: Código que contiene los valores de los parámetros estequiométricos del modelo. Este código llama a la función Matriz, lo cual permite obtener los coeficientes de la matriz estequiométrica.
- ***Main_DatosExperimentales***: Este código carga en el modelo los datos experimentales obtenidos a través de los ensayos en el laboratorio y los recopilados a través del SIPT. Junto con ello, obtiene una fragmentación teórica de la DQO del caudal afluente, utilizando la función *fraccion*. Finalmente, permite determinar las condiciones iniciales de las especies para ser ejecutados en *Main_LosAngeles*.
- ***Main_LosAngeles***: Código que simula el sistema de lodos activados de la PTAS Los Ángeles con valores promedio de la totalidad de las especies, esto lo realiza llamando a la función *Transiente_ReactorBiologico_LA* por medio de la función de *ode45*. El tiempo de simulación corresponde a un tiempo razonable hasta que las 18 especies estudiadas alcancen el estado estacionario. Al cumplir el estado estacionario, los valores de estas

especies se recopilan para ser utilizadas como condición inicial en los códigos de *Main_LosAngeles_SS* y *Main_Calibracion*.

- ***Main_LosAngeles_SS*:** Este código permite realizar una fragmentación de la DQO para todos los instantes de tiempo de los datos experimentales. Adicionalmente, simula la dinámica del sistema de lodos activados de la PTAS Los Ángeles contemplando la variación de los valores de las especies en la entrada del reactor de forma diaria, lo cual lo hace llamando a la función *PTAS_ReactorBiologico_LA* por medio de la función de *ode45*. Aquello entrega una aproximación a como se está comportando el modelo en su versión previa a la calibración de parámetros.
- ***Main_Calibracion*:** Este código minimiza la función *Calibración* a través del sistema de optimización de *fmincon*. Esto permite generar la calibración de los valores de los parámetros escogidos. La finalización de este main entrega el valor de dichos parámetros.
- ***Main_SimulacionCalibrada*:** Una vez encontrados los valores calibrados de los parámetros elegidos, se utiliza este código para verificar la dinámica del modelo. De esta manera se pueden contrastar los valores de los datos experimentales de las especies con los entregados por este modelo. Para lograr esto nuevamente se llama a la función *PTAS_ReactorBiologico_LA* por medio del sistema de *ode45*.
- ***Main_SensibilidadLA*:** Al obtener el modelo con los valores de los parámetros escogidos calibrados, se lleva a cabo un análisis de sensibilidad para estudiar el comportamiento del modelo, y del sistema, frente a distintos cambios en las condiciones de operación de la planta, particularmente con el flujo de aireación, el flujo de caudal WAS y el tiempo de residencia celular (TRC).

Para lograr lo anterior, se hace uso de este código, el cual llama constantemente a la función *PTAS_ReactorBiologico_LA* por medio de *ode45* (utilizando los valores de los parámetros calibrados) cambiando las condiciones de operación a evaluar.

7.13.2.Estructura de funciones

- **Matriz:** Esta función permite calcular los coeficientes de la matriz estequiométrica. Requiere de la entrega de los parámetros estequiométricos del sistema.
 - **Fraccion:** Permite obtener una fragmentación teórica de la DQO del caudal afluente. Para lograr ello, esta función sigue la siguiente metodología de cálculo:
 1. Cálculo de los Sólidos Suspensos Totales de la DQO afluente según la proporción propuesta por (Gujer et al, 2006) a través del llamado a la función *SST_ASM3*.
 2. Corrección de los SST calculados teóricamente multiplicándolos por un factor de corrección. Así se obtiene el valor de los SST reales. Posteriormente, se obtienen los SSV teóricos en el afluente, multiplicando los SST por una razón de proporción entre los SSV y los SST en la solución líquida del Reactor Biológico.
 3. Cálculo de la DQO aportada únicamente por los SSV presentes en la corriente afluente. Para lograr ello, se llama a la función *DQO_Correccion*.
 4. Obtención de la fracción de DQO para los sólidos suspendidos en el afluente.
 5. El remanente de DQO, se considera aporta de los sustratos de degradación rápida y el sustrato inerte presente en la corriente afluente. Estos mantienen una proporción de 0,6 (Si/Ss) propuesta por (Gujer et al, 2006).
 - **SST_ASM3:** Función que calcula los SST de acuerdo con la fragmentación de DQO propuesta por Gujer et al.
 - **DQO_Correccion:** Función que calcula el aporte en la DQO por parte de los sólidos suspendidos en el afluente.
-
- **Función_SST:** Función que calcula los SST utilizando los valores de las especies suspendidas del sistema.
 - **SSVLM:** Función que calcula los SSV utilizando los valores de las especies suspendidas del sistema.
-
- **Transiente_ReactorBiologico_LA:** Función que simula el sistema de lodos activados utilizando un valor promedio y constante para las especies que componen la corriente afluente al reactor biológico.
 - **PTAS_ReactorBiologico_LA:** Función que simula el sistema de lodos activados tomando en cuenta la variación diaria de los valores de las especies que componen la corriente afluente al reactor biológico.

