



**UNIVERSIDAD CATÓLICA**  
de Colombia

FACULTAD DE INGENIERÍA  
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL

PROPUESTA PLANTA DE TRATAMIENTO  
AGUAS RESIDUALES (PTAR) PARA  
EMPRESA DE LÁCTEOS

PRESENTADO POR:  
JULIANA CHACÓN CÓDIGO: 506807  
ISABELA RAMÍREZ CÓDIGO: 506911

**PROPUESTA DE PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES  
(PTAR) PARA EMPRESA DE LÁCTEOS, A PARTIR DE LA SIMULACIÓN  
DEL SOFTWARE GPS-X.**

**JULIANA ANDREA CHACÓN PÁEZ**  
**LAURA ISABELA RAMÍREZ SÁNCHEZ**



**UNIVERSIDAD CATÓLICA**  
de Colombia

**UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**  
**PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL**  
**BOGOTÁ D.C.**

**2020**



**UNIVERSIDAD CATÓLICA**  
de Colombia

FACULTAD DE INGENIERÍA  
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL

PROPUESTA PLANTA DE TRATAMIENTO  
AGUAS RESIDUALES (PTAR) PARA  
EMPRESA DE LÁCTEOS

PRESENTADO POR:  
JULIANA CHACÓN CÓDIGO: 506807  
ISABELA RAMÍREZ CÓDIGO: 506911

**PROPUESTA DE PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES  
(PTAR) PARA EMPRESA DE LÁCTEOS, A PARTIR DE LA SIMULACIÓN DEL  
SOFTWARE GPS-X.**

**PRESENTADO POR:  
JULIANA ANDREA CHACÓN PÁEZ  
LAURA ISABELA RAMÍREZ SÁNCHEZ**

**TRABAJO DE GRADO PARA OBTENER LA TITULACIÓN DE INGENIERO  
CIVIL**

**DIRECTOR DE PROYECTO:  
WILFREDO MARIMÓN BOLÍVAR**



**UNIVERSIDAD CATÓLICA**  
de Colombia

**UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL**

**BOGOTÁ D.C.**

**2020**



UNIVERSIDAD CATÓLICA  
de Colombia

FACULTAD DE INGENIERÍA  
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL

PROPUESTA PLANTA DE TRATAMIENTO  
AGUAS RESIDUALES (PTAR) PARA  
EMPRESA DE LÁCTEOS

PRESENTADO POR:  
JULIANA CHACÓN CÓDIGO: 506807  
ISABELA RAMÍREZ CÓDIGO: 506911

Nota de Aceptación.

---

---

---

---

---

Firma director de proyecto.

---

Firma – Jurado uno.

---

Firma – Jurado dos.

Bogotá D.C. Noviembre de 2020



La presente obra está bajo una licencia:  
**Atribución 2.5 Colombia (CC BY 2.5)**  
Para leer el texto completo de la licencia, visita:  
<http://creativecommons.org/licenses/by/2.5/co/>

**Usted es libre de:**

- Compartir - copiar, distribuir, ejecutar y comunicar públicamente la obra
- hacer obras derivadas
- hacer un uso comercial de esta obra



**Bajo las condiciones siguientes:**



**Atribución** — Debe reconocer los créditos de la obra de la manera especificada por el autor o el licenciante (pero no de una manera que sugiera que tiene su apoyo o que apoyan el uso que hace de su obra).



*Este triunfo se lo dedico a Dios en primer lugar, gracias a él pude tomar buenas decisiones, me brindo fuerza y salud para culminar una de las metas más importantes de mi vida.*

*A mis padres Patricia Páez y Pedro Chacón por sus consejos, comprensión, amor, apoyo en los momentos más difíciles y también por ayudarme con los recursos necesarios para estudiar. Son un motor importante en mi vida y un gran orgullo.*

*Mis hermanas Ana Chacón, Natalia Chacón, Mayra Santamaría, amigos y familiares por ser un apoyo, una gran motivación en todo momento y por siempre estar a mi lado.*

**Juliana Andrea Chacón Páez.**

*Dedico este triunfo primeramente a mi madre Hilda Lucia Sánchez Daza y a mi padre Diego Fernando Ramírez Esquivel quienes fueron mi pilar fundamental y apoyo en mi formación académica, por sus consejos y la fortaleza que me brindaron para lograr culminar esta etapa. A mis hermanos y demás familiares, quienes siempre con sus palabras lograron guiarme y motivarme para alcanzar mis metas tanto académicas como profesionales.*

*A Dios por siempre brindarme salud y fortaleza para atravesar todos los obstáculos que se presentaron, por acompañarme en cada segundo de mi vida para no perder mis propósitos.*

**Laura Isabela Ramírez Sánchez**



## AGRADECIMIENTOS

Al ingeniero Wilfredo Marimón Bolívar docente de la Universidad Católica de Colombia por creer en nosotras, brindar apoyo y guiar el proceso de desarrollo del trabajo de grado como director de la misma, quien nos aportó de su conocimiento, experiencia y tiempo para el desarrollo de este proyecto. A la Universidad Católica de Colombia y a todo su equipo de trabajo por brindarnos una formación como profesionales íntegros y bien calificados para el desarrollo de nuestras labores.



## RESUMEN

En el presente trabajo se muestra el desarrollo de una propuesta para el sistema de tratamiento de agua residual de la industria láctea, donde se determinó que parámetros eran problemáticos dentro de la planta de tratamiento de aguas residuales, y que no permitían cumplir con la resolución 0631 de 2015.

Teniendo en cuenta los parámetros analizados, se buscó información bibliográfica de fuentes confiables, con la cual se realizó la caracterización del agua residual para así lograr unos valores críticos, posteriormente se realizará el montaje de las 3 alternativas propuestas, que permitirían disminuir los parámetros que no cumplan la normatividad vigente, mediante el software GPS-X.

De igual forma por medio de simulaciones se establecen las unidades óptimas que pueden ayudar en la remoción de los elementos de  $DBO_5$ , DQO, SST, teniendo en cuenta que los procesos no ocupen mucho espacio y sean capaces de cumplir con las condiciones de vertimiento.

Finalmente se implementa al método de análisis de sensibilidad con el software GPS-X, indicando variables de entradas por cada proceso del sistema biológico implementado en cada alternativa, para conocer la variación que se tiene frente a los parámetros de estudio DQO,  $DBO_5$ , SST, Sulfatos y Cloruros (Aniones). En los resultados obtenidos se puede concluir, que la alternativa 1 donde se presentan los procesos de laguna de oxidación, reactor de flujo ascendente y filtro desnitrificado se tuvo una disminución de SST del 36.08%,  $DBO_5$  del 97.99%, DQO del 95,68% y un aumento de sulfatos del 859.39%; este proceso no es apto por lo que la disminución de los sólidos Suspendidos Totales no es suficiente, por tal motivo no cumplen con lo establecido en la resolución 0631 de 2015 y los indicadores de la norma de reúso (resolución 1207 de 2014); Para la alternativa 2 se presentan los procesos de Filtro aireado, reactor híbrido y filtro de membrana en los cuales se tienen una disminución de SST de 99.99%,  $DBO_5$  de 93.99%, DQO de 93.98% y un aumento de sulfatos del 34.54%; por último, se presentan los porcentajes de la alternativa 3 la cual presenta una disminución de SST del 99.64%,  $DBO_5$  de 98.06%, DQO de 93.58% y un aumento de sulfatos de 2933.33%, se toma la determinación de usar la alternativa 3, por lo que esta no necesita gran número de procesos biológicos para realizar la disminución del  $DBO_5$ , DQO y SST necesarios en la planta de tratamientos, al igual la alternativa 1 se descarta ya que, no logra remover los sólidos suspendidos totales necesarios y aceptados en la norma.



## TABLA DE CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN	15
2.	PLANTEAMIENTO Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	16
3.	ANTECEDENTES	19
4.	JUSTIFICACIÓN	22
5.	OBJETIVOS	25
5.1.	OBJETIVO GENERAL	25
5.2.	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	25
6.	MARCO DE REFERENCIA	26
6.1.	MARCO TEÓRICO	26
6.1.1.	Descargas líquidas de la industria láctea	26
6.1.2.	Procesos de Tratamiento de Aguas Residuales	26
6.1.2.1.	Pre-tratamiento	27
6.1.2.2.	Tratamiento Primario.	28
6.1.2.3.	Tratamiento Secundario.	28
6.1.2.4.	Tratamiento Terciario.	28
6.1.3.	Tratamiento de aguas residuales	28
6.1.4.	Contaminantes en las industrias lácteas.	31
6.1.5.	Contaminación en la industria láctea.	31
6.2.	SIMULACIÓN	32
6.2.1.	Importancia de la simulación.	32
6.2.2.	Características del Software GPS-X.	33
6.2.3.	Módulo Analizador del Software GPS-X.	35



6.3.	MARCO LEGAL	36
6.3.1.	La Resolución 0631 de 2015.	37
6.3.2.	Ley 373 de 1997	36
6.3.3.	Resolución 1207 de 2014.	38
6.3.4.	Norma Internacional.	40
6.4.	MARCO CONCEPTUAL	41
7.	ESTADO DE ARTE	43
7.1.	Artículo 1: Effluent Treatment Plant of Dairy Wastewater – A Performance Evaluation.	43
7.2.	Artículo 2: Anaerobic Digestion of Dairy Industry Wastewater – Biogas Evolution A.	44
7.3.	Artículo 3: Simulación de la planta de tratamiento de aguas residuales de la industria láctea en el entorno de GPS-X: Con un caso de estudio.	45
7.4.	Artículo 4: Method of Treating Dairy Effluent from the Farm to Produce Clarified Water.	46
7.5.	Artículo 5: Reuse of Dairy Wastewater Treated by Membrane Bioreactor and Nanofiltration: Rechnical and economic feasibility.	49
8.	METODOLOGÍA	52
8.1.	CARACTERIZACIÓN DEL AGUA RESIDUAL DE LA INDUSTRIA.	52
8.2.	SIMULACIÓN DE LOS PROCESOS DE TRATAMIENTO.	54
8.3.	ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD EN EL SOFTWARE GPS-X HYDROMANTIS.	56
9.	ANÁLISIS Y RESULTADOS	57
9.1.	ALTERNATIVAS PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE LA INDUSTRIA LÁCTEA.	57
9.1.1.	Planteamiento de las alternativas.	57
9.2.	SIMULACIÓN EN EL SOFTWARE GPS-X.	60



9.2.1.	Resultados de la simulación para la alternativa No.1.	61
9.2.3.	Resultados de la simulación para la alternativa No.2.	68
9.2.2.	Resultados de la simulación para la alternativa No.3.	74
9.3.	ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD EN EL SOFTWARE.	80
9.3.1.	Análisis de sensibilidad para la alternativa No.1.	80
9.3.2.	Análisis de sensibilidad para la alternativa No. 2.	88
9.3.3.	Análisis de sensibilidad para la alternativa No.3.	94
9.4.	SELECCIÓN DE LA ALTERNATIVA DE MEJORA PARA LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES.	99
9.4.1.	Matriz de selección.	99
9.4.1.1.	Criterios de selección.	100
9.4.2.	Alternativa seleccionada.	102
10.	CONCLUSIONES	108
11.	RECOMENDACIONES.	110
12.	BIBLIOGRAFÍA	111
13.	ANEXOS	116



## LISTA DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Producción mundial de carne de bovino.	17
<b>Tabla 2.</b> Producción Colombiana.	23
<b>Tabla 3.</b> Parámetros permisibles según la resolución.	38
<b>Tabla 4.</b> Normativa nacional	37
<b>Tabla 5.</b> Criterios de calidad.	39
<b>Tabla 6.</b> Distancias mínimas.	40
<b>Tabla 7.</b> Resumen de los 75 ensayos realizados en un periodo de 18 meses.	47
<b>Tabla 8.</b> Valores promedio de los parámetros para el efluente lechero de la granja sin tratar	48
<b>Tabla 9.</b> Caracterización del agua residual del proyecto	53
<b>Tabla 10.</b> Cumplimiento de parámetros de la caracterización del agua residual	54
<b>Tabla 11.</b> Resultados de simulación alternativa 1: Agua residual	61
<b>Tabla 12.</b> Resultados de simulación alternativa 1: Tanque de homogenización	62
<b>Tabla 13.</b> Resultados de simulación alternativa 1: Laguna de oxidación	63
<b>Tabla 14.</b> Resultados de simulación alternativa 1: Clarificador secundario	64
<b>Tabla 15.</b> Resultados de simulación alternativa 1: Reactor uasb	65
<b>Tabla 16.</b> Resultados simulación alternativa 1: Clarificador secundario	66
<b>Tabla 17.</b> Resultados de simulación alternativa 1: Filtro desnitrificado	67
<b>Tabla 18.</b> Resultados de simulación alternativa 1: Agua tratada	67
<b>Tabla 19.</b> Resultados de simulación alternativa 1: Tratamiento de lodos	68
<b>Tabla 20.</b> Resultados de simulación alternativa 2: Cámara de arena	69
<b>Tabla 21.</b> Resultados de simulación alternativa 2: Filtro aireado biológico simple	69
<b>Tabla 22.</b> Resultados de simulación alternativa 2: Reactor híbrido de película fija/biomasa suspendida	70
<b>Tabla 23.</b> Resultados de simulación alternativa 2: Clarificador secundario	71
<b>Tabla 24.</b> Resultados de simulación alternativa 2: Filtro de membrana	72
<b>Tabla 25.</b> Resultados de simulación alternativa 2: Tratamiento de lodos	73
<b>Tabla 26.</b> Resultados de simulación alternativa 2: Agua tratada	74
<b>Tabla 27.</b> Resultados de simulación alternativa 3: Cámara de arena	75
<b>Tabla 28.</b> Resultados de simulación alternativa 3: Clarificador primario	75
<b>Tabla 29.</b> Resultados de la simulación alternativa 3: Reactor MBR completamente mezclado	76
<b>Tabla 30.</b> Resultados de simulación alternativa 3: Clarificador secundario	77
<b>Tabla 31.</b> Resultados de simulación alternativa 3: Filtro desnitrificado	77
<b>Tabla 32.</b> Resultados de simulación alternativa 3: Agua tratada	78
<b>Tabla 33.</b> Resultados de simulación alternativa 3: Tratamiento de lodos	79



<b>Tabla 34.</b> Principales valores de aniones presentes en el agua natural	80
<b>Tabla 35.</b> Criterios de selección y asignación de porcentajes	100
<b>Tabla 36.</b> Calificación para evaluar las alternativas	101
<b>Tabla 37.</b> Listado de alternativas y nomenclatura	101
<b>Tabla 38.</b> Matriz de cumplimiento de los criterios mínimos (SI/NO)	102
<b>Tabla 39.</b> Matriz de selección de la alternativa, adaptación de Kepner & Tregoe	102
<b>Tabla 40.</b> Datos físicos y operacionales de la cámara de arena	104
<b>Tabla 41.</b> Datos físicos y operacionales del clarificador o sedimentador primario	104
<b>Tabla 42.</b> Datos físicos y operacionales del reactor	105
<b>Tabla 43.</b> Datos físicos y operacionales del clarificador o sedimentador secundario	105
<b>Tabla 44.</b> Datos físicos y operacionales del filtro desnitrificador	106
<b>Tabla 45.</b> Datos físicos y operacionales del digestor anaeróbico	107
<b>Tabla 46.</b> Datos físicos y operacionales de deshidratación de lodos	107

## LISTA DE GRÁFICAS

<b>Gráfica 1.</b> Valor de pH - temperatura del afluente con respecto al límite de MPCB	43
<b>Gráfica 2.</b> Valor de TDS-CDO del afluente con respecto al límite de MPCB.	44
<b>Gráfica 3.</b> Valor de SVI del afluente con respecto al límite de MPCB	44
<b>Gráfica 4.</b> Costos operativos anuales y porcentaje del costo asociado con la sustitución de módulos	51
<b>Gráfica 5.</b> Análisis de sensibilidad alternativa 1: Volumen máximo de laguna de oxidación	81
<b>Gráfica 6.</b> Análisis de sensibilidad alternativa 1: Profundidad del tanque	82
<b>Gráfica 7.</b> Análisis de sensibilidad alternativa 1: Anchura del canal	83
<b>Gráfica 8.</b> Análisis de sensibilidad alternativa 1: Volumen máximo del reactor UASB	84
<b>Gráfica 9.</b> Análisis de sensibilidad alternativa 1: Altura del agua del reactor	85
<b>Gráfica 10.</b> Análisis de sensibilidad alternativa 1: Flujo de bombeo del reactor	86
<b>Gráfica 11.</b> Análisis de sensibilidad alternativa 1: Profundidad del lecho del filtro	87
<b>Gráfica 12.</b> Análisis de sensibilidad alternativa 1: Superficie del lecho del filtro	88



<b>Gráfica 13.</b> Análisis de sensibilidad alternativa 2: Flujo de retro lavado del filtro membrana	89
<b>Gráfica 14.</b> Análisis de sensibilidad alternativa 2: Profundidad del lecho del filtro	90
<b>Gráfica 15.</b> Análisis de sensibilidad alternativa 2: Profundidad del tanque	91
<b>Gráfica 16.</b> Análisis de sensibilidad alternativa 2: Superficie de lecho del filtro	91
<b>Gráfica 17.</b> Análisis de sensibilidad alternativa 2: Duración del retro lavado por 24 horas	93
<b>Gráfica 18.</b> Análisis de sensibilidad alternativa 2: Volumen máximo	94
<b>Gráfica 19.</b> Análisis de sensibilidad alternativa 3: Profundidad del lecho del filtro	95
<b>Gráfica 20.</b> Análisis de sensibilidad alternativa 3: Superficie del lecho del filtro	96
<b>Gráfica 21.</b> Análisis de sensibilidad alternativa 3: Duración de retro lavado por 24 horas	97
<b>Gráfica 22.</b> Análisis de sensibilidad alternativa 3: Flujo de aire del flujo cruzado	98
<b>Gráfica 23.</b> Análisis de sensibilidad alternativa 3: Volumen máximo	99

#### LISTA DE FIGURAS.

<b>Figura 1.</b> Producción mundial de carne de bovino.	17
<b>Figura 2.</b> Producción Colombiana.	23
<b>Figura 3.</b> Tratamiento de agua residuales	27
<b>figura 4.</b> Proceso de floculación.	29
<b>Figura 5.</b> Proceso de sedimentación.	29
<b>Figura 6.</b> Esquema industrial de la cadena láctea en colombia.	32
<b>Figura 7.</b> Importancia del modelado y simulación en sistemas generales.	33
<b>Figura 8.</b> Entorno grafico del software GPS-X.	34
<b>Figura 9.</b> Balance de masas en el software GPS-X.	35
<b>Figura 10.</b> Análisis automático de sensibilidad en estado estacionario del amoníaco efluente frente a la temperatura de las aguas residuales.	36
<b>Figura 11.</b> Marco conceptual	42
<b>Figura 12.</b> Esquema del proceso de tratamiento de lácteos estudiado en el entorno de software GPS.X.	46
<b>Figura 13.</b> Disposición del sistema utilizado.	50
<b>Figura 14.</b> Tasa de flujo y dqp y carga de sólidos totales (TS) en la alimentación de MBR, permeado de MBR, retenido de NF y permeado de NF.	50
<b>Figura 15.</b> Metodología del proyecto.	52
<b>Figura 16.</b> Ícono de simulación del software GPS-X	55
<b>Figura 17.</b> Variables a analizar	57



<b>Figura 18.</b> Alternativa propuesta no.1	58
<b>Figura 19.</b> Alternativa propuesta no.2	59
<b>Figura 20.</b> Alternativa propuesta no.3	60
<b>Figura 21.</b> Paso del agua por el sistema final en la ptar	103



## 1. INTRODUCCIÓN

A través del tiempo la conservación de los recursos naturales ha despertado en el hombre la búsqueda de alternativas para cuidarlos y recuperarlos, para así ser aprovecharlos para los seres vivos, por ello uno de los recursos más vitales para sobrevivir, el agua, que es el objetivo de estudio de este proyecto (Revista Interamericana de Ambiente y Turismo, 2018).

La calidad del agua limita la disponibilidad del recurso y restringe las posibilidades de uso, dado a esto el aumento en su demanda tiene como consecuencia un aumento en el volumen de las aguas residuales, cuyo vertimiento sin un adecuado manejo que contemple su recolección y tratamiento, colabora con el deterioro del entorno y de fuentes superficiales (ONU-DAES, 2019).

Una vez se construyen y ponen en marcha las estructuras apropiadas para el correcto manejo de las aguas residuales (Alcantarillados y plantas de tratamiento), se pueden brindar soluciones, es por ello que el presente trabajo se enfatiza en la industria láctea en Colombia que se encuentra dentro de las industrias de alimentos que utiliza porcentajes de agua potable para realizar su producción. El contacto directo del agua con los compuestos utilizados en el procesamiento de la leche, genera contaminación de tipo física, química y biológica, lo que trae como consecuencia un impacto ambiental, que se debe tratar de inmediato (DAPSB, 1997).

Cualquier empresa de lácteos, dentro de sus políticas de calidad, busca mejorar los parámetros que producen el impacto ambiental mediante la implementación de proyectos sostenibles que mitiguen el daño causado al agua utilizada en los procesos de producción (INSACAN, 2016). Para esto, se plantea desarrollar un proyecto de tratamiento del agua, que busca disminuir los parámetros críticos, mejorando la calidad del afluente, teniendo en cuenta el costo, la eficiencia y la factibilidad. Describiendo de forma detallada el diagnóstico y la propuesta de mejora que se consideró apta para el tratamiento del agua residual del Lácteos, considerando las estrategias correctivas al sistema actual que maneja la industria láctea de Colombia, con el fin de disminuir el impacto ambiental generado en los vertimientos por la contaminación del agua.



## 2. PLANTEAMIENTO Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

Colombia es el tercer país con mayor biodiversidad del mundo y cuenta con una precipitación total anual 3000 mm/año y una disponibilidad hídrica de 5000 m<sup>3</sup>/año-persona. El 5% de agua dulce en el planeta corresponde al territorio colombiano, este se divide en 24.8% que corresponde a la cuenca del Magdalena Cauca, aportando el 10.6% de la oferta hídrica del país. A su vez, el 76% restante corresponde a la vertiente del Orinoco, Amazonas, Pacífico, Sinú, Atrato, Catatumbo y Sierra Nevada de Santa Marta, contribuyendo al 89% de la fuerza hídrica natural (Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial, 2009).

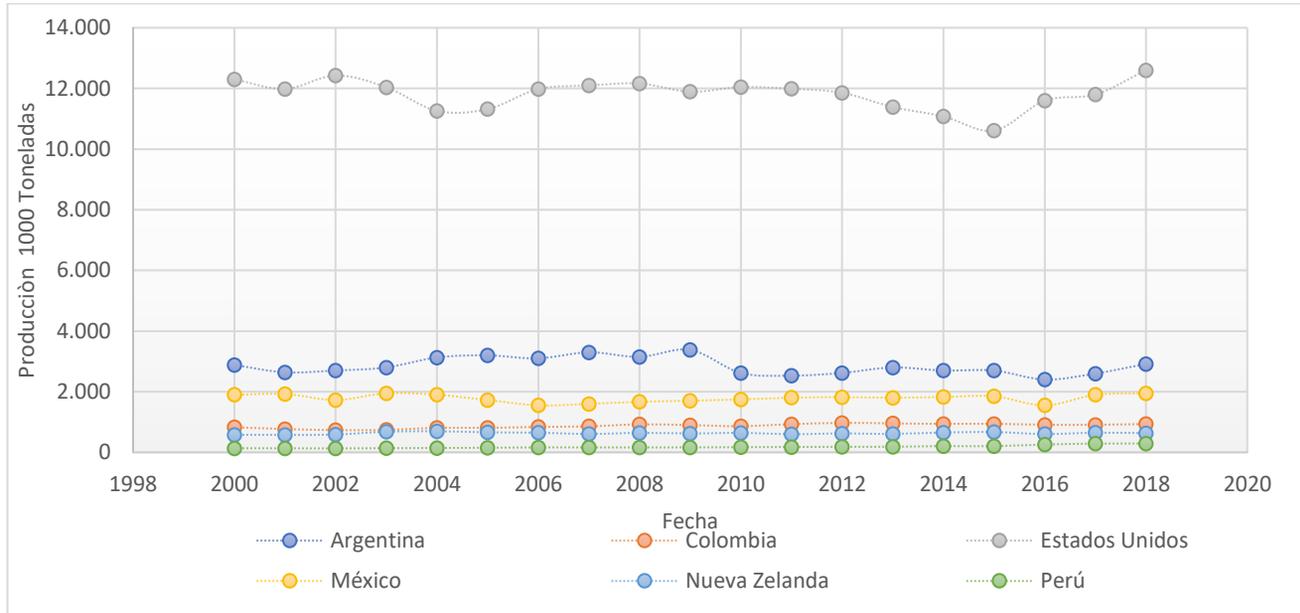
La cantidad de agua requerida para el desarrollo de actividades socioeconómicas de la población colombiana son: Agrícola 66%, Industrial 22%, Consumo humano y doméstico 10%, Pecuario 1.17%, Pesca 0.07%, Recreativo 0.02%, Otros 0.93%. (Reporte de avance del Estudio Nacional del Agua IDEAM, 2018).

En un futuro aumentará considerablemente el volumen de aguas residuales que será necesaria tratar, sobre todo en las ciudades de países en desarrollo con un rápido crecimiento demográfico. La capital de Nigeria, por ejemplo, genera cada día 1,5 millones de m<sup>3</sup> de aguas residuales que desembocan en la laguna de Lagos, sin haber sido tratada en su mayor parte. La contaminación con agentes patógenos procedentes de los humanos y animales afectan a casi un tercio de los recursos fluviales de América latina, África y Asia, poniendo así en peligro la vida de millones de personas (UNESCO, 2019).

Durante décadas, la humanidad ha consumido agua a un ritmo más rápido que su producción natural, contribuyendo en algunas regiones al hambre, la enfermedad, la migración y hasta los conflictos. Si no se actúa, se prevé que en 2030 la demanda mundial será superior en 40% a las provisiones naturales. La humanidad vive en zonas donde la escasez de agua es patente durante al menos un mes al año, por lo menos dos tercios, la mitad viven en China e India (ONU, 2007). Como se evidencia en la Figura 1 y Tabla 1 la producción de carne de bovino es un factor impactante a nivel mundial, del impacto que tiene dicha producción para contribuir a la escasez del agua.



Figura 1. Producción mundial de carne de bovino.



Fuente: (Foreign Agricultural Service- United States Department of Agriculture (USDA), 2000-2018)

Tabla 1. Producción mundial de carne de bovino.

	FECHA	Argentina	Australia	China	Estados Unidos	EU-27	India	Mexico	Nueva Zelanda
Producción (1000 Toneladas)	2000	9.800	11.172	9.191	75.927	134.750	79.250	9.726	12.900
	2001	9.500	10.864	11.229	74993	135.855	81.000	9.900	12.499
	2002	8.500	11.608	14.004	77.139	136.932	86.200	9.700	14.460
	2003	7.950	10.636	18.487	77.269	139.649	88.100	9.924	14.873
	2004	9.250	10.377	23.684	77.488	139.024	92.500	10.029	13.639
	2005	9.500	10.429	28.648	80.255	139.648	97.100	10.016	14.724
	2006	10.200	10.395	33.025	82.455	136.281	100.900	10.214	15.337
	2007	9.550	9.500	36.334	84.211	136.874	105.000	10.829	15.918
	2008	10.010	9.500	35.450	86.173	137.848	109.000	11.077	15.580
	2010	10.600	9.327	30.528	87.488	139.492	117.000	11.201	17.173
	2011	11.470	9.568	31.980	89.020	142.920	123.000	11.213	18.965
	2012	11.679	9.811	33.960	91.010	143.750	129.000	11.434	20.567
	2013	11.519	9.400	35.750	91.271	144.850	134.500	11.411	20.200
	2014	11.404	9.700	37.500	93.531	151.450	140.500	11.599	21.742
	2015	11.552	9.800	39.050	94.620	154.550	147.000	11.900	21.582
	2016	10.397	9.200	37.300	96.343	156.400	154.000	12.100	21.370
	2017	10.345	9.154	36.986	97.692	159.059	156.801	12.306	32.669
	2018	10.837	9.440	29.750	98.792	154.800	76.000	12.281	22.155

Fuente: (Foreign Agricultural Service- United States Department of Agriculture (USDA), 2000-2018)



En Colombia, solo se cuenta con el 48,2% del total de municipios donde cuentan con una planta de tratamiento de aguas residuales. Cundinamarca es el departamento con mayor cantidad de PTAR, con un total de 137; seguido por Antioquia, con 90; Boyacá, con 39; Cauca, con 37; y Tolima, con 36. Estas infraestructuras no son implementadas en la misma cantidad en zonas como amazonas, que no cuentan con ninguna, o en lugares como Vichada y Guainía, que poseen dos cada uno. Según el Ministerio del Medio Ambiente (agosto 2020), en Colombia el 80% de sus municipios arrojan sus aguas negras y residuales industriales a los ríos o lagunas, más cercanas a estos. Son aproximadamente cuatro millones de metros cúbicos de agua sin ningún tratamiento.