- **Calibracion:** Esta función simula constantemente el sistema de lodos activados de la PTAS de Los Ángeles llamando a la función por medio *PTAS_ReactorBiologico_LA* de *ode45*. Al obtener dichos resultados, genera una comparación entre los valores teóricos obtenidos y los experimentales de las siguientes especies:
 1. Oxígeno Disuelto
 2. Amoniaco
 3. pH
 4. Sólidos Suspensidos Totales
 5. Sólidos Suspensidos Volátiles

Una vez obtenidas dichas diferencias, se calcula el error medio absoluto de cada especie, y con ello, se minimiza la suma de los errores de todas las especies mencionadas anteriormente.

Cabe destacar que a cada especie se le asigna un factor de importancia en el valor de su error, cuya magnitud se escoge tratando de ser coherente con la injerencia que significa los valores del error de cada una de estas especies.

7.14. Condiciones de operación usadas en el modelo de análisis de significancia

La simulación para realizar el análisis de sensibilidad utiliza las condiciones de operación presentadas en las Tablas 35, 36 y 37. En esta se utilizó principalmente el *main_LosAngeles*, y su tiempo de simulación fueron 60 días, tiempo razonable para alcanzar el estado estacionario para todas las especies del modelo.

Tabla 35: Condiciones de operación usadas en el modelo inicial.

Condición de operación	Unidad	Valor
Volumen Reactor	[m^3]	4.610
Caudal de entrada	[m^3/d]	8.038
Caudal de purga (WAS)	[m^3/d]	401
Flujo de aireación	[$kg O_2 / d$]	6.915

Tabla 36: Composición de las especies del caudal afluente usado en el modelo inicial.

Especie	Unidad	Valor
Oxígeno Disuelto	[$mg O_2 /l$]	0
Sólidos Disueltos Inertes	[$mg DQO /l$]	215
Sustrato de Degradación Rápida	[$mg DQO /l$]	259
Sólidos Suspensos Inertes	[$mg DQO /l$]	80
Sustrato de Degradación Lenta	[$mg DQO /l$]	130
Organismos Heterótrofos	[$mg DQO /l$]	33
Sustrato Almacenado	[$mg DQO /l$]	0
Organismos Autótrofos	[$mg DQO /l$]	0
Lípido Suspensivo	[$mg DQO /l$]	69
Lípido Almacenado	[$mg DQO /l$]	0
<i>Microthrix parvicella</i>	[$mg DQO /l$]	0
Lípido Disuelto	[$mg DQO /l$]	0
Amoniaco Disuelto	[$mg N /l$]	47
Nitrógeno Gaseoso	[$mg N /l$]	0
Nitrito/Nitrato Disuelto	[$mg N /l$]	0
Bicarbonato (Alcalinidad)	[$mg SHCO /l$]	7,7

Cabe destacar que las especies que componen la DQO promedio del caudal afluente, fueron calculadas de forma teórica, por ende, podría existir un alejamiento de la realidad de acuerdo con esta fragmentación de la DQO.

Tabla 37: Concentraciones de las especies obtenidas a partir de la simulación del modelo inicial.