En el caso de la industria láctea, la cantidad de agua utilizada varía de acuerdo con la tecnología que se utilice, oscila entre 5 y 10 litros de agua por cada litro de leche. Los procesos de la industria láctea que producen residuos contaminantes son los procesos de producción de quesos, cremas y mantequillas, el lavado de torres de secado y las soluciones de limpieza alcalina (CIP1 soda). Se estima que el suero generado en la elaboración de quesos tiene una demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) del orden de 40.000 - 50.000 mg/L.

Las aguas residuales de las industrias lácteas son generalmente neutras o poco alcalinas, pero tienen tendencia a volverse ácidas rápidamente a causa de la fermentación del azúcar de la leche produciendo ácido láctico, sobre todo en ausencia de oxígeno y la formación simultánea de ácido butírico, descendiendo el pH a 4.5 - 5.0. La composición de estas aguas incluye sustancias orgánicas disueltas como la lactosa, sales minerales y suspensiones coloidales de proteínas (caseína, albúminas, y globulinas) con una DQO (Demanda Química de Oxígeno) entre 2000 - 4000 mg/l. El consumo de agua en las industrias lácteas oscila entre 8.0 - 35 L/Kg de leche (Arango Bedoya & Sánchez Sousa, 2009).

Teniendo en cuenta el impacto ambiental que las fábricas de productos lácteos proporcionan a los ríos, mares entre otras, la pregunta problema a resolver es: ***¿Cuál sería un sistema adecuado desde el punto de vista rendimiento y ambiental para el tratamiento y reutilización del agua residual de la fabricación de productos lácteos?***



### 3. ANTECEDENTES

El presente proyecto de investigación se enfoca en la idea de dar una solución sostenible, confiable y amigable con el medio ambiente, teniendo en cuenta que las industrias lácteas se han convertido en focos de contaminación para las fuentes hídricas, como son los ríos y lagos de agua dulce que a su vez por su carga orgánica afecta el ecosistema donde se vierten.

De acuerdo con Marcelino de Jesús González Cáceres, quien desarrollo un proyecto de investigación con el tema “*Aspectos medio ambientales asociados a los procesos de la industria láctea*”; en este se enfoca en el daño medio ambiental que puede traer las industrias lácteas al ecosistema, esta indagación se ejecuta por medio de averiguaciones de su proceso de producción, donde estudia el agua residual para que de esta forma pueda obtener una caracterización de la misma, logrando establecer que las operaciones auxiliares son las que más presentan contaminación en los efluentes, el cual se permite valorar estas operaciones en una escala de daño ambiental; también da a conocer alternativas para el reciclaje de este tipo de agua residual, teniendo en cuenta el bienestar de los animales y la calidad alimentaria [1].

Esta problemática no solo ha llegado a afectar países como Colombia, sino también por otro lado se ha convertido en una problemática mundial, siendo así que Diego Armesto, Luis Gallo, Diofanor Acevedo y Javier Mouthon desarrollaron un estudio de “*Biotratamientos de aguas residuales en la industria láctea*” donde su objetivo es consultar y analizar los principales tratamientos que se aplican a las aguas residuales de la industria láctea, donde se destacan los métodos biológicos y fisicoquímicos, así como se resaltan los métodos biológicos tales como: la digestión anaeróbica y los lodos activos, lo cuales producen gases que pueden ser usados como energía mientras degradan la materia orgánica que se tiene en el agua residual; en la investigación se realiza un análisis de la composición de las aguas lácteas donde se revisa las cantidades de DBO, DQO, SST, entre otros.

Concluyendo que, este tipo de aguas residuales, se encuentra similar a las aguas residuales que se pueden ver en la agroindustria donde se caracterizan por la alta concentración de contenido orgánico y altos niveles de sólidos disueltos o suspendidos, para este tipo de aguas residuales se investiga los tratamientos anaerobios donde los procesos biológicos han sido aplicados en las industrias agroindustriales como se emplean en fábricas de bebidas alcohólicas, cárnicas y lácteas, donde estos métodos son más económicos y eficaces cuando se presentan



grandes concentraciones, estos procesos tienen amplias ventajas como son la producción de metano el cual se puede usar como fuente de energía, de igual forma este indica menos consumo de energía a comparación de los procesos aeróbicos, también se tiene que la cantidad de fangos biológicos serán menores, por lo que se presentarán menos problemas en la disposición de los mismos; los reactores UASB son sistemas compactos, que tienen valores de remoción de DBO/DQO que superan el 80% con bajo costo de operación; estos resultados nos ayudan a concluir que la digestión biológica y los lodos activos producen mayor grado de estabilidad y bajo crecimiento de biomasa. [2]

En la investigación “*Caracterización del agua residual generada en la planta de lácteos el salinerito - parroquia salinas – cantón Guaranda para el diseño de una planta de tratamiento*” realizada por Juan Alberto Gaibor Chávez, tiene como objetivo evaluar el impacto ambiental producido en los efluentes donde es vertida; esta investigación se lleva a cabo por medio de un muestreo que se tomara periódicamente en los meses de febrero, marzo, abril y mayo, en el punto de descarga, gracias a este muestreo se puede conocer las características físicas y químicas de la calidad del agua, por tal motivo se puede analizar que las aguas lácteas contienen principalmente materia orgánica que son  $\beta$ -Lactoglobulinas,  $\alpha$ -Lactoalbúmina, inmunoglobulinas, que cuentan con concentraciones de proteína de 75%.

Indicando que los microorganismos presentes deben de tener una gran cantidad de oxígeno disuelto en el agua para poder cumplir con su función de degradación, los valores que se encuentran de nitrógeno, nitritos, nitratos y fósforos se producen a causa de los productos de limpieza y desinfección que se usan en la industria, estos también contribuyen a las alteraciones del pH por lo que son productos ácidos y básicos, los valores que se encuentran de conductividad son a causa de la presencia de cloruro sódico procedente de la salazón de los quesos, la temperatura es afectada por los momentos de enfriamiento de las tinas de procesamiento, y finalmente las alteraciones de turbidez, color, conductividad son producto de la materia particulada, con esta información se puede concluir que es necesario implementar una planta de tratamiento de agua residual, con énfasis en el control del efluente que se encuentra rico en material orgánico y material particulado. [3].

Por otro lado se presenta una investigación de Lesly Da Cámara, Mario Hernández y Luiselena Paz con el tema de “*Manual de diseño para plantas de tratamiento de aguas residuales alimenticias*”, donde hace destacar que generalmente este tipo de



aguas residuales se presentan como aguas neutras o con poca alcalinidad, pero presentan tendencias a volverse ácido lácteo por la fermentación del azúcar; estas contienen poca materia en suspensión y tienen gran cantidad de materia orgánica disuelta, lo cual las hacen tener un olor fuerte cuando se fermentan por estas características; este tipo de aguas responden de una forma adecuada a los procesos aeróbicos, los cuales dependerán de la colocación y del tamaño de las plantas que se vayan a manejar. Los procesos que se tienden a usar con más frecuencias son: aeración, filtros bacterianos, fangos activos, digestión anaeróbica. El tratamiento de fangos podría ser utilizado en un futuro como abono orgánico. (Lesly Da Cámara, 2013).



#### 4. JUSTIFICACIÓN

En los recursos naturales existentes solo el 0.007% del agua en la tierra es potable, y esa cantidad se reduce cada vez más año tras año debido a la contaminación. La demanda mundial del agua actualmente está estimada alrededor de 4,600 km<sup>3</sup> al año y se prevé que aumente un 20% a 30% para el año 2050, según el informe mundial de naciones unidas sobre desarrollo de recursos hídricos del 2018. A nivel internacional especialmente en los países del primer mundo el 59% del consumo total de agua se destina a uso industrial, el 30% a consumo agrícola y un 11% a gasto doméstico (Naciones unidas, 2019).

En 2025, el consumo de agua destinada a uso industrial alcanzará los 1170 km<sup>3</sup>/año, cifra que en 1995 se situaba en 752 km<sup>3</sup>/año. El sector productor no solo es el que más gasta, sino el que más contamina, hasta un 80% de los desechos peligrosos del mundo se producen en los países industrializados, mientras que en las naciones en vías de desarrollo un 70% de los residuos que se generan en las fábricas se vierten al agua sin ningún tipo de tratamiento adecuado, contaminando así los recursos reusó del agua (Aqua fundación, 2019).

El reúso de afluentes se convirtió en una solución confiable y aceptada, donde este ayuda a disminuir la huella ambiental que las fábricas ocasionan, ya sea por la producción de insumos para el consumo de las personas o el agua residual ocasionada en las zonas urbanas del mundo; esto es reconocido como una responsabilidad de disposición de desecho, donde esta modalidad se puede convertir en un recurso valioso. Estos datos aportan una idea de la importancia que tiene el tratamiento y la reutilización de aguas residuales en el sector industrial en el mundo, solamente el 15% de las aguas residuales colectadas estaban dirigidas a plantas de tratamiento, las cuales no están funcionando adecuadamente en muchos casos.

Las aguas residuales producto del procesamiento de la leche, genera en su mayoría la elaboración de productos lácteos tales como la mantequilla, queso, cuajada entre otros. Según la FEDEGAN se presenta un aumento en los últimos años en la producción de la leche en Colombia evidenciándose en la Tabla 2. Además, de observarse detalladamente en la Figura 2.

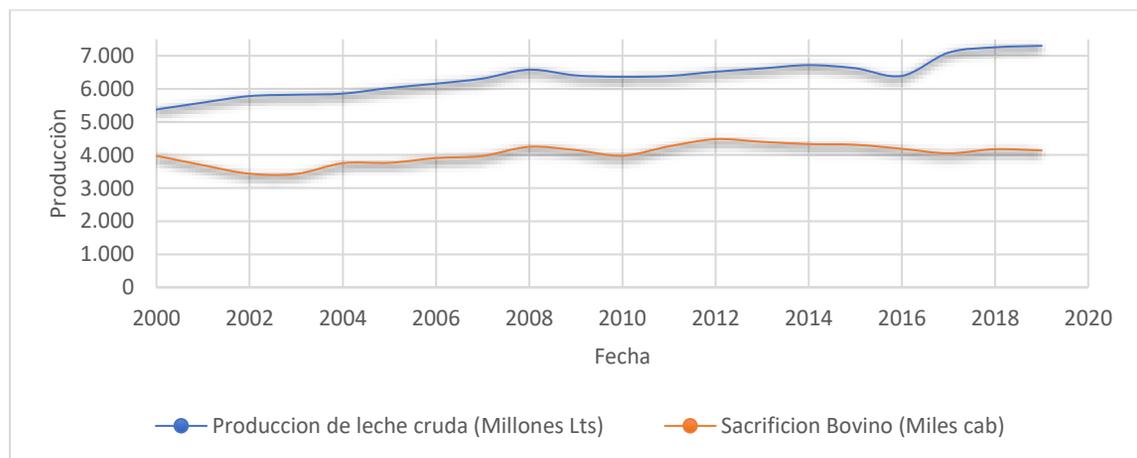


**Tabla 2.** Producción Colombiana.

Fecha	Producción de leche cruda (millones Lts)	Sacrificio bovino (miles cab)
2000	5.376	3.977
2001	5.586	3.691
2002	5.782	3.435
2003	5.824	3.428
2004	5.856	3.753
2005	6.026	3.763
2006	6.157	3.908
2007	6.312	3.973
2008	6.579	4.248
2009	6.406	4.149
2010	6.363	3.979
2011	6.390	4.262
2012	6.518	4.479
2013	6.617,82	4.399
2014	6.717	4.332
2015	6.623	4.311
2016	6.391	4.188
2017	7.094	4.052
2018	7.257	4.177
2019	7.301	4.137

**Fuente:** (Foreign Agricultural Service- United States Department of Agriculture (USDA), 2000-2019)

**Figura 2.** Producción colombiana.



**Fuente:** (Foreign Agricultural Service- United States Department of Agriculture (USDA), 2000-2019)

Concentraciones que representan alto contenido orgánico y niveles altos de sólidos disueltos y suspendidos, que incluyen grasas, aceites, amoníaco, minerales y



fosfatos. El problema de contaminación se da por exceso de nutrientes en abundancia donde crecen plantas y otros organismos. Cuando mueren, se pudren y llenan el agua de malos olores y le dan un aspecto nauseabundo, disminuyendo drásticamente su calidad, desarrollando el proceso de putrefacción que consume una gran cantidad del oxígeno disuelto y las aguas dejan de ser aptas para la mayor parte de los seres vivos, esto conlleva a bacterias que son perjudiciales para la salud de la persona.



## 5. OBJETIVOS

### 5.1. OBJETIVO GENERAL

Desarrollar una propuesta de una planta de tratamiento y reúso de agua residuales (PTAR) para la industria láctea.

### 5.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Establecer las características de calidad de agua residual de los procesos productivos lácteos.
- Llevar a cabo un análisis técnico de alternativas de tratamiento y operación, modelando en el software de aguas residuales GPS-X.
- Realizar un análisis de sensibilidad de los parámetros de operación en el sistema de tratamiento para el reúso del agua tratada.



## 6. MARCO DE REFERENCIA

En el siguiente capítulo se presentará la información teórica de partida para la realizar el análisis teórico y a partir de esto poder generar estrategias que nos permitan cumplir con nuestros objetivos planteados.

### 6.1. MARCO TEÓRICO

#### 6.1.1. Descargas líquidas de la industria láctea

Por lo general la leche se recibe en las primeras horas del día y se procesa horas después, lo cual hace que los residuos líquidos se generan de manera no continua a través del día, indicando que el caudal varía en función del tiempo y de los procesos que se estén utilizando.

En el proceso de pasteurización y envasado de leche, el residuo de este, está constituido por las aguas de lavado, siendo igual a una leche muy diluida. Su pH varía ácido y alcalino de acuerdo a las sustancias empleadas en la limpieza de los tanques, lavado de pisos, etc., Tales siendo como la sosa caustica y el cloro. Conociendo el origen de los residuos líquidos de la planta que son:

- Residuos productos del lavado, perdidas y purificación.
- Aguas contaminadas por soluciones alcalinas, acidas o desinfectantes.
- Aguas de enfriamiento y condensación.

#### 6.1.2. Procesos de Tratamiento de Aguas Residuales

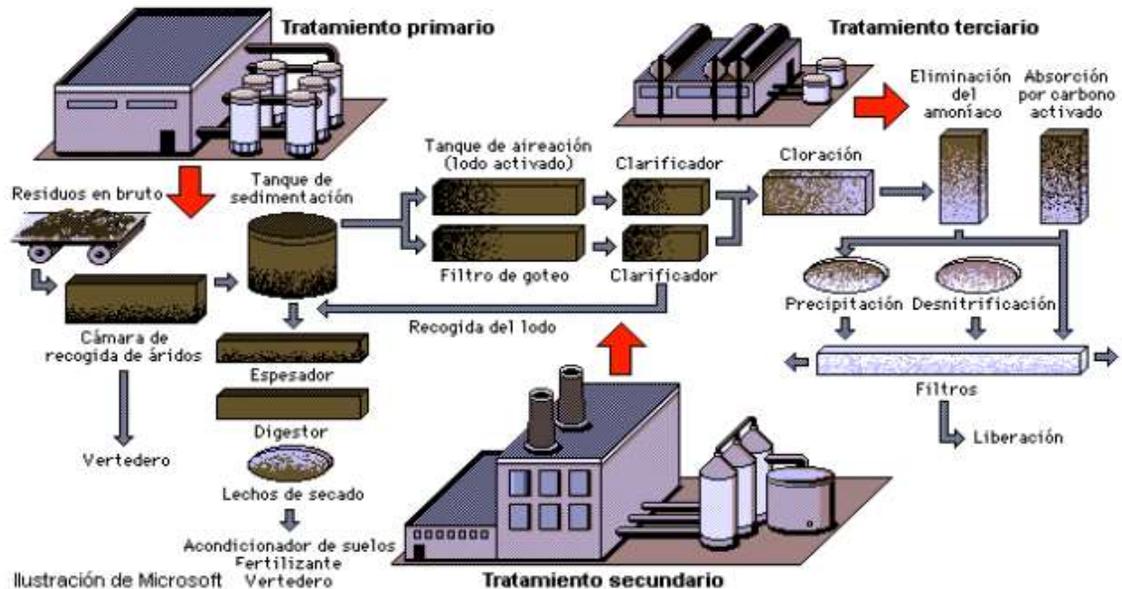
Una serie de procesos físicos, químicos y biológicos que tienen como fin eliminar los contaminantes físicos, químicos y biológicos presentes en el agua efluente del uso humano<sup>1</sup>. Dentro del tratamiento de aguas residuales existe un gran número de operaciones y procesos disponibles, es común hablar de pre-tratamiento, tratamiento primario, tratamiento secundario y tratamiento terciario, evidenciándose en la Figura 3, mostrando una idea del tratamiento de aguas residuales.

---

<sup>1</sup> ROMERO, Jairo Alberto. Op. cit. p.137.



Figura 3. Tratamiento de agua residuales



Fuente: (Ahmadi, M., Samarbaf, S., Golshan, M., Jorfi, S. y Ramavandi, B., 2018).

### 6.1.2.1. Pre-tratamiento

Tiene como finalidad remover del agua ciertos constituyentes que puedan afectar el funcionamiento y mantenimiento del sistema de tratamiento de aguas residuales, dentro de este se tienen:

- Trampas de grasa: Mecanismo que utiliza la diferencia de densidades para separar las grasas y aceites presentes en el agua residual, el diseño de estas varía dependiendo del agua residual de la industria. En el caso de la industria Láctea, las trampas de grasas deben tener un tiempo de retención hidráulico adecuado para permitir la remoción del material grasoso. El cambio brusco de la temperatura puede producir la disolución de las grasas, también el cambio variable del caudal puede producir agitación excesiva, lo que impide la flotación de la grasa.
- Tanques de homogenización: Amortiguan los cambios bruscos de caudal, que traen como consecuencia la variación de parámetros como la temperatura y el pH, lo que nos afecta el funcionamiento de la planta de tratamiento.



- Separación de sólidos: Se encuentran rejillas de tipo tamizado y cribado, que ayudan a separar cierta cantidad de sólidos presentes en el agua y evitan el daño de las bombas y tuberías.

#### 6.1.2.2. Tratamiento Primario.

El objetivo de este tratamiento es la eliminación de los sólidos en suspensión. Este se realiza por medio de un proceso de sedimentación simple por gravedad o asistida por sustancias químicas. El agua residual es depositada en grandes estanques decantadores y queda retenida allí de 1 a 2 horas. («Etapas del tratamiento de aguas residuales»).

#### 6.1.2.3. Tratamiento Secundario.

Los objetivos principales de esta etapa es eliminar la materia orgánica en estado coloidal y en disolución a través de un proceso de oxidación de naturaleza biológica. También, la degradación de sustancias del contenido biológico presente en el agua residual causado por desechos humanos. («Etapas del tratamiento de aguas residuales»).

#### 6.1.2.4. Tratamiento Terciario.

Esta es la etapa final del tratamiento de aguas residuales. En ella se realizan una serie de procesos, entre ellos la eliminación de agentes patógenos como bacterias fecales y de los nutrientes. Estos procesos aumentan a estándares requeridos la calidad del agua para ser descargada en mares, ríos, lagos y demás cuencas hidrográficas. («Etapas del tratamiento de aguas residuales»).

#### 6.1.3. Tratamiento de aguas residuales

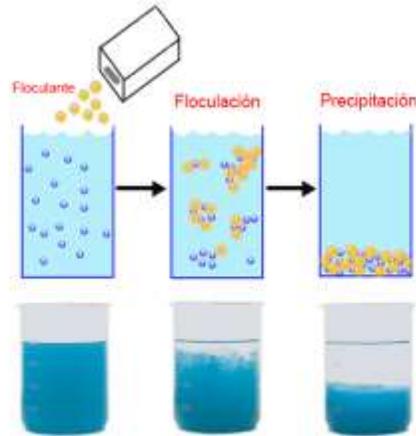
Las aguas residuales se generan como consecuencia de la actividad industrial donde la diversidad de estas aguas, pueden ser muy grande ya que, tienen contaminantes de naturaleza variados. El agua una vez ha sido utilizada, debe ser tratada antes de ser vertida con independencia si se devuelve al medio natural o se vierte en una red de alcantarillado, abarcando las siguientes operaciones:

a) Físicas: aplicando procesos físicos de desbaste, dilaceración, mezclado, floculación, sedimentación, filtración, y flotación.

Floculación: Se encarga que las partículas en suspensión aumenten su superficie de contacto debido a la adición de productos químicos en los procesos de precipitación, mostrándose en la Figura 4 el proceso de floculación.



**Figura 4.** Proceso de floculación.

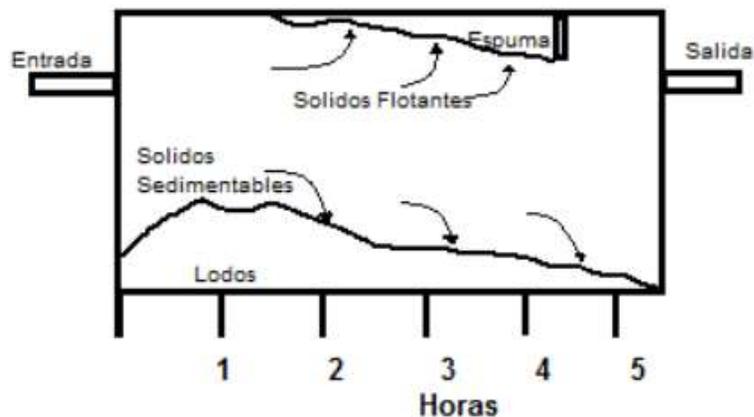


**Fuente:** (Los hijos de gudini, 2015

<https://loshijosdegudinio.wordpress.com/2015/05/22/floculacion/>)

Sedimentación: Proceso de separación de los componentes del agua, en fase sólida y fase líquida, se utiliza en puntos de depuración de aguas residuales como se detalla en la figura 5.

**Figura 5.** Proceso de sedimentación.



**Fuente:** (Blogs post, 2015)

b) Químicos: Aquellos que eliminan contaminantes del agua residual por medio de reacciones químicas de compuestos, utilizándose la precipitación química, la transferencia de gases, adsorción, decoloración, intercambio iónico, entre otros.



Precipitación química: Proceso de obtención de un sólido a partir de una disolución puede realizarse por una reacción química, por evaporación del disolvente o por enfriamiento repentino.

Adsorción: Proceso donde los iones se retienen en la superficie de un sólido adsorbente, teniendo el proceso de flotación donde se observa que el gas es el adsorbato y el adsorbente son los sólidos suspendidos.

c) Biológicos: Normalmente se presentan en los tratamientos secundarios como un proceso de coagulación y eliminación de sólidos coloidales no sedimentables, utilizando cantidad variada de microorganismo bacterianos. Teniendo los procesos de lechos oxidantes, post-precipitación, liberación al medio de efluentes, con o sin desinfección según las normas de cada jurisdicción.

La biodigestión aerobia, anaeróbica y los humedales artificiales utilizan la materia orgánica biodegradable de las aguas residuales, como nutrientes de una población bacteriana, a la cual se le proporcionan condiciones artificiales para su crecimiento, de esta manera se remueve la materia contaminante. En el tratamiento de aguas residuales a nivel biológico se distinguen sistemas como:

- **Sistemas aerobios:** La presencia de  $O_2$  hace que este elemento sea el aceptor de electrones, por lo que se obtienen unos rendimientos energéticos elevados, provocando una importante generación de fangos, debido al alto crecimiento de las bacterias aerobias. Su aplicación a aguas residuales puede estar muy condicionada por la baja solubilidad del oxígeno en el agua.
- **Sistemas anaerobios:** En este caso el aceptor de electrones puede ser el  $CO_2$  o parte de la propia materia orgánica, obteniéndose como producto de esta reducción el carbono es su estado más reducido, Metano ( $CH_4$ ). La utilización de este sistema tiene, como ventaja importante, la obtención de un gas combustible.
- **Sistemas anóxicos:** Se denominan así los sistemas en los que la ausencia de  $O_2$  y la presencia de  $NO_3^-$  hacen que este último elemento sea el aceptor de electrones, transformándose, entre otros, en  $N_2$ , elemento completamente inerte. Por tanto, es posible, en ciertas condiciones, conseguir una eliminación biológica de nitratos (desnitrificación).



#### 6.1.4. Contaminantes en las industrias lácteas.

Varían desde los orgánicos e inorgánicos, sin embargo, la carga contaminante orgánica es debida a los altos reactivos que se utilizan para la realización de los productos.

- Contaminantes inorgánicos: Productos disueltos o dispersos en el agua, que provienen de descargas industriales compuestos por sales minerales y son determinadas por medio de composición iónica y la concentración salina del agua, hoy en día se concentran los tratamientos en la reducción de nitrógeno, sales fosfóricas y metales pesados.
- Carbono orgánico total: Material orgánico que se determina mediante la medida de  $CO_2$  en la combustión de la muestra.
- Demanda química del oxígeno (DQO): Indica la cantidad de contaminantes en el agua residuales susceptibles a la oxidación mediante la suspensión o disueltas.
- Demanda biológica del oxígeno (DBO): Medida de contenido de sustancias degradables biológicamente en el agua residual.
- Perdidas por calcinación: Es una medida de la cantidad orgánica presente en la muestra, que se determina por el peso de la muestra antes y después de realizada la calcinación.
- Contaminación orgánica: Concentración de contaminantes en especificar la cantidad total por unidad de volumen de agua residual.

#### 6.1.5. Contaminación en la industria láctea.

Las cadenas lácteas se relacionan mediante la variedad de sus productos y los diferentes métodos de producción que causan impactos sobre los recursos naturales. En este sentido la producción sostenible busca incrementar la eficiencia en general y reducir los riesgos para el ambiente, mediante innovación tecnológica, diseño y optimización de productos y procesos en concordancia con las nuevas tendencias ecológicas con el fin de mitigar el impacto sobre el ambiente y conseguir la sostenibilidad ambiental (PGAS, 2016).

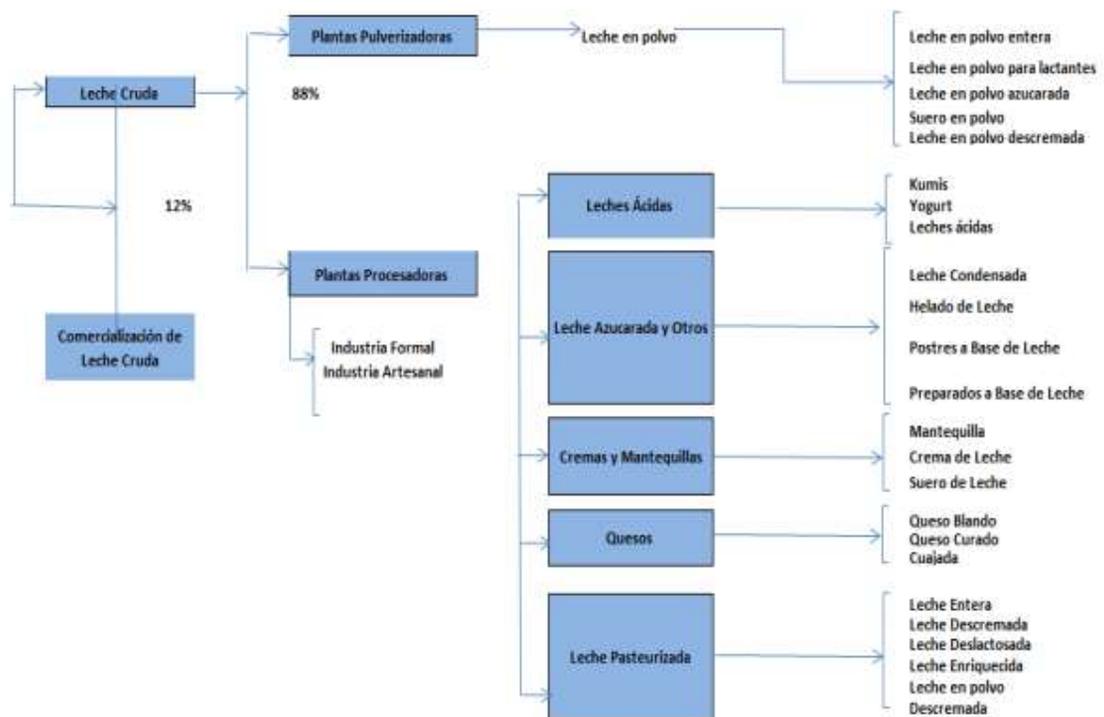
Las industrias lácteas producen gran cantidad de aguas residuales producto de los distintos procesos de producción que se llevan a cabo en estas. La mayor parte de estas aguas proceden fundamentalmente de la limpieza de aparatos, maquinas, por lo que estas contienen restos de productos lácteos y productos químicos (ácidos, detergentes, desinfectantes, etc.), aunque también hay inversiones en aguas de refrigeración, que si no se recuperan en su totalidad se puede suponer hasta tres



veces la cantidad de leche que entra. Detallándose en la Figura 6 el eslabón de la cadena láctea.

Por otra parte, la industria láctea se caracteriza por un elevado consumo de agua y energía para la limpieza de equipos e instalaciones y para la puesta en marcha de maquinarias en el proceso de producción, también en la gestión de residuos sólidos (restos de proceso, envases y embalajes), requieren de un elevado consumo de energía.

Figura 6. Esquema industrial de la cadena láctea en Colombia.



Fuente: (Agrocadenas, 2006)

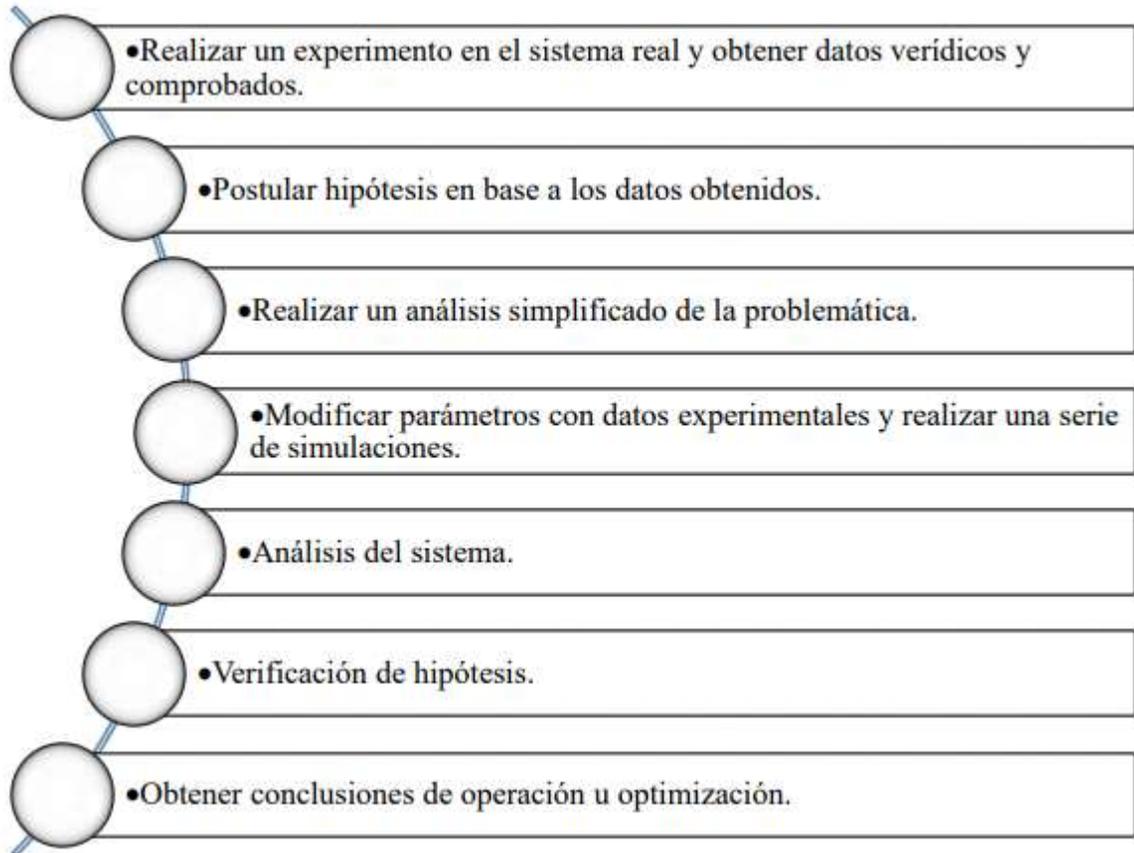
## 6.2. SIMULACIÓN

### 6.2.1. Importancia de la simulación.

Nos permite realizar análisis de comportamientos de sistemas reales y experimentar con escenarios aleatorios controlados. El modelado de una PTAR enfocados en los tanques y reactores se trata de una descripción matemática de los procesos generados en el sistema de estudio, existen softwares especializados para la resolución de dichos modelos en el tratamiento de aguas residuales, para el uso del software se debe plantear dichos procesos o mecanismo a trabajar dentro de este, para así, llegar a una conclusión. Demostrándose en la Figura 7.



**Figura 7.** Importancia del modelado y simulación en sistemas generales.



**Fuente:** (Artos B., Constante J., 2019. Hydromantis E. S., 2017)

### 6.2.2. Características del Software GPS-X.

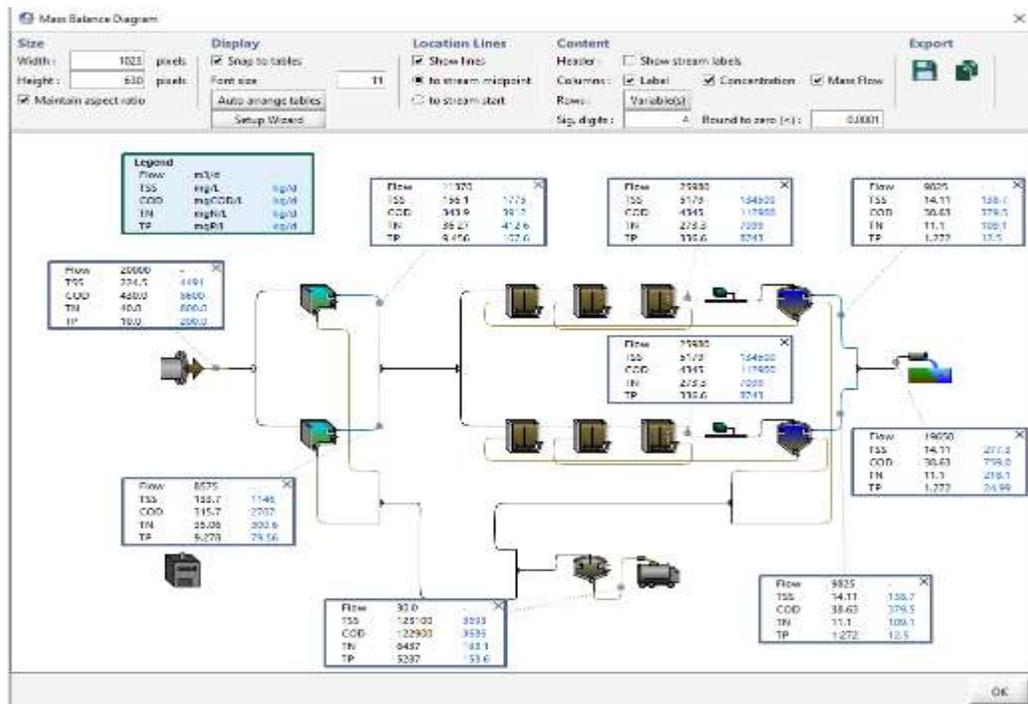
La elección y utilización de un programa especializado para la realización de simulaciones y modelaciones de procesos de una planta de tratamiento de aguas residuales, es una base fundamental para la obtención de resultados fiables mediante diagramas de procesos. Permite comprender y predecir el comportamiento de los procesos en la PTAR los cuales están relacionados a las condiciones ambientales, de descarga y la legislación aplicada (Hydromantis S. E., 2017).

El programa GPS-X fue desarrollado por la empresa consultora especializada en ingeniería ambiental Hydromantis, Inc. Fundada en Canadá en el año de 1985, su primera versión fue lanzada en 1991, actualmente existen nuevas versiones, demos disponibles en la página web de la empresa.





Figura 9. Balance de masas en el software GPS-X.



Fuente: (Hydromantis, 2019)

### 6.2.3. Módulo Analizador del Software GPS-X.

El módulo Analizador permite realizar automáticamente análisis de sensibilidad dinámica o de estado estable en los parámetros del modelo, lo que le ahorrará una cantidad significativa de tiempo y esfuerzo (Hydromantis, 2018).

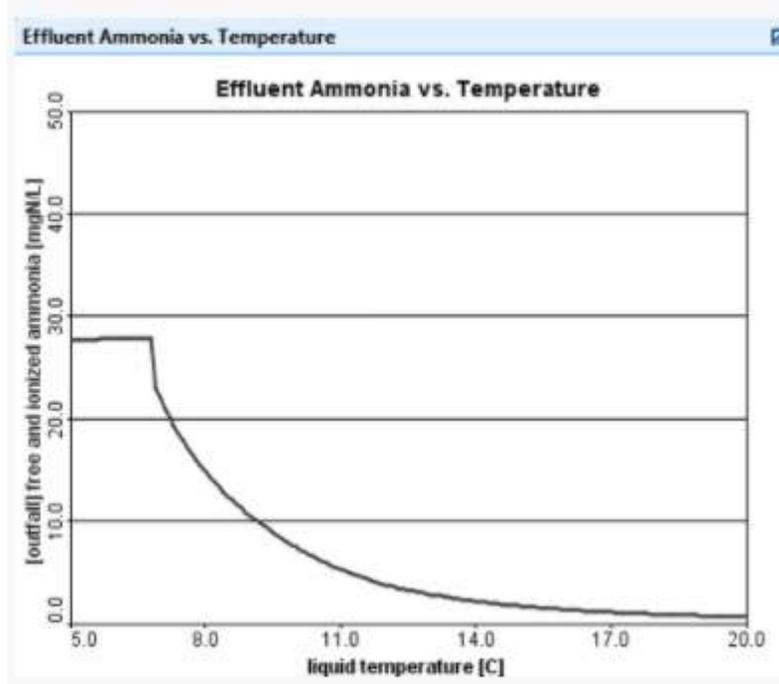
El análisis dinámico o de sensibilidad se puede realizar en:

- Flujo o carga de flujo secundario o de flujo secundario (sobrenadante, etc.)
- Tamaños de tanque
- Gestión del flujo de tormentas (derivación, almacenamiento)
- Desperdicio, reciclaje, flujo de aire y tasa de dosis de químicos
- Puntos de ajuste del controlador automático y parámetros de ajuste
- Parámetros cinéticos y estequiométricos
- Establecimiento de parámetros (por ejemplo, SVI)



Observando algunas aplicaciones en la Figura 10, el efecto de las medidas de rendimiento de una planta de tratamiento, como: Concentraciones de efluentes, eficiencia de eliminación de nutrientes, carga contaminante a las aguas receptoras, variables operativas de la planta (p. Ej. MLSS, DO) y producción de lodos.

**Figura 10.** Análisis automático de sensibilidad en estado estacionario del amoníaco efluente frente a la temperatura de las aguas residuales.



Fuente: (Hydromantis, 2018)

### 6.3. MARCO LEGAL

El gobierno nacional ha reglamentado una normatividad que se encarga de regular el manejo de vertimientos, en la cual se establecen los parámetros mínimos que debe cumplir el agua residual antes de descargarse al alcantarillado.

#### 6.3.1. Ley 373 de 1997

Dando alcance a esta Ley, el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible establece las disposiciones relacionadas con el uso de aguas residuales tratadas que permitirán incidir a nivel nacional, regional y local en: El uso eficiente del agua, la reducción de la contaminación, la reducción de la demanda de agua en las zonas con oferta limitada y la transformación de conflictos por el agua. Señalándose algunos artículos importantes en la Tabla 3.



**Tabla 3. Normativa Nacional**

<b>Artículo 1. Programa para el uso eficiente y ahorro del agua</b>	Todo plan ambiental regional y municipal debe incorporar obligatoriamente un programa para el uso eficiente y ahorro del agua. Se entiende por programa para el uso eficiente y ahorro de agua el conjunto de proyectos y acciones que deben elaborar y adoptar las entidades encargadas de la prestación de los servicios de acueducto, alcantarillado, riego y drenaje, producción hidroeléctrica y demás usuarios del recurso hídrico.” (Congreso de Colombia 2003).
<b>Artículo 5. Reusó obligatorio del agua</b>	Las aguas utilizadas, sean éstas de origen superficial, subterráneo o lluvias, en cualquier actividad que genere afluentes líquidos, deberán ser reutilizadas en actividades primarias y secundarias cuando el proceso técnico y económico así lo ameriten y aconsejen según el análisis socio-económico y las normas de calidad ambiental.” (Congreso de Colombia 2003).
<b>Artículo 15. Tecnología de bajo consumo de agua</b>	Los ministerios responsables de los sectores que utilizan el recurso hídrico reglamentarán en un plazo máximo de seis (6) meses la instalación de equipos, sistemas e implementos de bajo consumo de agua para ser utilizados por los usuarios del recurso y para el reemplazo gradual de equipos e implementos de alto consumo.” (Congreso de Colombia 2003).

**Fuente:** (Gobierno de Colombia, 2017)

### 6.3.2. La Resolución 0631 de 2015.

La cual establece los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de agua superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones. Tabla 4 presenta los parámetros permisibles según la resolución 0631 del 2015.



**Tabla 4.** Parámetros permisibles según la resolución.

PARÁMETRO	UNIDADES	ELABORACIÓN DE PRODUCTOS LÁCTEOS
<b>Generales</b>		
pH	pH	6 a 9
Demanda química de oxígeno (DQO)	mg/L O <sub>2</sub>	450
Demanda biológica de oxígeno (DBO <sub>5</sub> )	mg/L O <sub>2</sub>	250
Sólidos suspendidos totales (SST)	mg/L	150
Sólidos sedimentables (SED)	mg/L	2
Grasas y aceites	mg/L	20
Compuestos semivolátiles fenólicos	mg/L	
Sustancias activas al azul de metileno (SAAM)	mg/L	Análisis y Reporte
<b>Hidrocarburos</b>		
Hidrocarburos totales (HTP)	mg/L	
<b>Compuesto de Fósforo</b>		
Orto fosfatos	mg/L	Análisis y Reporte
Fósforo total	mg/L	Análisis y Reporte
<b>Compuestos de nitrógeno</b>		
Nitratos	mg/L	Análisis y Reporte
Nitritos	mg/L	Análisis y Reporte
Nitrógeno Amoniacal	mg/L	Análisis y Reporte
Nitrógeno total	mg/L	Análisis y Reporte
<b>Iones</b>		
Cloruros	mg/L	500
Sulfatos	mg/L	500
Sulfuros	mg/L	
<b>Metales y Metales</b>		
Cadmio (Cd)	mg/L	
Cinc (Zn)	mg/L	
Cobre (Cu)	mg/L	
Cromo (Cr)	mg/L	
Mercurio (Hg)	mg/L	
Níquel (Ni)	mg/L	
Plomo (Pb)	mg/L	
<b>Otros parámetros para análisis y reporte</b>		
Acidez total	mg/L CaCO <sub>3</sub>	Análisis y Reporte
Alcalinidad total	mg/L CaCO <sub>3</sub>	Análisis y Reporte
Dureza cálcica	mg/L CaCO <sub>3</sub>	Análisis y Reporte
Dureza total	mg/L CaCO <sub>3</sub>	Análisis y Reporte
Color real	m-1	Análisis y Reporte

**Fuente:** (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2015)

### 6.3.3. Resolución 1207 de 2014.

Por la cual se adoptan disposiciones relacionadas con el uso de aguas residuales tratadas donde “*el contexto de Gestión Integral del Recurso Hídrico el reúso del agua residual aparece como una estrategia para el ahorro y uso eficiente del agua*”.



• **Artículo 7. Criterios de calidad.**

El uso de agua residual tratada deberá cumplir previamente criterios de calidad que se evidencian en la Tabla 5 , donde se presentan las variables con sus respectivas unidades de medida y sus valores límites máximos permisibles correspondientes (Resolución 1207 de 2014, 2010).

**Tabla 5.** Criterios de calidad.

Variable	Unidad	Valor límite máximo permisible
<b>FISICOQUÍMICOS</b>		
pH	pH	6,0-9,0
<b>MICROBIOLÓGICOS</b>		
Coliformes termo tolerantes	NMP/100ml	1,00E+04
Helmintos parásitos humanos	Huevos-larvas/L	1,0
Protozoos parásitos humanos	Quistes/L	1,0
Salmonella sp	NMP/100ml	1,0
<b>QUÍMICOS</b>		
Benceno, Tolueno, Etilbenceno y Xileno (BTEX)	mg/L	0,001
Esteres Ftalatos	mg/L	0,005
Fenoles	mg/L	0,002
Hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP)	mg/L	0,001
<b>METALES</b>		
Aluminio	mgAl/L	5,00
Berilio	mgBe/L	0,10
Cadmio	mgCd/L	0,01
Zinc	mgZn/L	3,00
Cobalto	mgCo/L	0,05
Cobre	mgCu/L	1,00
Cromo	mgCr/L	0,10
Plomo	mgPb/L	5,00
Hierro	mgFe/L	5,00
Litio	mgLi/L	2,50
Magnesio	mgMn/L	0,20
Mercurio	mgHg/L	0,001
Molibdeno	mgMo/L	0,07
Níquel	mgNi/L	0,20
Vanadio	mgV/L	0,10
<b>OTROS</b>		
Demanda bioquímica de oxígeno 5 días (DQO5)	mgO <sub>2</sub> /L	30,0

**Fuente:** (Resolución 1207 de 2014, 2010)



- **Artículo 8 – Distancias mínimas de retiro para el desarrollo del reúso.**

Además de cumplir con los criterios de calidad para el reúso, se debe cumplir con las distancias mínimas de retiro presentadas en la Tabla 6 , al momento de efectuar la actividad de reúso:

**Tabla 6.** Distancias mínimas.

<b>Uso: Industrial</b>	<b>Distancia mínima (m)</b>
Intercambio de calor en torres de enfriamiento y en calderas.	15 metros medidos desde la línea de mareas máximas o la del cauce permanente de todo cuerpo de agua superficial hasta el perímetro de las áreas
Descarga de aparatos sanitarios.	15 metros de radio medidos desde los pozos y aljibes de agua subterránea hasta el perímetro de las áreas de reúso.
Limpieza mecánica de vías, riego de vías para el control de material particulado.	90 metros de radio medidos desde cada punto de reúso en torres de enfriamiento durante el lapso de tiempo que dure esta actividad para aquellas áreas con acceso al público.
Sistemas de redes contra incendios.	30 metros de radio medidos desde cada punto de aplicación cuando se presente la operación de los sistemas de redes contra incendios.

**Fuente:** (Resolución 1207 de 2014, 2010)

#### 6.3.4. Norma Internacional.

Resolución 64/292 aprobada por la Asamblea General el 28 de julio de 2010 derechos humanos al agua y el saneamiento.

En la actualidad aproximadamente 884 millones de personas carecen de agua y más de 2.600 millones no presentan acceso al saneamiento básico; de igual forma por causa de esto, se afectan alrededor de 1,5 millones de niños menores de 5 años y se pierden 443 millones de días escolares, debido a las enfermedades causadas por el agua contaminada.

- Reconoce que el derecho al agua potable y el saneamiento es un derecho humano esencial para el pleno disfrute de la vida y de todos los derechos humanos.
- Exhorta a los Estados y las organizaciones internacionales a que proporcionen recursos financieros y propicien el aumento de la capacidad y



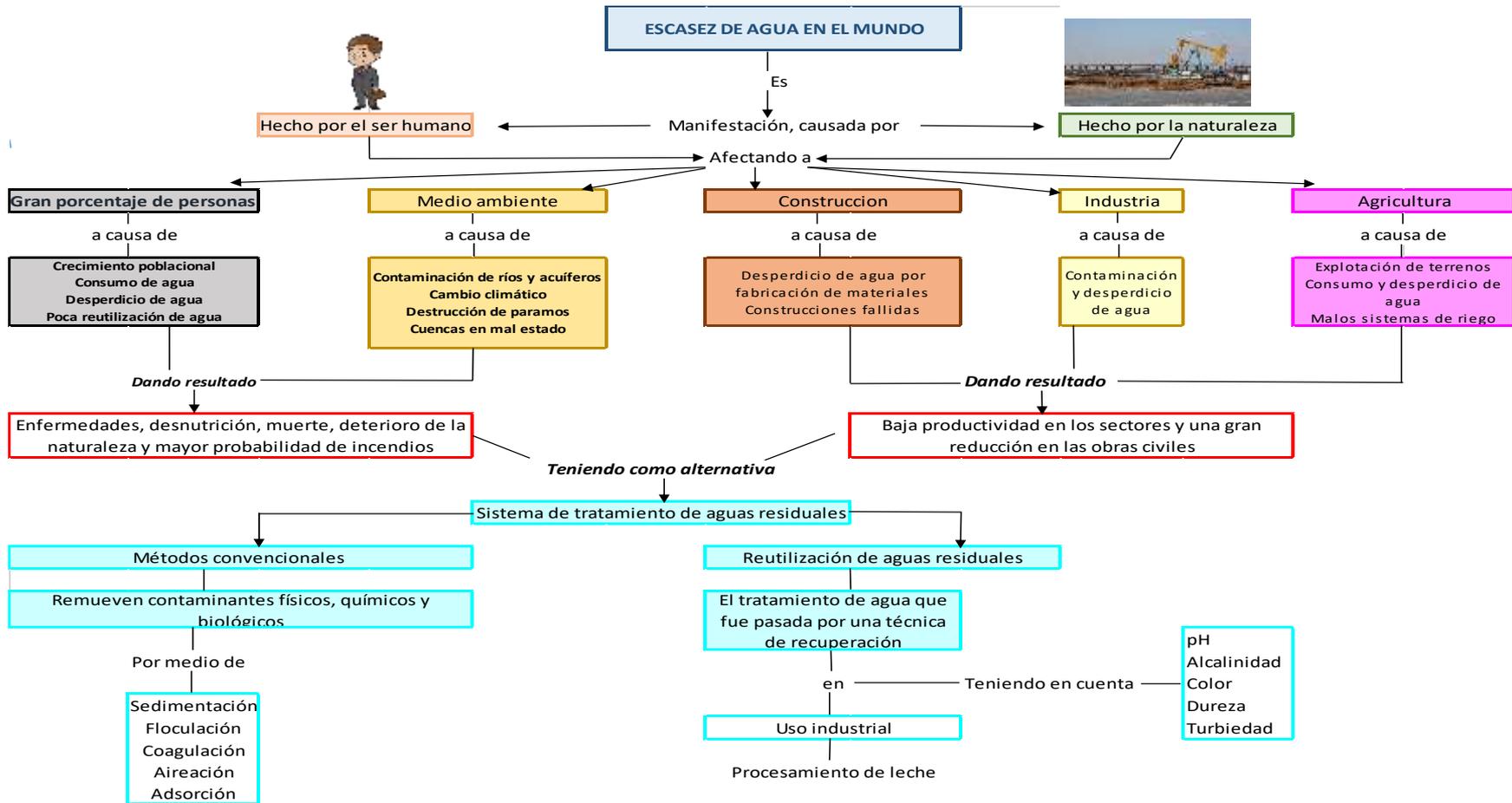
la transferencia de tecnología por medio de la asistencia y la cooperación internacionales, en particular a los países en desarrollo, a fin de intensificar los esfuerzos por proporcionar a toda la población un acceso económico al agua potable y el saneamiento.

- Acoge con beneplácito la decisión del Consejo de Derechos Humanos de pedir a la experta independiente sobre las obligaciones de derechos humanos relacionadas con el acceso al agua potable y el saneamiento que presente un informe anual a la Asamblea General, y alienta a la experta independiente a que siga trabajando en todos los aspectos de su mandato y a que, en consulta con todos los organismos, fondos y programas pertinentes de las Naciones Unidas, incluya en el informe que le presente en su sexagésimo sexto período de sesiones las principales dificultades relacionadas con el ejercicio del derecho humano al agua potable y el saneamiento y su efecto en la consecución de los Objetivos de Desarrollo del Milenio.

#### 6.4. **MARCO CONCEPTUAL**

La elaboración de productos lácteos implica un alto consumo de volúmenes de agua en los procesos de lavados de equipos y plantas, observando que estas cifras de consumo y contaminación de agua indican un impacto y solución que se debe realizar, en este sector para un uso racional del recurso hídrico dado a que la sostenibilidad de la industria alimenticia, entre ellas la láctea depende de la disponibilidad del agua en calidad y cantidad. Por ello, de manera conceptual se observa en la Figura 11. Detalladamente los distintos impactos que nos llevan a la escasez del agua y como, se puede llegar a un reusó de esta.

Figura 11. Marco conceptual



Fuente: Elaboración propia

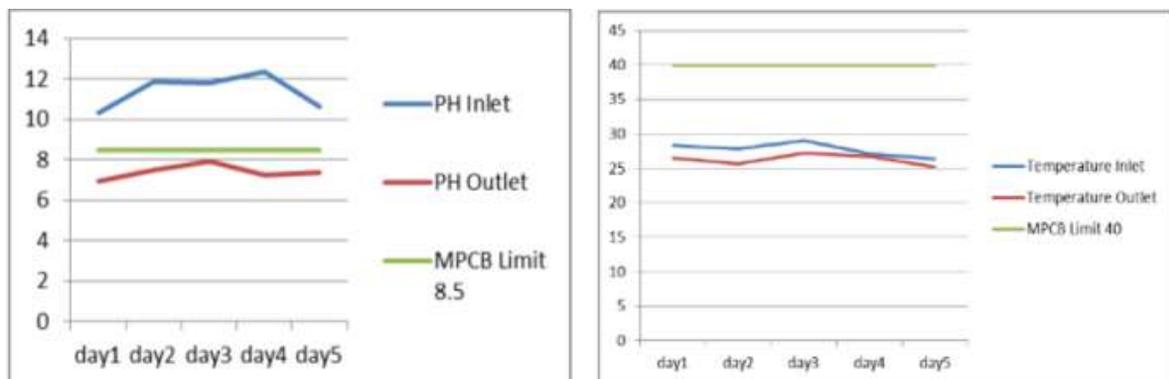
## 7. ESTADO DE ARTE

### 7.1. Artículo 1: Effluent Treatment Plant of Dairy Wastewater – A Performance Evaluation.

La investigación se basa en la contaminación de las industrias alimentarias, donde se resaltan las afectaciones que producen la fabricación de productos lácteos. Evaluando el desempeño de la planta de tratamiento de efluentes, comparando la calidad de aguas residuales regeneradas con estándares de la Junta de Control de Contaminación de Maharashtra India (MPCB), para determinar su idoneidad para su reutilización. La metodología consistió en procesos de tratamiento de efluentes industriales lácteos que constan de uno y más procesos tales como equalización, neutralización, tratamiento físico y biológico. Las muestras de aguas residuales se recolectaron utilizando botellas de plástico de un litro del tanque de recolección, tanque de aireación, clarificador y UASB.

La planta fue diseñada para reducir DQO en menos de 250 mg/L del tanque de efluente crudo, bomba de aguas residuales al tanque de eliminación de grasa, luego, con la ayuda de la gravedad, las aguas residuales llegan al tanque de equalización y luego al UASB, al tanque de aireación y al clarificador, etc. El manejo de lodos se realiza con la ayuda de un lecho de secado de lodos y los lodos secos se recolectan y transportan a un sitio de eliminación administrado sistemáticamente. La investigación se realizó por cinco días, tomando como características del agua pH y temperatura evidenciándose en la Gráfica 1. Sólidos disueltos totales (SVI) y demanda química del oxígeno (CDO) en la Gráfica 2, y por último la concentración de lodos (TDS) en la Gráfica 3.