Especie	Unidad	Valor
Oxígeno Disuelto	[mg O_2 /l]	0,6
Sólidos Disueltos Inertes	[mg DQO /l]	215
Sustrato de Degradación Rápida	[mg DQO /l]	0,24
Sólidos Suspendidos Inertes	[mg DQO /l]	2.343
Sustrato de Degradación Lenta	[mg DQO /l]	76
Organismos Heterótrofos	[mg DQO /l]	1.738
Sustrato Almacenado	[mg DQO /l]	266
Organismos Autótrofos	[mg DQO /l]	122
Lípido Suspendido	[mg DQO /l]	1.208
Lípido Almacenado	[mg DQO /l]	4×10^{-5}
<i>Microthrix parvicella</i>	[mg DQO /l]	0,19
Lípido Disuelto	[mg DQO /l]	9×10^{-3}
Amoniaco Disuelto	[mg N /l]	2,3
Nitrógeno Gaseoso	[mg N /l]	25
Nitrito/Nitrato Disuelto	[mg N /l]	30
Bicarbonato (Alcalinidad)	[mg SHCO /l]	2,4
Sólidos Suspendidos Totales	[mg XST /l]	3.764
Sólidos Suspendidos Volátiles	[mg XSV /l]	3.419
Abundancia Relativa	[%]	0,01

7.15. Gráfico de las especies del modelo con el ajuste de parámetros

En la siguiente sección se presentan las especies restantes del modelo con los parámetros ajustados que no fueron presentados en la sección 4.4.1.

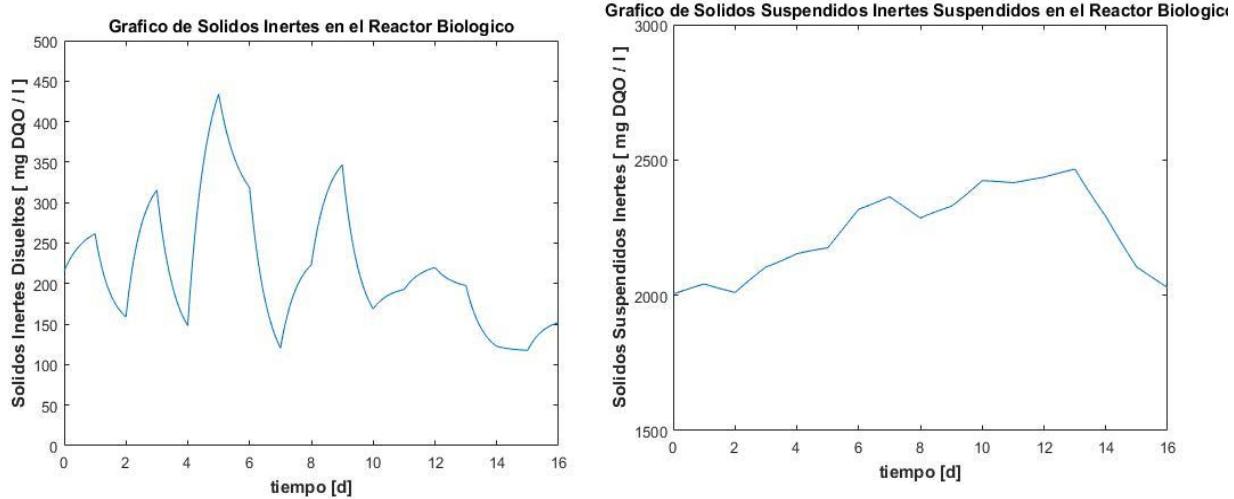


Figura 58: Gráfico de Sólidos Inertes disueltos y suspendidos obtenidos a partir del modelo de simulación con los parámetros ajustados.