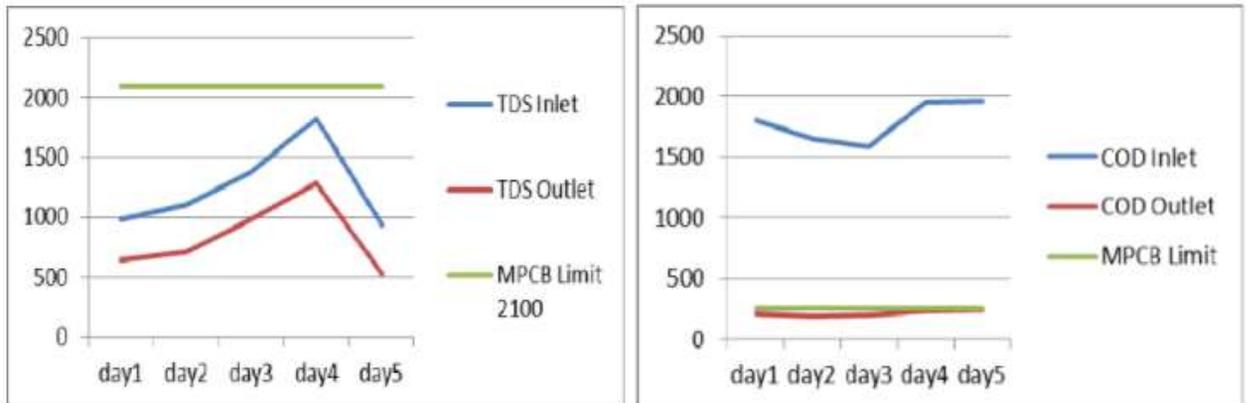
**Gráfica 1.** Valor de pH - Temperatura del afluente con respecto al límite de MPCB



**Fuente:** (Riyaj K, Mulla, Ajim S, Sutar, Anil C, Ranvee, 2015)

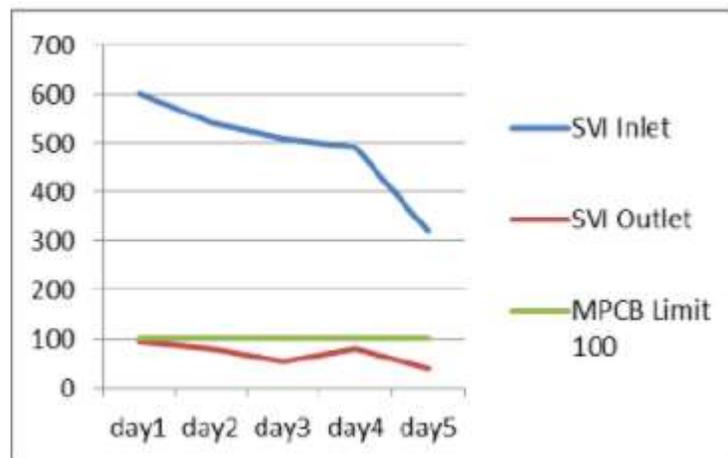


**Gráfica 2.** Valor de TDS-CDO del afluente con respecto al límite de MPCB.



**Fuente:** (Riyaj K, Mulla, Ajim S, Sutar, Anil C, Ranvee, 2015)

**Gráfica 3.** Valor de SVI del afluente con respecto al límite de MPCB



**Fuente:** (Riyaj K, Mulla, Ajim S, Sutar, Anil C, Ranvee, 2015)

En conclusión, el afluente tratado cumplió con el estándar MPCB para descarga en aguas superficiales interiores, lo cual se puede deducir que la planta está funcionando de manera eficiente y tiene un alto potencial de reducción de pH, temperatura, TDS (sólidos disueltos totales), DQO, por lo tanto, esta tecnología de tratamiento puede considerarse como una planta potencial para el tratamiento de aguas residuales lácteas.

## 7.2. Artículo 2: Anaerobic Digestion of Dairy Industry Wastewater – Biogas Evolution A.

En este trabajo se investiga la generación de Biogás y los factores que afectan la generación de este como es, el pH, temperatura, alcalinidad, etc., de las aguas



residuales de la industria láctea para optimizar la liberación de biogás por degradación biológica por medio de la digestión anaeróbica. El estudio mostró un rendimiento de un reactor de manto de lodo anaeróbico de flujo ascendente híbrido para el tratamiento de aguas residuales lácteas. El reactor HUASB se cargó con diferentes tasas de carga orgánica de 2,5 g / l / día, 3,0 g / l / día y 3,5 g / l / día. El autor observó que el Reactor UASB es adecuado para tratar el agua residual de la lechería. El rendimiento del reactor se mejoró mediante la temperatura de funcionamiento, el pH del agua residual, la población microbiana y el agitador magnético para el reactor de agitación continua. El rendimiento del reactor depende de la Carga Orgánica Volumétrica (OLR), el Tiempo de Retención Hidráulica (HRT) y el lodo de siembra. La eliminación máxima de DQO es del 88%. Observó que el rendimiento máximo de gas es ligeramente mejor e igual a 750 ml en HUASB que en UASB.

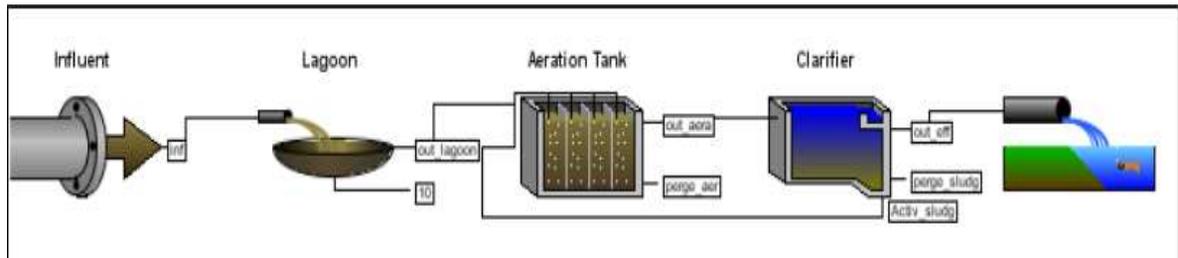
Concluyendo que los resultados investigados, muestran que el biogás es la fuente de energía no convencional más barata producida a través de un método de ingeniería a partir de las aguas residuales de la industria láctea. Donde la eficiencia del proceso anaeróbico tiene un efecto en parámetros como la temperatura, el pH, la tasa de carga orgánica, el tiempo de retención de lodos, el tiempo de retención hidráulica, la velocidad de flujo ascendente y la distribución del tamaño.

### 7.3. **Artículo 3: Simulación de la planta de tratamiento de aguas residuales de la industria láctea en el entorno de GPS-X: Con un caso de estudio.**

Este estudio se basa en observaciones y en los coeficientes del modelo biológico para la transformación y eliminación del carbono, nitrógeno, fosforo y pH (ASM2) como se detalla en la Figura 12, teniendo en cuenta el análisis medio de los efluentes de entrada y salida de Tasi Khan en Irán, se realizó un modelo confiable para las condiciones de concentración máxima. Realizándose tres casos de estudios donde: El primer caso se investiga con la atención del caudal metro soplador. El segundo caso provoca la rápida salida de burbujas de aire de una parte de la superficie que no se ha observado en Tasi Khan. El tercer caso depende del factor B (flujo retorno del reactor) y el cuarto caso depende del factor beta (reactor mezcla).



**Figura 12.** Esquema del proceso de tratamiento de lácteos estudiado en el entorno de software GPS.X.



**Fuente:** (Seyed Mahdi, & Mahdi Pourafshari, 2019)

El modelo presentado por el software (ASM), para el tratamiento aeróbico y anaeróbico nocturno de aguas residuales municipales, con la calibración adecuada, pueden utilizarse para la limpieza industrial nocturna. Entorno de software GPS-X considerando las capacidades de análisis y optimización se observó que el orden de los pasos de calibración es muy importante para determinar las variables asbestocitométricas y de centelleo del modelo. Los resultados de este estudio mostraron que el protocolo propuesto es un camino adecuado para la calibración sostenible en la industria láctea.

#### 7.4. **Artículo 4: Method of Treating Dairy Effluent from the Farm to Produce Clarified Water.**

La investigación se realizó, por la creciente preocupación de cantidad de agua dulce utilizada en las granjas lecheras de Nueva Zelanda y los impactos adversos que los efluentes de los productos lácteos (FDE) tienen sobre el medio ambiente, y con ello permitiera reciclar el agua clarificada para lavar el patio de la granja en la sala de ordeño, reducir el riesgo para la salud del personal del uso de agua reciclada y reducir el riesgo de contaminación. de ríos, lagos y aguas subterráneas de FDE aplicadas a la tierra.

El protocolo de investigación utilizado para desarrollar y probar la efectividad de sulfato poliférrico (PFS) para tratar las aguas residuales de la granja involucró tres pasos: (1) Pruebas estándar de frascos de laboratorio, (2) pruebas de tanques a gran escala y (3) construcción y prueba de plantas piloto; cada uno de estos pasos se describirá a continuación.

- Prueba de frasco de laboratorio: Se recolecto muestras de efluentes de productos lácteos de seis granjas diferentes en Canterbury, Nueva Zelanda, durante todo el año para su uso en el procedimiento de prueba de jarras. Se



realizaron un total de 75 pruebas en frascos utilizando diferentes tasas de coagulante PFS para determinar su eficacia en la aclaración de la FDE. La turbidez de cada uno. Detallándose de manera resumida en la Tabla 7 los 75 resultados de la prueba de frascos para efluentes recolectados de seis granjas en Canterbury durante un período de 18 meses.

**Tabla 7.** Resumen de los 75 ensayos realizados en un periodo de 18 meses.

	Turbidity (NTU)		pH		Average rate of Fe addition to achieve best clarification result (mg Fe L <sup>-1</sup> )
	Untreated FDE	Clarified Water	Untreated FDE	Clarified Water	
Mean	2096	6.32	7.53	5.45	214
S.E.M.	100.55	0.50	0.07	0.06	10.24

**Fuente:** (Keith C. Cameron & Hong J. Di, 2018)

- El tratamiento de FDE en las pruebas de tanques grandes mostró que la PFS significativamente ( $p < 0.001$ ) redujo la turbidez promedio de 2214 NTU en el FDE sin tratar a 17 en el agua clarificada, lo que representa una reducción del 99% en la turbidez. Existieron diferencias significativas entre los parámetros medidos en el efluente tratado en comparación con el FDE no tratado como lo muestra la Tabla 8, esto incluyó un significativo ( $p < 0.05$ ) reducción en E. coli concentración desde un promedio de 247,718 ufc / 100 ml en el FDE sin tratar hasta 22,816 ufc por 100 ml en el efluente tratado (lo que representa una reducción del 91%). La concentración de DRP fue significativamente ( $p < 0,001$ ) reducido de un promedio de 9,7 a 0,03 g - 3 en el efluente tratado (lo que representa una reducción del 99%). Se produjeron aumentos significativos en la turbidez, N total, P total, DBO<sub>5</sub> y contenido de sólidos en el efluente tratado debido al proceso de coagulación que flocula el material FDE que contiene estos componentes. Además, se registró un crecimiento en la concentración de S, Ca, Al, B, Cu, Fe, Mg, Mn, Na y Zn en el efluente tratado debido al incremento en el contenido de sólidos. No hubo aumentos detectables de As, Cd, Cr o Pb en comparación con el agua de estudio sin tratar.

**Tabla 8.** Valores promedio de los parámetros para el efluente lechero de la granja sin tratar

	Untreated farm dairy effluent Mean	Clarified water Mean	Treated effluent Mean	Difference between untreated farm dairy effluent and clarified water Significance	Difference between untreated farm dairy effluent and treated effluent Significance
Turbidity (NTU)	2214	17	6361	***	***
<i>E. coli</i> (cfu 100 ml <sup>-1</sup> )	247,718	55	22,816	***	*
Total-N (g m <sup>-3</sup> )	200	87	447	***	***
NH <sub>4</sub> -N (g m <sup>-3</sup> )	56	43	55	*	NS
Total-P (g m <sup>-3</sup> )	35.27	0.44	111.80	***	***
DRP (g m <sup>-3</sup> )	9.68	0.02	0.03	***	***
K (g m <sup>-3</sup> )	198	182	195	*	NS
S (g m <sup>-3</sup> )	28.20	224.97	320.97	***	***
Al (g m <sup>-3</sup> )	13.83	0.23	34.38	***	***
As (g m <sup>-3</sup> )	nd	nd	nd		*
B (g m <sup>-3</sup> )	0.17	0.08	0.36	***	*
Ca (g m <sup>-3</sup> )	134.44	139.41	193.95	NS	***
Cd (g m <sup>-3</sup> )	0	0.34	0.00	NS	NS
Cr (g m <sup>-3</sup> )	0.16	0.13	0.15	NS	NS
Cu (g m <sup>-3</sup> )	0.16	0.01	0.42	***	***
Fe (g m <sup>-3</sup> )	15.60	13.56	966.15	NS	***
Mg (g m <sup>-3</sup> )	40.90	39.75	51.76	NS	***
Mn (g m <sup>-3</sup> )	1.28	2.43	3.71	***	***
Na (g m <sup>-3</sup> )	55.99	56.53	59.24	NS	*
Ni (g m <sup>-3</sup> )	nd	nd	nd		
Pb (g m <sup>-3</sup> )	0.48	0.18	0.14	NS	NS
Zn (g m <sup>-3</sup> )	1.31	0.50	2.94	***	***
pH	7.89	5.35	5.24	***	***
BOD (g m <sup>-3</sup> )	953	322	1543	***	***
Solids (g m <sup>-3</sup> )	3173	24	8961	***	***
Water (%)	99.7	100.0	99.1	***	***

Statistically significant differences between untreated farm dairy effluent and the clarified water or the treated effluent are shown at  $p < 0.001$  as \*\*\*;  $p < 0.01$  as \*\*;  $p < 0.05$  as \* and no significant difference as NS

**Fuente:** (Keith C. Cameron & Hong J. Di, 2018)

- La prueba de la planta piloto de mezcladoras estáticas en línea tuvo éxito en aclarar el FDE producido a partir de tres lavados separados del patio de la granja realizados en tres días diferentes. La NTU del agua clarificada fue significativamente ( $p < 0,001$ ) reducido cada día de un promedio de 1864 a 51 NTU (lo que representa una reducción del 97%) y el *E. coli* la concentración fue significativamente ( $p < 0,001$ ) reducido de un promedio de 379,647 a 9 ufc por 100 ml (lo que representa una reducción del 99,99%). La concentración de N total en el agua clarificada fue significativamente ( $p < 0,01$ ) reducido cada día de un promedio de 200 a 61 g - 3 (lo que representa una reducción del 70%). La concentración de P total en el agua clarificada fue significativamente ( $p < 0,001$ ) reducido de un promedio de 31,8 a 1,8 g - 3 (representando una reducción del 94%) y la concentración de DRP fue significativamente ( $p < 0,001$ ) reducido de 16,5 a 0,09 g - 3 (que representa una reducción del 99,5%) durante las tres pruebas de la planta piloto.



En conclusión, este nuevo método de tratamiento del efluente de los productos lácteos de la granja ha tenido éxito en la producción de agua clarificada que se puede reciclar para lavar el patio de la granja y ahorrar más de 14.000 L por día en una granja lechera típica de Nueva Zelanda. Si lo adoptan las 10,500 granjas lecheras en Nueva Zelanda, este nuevo sistema de tratamiento podría ahorrar aproximadamente 41 mil millones de litros de agua por año. Además, la aplicación a la tierra de agua clarificada y / o efluentes tratados reduciría los riesgos actuales de contaminación del agua que plantea la aplicación a la tierra de FDE sin tratar y esto se puede lograr sin comprometer el crecimiento de las plantas.

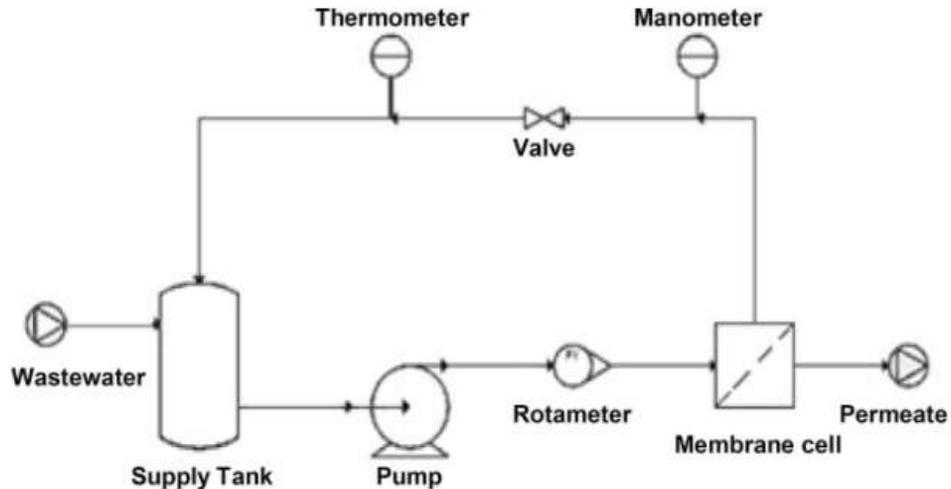
**7.5. Artículo 5: Reuse of Dairy Wastewater Treated by Membrane Bioreactor and Nanofiltration: Rechnical and economic feasibility.**

Este estudio evaluó, la viabilidad técnica y económica de los biorreactores de membrana (MBR), seguidos de la Nanofiltración (NF) para el tratamiento de aguas residuales lácteas, con el fin de reutilizar el afluente tratado. El estudio inicialmente evaluó la eficiencia de remoción del sistema combinado BRM + NF y verificó si las características del efluente tratado cumplían con los estándares para la reutilización del agua. Finalmente, se realizó un análisis económico preliminar para evaluar la viabilidad del sistema propuesto. La metodología utilizada fue, una recolección de agua residual de una fábrica de lácteos de Rio de Janeiro. Brasil. Donde dichas aguas residuales se trataron utilizando un biorreactor de membrana a escala de laboratorio y un sistema de Nanofiltración.

La MBR sumergida tenía un módulo de fibra hueca de micro filtración, el permeado se recogió en el extremo superior del módulo. En el extremo opuesto había pequeños orificios para la introducción de aire y la promoción de la aireación entre las fibras. El MBR estaba compuesto por cuatro tanques acrílicos (un tanque de 13.4 litros para almacenamiento de alimento, un tanque biológico con volumen útil de 4.4 litros y dos tanques para almacenamiento de permeado de 4.0 L cada uno, en uno de los cuales se creó un vacío para promover la filtración) , una bomba de vacío utilizada en micro filtración, una bomba de diafragma utilizada en retro lavado, válvulas solenoides, sensores de nivel, válvulas de control, indicadores de flujo de permeado, retro lavado y aire, un indicador de presión para el permeado y el retro lavado y un patín con cuadro eléctrico. Detallándose en la Figura 13.



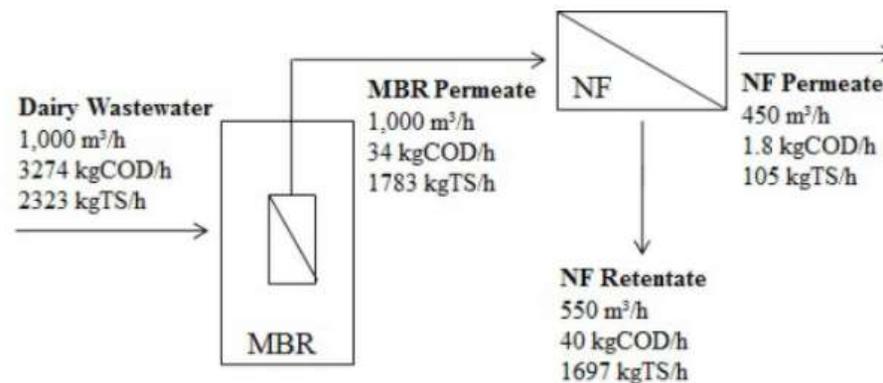
Figura 13. Disposición del sistema utilizado.



Fuente: (LH Andrade, FDS Mandes, JC Espíndola & MCS Amara, 2015)

La viabilidad técnica de la reutilización de aguas residuales tratadas se presenta en la Figura 14, dando los resultados de la ruta combinada MBR y NF para el tratamiento de aguas residuales de la industria láctea.

Figura 14. Tasa de flujo y DQO y carga de sólidos totales (TS) en la alimentación de MBR, permeado de MBR, retenido de NF y permeado de NF.



Fuente: (LH Andrade, FDS Mandes, JC Espíndola & MCS Amara, 2015)

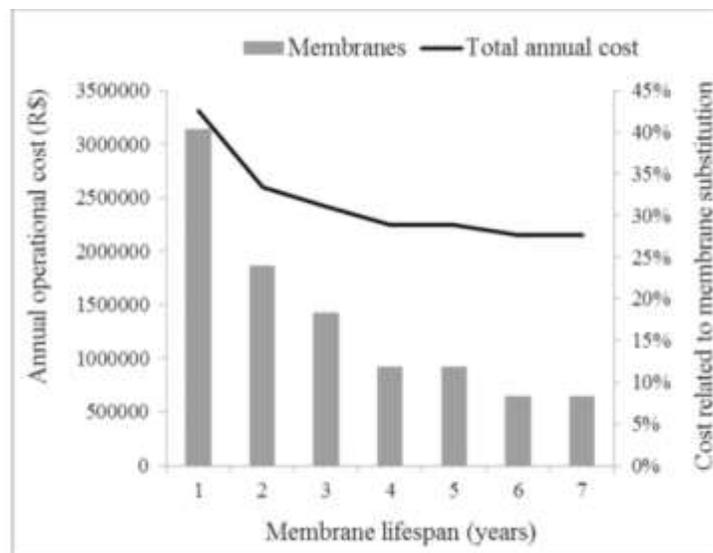
Los resultados muestran que MBR elimina eficientemente la materia orgánica contenida en el efluente de alimentación. Esto se debe a su capacidad para operar con concentraciones de biomasa más altas que los sistemas convencionales,



demostrando una mejor biodegradación de los compuestos orgánicos en el efluente. Además, la presencia de la membrana asegura la eliminación completa de los sólidos en suspensión y también la retención parcial de compuestos de baja biodegradabilidad, ya sea del propio efluente o generados por los microorganismos, que permanecen en el reactor más tiempo que la media para el tiempo detención hidráulica (TDH) y por tanto pueden degradarse, por la biomasa (Bernhard & Andrade, 2013).

En la viabilidad económica de la reutilización de aguas residuales tratadas, se presenta en el Gráfica 4, dando los costos operativos anuales y el porcentaje de estos costos asociados con el reemplazo de membranas en función de la vida útil de los módulos. Se demostró que los costos operativos se reducen progresivamente a medida que aumenta la vida útil de las membranas. Por lo tanto, vale la pena resaltar la importancia de adoptar procedimientos operativos para el mantenimiento de los módulos y aumentar la vida útil de las membranas, evitando acciones que puedan dañar la estructura de la membrana y generar la necesidad de reemplazos frecuentes.

**Gráfica 4.** Costos operativos anuales y porcentaje del costo asociado con la sustitución de módulos

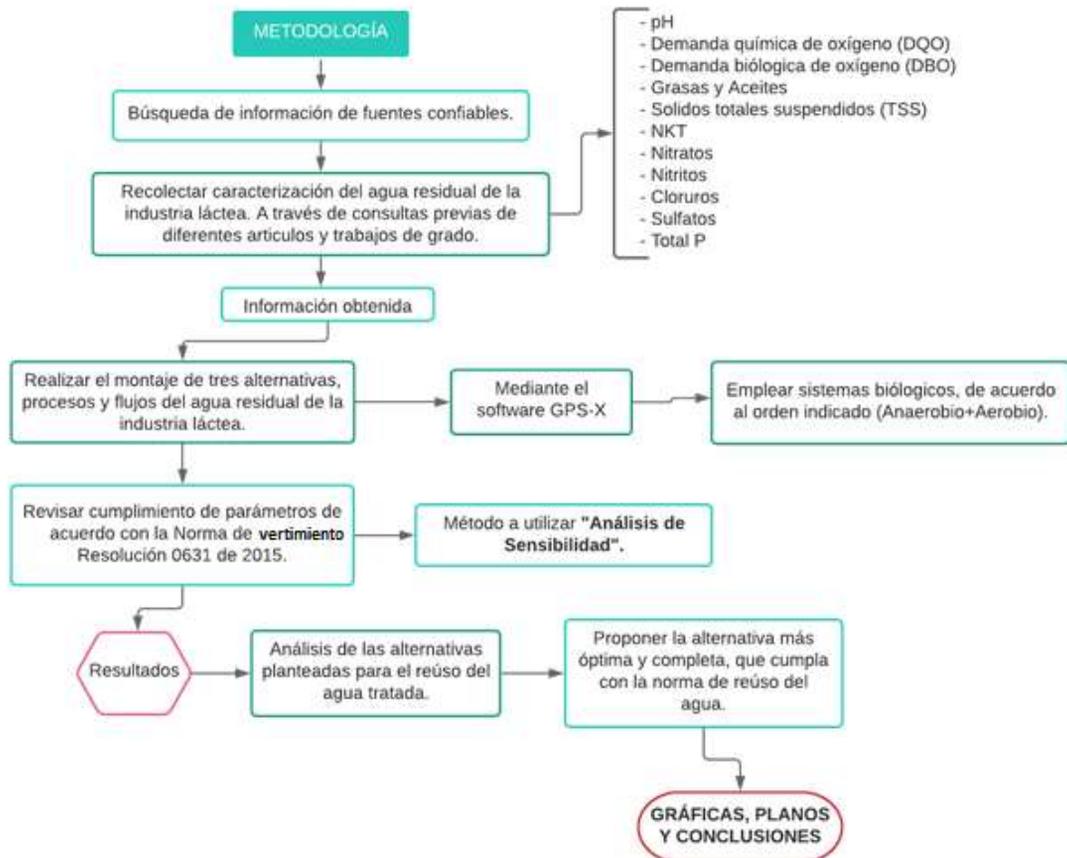


**Fuente:** (LH Andrade, FDS Mandes, JC Espíndola & MCS Amara, 2015)

## 8. METODOLOGÍA

Para el desarrollo de este proyecto se abarcan temáticas en el orden de diagramación de la Figura 15.

**Figura 15.** Metodología del proyecto.



**Fuente:** Elaboración propia

### 8.1. CARACTERIZACIÓN DEL AGUA RESIDUAL DE LA INDUSTRIA.

A causa de la emergencia sanitaria y la falta de instalaciones de laboratorio para el análisis de la calidad del agua de la industria láctea, se toma la determinación de buscar información por medio de investigaciones previas sobre el tema a tratar vía online, las fuentes que se consultaron son tesis o investigaciones en las cuales se pueden encontrar una caracterización confiable para lograr hacer esta investigación verídica. Se toman las investigaciones de la escuela de ingeniería agroindustrial de la universidad nacional de Trujillo y la facultad de ingeniería agroindustrial de la



universidad de Nariño, enfocadas en el área de aguas residuales de la industria láctea, donde se tomaron distintas muestras y posteriormente se analizaron en un laboratorio logrando de esta forma obtener una caracterización adecuada del agua residual, donde se analiza y compara cada valor con el fin de tomar los niveles máximos de cada uno para lograr una caracterización crítica.

De las investigaciones se obtiene el DQO, DBO<sub>5</sub>, SST, STV entre otros, detallándose en la Tabla 9. Uno de los informes indica la dirección general de alimentación del Ministerio de Agricultura Pesa y Alimentación (MAPA), el cual aporta datos de concentraciones medias para las aguas residuales de una central de lechera tipo y una elaboración de productos lácteos (Escuela Organización Industrial. Sevilla. Abril 2008).

Para completar la caracterización del agua residual, se culminó con la investigación que fue desarrollada en el laboratorio de ingeniería sanitaria del departamento de ciencias y técnicas del agua y del Medio ambiente de la universidad de Cantabria, España.

**Tabla 9.** Caracterización del agua residual del proyecto

CARACTERÍSTICAS	VALOR
pH	7
DQO (mg/L)	6000
SST (mg/L)	36000
Materia sedimentable (ml/l)	0.1
DBO <sub>5</sub> (mg/L)	3000
NTK (mg/L)	1300
Total P (mg/L)	130
Detergentes (m3/m3)	4
Aceites y grasas (mg/L)	11
Conductividad (Ms/cm)	1.7
Cloruros	220
Amonio	139
Alcalinidad (mg/L)	170
Temperatura °C	20
Acidez (mg/L)	420
Turbiedad (NTU)	1.70
Hierro (mg/L)	0.17

 <p><b>UNIVERSIDAD CATÓLICA</b> de Colombia</p> <p>FACULTAD DE INGENIERÍA PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL</p>	<p><u>PROPUESTA PLANTA DE TRATAMIENTO</u> <u>AGUAS RESIDUALES (PTAR) PARA EMPRESA</u> <u>DE LÁCTEOS</u></p>	<p>PRESENTADO POR: JULIANA CHACÓN <u>CÓDIGO: 506807</u> ISABELA RAMÍREZ <u>CÓDIGO: 506911</u></p>
--	---	---

### Continuación de la tabla 9

Sulfatos (mg/L)	1.65
Nitrógeno de nitratos (mg/L)	10.11
Temperatura (°C)	20

**Fuente:** Elaboración propia

La planta de tratamiento para efluentes lácteos requiere ser diseñada básicamente para remover los niveles contaminantes de parámetros establecidos como límites máximos permisibles de la norma (Resolución 0631 de 2015) tales como, se observan en la Tabla 10. A pesar de la variabilidad en los parámetros de vertido, se puede considerar unos sistemas básicos de control y de pretratamiento que se adapten a las características generales del reusó y que puedan servir de orientación para que las empresas desarrollen unos sistemas más específicos y adecuados del reusó del agua (Escuela Organización Industrial. Sevilla. Abril 2008).