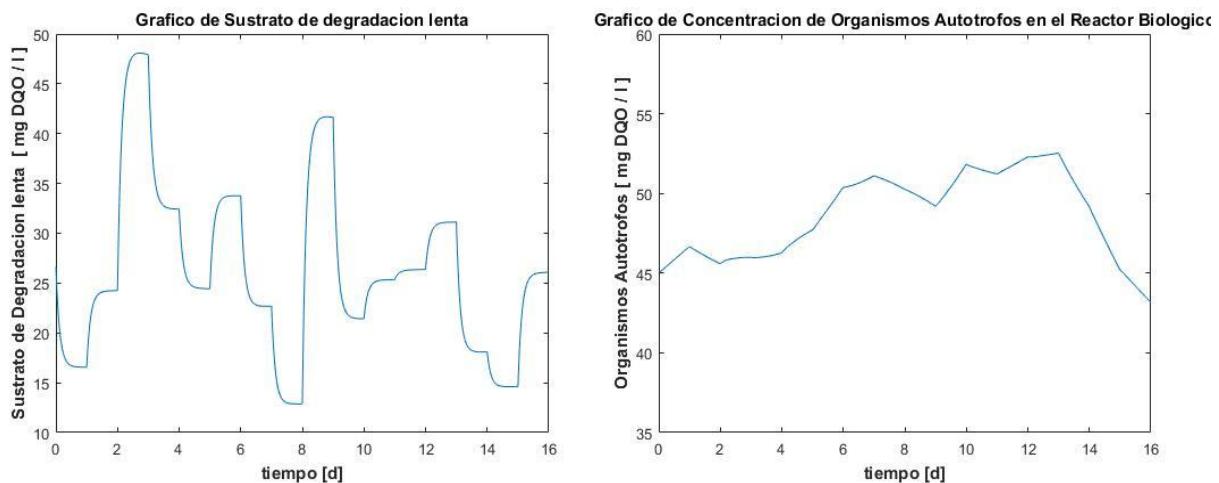


Figura 59: Gráfico de Sustratos de degradación lenta y Organismos Autótroficos obtenidos a partir del modelo de simulación con los parámetros ajustados.

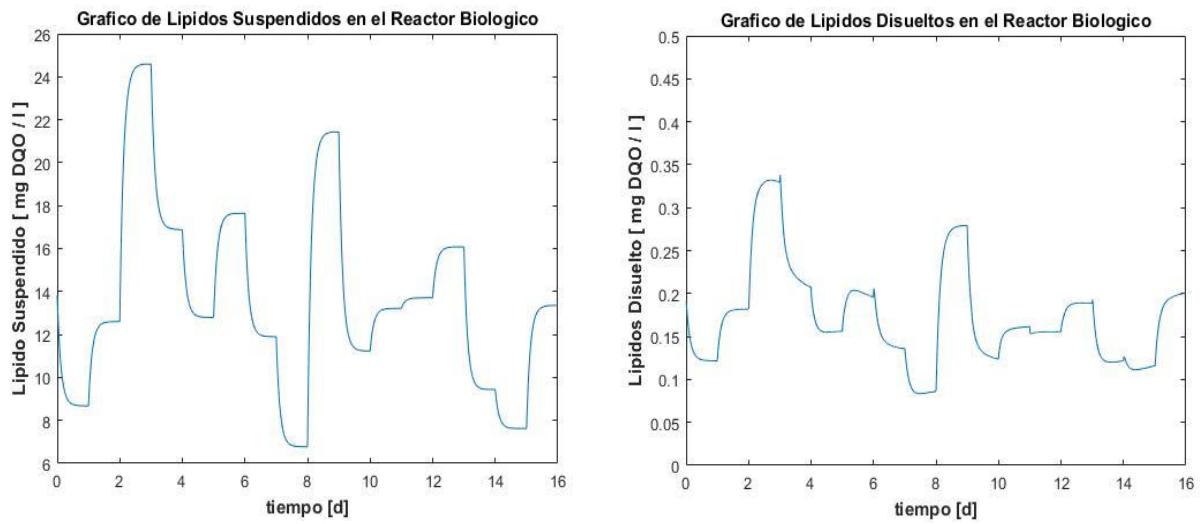


Figura 61: Gráfico de Lípidos Suspendedos y Lípidos Disueltos obtenidos a partir del modelo de simulación con los parámetros ajustados.

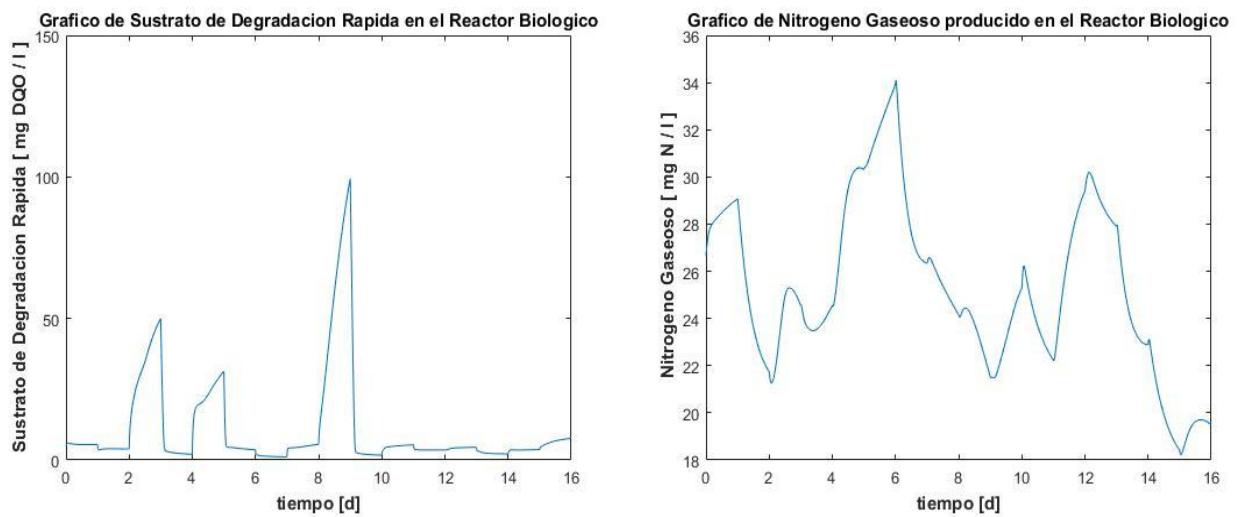


Figura 60: Gráfico de Sustratos de degradación rápida y Nitrógeno gaseoso disuelto obtenidos a partir del modelo de simulación con los parámetros ajustados.

7.16. Valores de las especies obtenidas a través de la variación de las condiciones de operación de la PTAS en el análisis de sensibilidad

En la siguiente sección se presentan los resultados del análisis de sensibilidad para las especies que no fueron mostradas en la sección 4.5.

Tabla 38: Concentración de Oxígeno disuelto según la variación del TRC y el flujo de aireación.

Oxígeno Disuelto [mg O ₂ /l]			
Tiempo de Residencia Celular [d]	Flujo de Aireación		
	Mínimo	Neutro	Máximo
3	0	0,81	1,88
4	0,11	0,68	1,7
5	0,1	0,6	1,6
6	0,09	0,56	1,54
7	0,09	0,53	1,5
8	0,09	0,51	1,47
9	0,9	0,49	1,44
10	0,8	0,48	1,42

Tabla 39: Concentración de Sólido Inerte Disuelto según la variación del TRC y el flujo de aireación.

Sólido Inerte Disuelto [mg DQO / l]			
Tiempo de Residencia Celular [d]	Flujo de Aireación		
	Mínimo	Neutro	Máximo
3	220	220	220
4	220	220	220
5	220	220	220
6	220	220	220
7	220	220	220
8	220	220	220
9	220	220	220
10	220	220	220

Tabla 40: Concentración de Sustrato de degradación rápida según la variación del TRC y el flujo de aireación.

Sustrato Degradación Rápida [mg DQO / l]			
Tiempo de Residencia Celular [d]	Flujo de Aireación		
	Mínimo	Neutro	Máximo
3	148	11,95	9,6
4	148,47	10,64	7,86
5	149,05	9,97	7,01
6	149,45	9,56	6,53
7	149,77	9,3	6,21
8	150,01	9,11	5,99
9	150,21	8,97	5,83
10	150,37	8,8	5,7

Tabla 41: Concentración de Sustrato de Degradación Lenta según la variación del TRC y el flujo de aireación.

Sustrato de Degradación Lenta [mg DQO / l]			
Tiempo de Residencia Celular [d]	Flujo de Aireación		
	Mínimo	Neutro	Máximo
3	26	26,29	26,52
4	25,85	26,23	26,5
5	25,83	26,18	26,49
6	25,82	26,16	26,48
7	25,81	26,14	26,48
8	25,81	26,12	26,48
9	25,8	26,11	26,47
10	25,8	26,1	26,47

Tabla 42:Concentración de Sustrato Almacenado según la variación del TRC y el flujo de aireación.

Sustrato Almacenado [mg DQO / l]			
Tiempo de Residencia Celular [d]	Flujo de Aireación		
	Mínimo	Neutro	Máximo
3	973	495	427
4	1098	527	434
5	1185	552	438
6	1250	571	441
7	1300	587	443
8	1340	600	445
9	1372	611	446
10	1398	620	447

Tabla 43: Concentración de Organismos Autótrofos según la variación del TRC y el flujo de aireación.