**Tabla 10.** Cumplimiento de parámetros de la caracterización del agua residual

Parámetro	Valor	Límite máximo permisible <sup>2</sup>	
DQO (mg/L)	6000	450	No Cumple
Ph	7	6 a 9	Cumple
DBO <sub>5</sub> (mg/L)	3000	250	No Cumple
SST (mg/L)	36000	150	No Cumple
Grasas y Aceites (mg/L)	11	20	Cumple
Solidos sedimentables (mL/L)	0.1	2	Cumple
Cloruros (mg/L)	220	500	Cumple
Sulfatos (mg/L)	1.65	500	Cumple

**Fuente:** Elaboración propia

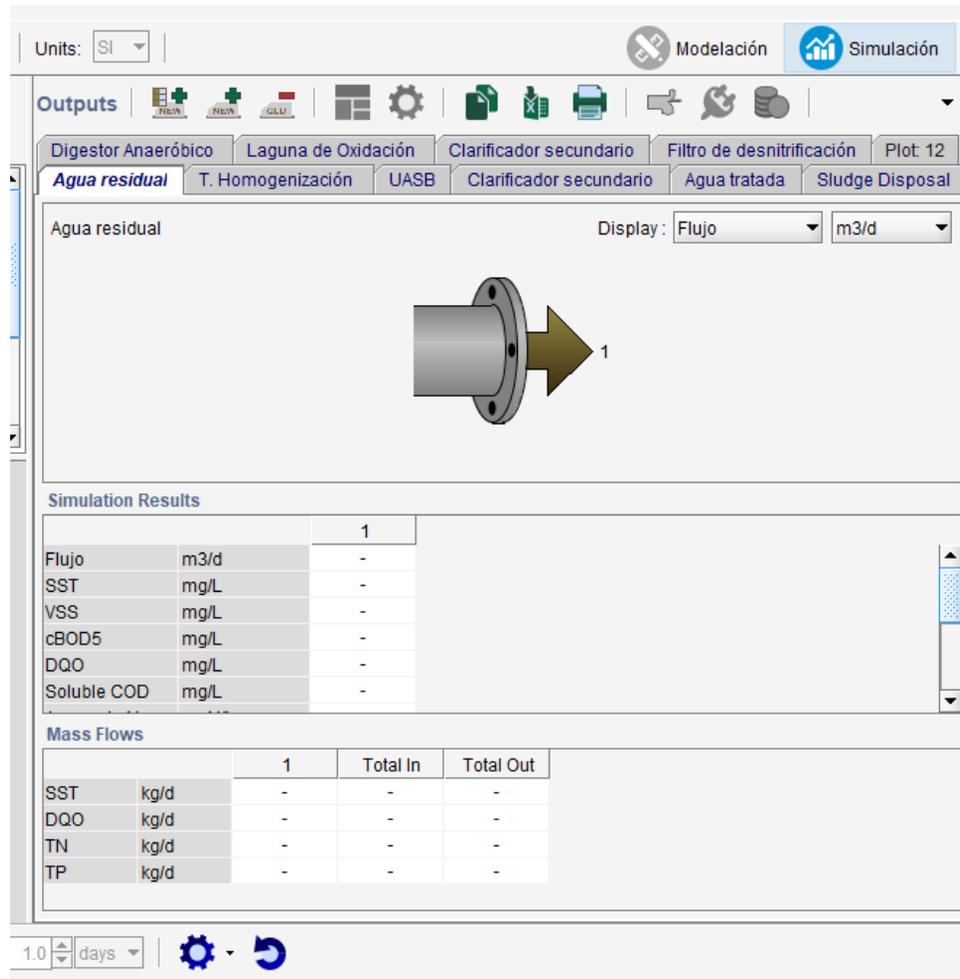
## 8.2. SIMULACIÓN DE LOS PROCESOS DE TRATAMIENTO.

Para la simulación se realiza con el programa de GPS – X, donde se modula el montaje de tres alternativas de planta de tratamientos de aguas residuales para el mejoramiento de la misma, con el fin de adaptar de manera conveniente a las necesidades del modelo presentado y el software a utilizar. Se realizó una revisión bibliográfica de procesos donde se emplea el ASM2 (Modelo biológico, para la transformación y eliminación del carbono, nitrógeno, fósforo y pH) para simular a

<sup>2</sup> Resolución 0631 2015. Pag 15

escala real una planta de tratamiento de agua residual, de igual manera, se analizó una investigación del orden de los modelos biológicos para la industria láctea la cual, consiste en un sistema de aerobio – anaerobio.

**Figura 16.** Ícono de simulación del software GPS-X



**Fuente:** (Hydromantis, 2020)

La calibración de cada alternativa es requerida antes de realizar una simulación dinámica de la planta de tratamiento de aguas residuales. Esta calibración consiste en la caracterización del efluente y la caracterización de los parámetros estequiométricos/cinéticos de los procesos de la planta de tratamiento detallándose en la Tabla 9.

 <p><b>UNIVERSIDAD CATÓLICA</b> de Colombia</p> <p>FACULTAD DE INGENIERÍA PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL</p>	<p><u>PROPUESTA PLANTA DE TRATAMIENTO</u> <u>AGUAS RESIDUALES (PTAR) PARA EMPRESA</u> <u>DE LÁCTEOS</u></p>	<p>PRESENTADO POR: JULIANA CHACÓN <u>CÓDIGO: 506807</u> ISABELA RAMÍREZ <u>CÓDIGO: 506911</u></p>
--	---	---

Después de obtener la información para la caracterización del agua residual se procede a realizar los montajes de las tres alternativas para cada una, donde se empieza analizando los procesos biológicos que permitan remover mayor cantidad de los parámetros DBO, DQO, SST y Total de Aniones, por medio de un diagrama de la planta propuesta a continuación, se procede a realizar la simulación en el programa, el ícono se encuentra ubicado en la parte superior derecha, donde se espera que se construya el modelo en la Figura 16. En este se permite analizar el comportamiento de las unidades con las condiciones de vertimiento anteriormente nombradas, respetando el orden de aerobio – anaerobio.

De acuerdo con Hydromantis (2017), el sistema se basa en un algoritmo de optimización multiparámetro dinámico no lineal, donde los parámetros seleccionados para la auto calibración varía su concentración con respecto a las variables de interés del estudio para así lograr tener una curva de la simulación más cercana a los datos reales ingresados en el software. Por ende, las simulaciones se detienen cuando el programa ha determinado los valores óptimos durante un tiempo de parada optado por un día para nuestro caso.

### 8.3. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD EN EL SOFTWARE GPS-X HYDROMANTIS.

El análisis de sensibilidad es una herramienta que permite identificar la correlación entre las variables de estudio y los parámetros de variabilidad de vertimientos dados en la norma, para la generación de un modelo confiable. Este proceso se efectúa con la finalidad de validar los resultados de cada modelo simulado, y establecer los parámetros que se deben ajustar durante la calibración, además ayuda a identificar el mayor impacto de cada parámetro, en la respuesta del modelo.

El programa GPS-X posee un análisis de sensibilidad en estado estacionario, en fase dinámica y en tiempo de análisis de sensibilidad dinámica (Hydromantis, 2017). Unos de los variables considerados fueron volumen máximo, profundidad del tanque, flujo de bombeo, entre otros detallándose en la

Figura 17. Esto varía dependiendo de cada alternativa propuesta, debido a que estos afectan al comportamiento del modelo produciendo variaciones en los resultados de salida. Las variables analizadas presentaron dos tipos de sensibilidad crítica y nula, esto se puede apreciar en las gráficas coladas en resultados y análisis generadas por el programa durante la simulación, las cuales demostraran cual es el esquema óptimo que requiere la industria láctea para no afectar en gran medida el ecosistema.

Figura 17. **Variables a analizar**



Fuente: (Hydromantis, 2017)

## 9. ANÁLISIS Y RESULTADOS

### 9.1. ALTERNATIVAS PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE LA INDUSTRIA LÁCTEA.

A continuación, se plantean alternativas de planteamiento que permiten disminuir los valores de los parámetros expuestos en la Tabla 10. El planteamiento de las tres alternativas para el tratamiento del afluente residual se hace con el fin, de que cualquier empresa Láctea las pueda estudiar y utilizar, como alternativas de tratamiento se consideran las siguientes:

#### 9.1.1. Planteamiento de las alternativas.

Para la primera alternativa presentada en la Figura 18, el agua residual industrial llega a un tanque de homogenización que amortigua las cargas contaminantes y contribuye a la estabilización del pH y temperatura, con el sistema de distribución de aguas presentado por las líneas de flujo que conectan cada proceso.

Posterior a esto, se conduce el agua hacia un tanque llamado laguna de oxidación donde la materia orgánica es oxidada por microorganismos y los lodos generados por este proceso son recirculados mediante el clarificador secundario que le sigue donde los lodos en esta etapa son desechados a un digestor anaeróbico.

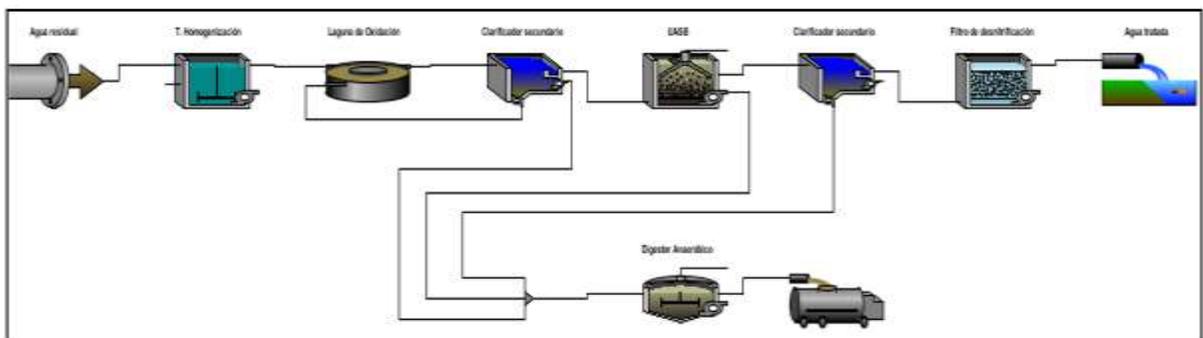


Este mecanismo (Clarificador secundario) permite que el volumen de lodos aumente hasta el momento de realizar la purga de los mismos. Además, el clarificador provee un sistema de eliminación de grasas y aceites flotantes por medio de un blower, el cual está situado en la parte superior del tanque (Torres, 2005).

El agua es conducida al reactor UASB (Reactor anaeróbico de flujo ascendente), donde comienza a ascender a través de un manto de lodo microbiano, que ocupa la parte inferior del reactor, reteniendo sólidos suspendidos y coloidales del agua residual produciendo mediante este proceso la biodegradación de la materia orgánica, de igual forma se repite el mismo mecanismo del clarificador secundario mencionado anteriormente.

Los reactores UASB no eliminan totalmente los agentes contaminantes de las aguas residuales. Por lo tanto, debido de las exigencias de la resolución, fue necesario incorporar el filtro de desnitrificación con la finalidad de eliminar microorganismos patógenos, y reducir la concentración de nutrientes como el nitrógeno y el fósforo (Fernández F, 2015). Para así, terminar el montaje de la planta de tratamiento en la descarga o agua tratada.

**Figura 18.** Alternativa propuesta No.1



**Fuente:** Elaboración propia

Para la segunda alternativa presentada en Figura 19, el agua residual industrial llega a cámara de arena que tiene como objetivo la extracción de grasas y aceites, y a su vez separa los sólidos en suspensión de las aguas residuales, este proceso basa en la diferencia de peso específico que existe entre las partículas sólidas y el líquido donde se encuentran.

Por consiguiente, el agua es conducida al filtro aireado biológico simple el cual, es un sistema de tratamiento de agua residual de biomasa fija que combina la retención de los sólidos suspendidos contenidos en el agua residual con la remoción de

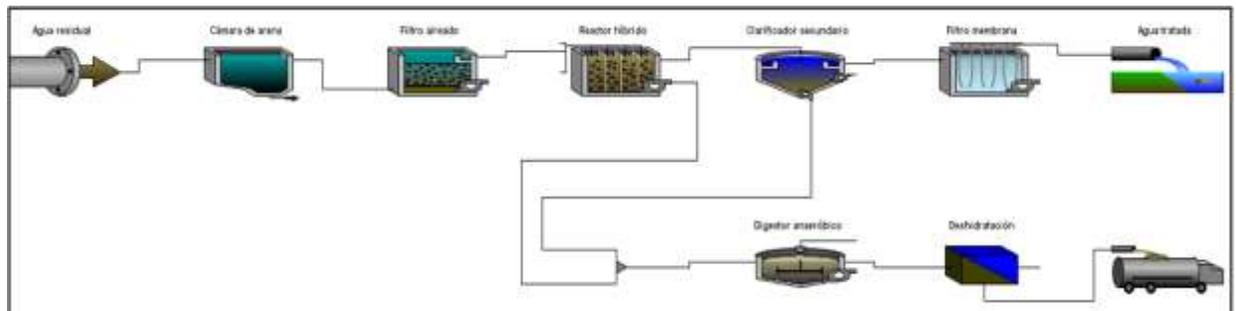


nutrientes en un medio granular sumergido que proporciona la superficie sobre la cual se desarrollan microorganismos. Al llegar al reactor híbrido la mayor parte de la materia orgánica se elimina en la parte del lecho del fango, donde son direccionados al digestor anaeróbico, por una parte, este relleno de materia orgánica favorece ya que se realiza una circulación de este y hace que el fango regrese al lecho, debido a la sustitución que tiene este reactor del separador de gas-sólido por relleno.

En el clarificador secundario que es el proceso que le sigue donde los lodos en esta etapa son desechados a un digestor anaeróbico de igual manera que en el reactor, este proceso permite que el volumen de lodos aumente hasta el momento de realizar la purga de los mismos. La masa sobrante es purgada para su posterior tratamiento de filtración de membrana y gestión de los lodos de depuradoras de deshidratación.

En la filtración de membrana empleada para el tratamiento de aguas residuales de la industria e implementación de un tratamiento terciario, con el propósito de lograr un agua de mejor calidad y cumpla con lo establecido por la norma nacional sobre el proceso de vertimiento a los cuerpos de agua en la industria láctea. También se consideró una purga de lodos o deshidratación de estos, de desechos posterior del digestor anaeróbico. Por último, terminar el montaje de la planta de tratamiento en la descarga o agua tratada.

**Figura 19.** Alternativa propuesta No.2



**Fuente:** Elaboración propia

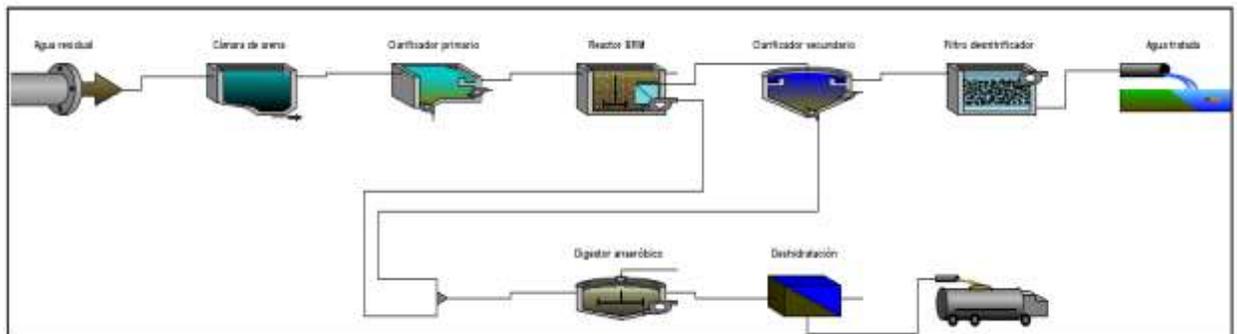
Para la tercera alternativa presentada en Figura 20, el agua residual industrial llega a cámara de arena que tiene como objetivo la extracción de grasas y aceites, y a su vez separa los sólidos en suspensión de las aguas residuales, este proceso basa en la diferencia de peso específico que existe entre las partículas sólidas y el líquido donde se encuentran.



El agua es conducida a un clarificador primario donde se basa en los principios de separación mecánica e hidráulica, produciendo un líquido homogéneo capaz de ser tratado biológicamente y un lodo que se puede tratar por separado. Con finalidad de realizar una disminución de generación de lodos, para un tratamiento de lodos activados convencionales se decidió utilizar un reactor BMR (Reactor biológico de membrana) que hará una cantidad considerable de desecho de lodos al digestor anaeróbico.

En el clarificador secundario que es el proceso que le sigue donde los lodos en esta etapa son desechados de igual manera al digestor anaeróbico, este proceso permite que el volumen de lodos aumente hasta el momento de realizar la purga de los mismos. La masa sobrante es purgada para su posterior tratamiento de filtro de desnitrificación con la finalidad de eliminar microorganismos patógenos, y reducir la concentración de nutrientes como el nitrógeno y el fósforo (Fernández F, 2015). Por último, se procedió a evaluar el flujo de recirculación y purga de lodos de desecho en un mismo escenario para ver si el comportamiento lograba una mejora en cuanto a la disminución de lodos en el montaje, utilizando el mismo mecanismo de la alternativa dos que se muestra en la Figura 18.

**Figura 20.** Alternativa propuesta No.3



**Fuente:** Elaboración propia

## 9.2. SIMULACIÓN EN EL SOFTWARE GPS-X.

El programa GPS-X se encarga de variar las concentraciones de los parámetros más sensibles, realizando iteraciones y variaciones bajo un rango que se definió de 1 día de simulación, mediante los valores de entrada para la caracterización del agua residual y su calibración inicial.

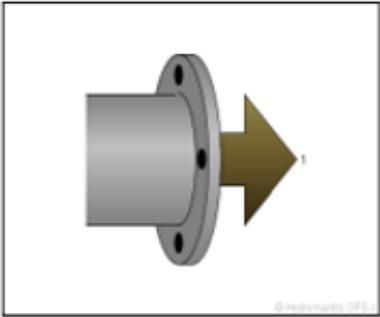
Para la calibración inicial se comprobó que los valores de entrada para la planta coincidan con los valores compuestos (sin que den valores negativos en todas las

celdas). Para así lograr obtener una simulación más cercana a los datos reales medidos una vez se ha creado el diseño, se procede a simular la planta piloto, para la cual en este caso se cuenta con datos de DBO<sub>5</sub>, DQO, NTK, SST, SSV, OD, NO<sub>2</sub>, pH, total de alcalinidad y NO<sub>3</sub>, entre ellos se elegirán los más relevantes para así, ser analizados.

### 9.2.1. Resultados de la simulación para la alternativa No.1.

Para establecer una campaña de muestreo confiable, se realizó un muestreo previo durante 24 horas con el fin de determinar un horario aproximado de variación del parámetro en cada estructura propuesta para la planta de tratamiento. Como se observa en la Tabla 11, se muestran los parámetros de salida a simular en la planta de tratamiento de aguas residuales propuesta para la alternativa 1.

**Tabla 11.** Resultados de simulación alternativa 1: Agua residual



		Entrada
Caudal	m <sup>3</sup> /d	5000
SST	mg/L	35336,75
VSS	mg/L	3533,67
DBO <sub>5</sub>	mg/L	3094,45
DQO	mg/L	6000
Soluble COD	mg/L	2058
Amoniac de N	mgN/L	139
NKT	mgN/L	1300
TN	mgN/L	1448,9
Sulfatos	mgP/L	1,65
TP	mgP/L	130
Total Alcalinidad	mgCaCO <sub>3</sub> /L	780,94
pH	-	7

**Fuente:** Elaboración propia

La variación de parámetros para el tanque de homogenización se identifica en la Tabla 12, donde se puede apreciar que no existen grandes variaciones en cuanto al caudal de entrada y de salida 5000 m<sup>3</sup>/día. Sin embargo, el parámetro que representa un mayor porcentaje de remoción es Solidos Suspendidos Totales (SST), con valores de entrada de 35336.75 mg/L y al ser removido al 0.6 % se obtiene valores de 35119.06 mg/L.

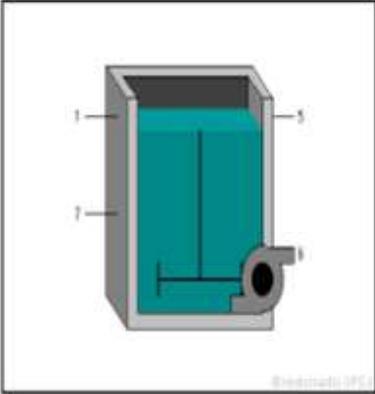
El parámetro de Demanda Biológica de Oxígeno (DBO<sub>5</sub>) el cual, tiene una remoción de 0,5% entrando con un valor de 3095.45 mg/L y saliendo 3080.71 mg/L. Para la demanda química de oxígeno (DQO) se destaca una reducción de 0,4% siendo la



remoción menor en la calibración matemática del tanque de homogenización, puesto que al entrar con 6000 mg/L este sale con 5973.26 mg/L.

Además, se presenta un aumento de 1.5% en el total de fósforo (TP) debido a que entra con un valor de 130 mgP/L y sale con una cantidad de 131.93 mgP/L, datos arrojados en el flujo de masa del tanque de homogenización, cabe resaltar que esta etapa de la planta de tratamiento como su nombre lo indica, es el encargado de homogenizar el caudal entrante y su composición a la planta, por tal motivo el no presenta grandes variaciones en los compuestos del agua residual.

**Tabla 12.** Resultados de simulación alternativa 1: Tanque de homogenización



		Entrada	Salida	Bomba
Caudal	m <sup>3</sup> /d	5000	5000	0
SST	mg/L	35336,75	35119,06	35119,06
VSS	mg/L	3533,67	3516,99	3516,99
DBO <sub>5</sub>	mg/L	3095,45	3080,71	3080,71
DQO	mg/L	6000	5973,26	5973,26
Amoniaco de N	mgN/L	139	138,74	138,74
NKT	mgN/L	1300	1293,88	1293,88
TP	mgP/L	130	131,93	131,93
Total alcalinidad	mgCaCO <sub>3</sub> /L	780,94	781,60	781,60
pH	-	7	7	7

**Fuente:** Elaboración propia

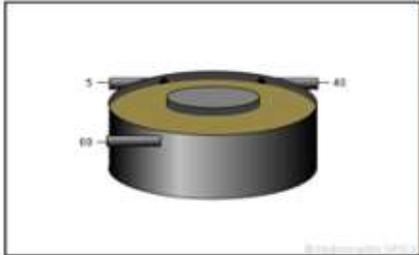
Por otro lado, para la etapa de laguna de oxidación se identifican otros parámetros distintos arrojados a los resultados de simulación detallándose en la Tabla 13. Presentando una disminución de Nitrito de 99.9%, por lo que entra con valores de 138.64 mgN/L y sale con una cantidad de 0.12 mgN/L. Siendo muy similar el parámetro Nitrato presente en el agua residual que experimenta, cambios con una disminución de 99.3%, entrando con un valor de 10.61 mgN/L y sale con una cantidad de 0.08 mgN/L.

De igual forma, se presenta aumento en los componentes de amoniaco de nitrógeno, el cual entra con un valor de 138.74 mgN/L y sale con un rango de 264.65 mgN/L arrojando un porcentaje de remoción de 90.8%. Los Sulfatos es el parámetro que más tuvo cambios en esta etapa presentando un aumento de un valor de entrada de 2.31 mgP/L y sale con un valor de 20.37 mgP/L esto puede ser debido, a que en la laguna de oxidación un porcentaje considerable de sólidos suspendidos presentes en el agua residual se convierten materia orgánica y estos son difíciles



de remover. Se realiza una recirculación del agua mediante el clarificador secundario de 2000 m<sup>3</sup>/día, ya que se trata de una laguna y por tal motivo el caudal se aumentará a 7000 m<sup>3</sup>/día.

**Tabla 13.** Resultados de simulación alternativa 1: Laguna de oxidación



Caudal (m <sup>3</sup> /d)	
5000	Entrada
7000	Salida
2000	Reciclado

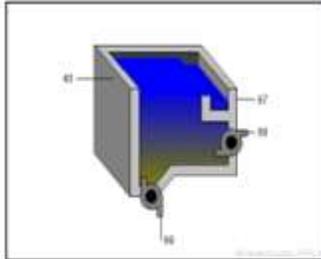
		Entrada	Salida
MLSS	mg/L	35117,36	18902,00
MLVSS	mg/L	3516,86	2411,18
Soluble COD	mg/L	2048,18	261,94
Amoniaco de N	mgN/L	138,74	264,65
Nitrito	mgN/L	138,64	0,12
Nitrato	mgN/L	10,61	0,08
Sulfatos	mgP/L	2,31	20,37
Total alcalinidad	mgCa CO <sub>3</sub> /L	781,60	93,77
pH	-	7	7
Tiempo de residencia hidráulico	h	-	0,01
DOO	mgO <sub>2</sub> /L	-	0,01
Total OUR	mgO <sub>2</sub> /(L.h)	-	4,04
Tasa de nitrificación	mgN/(L.h)	-	0,52
Tasa util de nitrato	mgN/(L.h)	-	2,63
Flujo de aire	m <sup>3</sup> /h	-	0
SOTE	%	-	30
Actual OTR	kg/h	-	0

**Fuente:** Elaboración propia

Para los parámetros del primer clarificador secundario implementado para esta alternativa se identifican en la Tabla 14, donde dan a conocer una disminución de los Sólidos Suspendidos Totales (SST) del 3%, debido a lo mencionado anteriormente se tiene un valor de entrada 18902 mg/L y de salida 18259.53 mg/L.



**Tabla 14.** Resultados de simulación alternativa 1: Clarificador secundario



		Entrada	Salida	Bomba	Lodo sedimentado
Caudal	m <sup>3</sup> /d	7000	4900	100	2000
SST	mg/L	18902,00	18259,53	18477,25	18477,25
VSS	mg/L	2411,18	2378,94	2414,64	2414,64
DBO <sub>5</sub>	mg/L	1354,94	1327,19	1344,60	1344,60
DQO	mg/L	3729,99	3685,54	3737,25	3737,25
Amoníaco de N	mgN/L	264,65	255,14	253,70	253,70
Nitrito	mgN/L	0,12	0,13	0,13	0,13
Nitrato	mgN/L	0,08	0,09	0,09	0,09
NKT	mgN/L	678,96	660,14	664,09	664,09
TN	mgN/L	679,16	660,36	664,31	664,31
Sulfatos	mgP/L	20,37	20,38	20,37	20,37
TP	mgP/L	209,12	210,83	214,30	214,30
Total alcalinidad	mgCaCO <sub>3</sub> /L	93,77	92,60	92,45	92,45
pH	-	7	7	7	7

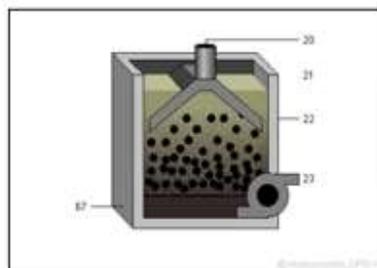
**Fuente:** Elaboración propia

En cuanto a la Demanda Biológica de Oxígeno (DBO<sub>5</sub>) se puede destacar que el valor de entrada oscila en 1354.94 mg/L y se tiene en la salida de 1327.19 mg/L, por consiguiente, se presenta una disminución del 2%, en cuanto a la Demanda Química de Oxígeno (DQO) se presenta una disminución 1% con valores de entrada de 3729.99 mg/L y para la salida de 3685.54 mg/L. Los parámetros con un aumento considerable se destacan los nitratos con un porcentaje de 9% entre valores de 0,009 mgN/L – 0.08 mgN/L para el caudal que maneja el clarificador este presenta una disminución en gran medida del 30% pasando de un valor de entrada de 7000 m<sup>3</sup>/día a una cantidad de salida de 4900 m<sup>3</sup>/día.

En los resultados del reactor UASB presentados en la Tabla 15, es una de las etapas que presenta grandes cambios respecto a la remoción de los Sólidos Suspendedos Totales (SST) los cuales tienen una remoción de 65%, otro parámetro que presenta un cambio significativo es la Demanda Química de Oxígeno (DQO) teniendo un porcentaje de 62%. Presentando valores iniciales de 3685.54 mg/L y con un valor de salida de 140.36 mg/L este cambio es causado a que se le asignada un flujo de bombeo de 1500 m<sup>3</sup>/día.



**Tabla 15.** Resultados de simulación alternativa 1: Reactor UASB



Caudal(m <sup>3</sup> /d)	
4890	Entra da
14,16	Gas
3390	Salida
1500	Bomba

		Entrada	Gas	Salida	Bomba
Caudal	m <sup>3</sup> /d	4900	-	3400	1500
SST	mg/L	18259,53	0	6334,94	2794,83
VSS	mg/L	2378,94	0	825,35	364,12
DQO	mg/L	3685,54	213,66	1403,36	738,53
Amoníaco de N	mgN/L	255,14	176,39	176,39	176,39
Sulfatos	mgP/L	20,38	11,41	11,41	11,41
Total alcalinidad	mgCaCO <sub>3</sub> /L	92,60	110,23	110,23	110,23
pH	-	7	7	7	7

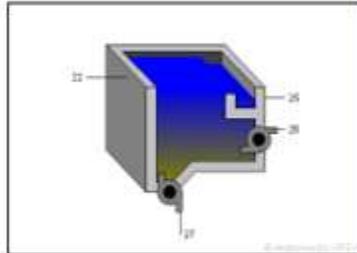
**Fuente:** Elaboración propia

Otros de los parámetros que presenta variaciones son los Sólidos Suspendidos Volátiles (SSV) con un porcentaje de remoción de 65% que por ende se ve reflejado con valores entre 2378.94 mg/L - 825.35 mg/L, al igual que el total de alcalinidad el cual tuvo un aumento del 19% con valores de 92.60 mgCaCO<sub>3</sub>/L - 110.23 mgCaCO<sub>3</sub>/L con un comportamiento en el caudal de circulación disminuyendo en un 31% teniendo en cuenta que el valor de entrada era de 4900 m<sup>3</sup>/día y la cantidad de salida en 3400 m<sup>3</sup>/día en esta unidad se presenta una cantidad apreciable de caudal pero de igual forma se tiene gran disminución.