Organismos Autótrofos [mg DQO / l]			
Tiempo de Residencia Celular [d]	Flujo de Aireación		
	Mínimo	Neutro	Máximo
3	28	44	52
4	33	50	59
5	36	55	63
6	38	58	67
7	40	61	69
8	42	63	71
9	43	64	72
10	44	66	74

Tabla 44: Concentración de Lípido Suspenido según la variación del TRC y el flujo de aireación.

Lípido Suspendido [mg DQO / l]			
Tiempo de Residencia Celular [d]	Flujo de Aireación		
	Mínimo	Neutro	Máximo
3	13,59	13,64	13,65
4	13,58	13,62	13,63
5	13,58	13,62	13,62
6	13,57	13,61	13,61
7	13,57	13,61	13,61
8	13,57	13,61	13,61
9	13,57	13,61	13,61
10	13,57	13,61	13,61

Tabla 45: Concentración de Lípidos Almacenados según la variación del TRC y el flujo de aireación.

Lípido Almacenado [mg DQO / l]			
Tiempo de Residencia Celular [d]	Flujo de Aireación		
	Mínimo	Neutro	Máximo
3	31	21,15	20,39
4	31,15	21,13	20,36
5	31,25	21,16	20,31
6	31,37	21,2	20,28
7	31,47	21,24	20,26
8	31,56	21,27	20,25
9	31,64	21,3	20,24
10	31,71	21,32	20,23

Tabla 46: Concentración de Lípido Disuelto según la variación del TRC y el flujo de aireación.

Lípido Disuelto [mg DQO / l]			
Tiempo de Residencia Celular [d]	Flujo de Aireación		
	Mínimo	Neutro	Máximo
3	0,220	0,180	0,180
4	0,200	0,160	0,160
5	0,180	0,160	0,150
6	0,180	0,150	0,150
7	0,180	0,150	0,140
8	0,180	0,140	0,140
9	0,170	0,140	0,140
10	0,170	0,140	0,140

Tabla 47: Concentración de Nitrógeno Amoniacal según la variación del TRC y el flujo de aireación.

Nitrógeno Amoniacal [mg N/ l]			
Tiempo de Residencia Celular [d]	Flujo de Aireación		
	Mínimo	Neutro	Máximo
3	50	36	23
4	50	35	21
5	50	35	20
6	50	35	20
7	50	35	19
8	50	35	19
9	50	35	19
10	50	35	18

Tabla 48: Concentración de Nitrógeno Gaseoso según la variación del TRC y el flujo de aireación.

Nitrógeno Gaseoso [mg N/ l]			
Tiempo de Residencia Celular [d]	Flujo de Aireación		
	Mínimo	Neutro	Máximo
3	6	24,28	19,58
4	5,83	25,49	21,734
5	5,9	25,99	23,13
6	5,95	26,23	24,12
7	5,98	26,35	24,86
8	6	26,41	25,43
9	6,02	26,44	25,88
10	6,04	26,46	26,24

Tabla 49: Concentración de Nitrito y Nitrato según la variación del TRC y el flujo de aireación.

Nitrito y Nitrato [mg N/ l]			
Tiempo de Residencia Celular [d]	Flujo de Aireación		
	Mínimo	Neutro	Máximo
3	0,018	1,03	18,68
4	0,016	0,69	18,79
5	0,016	0,54	18,66
6	0,015	0,46	18,48
7	0,015	0,41	18,3
8	0,015	0,38	18,15
9	0,015	0,36	18,01
10	0,015	0,34	17,89

Tabla 50: Alcalinidad según la variación del TRC y el flujo de aireación.

Alcalinidad [mol HCO/ l]			
Tiempo de Residencia Celular [d]	Flujo de Aireación		
	Mínimo	Neutro	Máximo
3	8	7,07	4,9
4	8,19	7,05	4,76
5	8,19	7,05	4,7
6	8,18	7,05	4,66
7	8,18	7,05	4,65
8	8,18	7,06	4,63
9	8,18	7,06	4,63
10	8,18	7,06	4,63

7.17. Medidas propuestas para el control de la proliferación del Bulking Filamentoso

En el siguiente anexo, se presentan las medidas propuestas para el control de la formación de Bulking Filamentoso. Estas se dividen en dos categorías, cuya diferencia radica en los tiempos de ejecución y evaluación de costos:

7.17.1. Medidas Correctivas

Las medidas correctivas son consideradas como acciones no específicas con respecto al control de Bulking Filamentoso. Esta característica se les acuña debido a que sus resultados no solucionan el problema microbiológico que significa el presentar los eventos de Bulking, sino que, corrige la consecuencia de presentar estos eventos, es decir, la mala compactación de sólidos en el clarificador secundario. Estas medidas poseen resultados de corto tiempo, que podrían ocasionar problemas medioambientales, generación de compuestos químicos indeseados y perjuicio en la calidad del lodo activado. Estas se presentan a continuación:

- **Cloración:** Consiste en aplicar una dosis determinada de cloro en distintas secciones del sistema de lodos activados. Típicamente se aplican en la línea donde fluye la recirculación debido a su alta turbulencia, o, al inicio del Reactor Biológico, aprovechando el sistema de mezcla que posee este equipo [42].

La pared celular de los microorganismos se ve afectada por la presencia de cloro, por ende, al tener contacto con este elemento se genera la lisis celular, y con ello, la muerte de la biomasa activa en el lodo activado. Esta acción afecta a la mayoría de los microorganismos presentes en el reactor biológico, desde bacterias filamentosas, nitrificantes, heterótrofos, entre otros. Por ende, la cloración como medida correctiva, permite disminuir la presencia de bacterias filamentosas en el sistema [10].

- **Adición de coagulantes, polímeros y productos comerciales:** La estrategia para estos 3 químicos es la misma. Se añaden productos que promueven la aglomeración de materia suspendida, como la del lodo activado. Con ello, se promueve la decantación de sólidos en el clarificador secundario. Estos productos se agregan normalmente a la salida del reactor biológico o entrada del clarificador [48, 75].
- **Nitrato de sodio:** Se ha estudiado que, la adición de este elemento entrega a las zonas sépticas que podrían generarse en el Reactor biológico una especie aceptora de electrones, que puede ser utilizado por los organismos heterótrofos, o incluso nitrificantes, para sus procesos metabólicos. Con ello, se estaría promoviendo el crecimiento de estos organismos por sobre las especies filamentosas [42, 91].
- **Aumento del caudal RAS:** Se basa en aumentar el caudal de recirculación para disminuir la concentración de sólidos en el clarificador, y con ello, reducir la probabilidad de que estos se encuentren en la corriente efluente [42].

- **Aumento de sólidos en el clarificador:** Al aumentar los sólidos en esta etapa, se estaría promoviendo la compactación debido a la alta masa de materia suspendida. Esto se logra controlando el caudal de purga y/o recirculación [42].

Luego de ser presentadas las medidas correctivas, se procede a realizar una estimación del costo que significaría el implementar alguna de estas medidas ante algún evento de Bulking Filamentoso. Cabe destacar que no se calculan los cotos relacionados con la adición de nitrato de sodio, aumento del caudal RAS y sólidos en el clarificador puesto que, no se encuentra la información necesaria para hacer la estimación.

En cuanto a la adición de químicos, la cuantificación de costos se hace en base a un rango máximo y mínimo de la dosis recomendada encontrada en literatura, y una aplicación de estos químicos por 7 días, tiempo requerido para solucionar el efecto del Bulking Filamentoso. Con ello se calcula un costo promedio de cada medida (ver Tabla 51).

Tabla 51: Cálculo de costos de las medidas correctivas asociadas a adición de químicos en el sistema.

Medida	Dosis Recomendada	Costo por kilogramo [\$CLP]	Costo Dosis mínima [\$CLP/m ³]	Costo dosis máxima [\$CLP/m ³]	Costo promedio [\$CLP/m ³]	Costo PTAS Los Ángeles [\$ CLP]
Cloración	4-8 [g Cl/kg SSV]	620	160	319	240	1.102.013
Polímero	6,6-11,5 [g/kg SSLM] [74]	2640	1.403	2.444	1.923	8.847.208
Coagulante (<i>FeCl₃</i>)	3,5 -25 [g/] [74] [91]	190	54	382	218	1.002.587
Producto Comercial	10 [mg/l RAS]	1000	-	-	70 ³	2.596.580

³ En el caso de la medida de adición de producto comercial, este se basa en el precio unitario por m³ caudal de la recirculación (RAS).