Con el fin de realizar el tratamiento de lodos se realiza el clarificador secundario posterior al reactor, donde este arrojó resultados mostrados en la Tabla 16, para esta etapa y en comparación del primer clarificador secundario se evidencia una disminución de caudal del 2% dando valores de 3400 m<sup>3</sup>/día - 3200 m<sup>3</sup>/día que para los Sólidos Suspendidos Totales (SST) se obtuviera una eficiencia máxima del 12% teniendo valores 497.53 mg/L – 437.96 mg/L.



**Tabla 16.** Resultados simulación alternativa 1: Clarificador secundario



		Entrada	Salida	Bomba	Lodo sedimentado
Caudal	m <sup>3</sup> /d	3400	3200	0	200
SST	mg/L	8334,94	5353,39	0	18629,00
VSS	mg/L	825,35	724,38	0	4500,28
DBO5	mg/L	497,53	437,96	0	2498,88
DQO	mg/L	1403,36	1252,34	0	6952,07
Amoniaco de N	mgN/L	176,39	160,55	0	121,80
Nitrito	mgN/L	7,23	8,94	0	54,99
Nitrato	mgN/L	8,94	11,07	0	87,46
NKT	mgN/L	323,60	289,33	0	858,51
TN	mgN/L	339,76	309,34	0	980,97
Sulfatos	mgP/L	11,41	11,85	0	58,00
TP	mgP/L	77,56	72,58	0	768,42
Total alcalinidad	mgCa CO <sub>3</sub> /L	110,23	116,99	6,61744E-19	516,73
pH	-	7	7	7	7

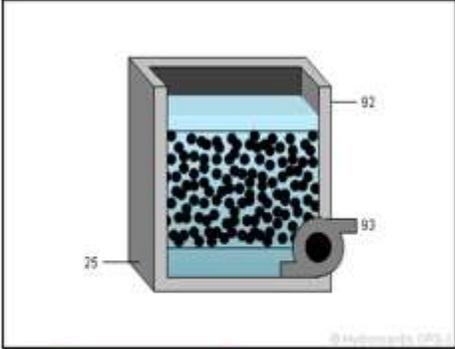
**Fuente:** Elaboración propia

La Demanda Química de Oxígeno (DQO) disminuyó un 11% al arrojar un valor de 1252.34 mg/L el comportamiento que tuvo el nitrato y nitrito fue de una eficiencia máxima de 24% para cada uno, con valores de 8,94 mgN/L - 7,23 mgN/L y valores de 11,07 mgN/L - 8,94 mgN/L respectivamente.

En la última etapa del filtro desnitrificado que fue el proceso que se evidencio mayor remoción detallándose en la Tabla 17, donde el caudal no disminuye en gran medida entrando con un valor de 3200 m<sup>3</sup>/día y sale 3195.83 m<sup>3</sup>/día. Mientras que los Sólidos Suspendidos Totales (SST) tienen una disminución del 90%, contando con valores de entrada de 5353.39 mg/L y de salida 523.98 mg/L. Para la Demanda Biológica de Oxígeno (DBO) se obtiene un 86% de reducción con valores 437,96 mg/L - 62,24 mg/L. También en la Demanda Química de Oxígeno tuvo una disminución de 79% con valores 1252.34 mg/L – 259.23 mg/L.



**Tabla 17.** Resultados de simulación alternativa 1: Filtro desnitrificado



		Entrada	Salida
Caudal	m <sup>3</sup> /d	3200	3195,83
SST	mg/L	5353,39	523,98
VSS	mg/L	724,38	90,71
DBO <sub>5</sub>	mg/L	437,96	62,24
DQO	mg/L	1252,34	259,23
Amoníaco de N	mgN/L	160,55	145,46
Nitrito	mgN/L	8,94	0,19
Nitrato	mgN/L	11,07	0,06
NKT	mgN/L	289,33	160,17
TN	mgN/L	309,34	160,42
Sulfatos	mgP/L	11,85	15,81
TP	mgP/L	72,58	27,04
Total alcalinidad	mgCaCO <sub>3</sub> /L	116,99	189,96
pH	-	7	7

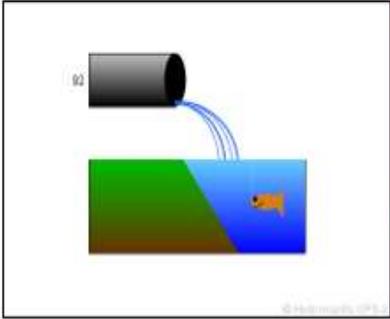
  

Caudal (m <sup>3</sup> /d)	
3200	Entrada
3195,83	Salida
4,17	Bomba

Fuente: Elaboración propia

Los resultados finales que dan por culminada la simulación de la planta número uno es detallado en la Tabla 18, donde se puede evidenciar que de acuerdo a la Tabla 10, presentada en el proyecto, el sistema biológico implementado para esta alternativa logra que se cumpla los valores de DBO<sub>5</sub>, DQO y iones, a excepción del SST.

**Tabla 18.** Resultados de simulación alternativa 1: Agua tratada



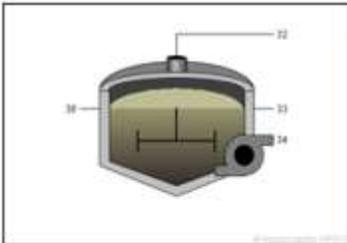
		Salida
Caudal	m <sup>3</sup> /d	3195,83
SST	mg/L	523,98
VSS	mg/L	90,72
DBO <sub>5</sub>	mg/L	62,25
DQO	mg/L	259,26
Amoníaco de N	mgN/L	145,47
Nitrito	mgN/L	0,19
Nitrato	mgN/L	0,06
NKT	mgN/L	160,19
TN	mgN/L	160,43
Sulfatos	mgP/L	15,83
TP	mgP/L	27,05
Total alcalinidad	mgCaCO <sub>3</sub> /L	189,96
pH	-	7,00

Fuente: Elaboración propia

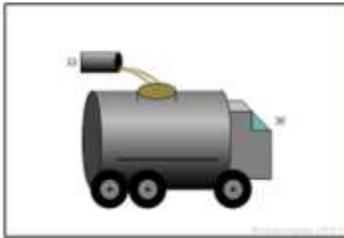


En consideración, al tratamiento de lodos propuesto mostrándose en la Tabla 19, donde el digestor anaeróbico no presenta modificaciones en su caudal por lo que este permanece en 1600 m<sup>3</sup>/día mientras que, para los Sólidos Suspendidos Totales (SST) se ve un aumento de 553%, con valores de 3774.98 mg/L – 24655.35 mg/L. También para los sólidos suspendidos volátiles se presenta un incremento del compuesto de 611% con valores de 492.28 mg/L – 3499.11 mg/L. El comportamiento de la Demanda Química de Oxígeno se observa en un aumento de 498% con valores de 925,95 mg/L – 5541.09 mg/L. El parámetro que tuvo mayor cambio fue los sulfatos con una eficiencia máxima de 924%.

**Tabla 19.** Resultados de simulación alternativa 1: Tratamiento de lodos

		Entrada	Salida	Bomba	
	Caudal	m3/d	1600	1600	0
	SST	mg/L	3774,98	24655,35	24655,35
	VSS	mg/L	492,28	3499,11	3499,11
	DQO	mg/L	925,95	5541,09	5541,09
	Amoníaco de N	mgN/L	181,22	282,93	282,93
	Sulfatos	mgP/L	11,97	122,61	122,61
	Total alcalinidad	mgCaCO3/L	109,12	346,12	346,12
	pH	-	7	7	7

		Salida	
	Caudal	m3/d	1600
	SST	mg/L	24655,35
	VSS	mg/L	3499,11
	DBO5	mg/L	1814,28
	DQO	mg/L	5541,09
	Amoníaco de N	mgN/L	282,93
	Nitrato	mgN/L	0,00
	Nitrato	mgN/L	0,01
	NKT	mgN/L	739,90
	TN	mgN/L	739,90
	Sulfatos	mgP/L	122,61
	TP	mgP/L	396,54
	Total alcalinidad	mgCaCO3/L	346,12
	pH	-	7

Fuente: Elaboración propia

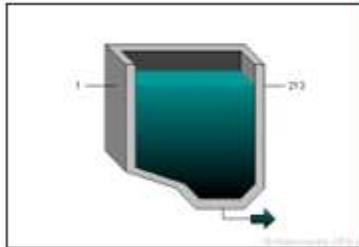
### 9.2.3. Resultados de la simulación para la alternativa No.2.

En la primera etapa de la planta de tratamiento propuesta, se evidencia que la cámara de arena no presenta variaciones detallándose en la Tabla 20, en cuanto a los componentes de Sólidos Suspendidos Totales (SST) se presenta una disminución únicamente del 0,06% con valores de 35336.74 mg/L y una cantidad de salida de 35316.75 mg/L. Del mismo modo, se presentó un valor en aumento que fue el Total de Alcalinidad el cual oscila los valores entra 780.90 mgCaCO<sub>3</sub>/L –



781.10 mgCaCO<sub>3</sub>/L representando un 0,03% de remoción, para el caudal que pasa por la etapa sigue siendo igual en todo el proceso por lo tanto será de 5000 m<sup>3</sup>/día y en variación al pH este se mantiene.

**Tabla 20.** Resultados de simulación alternativa 2: Cámara de arena

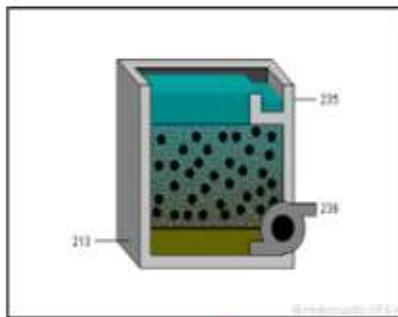


		Entrada	Salida
Caudal	m <sup>3</sup> /d	5000	5000
SST	mg/L	35336,746	35316,746
VSS	mg/L	3533,6746	3533,674603
DBO <sub>5</sub>	mg/L	3094,446	3094,446
DQO	mg/L	6000	6000
Amoniaco de N	mgN/L	139	139
NKT	mgN/L	1300	1300
TP	mgP/L	130	130
Total alcalinidad	mgCaCO <sub>3</sub> /L	780,90	781,10
pH	-	7	7

**Fuente:** Elaboración propia

Para el caso del filtro aireado biológico simple los resultados de este se evidencian en la Tabla 21, presentando un mínimo de variación en cuanto al caudal de entrada que es 5000 m<sup>3</sup>/día y presenta un valor de salida de 4958.33 m<sup>3</sup>/día, correspondiendo al 1% de disminución.

**Tabla 21.** Resultados de simulación alternativa 2: Filtro aireado biológico simple



Caudal (m <sup>3</sup> /d)	
5000	Entrada
4958,33	Salida
41,67	Bomba

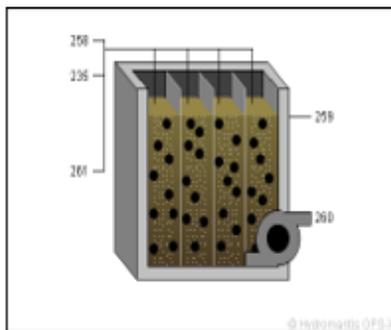
		Entrada	Salida
MLSS	mg/L	35316,75	3561,63
MLVSS	mg/L	3533,67	356,37
DBO <sub>5</sub>	mg/L	3094,45	1432,71
Soluble COD	mg/L	2058,00	2040,22
Amoniaco de N	mgN/L	139,00	142,68
Nitrato	mgN/L	138,90	139,17
Nitrato	mgN/L	10,00	10,22
Sulfatos	mgP/L	1,65	1,91
Total alcalinidad	mgCaCO <sub>3</sub> /L	781,10	507,16
pH	-	7	7

**Fuente:** Elaboración propia



En los Sólidos Totales en Suspensión representándose en esta etapa mediante las abreviaturas de MLSS, presentan una disminución de 89,90%, arrojando valores de entre 35316.75 mg/L – 3561.63 mg/L. Para el caso de los sólidos volátiles en suspensión son representados con la abreviatura de MLVSS, donde nos lanzan valores de iniciales de 3533.67 mg/L y finales de 356.37 mg/L presentando un porcentaje de remoción del 89,9% para las aguas residuales. El parámetro de DBO<sub>5</sub> tiene un gran cambio de valor al finalizar la primera etapa del proceso biológico con un valor de 1432.71 mg/L.

**Tabla 22.** Resultados de simulación alternativa 2: Reactor híbrido de película fija/biomasa suspendida



Caudal (m <sup>3</sup> /d)	
4958,33	<b>Entrada 1</b>
0	<b>Entrada 2</b>
4958,33	<b>Salida</b>
0	<b>Bomba</b>
0	<b>Reciclado</b>

		Entrada	Salida
MLSS	mg/L	3561,63	3000,63
MLVSS	mg/L	356,37	346,11
Soluble COD	mg/L	2040,22	378,99
Amoníaco de N	mgN/L	142,68	38,43
Nitrito	mgN/L	139,17	20,39
Nitrato	mgN/L	10,22	14,87
Sulfatos	mgP/L	1,91	2,29
Total Alcalinidad	mgCaCO <sub>3</sub> /L	507,16	99,63
pH	-	7	7
T. de residencia hidráulico	h	-	2,20
DO	mgO <sub>2</sub> /L	-	8,10
Flujo de aire	m <sup>3</sup> /h	-	5585,38
SOTE	%	-	30
Actual OTR	kg/h	-	40,85
Espesor de la biopelícula	mm	-	0,46
Masa de biopelícula	kg	-	5875,11
multimedia	m <sup>2</sup>	-	125000
Superficie de área SST	g/m <sup>2</sup>	-	47
Llenado de medio del	%	-	50
Vol. Medio desplazados	m <sup>3</sup>	-	45
Volumen del líquido	m <sup>3</sup>	-	455

Fuente: Elaboración propia

Posterior al filtro, los resultados arrojados por el programa GPS-X para la etapa del reactor híbrido se detallan en la Tabla 22, donde el caudal conducido por este tuvo una disminución al 3000.63 m<sup>3</sup>/día pero sí, un gran aumento en el nitrito de un 85% al valor de entrada, la alcalinidad que entra con valores de 507.16 mgCaCO<sub>3</sub>/L y en

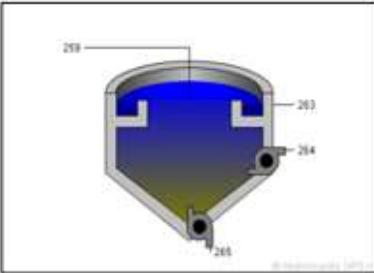


la salida se encuentra con una cantidad de 99.63 mgCaCO<sub>3</sub>/L, correspondiendo a una reducción del 80%. Sin embargo, se encuentran parámetros con aumentos como es el nitrato el cual tiene un incremento del 45% con valores de 10.22 mgP/L – 14.87 mgN/L; en el caso de los sulfatos del 20% arrojó valores de 1,91 mgP/L - 2,29 mgP/L.

En el Clarificador secundario obtuvo resultados no tan radicales detallándose en la Tabla 23, ya que este logra reducir en gran medida los componentes de Solidos Suspendidos Totales (SST) con una eficiencia máxima de 99% con valores entre 3000.63 mg/L – 17.55 mg/L. De igual manera, se presenta la Demanda Biológica de Oxígeno (DBO) con una remoción del 53%, con valores entre 395.61 mg/L – 187.18 mg/L.

En la Demanda Química de Oxígeno (DQO) presenta una reducción del 58% con valores entre 869.17 mg/L – 364.23 mg/L. Para los parámetros de nitrato no se ven cambios significativos por lo que se aumenta en un 0.38%, con valores entre 14,87 mgN/L – 14,92 mgN/L y el caudal disminuye el 41%, con valores entre 4958,33 m<sup>3</sup>/día – 2918,33 m<sup>3</sup>/día.

**Tabla 23.** Resultados de simulación alternativa 2: Clarificador secundario



		Entrada	Salida	Bomba	Lodo sedimentado
Caudal	m <sup>3</sup> /d	4958,33	2918,33	40,00	2000,00
SST	mg/L	3000,63	17,55	7050,47	7050,47
VSS	mg/L	346,11	2,06	817,98	817,98
DBO5	mg/L	395,61	187,18	659,61	659,61
DQO	mg/L	869,17	364,23	1527,61	1527,61
Amoniaco de N	mgN/L	38,43	34,76	36,29	36,29
Nitrato	mgN/L	20,39	18,51	19,29	19,29
Nitrato	mgN/L	14,87	14,92	14,91	14,91
NKT	mgN/L	106,14	43,35	185,26	185,26
TN	mgN/L	141,40	76,79	219,46	219,46
Sulfatos	mgP/L	2,29	2,22	2,25	2,25
TP	mgP/L	16,86	2,41	37,00	37,00
Total alcalinidad	mgCaCO <sub>3</sub> /L	99,63	91,21	94,72	94,72
pH	-	7,00	7,00	7,00	7,00

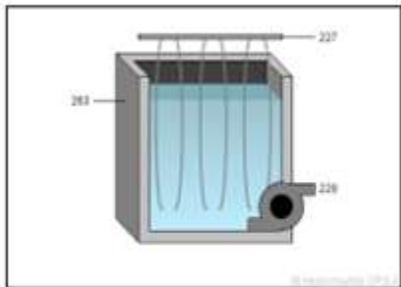
**Fuente:** Elaboración propia

Para las últimas etapas de la planta propuesta, se encuentra el filtro de membrana siendo una de las que presenta mayores variaciones evidenciándose en la Tabla 24. Donde, en los Sólidos Suspendidos Totales (SST) los cuales fueron removidos un 99,90%, con valores de 17.55 mg/L – 0.02 mg/L, así mismo ocurrió en parámetros



como la Demanda Biológica de Oxígeno (DBO) presentando un porcentaje de remoción del 0.62% con valores entre 187.18 mg/L – 186.02 mg/L y la Demanda Química de Oxígeno (DQO) se destaca una reducción mínima de 0.80 % entre valores de 364.23 mg/L – 361.32 mg/L. Para los sólidos suspendidos volátiles (VSS) se presenta una reducción significativa en un 99.90%, al llegar casi a un valor de 0.00 mg/L el caudal se disminuye en un 1.03%, con valores entre 2918.33 m<sup>3</sup>/día - 2888.33 m<sup>3</sup>/día.

**Tabla 24.** Resultados de simulación alternativa 2: Filtro de membrana



		Entrada	Salida	Bomba
Flujo	m3/d	2918,33	2888,33	30,00
SST	mg/L	17,55	0,02	1705,80
VSS	mg/L	2,06	0,00	200,20
DBO5	mg/L	187,18	186,02	299,52
DQO	mg/L	364,23	361,32	645,07
Amoníaco de N	mgN/L	34,76	34,76	34,76
Nitrato	mgN/L	18,51	18,51	18,51
Nitrato	mgN/L	14,92	14,92	14,92
NKT	mgN/L	43,35	43,00	77,50
TN	mgN/L	76,79	76,44	110,94
Sulfatos	mgP/L	2,22	2,22	2,22
TP	mgP/L	2,41	2,32	11,02
Total alcalinidad	mgCaCO <sub>3</sub> /L	91,21	91,21	91,21
pH	-	7,00	7,00	7,00

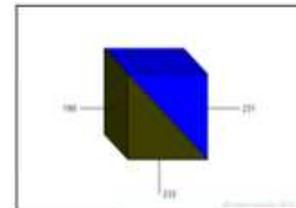
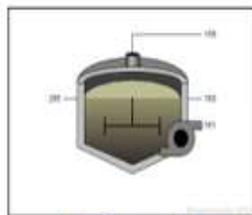
**Fuente:** Elaboración propia

En esta alternativa el tratamiento de lodos se le agrega una purga de lodos (Deshidratación) identificándose en la Tabla 25. En cuanto al Digestor anaeróbico no se presenta modificaciones en su caudal por lo que este permanece en 2000 m<sup>3</sup>/día para los Sólidos Suspendidos Totales (SST) se ve una disminución del 42%, con valores entre 7050.47 mg/L - 4106.99 mg/L, en la Demanda Química de Oxígeno (DQO) se indica una eficiencia máxima del 39%, con valores entre 1527.61 mg/L – 925.92 mg/L. El parámetro que represento el mayor aumento significativo entre los que arrojo la simulación del Software GPS-X fue sulfato con un porcentaje de 553%, con valores entre 2.25 mgP/L – 14.68 mgP/L presentándose no de la misma manera, pero si hubo un porcentaje de remoción del 46% al total de Alcalinidad, con valores entre 94.72 mgCaCO<sub>3</sub>/L – 138.26 mgCaCO<sub>3</sub>/L siendo aún constante el pH.



En la etapa de deshidratación el caudal sufre una leve disminución del 0.08% con valores entre 2000 m<sup>3</sup>/día – 1998,5 m<sup>3</sup>/día mientras que para los Sólidos Suspendidos Totales (SST), indica un porcentaje de reducción del 95% con valores entre 4106.99 mg/L – 205.35 mg/L. En la demanda química de oxígeno (DQO) se observa una eficiencia máxima de 77.71%, con valores entre 925.92 mg/L -206.41 mg/L; en el valor de total de alcalinidad se presenta una remoción del 3,62% con valores entre 138.26 mgCaCO<sub>3</sub>/L – 133.26 mgCaCO<sub>3</sub>/L.

**Tabla 25.** Resultados de simulación alternativa 2: Tratamiento de lodos



		Entrada	Salida	Bomba
Caudal	m <sup>3</sup> /d	2000	2000	0
SST	mg/L	7050.47	4106.99	4106.99
VSS	mg/L	817.98	505.40	505.40
DQO	mg/L	1527.61	925.92	925.92
Amoniaco de N	mgN/L	36,29	51,35	51,35
Sulfatos	mgP/L	2,25	14,68	14,68
Total alcalinidad	mgCaCO <sub>3</sub> /L	94,72	138,26	138,26
pH	-	7	7	7

		Entrada	Filtrado	Sólidos deshidratados
Caudal	m <sup>3</sup> /d	2000	1998.5	1.5
SST	mg/L	4106.99	205.35	5202398.74
DQO	mg/L	925.92	206.41	959556.66
Amoniaco de N	mgN/L	51,35	51,35	51,35
Sulfatos	mgP/L	14,68	14,68	14,68
Total alcalinidad	mgCaCO <sub>3</sub> /L	138,26	133,26	133,26
pH	-	7	7	7

		Salida
Caudal	m <sup>3</sup> /d	1,5
SST	mg/L	5202398,74
VSS	mg/L	640202,873
DBO <sub>5</sub>	mg/L	379019,299
DQO	mg/L	959556,66
Amoniaco de N	mgN/L	51,35
Nitrato	mgN/L	0,05
Nitrato	mgN/L	0,08
NKT	mgN/L	82436,46
TN	mgN/L	82436,58
Sulfatos	mgP/L	14,68
TP	mgP/L	23852,34
Total alcalinidad	mgCaCO <sub>3</sub> /L	133,26
pH	-	7



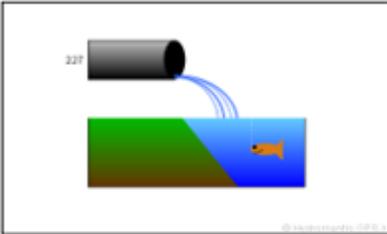
**Fuente:** Elaboración propia

Los demás parámetros que dan por culminada la simulación de la planta propuesta número dos son detallados en la Tabla 26, donde se puede evidenciar que de acuerdo a la Tabla 10, la implementación del sistema biológico presentada en el



proyecto para esta alternativa logra que se cumpla todos los valores, ya que estos se encuentran por debajo de los valores límites permisibles de la norma

**Tabla 26.** Resultados de simulación alternativa 2: Agua tratada



		227
Caudal	m3/d	2888,33
SST	mg/L	0,02
VSS	mg/L	0,00
DBO5	mg/L	186,02
DQO	mg/L	361,32
Amoníaco de N	mgN/L	34,76
Nitrito	mgN/L	18,51
Nitrato	mgN/L	14,92
NKT	mgN/L	43,00
TN	mgN/L	76,44
Sulfatos	mgP/L	2,22
TP	mgP/L	2,32
Total alcalinidad	mgCaCO <sub>3</sub> /L	91,21
pH	-	7,00

Fuente: Elaboración propia

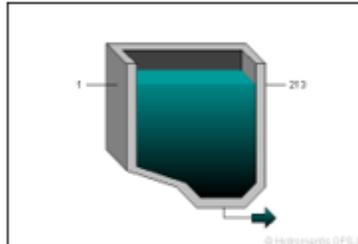
### 9.2.2. Resultados de la simulación para la alternativa No.3.

A fin de culminar con las alternativas propuestas para la planta de tratamiento de la industria láctea, se plantea una alternativa tres la cual cuenta con cinco etapas. En la primera etapa se encuentra una cámara de arena arrojando resultados en la simulación del software observados en la Tabla 27, donde esta tiene como finalidad remover las grasas en un 78.30% que puede tener el agua residual de la industria, de igual forma este proceso presenta pequeñas variaciones en cuanto a los parámetros de los Sólidos Suspendidos Totales (SST) los cuales presentan una disminución del 0.06% con valores entre 35336.75 mg/L – 35316.75 mg/L en el caso de la Alcalinidad del agua, este presenta un valor entre 780.90 mgCaCO<sub>3</sub>/L – 781.10 mgCaCO<sub>3</sub>/L en la salida, lo cual representa un 0.03%.

Siguiente a la cámara de arena, se encuentra el clarificador primario evidenciándose a través de los resultados de simulación obtenidos y mostrados en la Tabla 28, que las variaciones son despreciables con respecto a los Sólidos Suspendidos Totales (SST) ya que estos tienen un porcentaje de remoción del 0.09%, con valores entre 35316.75 mg/L – 35284.54 mg/L.



**Tabla 27.** Resultados de simulación alternativa 3: Cámara de arena

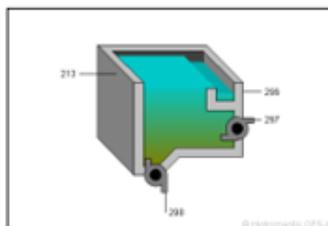


		Entrada	Salida
Caudal	m <sup>3</sup> /d	5000	5000
SST	mg/L	35336,746	35316,746
VSS	mg/L	3533,6746	3533,6746
DBO <sub>5</sub>	mg/L	3094,446	3094,446
DQO	mg/L	6000	6000
Amoníaco de N	mgN/L	139	139
NKT	mgN/L	1300	1300
TP	mgP/L	130	130
Total alcalinidad	mgCaCO <sub>3</sub> /L	780,90	781,10
pH	-	7	7

**Fuente:** Elaboración propia

De igual manera se tiene en cuenta los valores que se tuvieron para la Demanda Biológica de Oxígeno (DBO<sub>5</sub>) la cual presenta una disminución del 0.05%, con valores entre de entrada de 3094.45 mg/L y saliendo con un valor de 3092,77 mg/L, se evidencia en la Tabla 28, que para la Demanda Química de Oxígeno (DQO) tuvo un comportamiento similar al DBO<sub>5</sub> presentando una eficiencia máxima del 0.06%, con valores entre 6000 mg/L – 5996.41 mg/L. También, es el caso en total de fósforo (TP) se presenta una reducción del 0.09%, con valores entre 130 mgP/L – 129,88 mgP/L; el caudal muestra una remoción del 0.20%, entre valores de 5000 m<sup>3</sup>/d – 4990 m<sup>3</sup>/d; el pH se mantiene neutro con un valor de 7.