7.17.2.Medidas Preventivas

Las medidas preventivas se definen como acciones para llevar un control exhaustivo de las condiciones de operación que se relacionan con la formación de Bulking Filamentoso. Estas requieren de un cambio de consigna en la operación de la planta, reflejado en el trabajo de los operadores y un acondicionamiento del equipamiento de la planta. Estas se presentan a continuación:

- **Medición de relación F/M (DQO afluente, medición SSV en el Reactor biológico y corriente RAS):** Actualmente la medición de DQO de la corriente afluente se realiza una vez al día, al igual que los SSV en el reactor biológico y la corriente RAS. Con ello se propone aumentar a dos mediciones diarias (o más) de estos parámetros para estimar diariamente la razón F/M que, como se percibió en el modelo, es un indicar que podría predecir la promoción del crecimiento de bacterias filamentosas.
- **Control Oxígeno:** Mejorar la precisión en la medición del oxígeno disuelto en el Reactor Biológico. Para lograr ello, se requiere de una instalación de equipos de medición junto con una programación para llevar este control en línea. Como se obtuvo en el modelo, el oxígeno disuelto es una especie que impacta en la dinámica de la biomasa del lodo activado, y, de igual forma en el crecimiento de bacterias filamentosas.
- **Observación Microscópica:** La observación fue fundamental para la obtención de los resultados en el modelo. Por lo cual se propone aumentar el control y observación de la microfauna del lodo, por medio ensayos de tinción Gram y/o conteo microscópico para la evaluación de la abundancia relativa de filamentos.
- **Medición Ácidos Orgánicos:** Existen estudios que postulan que, la presencia de ácidos orgánicos, como el ácido oleico, en el reactor biológico podría significar la presencia de un ambiente propicio para el desarrollo de bacterias filamentosas, fenómeno que fue incluido en el modelo. Por ende, se propone el implementar una medición adicional de ácidos orgánicos, procedimiento que, en la actualidad no existe en la planta.
- **Test sedimentométricos:** El test de sedimentabilidad de lodo corresponde a un indicador que representaría la compactación en el clarificador secundario y, consecuentemente, alertaría de la presencia de Bulking Filamentoso. Este procedimiento se realiza en la actualidad en la planta, por lo cual, se deja propuesto que se siga haciendo este ensayo en el laboratorio.
- **Control del Tiempo de Residencia Celular:** El tiempo de residencia celular es un parámetro que relaciona las líneas de tratamiento de lodos y de aguas. Por ende, su control no solo impacta en la dinámica de la biomasa, lo cual pudo ser simulado por el modelo, sino que, ante cualquier eventualidad en el tratamiento de lodos, como cambio o falla de equipos, por ejemplo, el TRC se verá comprometido, por lo cual, ante estos casos, es importante llevar tener en consideración el cambio que significaría en la actividad microbiológica del lodo activado.

Se procede a calcular los costos de inversión de las medidas preventivas (ver Tabla 52):

Tabla 52: Costos de inversión de equipamiento para implementación de medidas preventivas.

Medida	Detalle	Costo Inversión [\$ CLP]
Medición de relación F/M	Mufla de laboratorio [92]	2.276.000
	Estufa de secado [93]	2.059.200
	Termoreactor <i>DRB200</i> [94]	1.360.000
Medición Ácidos Grasos	Medidor de parámetros <i>HACH DR900</i> [95]	1.192.800
	Balanza [96]	40.000
Observación microscópica	Microscopio [97]	1.157.600
	Tinciones [98]	80.000
	Cámara Neubauer [99]	43.000
Control Oxígeno Disuelto	Sensores de Oxígeno e instalación	800.000
Total		9.408.600

Seguido de ello, en la Tabla 53, se presentan los costos operacionales mensuales de las medidas preventivas:

Tabla 53: Costos operacionales mensuales de las medidas preventivas.

OPEX	Detalle	Detalle costo	Valor mensual	Costo unitario [\$ CLP]	Costo mensual [\$CLP]
Trabajo personal laboratorio	Analista Químico	Horas de trabajo	176	4.000	704.000
Medición de relación de F/M	Medición DQO Afluentes	Insumos de laboratorio (viales)	124	500	62.000
	Medición SSVLM	Insumos de laboratorio (Filtros)	248	260	64.480
	Medición SSV en RAS	Insumos de laboratorio (Filtros)	124	260	32.240
Otros parámetros	Medición Ácidos Orgánicos	Insumos de laboratorio (kit de medición) [100] [101]	1	74.800	74.800
Total					937.520