**Tabla 28.** Resultados de simulación alternativa 3: Clarificador primario



		Entrada	Salida	Bomba	Lodo sedimentado
Caudal	m <sup>3</sup> /d	5000	4990	0	10
SST	mg/L	35316,75	35284,54	0	51388,02
VSS	mg/L	3533,67	3530,45	0	5141,71
DBO <sub>5</sub>	mg/L	3094,45	3092,77	0	3929,01
DQO	mg/L	6000,00	5996,41	0	7793,85
NKT	mgN/L	1300,00	1298,96	0	1821,30
TP	mgP/L	130,00	129,88	0	188,27
Total alcalinidad	mgCaCO <sub>3</sub> /L	780,95	780,95	6,61744E-19	780,95
pH	-	7	7	7	7

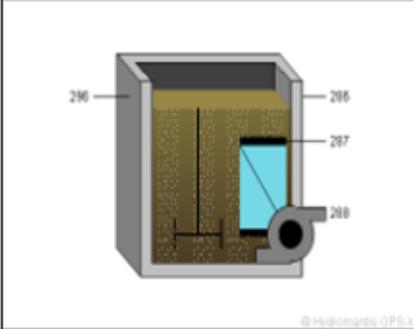
**Fuente:** Elaboración propia

Para el caso del reactor BMR detallando los resultados obtenidos mediante el software GPS-X en la Tabla 29, presenta un mínimo de variación en cuanto al caudal con valores entre 4990 m<sup>3</sup>/día – 4940 m<sup>3</sup>/día el cual corresponde al 1% de disminución; los Sólidos Totales en Suspensión (MLSS) presentan una disminución



del 99.60%, el cual cuenta con valores entre 35284.54 mg/L – 139.97 mg/L. Para los nitritos estos cuentan con una eficiencia máxima del 99.99% al ser removidos casi en su totalidad con valores entre 138.90 mg/L – 0.01 mg/L; al igual se demuestra un aumento de amoníaco de nitrógeno de 729.98%, el cual tiene valores de 139.00 mgN/L – 1153.97 mgN/L; para los sulfatos se aprecia un incremento de 3796.24%, que contiene valores entre 1.65 mgP/L – 64.29 mgP/L; el pH se sigue manteniendo neutro con un valor de 7.

**Tabla 29.** Resultados de la simulación alternativa 3: Reactor MBR completamente mezclado



		Entrada	Salida
MLSS	mg/L	35284,54	139,97
MLVSS	mg/L	3530,45	11,14
Soluble COD	mg/L	2058,00	2287,62
Amoníaco de N	mgN/L	139,00	1153,67
Nitrito	mgN/L	138,90	0,01
Nitrato	mgN/L	10,00	0,00
Sulfatos	mgP/L	1,65	64,29
Total Alcalinidad	mgCaCO3/L	780,95	1795,97
pH	-	7,00	7,00
T. de residencia hidráulico	h	-	1,92
DO	mgO2/L	-	0,01
Total OUR	mgO2/(L.h)	-	107,96
Tasa de nitrificación	mgN/(L.h)	-	0,00
Velocidad útil de nitrato	mgN/(L.h)	-	5,20
Flujo de aire biológico	m3/h	-	833,33
Flujo de aire de limpieza	m3/h	-	791,67
Aire biológico -SOTE	%	-	30,00
Aire de limpieza - SOTE	%	-	10,00
Total actual OUR	kg/h	-	43,19

Caudal (m3/d)	
4990	Entrada
0	Bomba
4940	Filtrado
50	Bomba

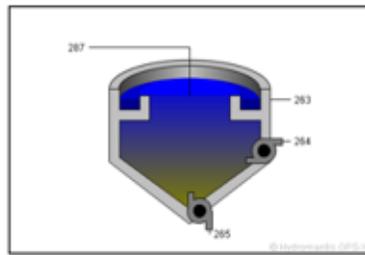
Fuente: Elaboración propia

En el Clarificador secundario los resultados de la simulación son evidenciados a través de la Tabla 30, donde se logra reducir en gran medida los componentes de Solidos Suspendidos Totales (SST) con una eficiencia máxima del 90.5%, con valores entre 139.97 mg/L – 13.24 mg/L. Sin embargo, en la Demanda Biológica de Oxígeno (DBO) con una remoción del 0.30%, con valores entre 1430.57 mg/L – 1425.85 mg/L, el comportamiento sigue siendo muy similar en la Demanda Química de Oxígeno (DQO) pues solo presenta una reducción del 0.7%, con valores entre 2305.24 mg/L – 2289.29 mg/L; en el total de nitrógeno no se ven cambios



significativos por lo que se aumenta en un 0.1%, con valores entre 1158.50 mgN/L – 1157.23 mgN/L, para el caudal de circulación que atraviesa por este clarificador se ve una disminución del 41.30%, con valores entre 4940 m<sup>3</sup>/día – 2900 m<sup>3</sup>/día, el pH se mantiene neutro con un valor de 7.

**Tabla 30.** Resultados de simulación alternativa 3: Clarificador secundario

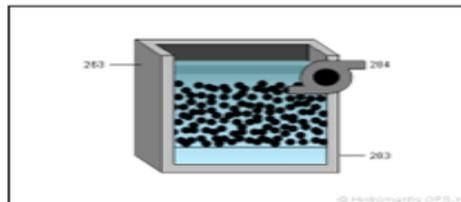


		Entrada	Salida	Bomba	Lodo sedimentado
Caudal	m <sup>3</sup> /d	4940	2900	40	2000
SST	mg/L	139,97	13,24	318,82	318,82
VSS	mg/L	11,14	1,07	25,50	25,50
DBO5	mg/L	1430,57	1425,85	1437,27	1437,27
DQO	mg/L	2305,24	2289,29	2327,94	2327,94
Amoníaco de N	mgN/L	1153,67	1153,67	1153,67	1153,67
Nitrito	mgN/L	0,01	0,01	0,01	0,01
Nitrato	mgN/L	0,00	0,00	0,00	0,00
NKT	mgN/L	1158,48	1157,21	1160,29	1160,29
TN	mgN/L	1158,50	1157,23	1160,30	1160,30
Sulfatos	mgP/L	64,29	64,29	64,29	64,29
TP	mgP/L	65,23	64,65	66,06	66,06
Total alcalinidad	mgCaCO <sub>3</sub> /L	1795,97	1795,96	1795,97	1795,97
pH	-	7	7	7	7

**Fuente:** Elaboración propia

Para el caso de la última etapa de la planta piloto propuesta, se tuvieron resultados de la modelación detallándose en la Tabla 31, el filtro desnitrificador es la etapa donde se presenta mayores variaciones en los parámetros, para los Sólidos Suspendidos totales (SST) los cuales fueron aumentados en un 34.9%, con valores de 13.24 mg/L – 17.85 mg/L.

**Tabla 31.** Resultados de simulación alternativa 3: Filtro desnitrificado



		Entrada	Salida
Caudal	m <sup>3</sup> /d	2900,00	2858,33
SST	mg/L	13,24	17,85
VSS	mg/L	1,07	5,70
DBO5	mg/L	1425,85	60,00
DQO	mg/L	2289,29	385,34
Amoníaco de N	mgN/L	1153,67	1144,33
Nitrito	mgN/L	0,01	0,00
Nitrato	mgN/L	0,00	0,00
NKT	mgN/L	1157,21	1147,05
TN	mgN/L	1157,23	1147,05
Sulfatos	mgP/L	64,29	50,05
TP	mgP/L	64,65	51,80
Total alcalinidad	mgCaCO <sub>3</sub> /L	1795,96	1420,01
pH	-	7,00	7,00

Caudal (m <sup>3</sup> /d)	Entrada
2900	2858,33
Entrada	Salida
13,24	17,85
Salida	Bomba
41,67	41,67

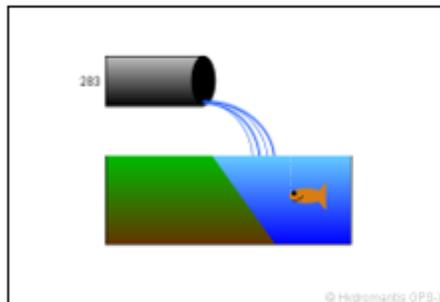
**Fuente:** Elaboración propia



En la Demanda Biológica de Oxígeno (DBO) se presenta una eficiencia máxima del 95.79%, con valores entre 1425.85 mg/L – 60.00 mg/L; para la Demanda Química de Oxígeno (DQO) se destaca una reducción de 83.17 %, entre valores de 2289.29 mg/L – 385.34 mg/L; para los sólidos suspendidos volátiles (VSS) se presenta un aumento significativa en un 434.44%, con valores de 1.07 mg/L – 5.70 mg/L; el caudal se disminuye en un 1,44%, con valores entre 2900 m<sup>3</sup>/día - 2858,33 m<sup>3</sup>/día.

Los demás parámetros que dan por culminada la simulación de la planta propuesta número tres son detallados en la Tabla 32, donde se puede evidenciar que de acuerdo a la Tabla 10, la implementación del sistema biológico presentada en el proyecto para esta alternativa logra que se cumpla todos los valores de los parámetros establecidos, ya que estos se encuentran por debajo de los valores límites permisibles de la norma.

**Tabla 32.** Resultados de simulación alternativa 3: Agua tratada



		Salida
Caudal	m <sup>3</sup> /d	2858,33
SST	mg/L	17,85
VSS	mg/L	5,70
DBO5	mg/L	60,00
DQO	mg/L	385,34
Amoníaco de N	mgN/L	1144,33
Nitrito	mgN/L	0,00
Nitrato	mgN/L	0,00
NKT	mgN/L	1147,05
TN	mgN/L	1147,05
Sulfatos	mgP/L	50,05
TP	mgP/L	51,80
Total alcalinidad	mgCaCO <sub>3</sub> /L	1420,01
pH	-	7,00

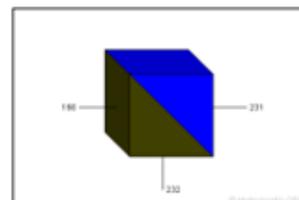
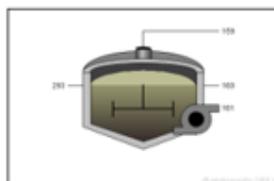
**Fuente:** Elaboración propia

En esta alternativa el tratamiento de lodos se le agrega una purga de lodos (Deshidratación) identificándose en la Tabla 33. Para la etapa del digester anaeróbico no se presenta modificaciones en su caudal por lo que este permanece en 2050 m<sup>3</sup>/día; para los Sólidos Suspendidos Totales (SST) se ve una disminución del 4%, con valores entre 34449.74 mg/L – 33238.84 mg/L; en la Demanda Química de Oxígeno (DQO) se indica una eficiencia máxima del 1% con valores entre 6625.89 mg/L – 6537.29 mg/L; al igual se presenta un aumento en el amoníaco de nitrógeno con un porcentaje de 4%, con valores entre 1153.67 mgN/L – 1199.35



mgN/L; en el caso de la Alcalinidad presente en el agua este tiene un incremento del 9% con valores entre 1795.97 mgCaCO<sub>3</sub>/L – 1954.33 mgCaCO<sub>3</sub>/L mientras que, el pH permanece neutro con un valor de 7.

**Tabla 33.** Resultados de simulación alternativa 3: Tratamiento de lodos



		Entrada	Salida	Bomba
Caudal	m <sup>3</sup> /d	2050	2050	0
SST	mg/L	34449,74	33238,84	33238,84
VSS	mg/L	2742,09	2557,59	2557,59
DQO	mg/L	6625,89	6537,20	6537,20
Amoníaco de N	mgN/L	1153,67	1199,35	1199,35
Sulfatos	mgP/L	64,29	52,74	52,74
Total alcalinidad	mgCaCO <sub>3</sub> /L	1795,97	1954,33	1954,33
pH	-	7	7	7

		Entrada	Filtrado	Sólidos deshidratados
Caudal	m <sup>3</sup> /d	2050	2048,5	1,5
SST	mg/L	33238,84	1661,94	43156756,16
DQO	mg/L	6537,20	2623,86	5350850,59
Amoníaco de N	mgN/L	1199,35	1199,35	1199,35
Sulfatos	mgP/L	52,74	52,74	52,74
Total alcalinidad	mgCaCO <sub>3</sub> /L	1954,33	1915,37	1915,37
pH	-	7	7	7

		Salida
Caudal	m <sup>3</sup> /d	1,5
SST	mg/L	43156756,2
VSS	mg/L	3320733,7
DBO5	mg/L	1497592,2
DQO	mg/L	5350850,6
Amoníaco de N	mgN/L	1199,35
Nitrato	mgN/L	0,0
Nitrito	mgN/L	0,0
NKT	mgN/L	392181,53
TN	mgN/L	392181,53
Sulfatos	mgP/L	52,7
TP	mgP/L	221252,45
Total alcalinidad	mgCaCO <sub>3</sub> /L	1915,37
pH	-	7



**Fuente:** Elaboración propia

En la deshidratación el caudal sufre una leve disminución del 0,07%, con valores entre 2050 m<sup>3</sup>/día – 2048.5 m<sup>3</sup>/día; para los Sólidos Suspendidos Totales (SST) se indica una reducción del 95%, con valores entre 33238.84 mg/L – 1661.94 mg/L; para la Demanda Química de Oxígeno (DQO) se observa una eficiencia máxima de 59.86%, con valores entre 6537.20 mg/L – 2623.86 mg/L en el valor de total de Alcalinidad se presenta una remoción del 1.99% con valores entre 1954.33 mgCaCO<sub>3</sub>/L – 1915.37 mgCaCO<sub>3</sub>/L; culminando que el pH no tuvo ningún cambio en el proceso debido a que permanece neutro con un valor de 7.



### 9.3. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD EN EL SOFTWARE.

El análisis de sensibilidad se realiza con base en las variables físicas y operacionales de interés de estudio (Sistema biológico implementado) de cada alternativa, con el fin de determinar el comportamiento que tienen estas frente a los resultados de salida y poder apreciar la sensibilidad que estas producen en los parámetros de estudios para estos proyectos detallados en la Tabla 10. En el caso de cloruros y sulfatos como parámetro de estudio, se realizó por medio de unidades de concentración tomando valores detallados en la tabla X para así, ser colocada en el software:

**Tabla 34.** Principales valores de aniones presentes en el agua natural

Aniones	Valencia	Peso molecular (mg/mmol)	Peso equivalente (mg/meq)
Carbonatos	-2	60.01	30.01
Bicarbonatos	-1	61.02	61.02
Cloruros	-1	35.46	35.46
Fluoruros	-1	19	19
Nitratos como N	-1	14.01	14.01
Sulfatos	-2	96.06	48.03

**Fuente:** (M. Espigares García, M. Fernández – Creuhet Navajas. Estudio Sanitario del Agua. 1995)

$$\text{Total Aniones} = \left( \frac{500 \text{ mg/m}^3}{35.46 \text{ mg/eq}} \times |-1| \right) + \left( \frac{500 \text{ mg/m}^3}{96.06 \text{ mg/eq}} \times |-2| \right) = 24.12 \text{ eq/m}^3$$

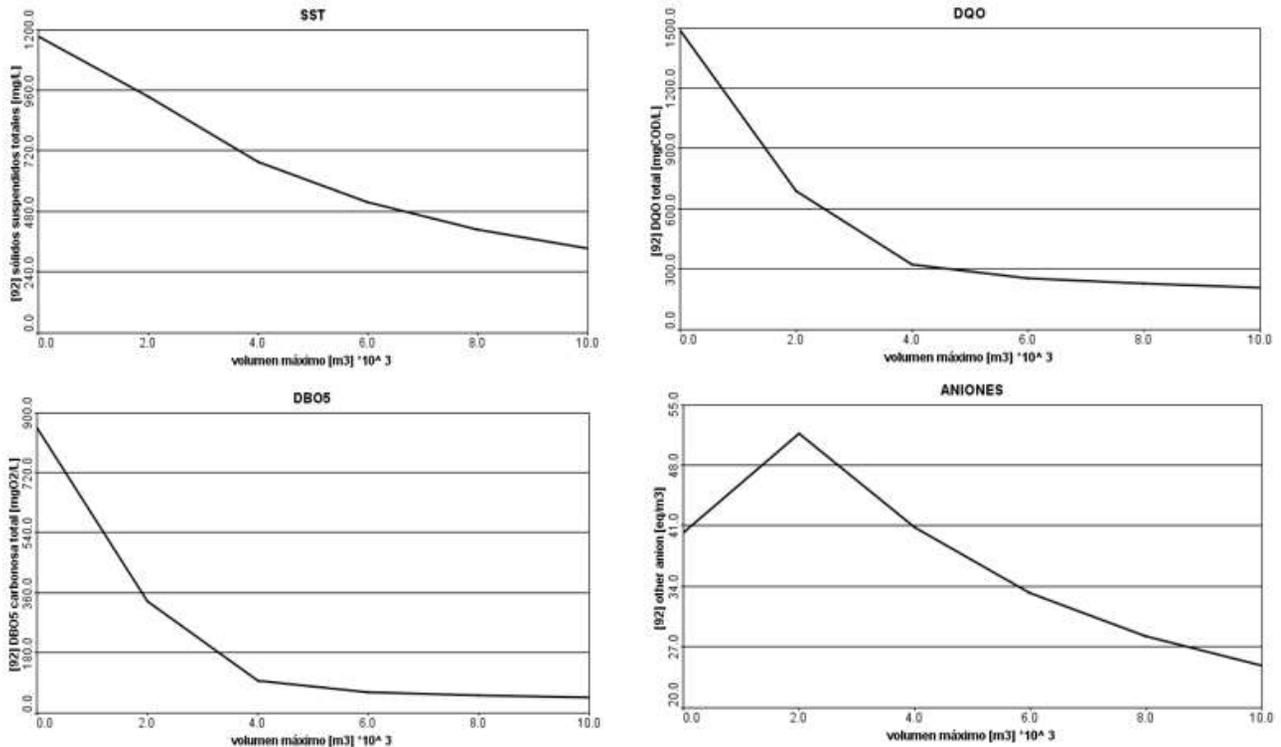
#### 9.3.1. Análisis de sensibilidad para la alternativa No.1.

La Gráfica 5 representa la variable de volumen máximo realizado en la laguna de oxidación con respecto a los parámetros de estudio del proyecto, donde se aprecia que existen pendientes en SST, DQO, DBO y el Total de Aniones observando una sensibilidad crítica indicando que existe una dependencia en el comportamiento, afectando el resultado del modelo. Para el caso de la simulación la laguna de oxidación trabaja con un volumen de 6000 m<sup>3</sup> optando por analizar esta variable frente a los parámetros, se dejó un volumen hasta 10000 m<sup>3</sup> apreciando que, si se trabaja con un volumen inferior a 2000 m<sup>3</sup> el valor de DQO estará entre 1490 mg/L a 685 mg/L y no será satisfactorio ya que, este se encuentra por encima de lo permitido respecto a la norma. Sin embargo, para trabajar volúmenes entre 3000 m<sup>3</sup> a 10000 m<sup>3</sup> nos darán resultados favorables menores a 450 mg/L permitidos por la norma.



Para el caso del SST y Total de Aniones, se evidencia desde los resultados de simulación y en el análisis presentado a la propuesta planteada hará que estos valores de los parámetros en la descarga estén por encima de lo permitido, mientras que para el DBO<sub>5</sub> se pueden trabajar volúmenes desde 1000 m<sup>3</sup> a 10000 m<sup>3</sup>.

**Gráfica 5.** Análisis de sensibilidad alternativa 1: Volumen máximo de laguna de oxidación



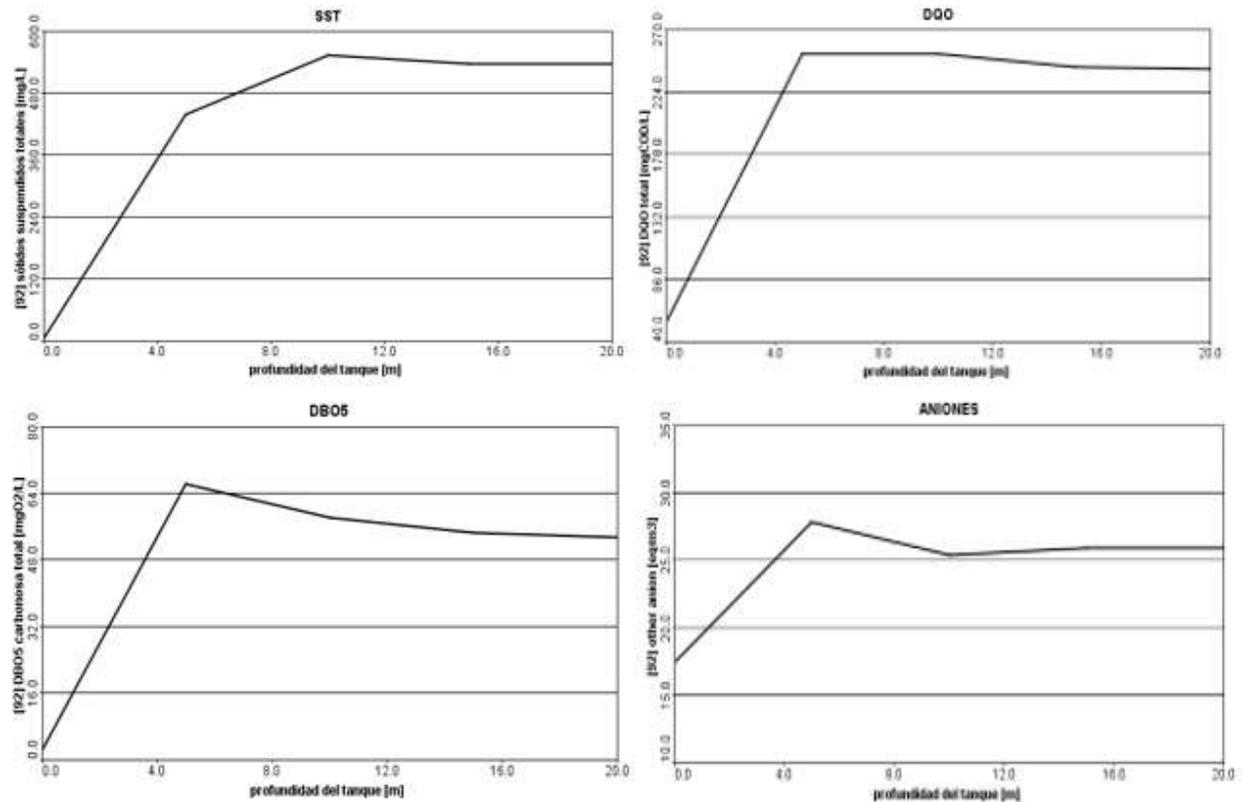
**Fuente:** Elaboración propia

En la laguna de oxidación se analizó la variable física, de profundidad del tanque observándose en la Gráfica 6, donde se observa de igual forma, una sensibilidad crítica indicando que existe una dependencia en el comportamiento, afectando el resultado del modelo. Para el caso de la simulación la laguna de oxidación trabaja con una profundidad de 4 mts optando por analizar esta variable frente a los parámetros, se dejó una profundidad hasta 20 mts apreciando que, el DBO<sub>5</sub> se encontrara entre 2.35 mg/L a 62.2 mg/L y el DQO en 56 mg/L a 252 mg/L con un comportamiento satisfactorio para cualquier profundidad que se desea tomar en rango menor a 20 mts, puesto se tendrán resultados que cumplan con la norma.



Para el caso del SST y Total de Aniones, se evidencia desde los resultados de simulación y en el análisis presentado en la propuesta planteada hará que estos valores de los parámetros en la descarga estén por encima de lo permitido.

**Gráfica 6.** Análisis de sensibilidad alternativa 1: Profundidad del tanque



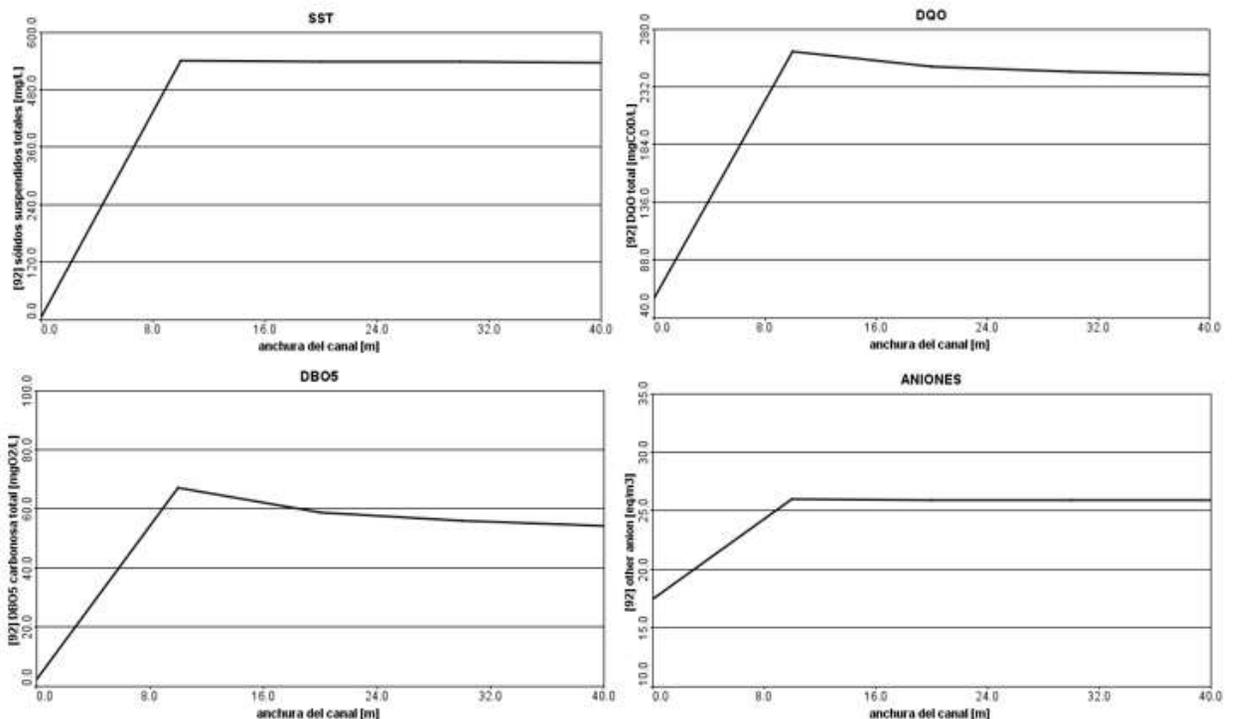
**Fuente:** Elaboración propia

Otra de las variables físicas analizadas en la laguna de oxidación baso en la anchura del canal de la misma, observándose en la Gráfica 7. Presentándose una sensibilidad crítica indicando que existe una dependencia en el comportamiento, afectando el resultado del modelo. Para el caso de la simulación la laguna de oxidación trabaja con una profundidad de 8 mts optando por analizar esta variable frente a los parámetros, se dejó una profundidad hasta 40 mts apreciando que, el DBO<sub>5</sub> se encontrara entre 2.35 mg/L a 67.10 mg/L y el DQO en 56 mg/L a 261 mg/L con un comportamiento satisfactorio para cualquier ancho que se desea tomar en un rango menor a 40 mts, puesto que se tendrán resultados que cumplan con la norma.



Para el caso del SST y Total de Aniones, se evidencia desde los resultados de simulación y en el análisis presentado en la propuesta planteada hará que estos valores de los parámetros en la descarga estén por encima de lo permitido. Sin embargo, para el caso de los aniones los valores de 20 mts a 40 mts dan como resultados un valor muy cercano al permitido de 25.9 eq/m<sup>3</sup> permaneciendo constante.

**Gráfica 7.** Análisis de sensibilidad alternativa 1: Anchura del canal



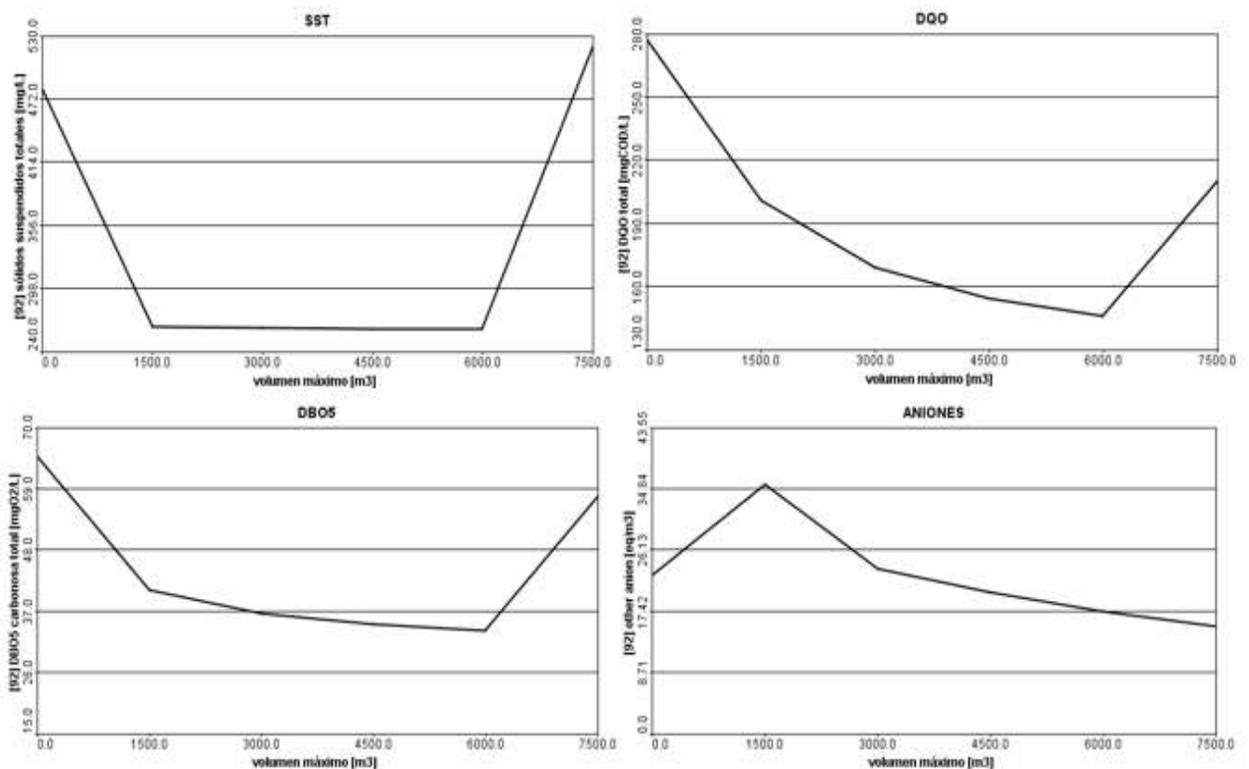
Fuente: Elaboración propia

Dado a la implementación del reactor UASB, se realiza el análisis de la variable de volumen máximo del reactor detallándose en la Gráfica 8. Se aprecia que en todos los parámetros de salida se presenta una sensibilidad crítica indicando que existe una dependencia en el comportamiento, afectando el resultado del modelo. Para el caso de la simulación del reactor, este trabaja con un volumen de 1500 m<sup>3</sup> optando por analizar esta variable frente a los parámetros, se dejó un volumen hasta 7500 m<sup>3</sup> apreciando que, el DBO<sub>5</sub> se encontrara entre 36.60 mg/L a 64.70 mg/L y el DQO en 146 mg/L a 277 mg/L teniendo un comportamiento satisfactorio para cualquier volumen que se desea tomar en un rango menor a 7500 m<sup>3</sup>, puesto se tendrán resultados que cumplan con la norma.



Para el caso del SST se evidencia desde los resultados de simulación y en el análisis presentado en la propuesta planteada hará que estos valores de los parámetros en la descarga estén por encima de lo permitido, mientras que para el Total de Aniones trabajara con volúmenes desde 2000 m<sup>3</sup> a 7500 m<sup>3</sup> arrojará resultados que están por debajo de la norma, a excepción de volúmenes entre 1000 m<sup>3</sup> a 1500 m<sup>3</sup> que darán como resultados de 30.8 eq/m<sup>3</sup> a 35.4 eq/m<sup>3</sup> valor que está por encima de lo permitido en la norma, y calculado anteriormente.

**Gráfica 8.** Análisis de sensibilidad alternativa 1: Volumen máximo del reactor UASB



Fuente: Elaboración propia

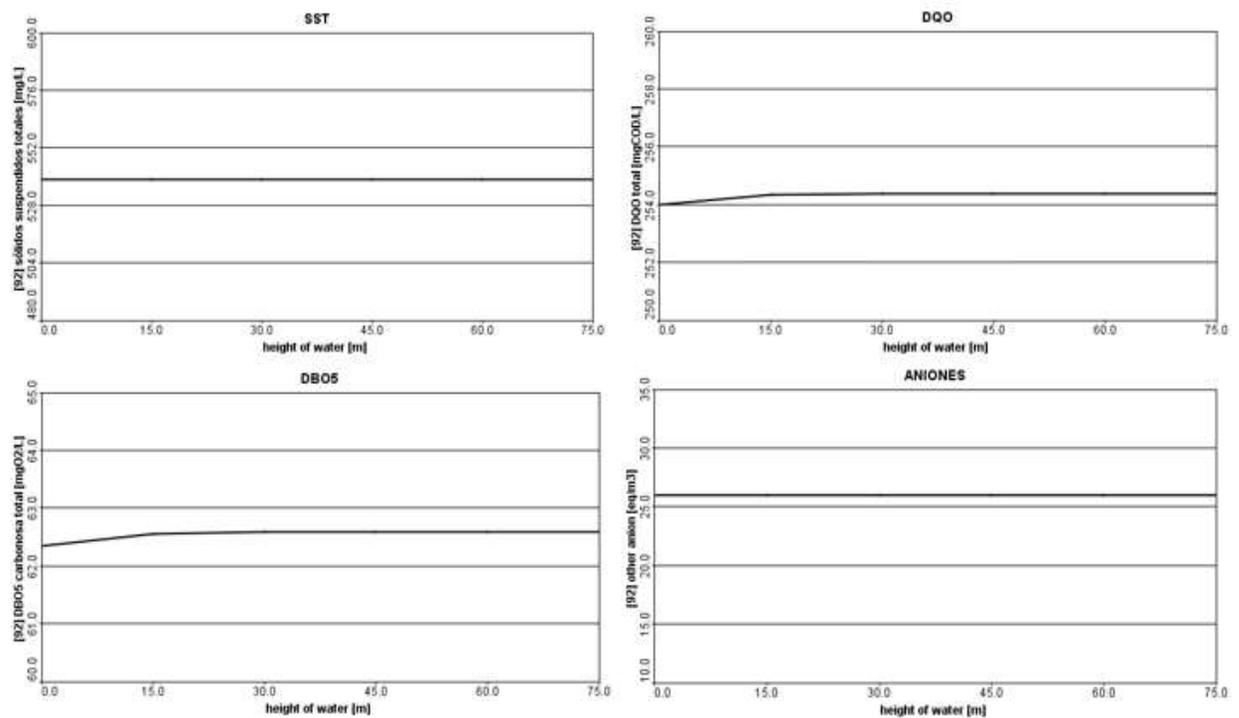
Otra de las variables físicas analizadas en el reactor UASB baso en la altura del agua del mismo, observándose en la Gráfica 9. Donde se puede apreciar que la pendiente se mantiene constante conforme aumenta la concentración de la variable, lo cual nos indica que no afecta a los resultados del modelo. Se evidencia una sensibilidad nula entre ambas variables analizadas. Para el caso de la simulación reactor UASB trabaja con una altura de 15 mts optando por analizar esta variable frente a los parámetros, se dejó una altura máxima hasta 75 mts apreciando que, el DBO<sub>5</sub> arroja un resultado de 254 mg/L y el DQO un valor de 62.6 mg/L, lo que indican



que tienen un comportamiento satisfactorio para cualquier ancho que se desea tomar en un rango menor a 75 mts, puesto se tendrán resultados que cumplan con la norma.

Para el caso del SST con un valor 539 mg/L y Total de Aniones de 26 eq/m<sup>3</sup>, se evidencia desde los resultados de simulación y en el análisis presentado en la propuesta planteada hará que estos valores de los parámetros en la descarga estén por encima de lo permitido.

**Gráfica 9.** Análisis de sensibilidad alternativa 1: Altura del agua del reactor



**Fuente:** Elaboración propia

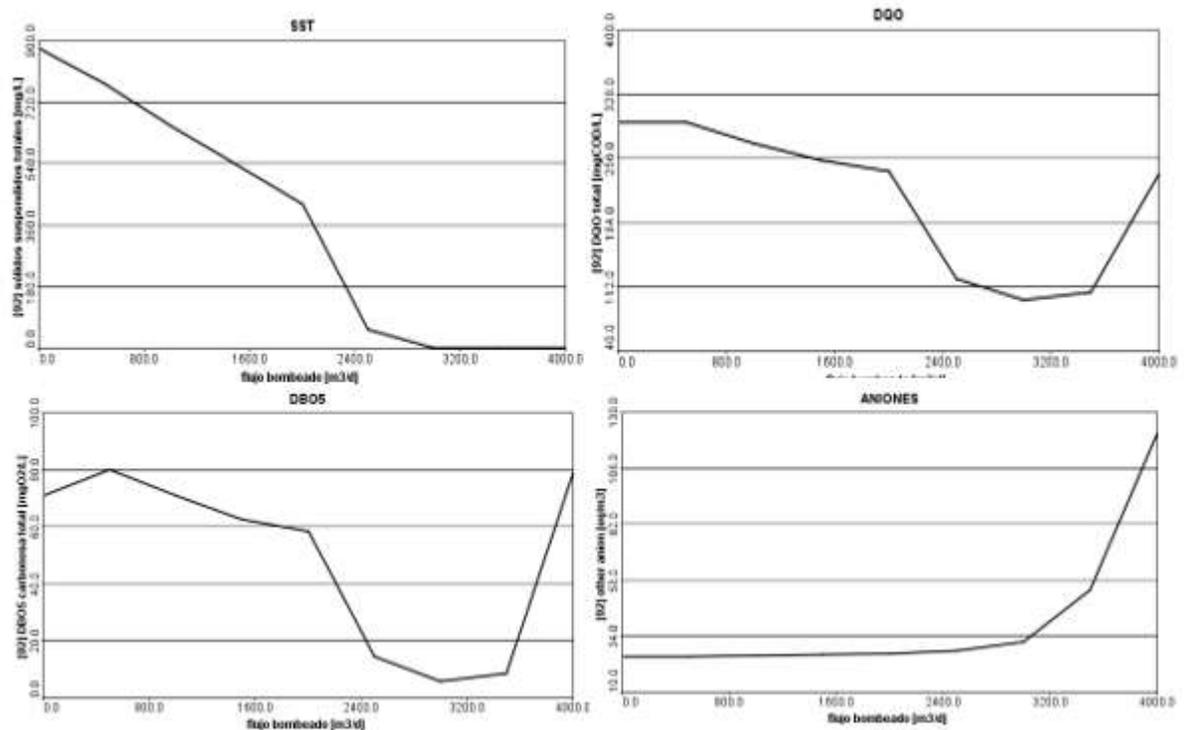
En base a la Gráfica 10, se analiza la variable operacional del reactor UASB basado en el flujo de bombeo del mismo, donde se aprecia que en todos los parámetros de salida se presenta una sensibilidad crítica indicando que existe una dependencia en el comportamiento, afectando el resultado del modelo. Para el caso de la simulación reactor UASB trabaja con flujo de bombeo de 1500 m<sup>3</sup>/día optando por analizar esta variable frente a los parámetros, se dejó un flujo de bombeo máximo hasta 4000 m<sup>3</sup>/día apreciando que, el DBO<sub>5</sub> arroja un resultado de 5.91 mg/L a 79.90 mg/L y el DQO un valor de 96.7 mg/L a 297 mg/L, lo que indican que tienen un



comportamiento satisfactorio para cualquier flujo que se desea tomar en un rango menor a 4000 m<sup>3</sup>/día, puesto se tendrán resultados que cumplan con la norma.

El comportamiento que se aprecia para los SST nos indica que trabajar con flujo de bombeo menor a 2000 m<sup>3</sup>/día, nos darán resultados en la descarga no convenientes con respecto a lo permitido por la norma, esto debido a que se tendrán valores de 421 mg/L a 877 mg/L mientras, que para un rango de flujo entre 2500 m<sup>3</sup>/día a 4000 m<sup>3</sup>/día, hará que el flujo tenga valores de salida de SST entre 0.759 mg/L a 56.3 mg/L. En el caso del total de Aniones se puede analizar que para en rango de flujo de bombeo presentado en la propuesta planteada hará que estos valores de los parámetros en la descarga estén por encima de lo permitido.

**Gráfica 10.** Análisis de sensibilidad alternativa 1: Flujo de bombeo del reactor



**Fuente:** Elaboración propia

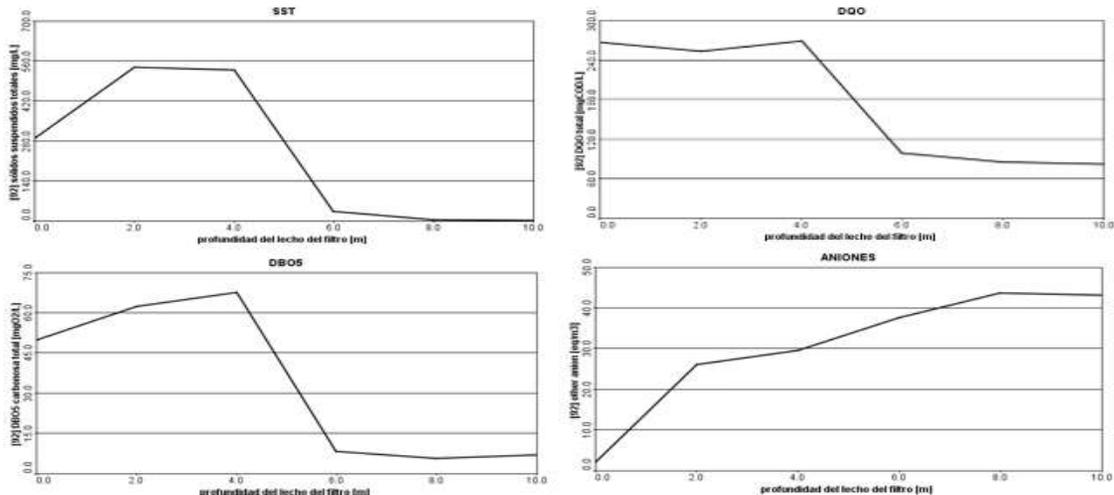
Con el uso del filtro desnitrificado se notó que fue el proceso que más hizo remociones en cuanto a los parámetros de estudio, por ello se realiza el análisis de la profundidad del lecho del filtro detallándose en la Gráfica 11. Donde se aprecia que en todos los parámetros de salida se presenta una sensibilidad crítica indicando que existe una dependencia en el comportamiento, afectando el resultado del



modelo. Para el caso de la simulación del filtro, este trabaja con profundidad del lecho de 2 mts optando por analizar esta variable frente a los parámetros, se dejó una profundidad máxima hasta 10 mts apreciando que, el DBO<sub>5</sub> se encontrara entre 5.69 mg/L a 67.40 mg/L y el DQO en 81.5 mg/L a 270 mg/L con un comportamiento satisfactorio para cualquier profundidad del lecho que se desea tomar en un rango menor a 10 mts puesto se tendrán resultados que cumplan con la norma.

Para el caso de Total de Aniones, se evidencia desde los resultados de simulación y en el análisis presentado en la propuesta planteada hará que estos valores de los parámetros en la descarga estén por encima de lo permitido, mientras que para el SST se evidencia que el rango entre 2 mts a 4 mts el resultado de SST para la descarga será por encima de lo permitido en la norma con rangos mayores a 500 mg/L pero, para rangos de entre 6 mts a 10 mts se tendrán resultados que cumplan con la norma, observando con exactitud que puede ser removido hasta un 99.9% en una profundidad de lecho de 10 mts.

**Gráfica 11.** Análisis de sensibilidad alternativa 1: Profundidad del lecho del filtro



Fuente: Elaboración propia

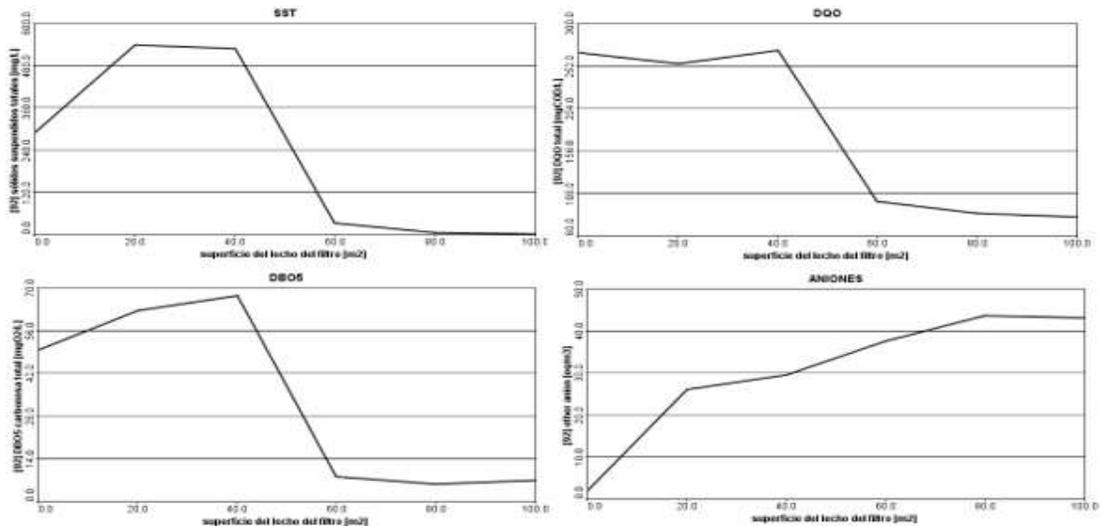
En la Gráfica 12, se analiza la última variable de la alternativa 1 la superficie del lecho del filtro desnitrificado, identificando que tiene un comportamiento muy similar al análisis de la profundidad del lecho lo cual indica que la pendiente se mantiene constante conforme aumenta la concentración de la variable, afectando a los resultados del modelo, concluyendo que es una sensibilidad crítica. Para el caso de la simulación del filtro trabaja con un área de 20 m<sup>2</sup> optando por analizar esta variable frente a los parámetros, se dejó un área máxima hasta 100 m<sup>2</sup> apreciando



que, el  $DBO_5$  se encontrara entre 5.8 mg/L a 73.40 mg/L y el DQO en 81.5 mg/L a 270 mg/L teniendo un comportamiento satisfactorio para cualquier superficie del lecho que se desea tomar en un rango menor a 100 m<sup>2</sup> puesto que, se tendrán resultados que cumplan con la norma.

Para el caso de Total de Aniones, se evidencia desde los resultados de simulación y en el análisis presentado en la propuesta planteada hará que estos valores de los parámetros en la descarga estén por encima de lo permitido arrojando resultados de 25 eq/m<sup>3</sup> a 44.1 eq/m<sup>3</sup>, mientras que para el SST se evidencia que para una superficie menor a 40 m<sup>2</sup> el resultado de SST para la descarga será por encima de lo permitido en la norma con rangos mayores a 500 mg/L pero, para rangos de entre 50 m<sup>2</sup> a 100 m<sup>2</sup> se tendrán resultados que cumplan con la norma, observando con exactitud que puede ser removido hasta un 99.9% en una profundidad de lecho desde 90 m<sup>2</sup>.

**Gráfica 12.** Análisis de sensibilidad alternativa 1: Superficie del lecho del filtro



Fuente: Elaboración propia

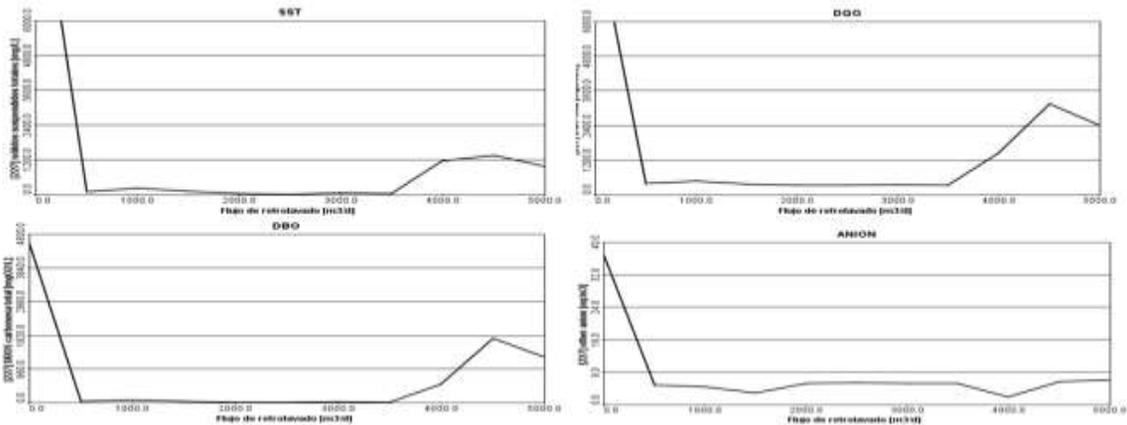
### 9.3.2. Análisis de sensibilidad para la alternativa No. 2.

De acuerdo a la variable operacional Flujo de retro lavado que se encuentra en el Filtro Aireador Biológico Simple, se logra obtener una Gráfica 13, apreciando una sensibilidad crítica frente a las variables de estudio. Para el filtro aireador biológico simple se toma la determinación de dejar un flujo de retro lavado de 1000 m<sup>3</sup>/día, dejando un flujo máximo hasta 5000 m<sup>3</sup>/día.



Observando que para SST se logra apreciar valores entre 0 m<sup>3</sup>/día – 3500 m<sup>3</sup>/día se presenta una disminución de los sólidos suspendidos entre valores de 11800 mg/L – 21,1 mg/L, pero por otro lado se tiene un aumento de los SST entre valores de 3500 m<sup>3</sup>/d – 5000 m<sup>3</sup>/d con valores entre 21.1 mg/L – 968 mg/L. En el DQO se presenta una disminución entre los valores de 0 m<sup>3</sup>/día – 3500 m<sup>3</sup>/día con una disminución de 9310 mg/L – 323 mg/L, pero se presenta un aumento entre los valores de 3500 m<sup>3</sup>/ día – 5000 m<sup>3</sup>/ día con valores de 323 mg/L – 2390 mg/L, de igual manera en el DBO<sub>5</sub> se tiene una disminución entre los valores de 0 m<sup>3</sup>/día – 3500 m<sup>3</sup>/ día con una disminución de 4530mg/L – 12,2 mg/L, pero se presenta un aumento entre los valores de 3500 m<sup>3</sup>/ día – 5000 m<sup>3</sup>/ día con valores de 12,2 mg/L – 1300 mg/L. La variable que menos afectaciones presenta son los aniones por lo que estos disminuyen entre los valores de 0 m<sup>3</sup>/ día – 500 m<sup>3</sup>/ día con valores de 36.7 eq/m<sup>3</sup> – 4.79 eq/m<sup>3</sup>, entre los valores de 500 m<sup>3</sup>/ día – 5000 m<sup>3</sup>/ día se aprecia cambios poco notables por lo que tienen cantidades entre 4.79 eq/m<sup>3</sup> – 6.11 eq/m<sup>3</sup>.

**Gráfica 13.** Análisis de sensibilidad alternativa 2: Flujo de retro lavado del filtro membrana



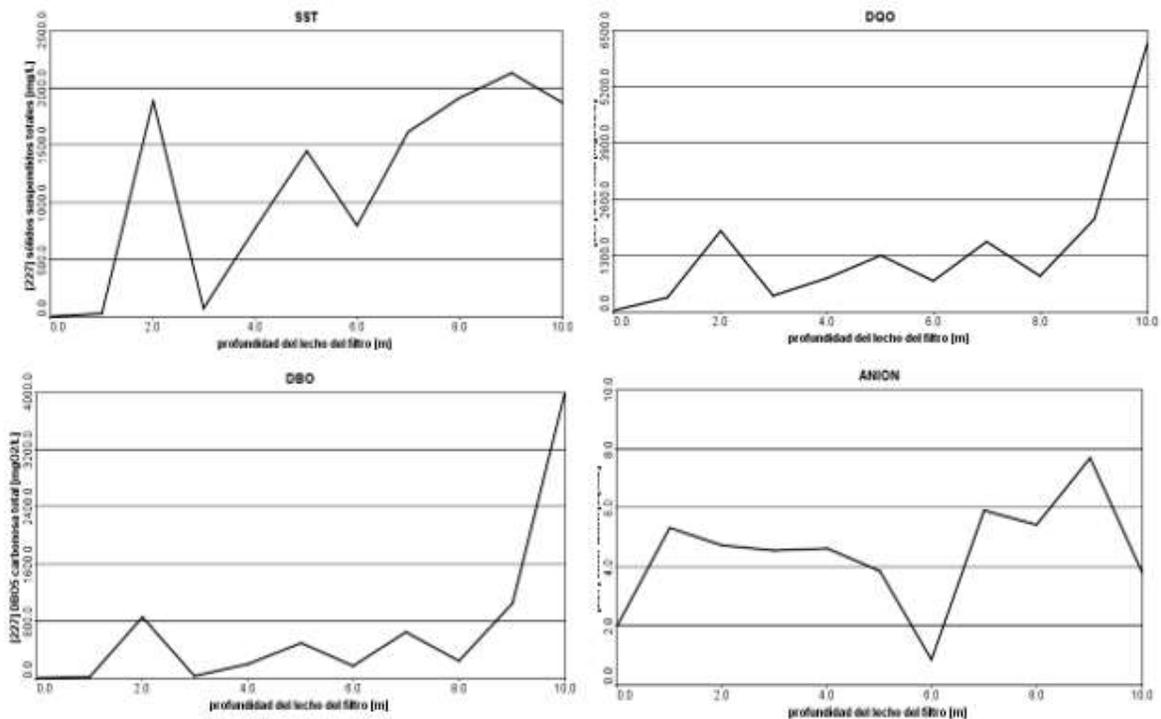
**Fuente:** Elaboración propia

Por medio de la variable física de la profundidad del lecho del filtro que se encuentra en el Filtro Aireador Biológico Simple observándose en la Grafica 14, indicando que la pendiente se mantiene constante conforme aumenta la concentración de la variable, afectando a los resultados del modelo, concluyendo que es una sensibilidad crítica. Para el filtro aireador biológico simple se toma la determinación de dejar una profundidad del lecho del filtro de 2 mts y una profundidad máxima hasta 10 mts por lo que en la gráfica de SST se logra apreciar que entre valores de 0 mts – 10 mts se presenta un aumento de los sólidos suspendidos con valores de 0.014 mg/L – 1870 mg/L, también se tiene en el DQO un aumento entre los valores



de 0 mts – 10 mts con un aumento de 31 mg/L – 6220 mg/L; para la demanda biológica de oxígeno (DBO<sub>5</sub>) se tiene un aumento entre los valores de 0 mts – 10 mts con un aumento de 0.679 mg/L – 4030 mg/L, la variable que menos afectaciones presenta son los aniones por lo que estos aumentan entre los valores de 0 mts – 10 mts con valores de 2.01 eq/m<sup>3</sup> – 3.79 eq/m<sup>3</sup>.

**Gráfica 14.** Análisis de sensibilidad alternativa 2: Profundidad del lecho del filtro



**Fuente:** Elaboración propia

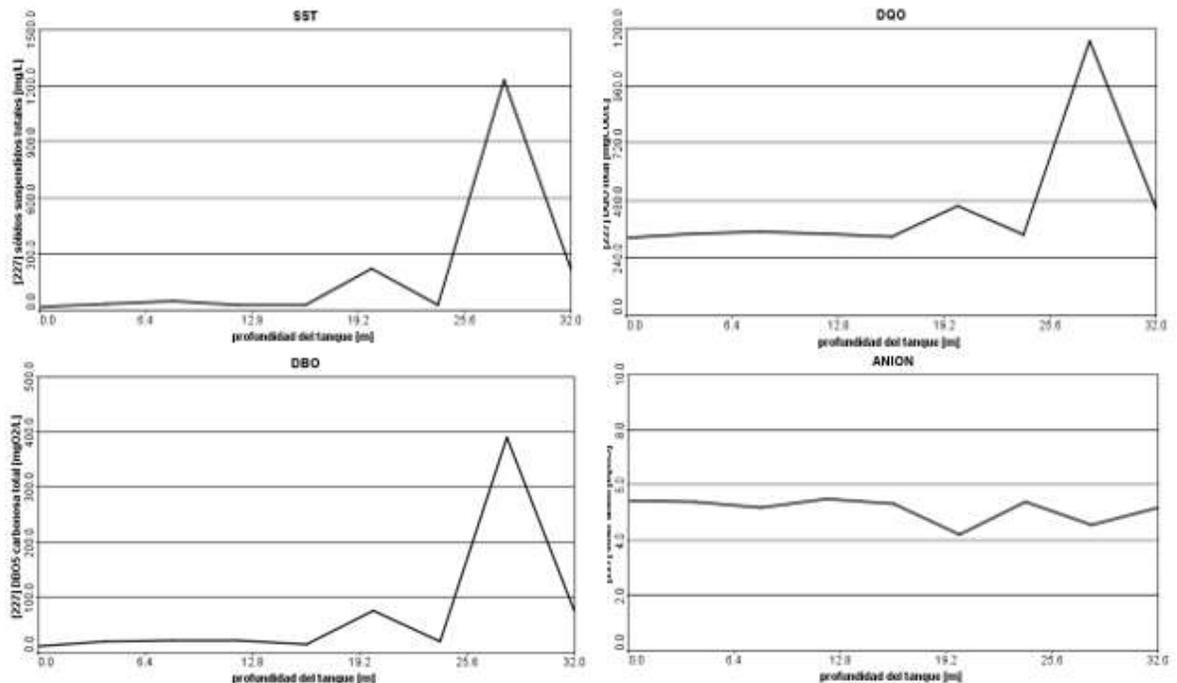
Con respecto a la profundidad del tanque que se encuentra en el reactor híbrido, se logra obtener la Gráfica 15, que es clasificado como una gráfica crítica, observando una sensibilidad crítica indicando que existe una dependencia en el comportamiento, afectando el resultado del modelo. Para el reactor híbrido se trabaja con una profundidad de 6 mts optando por analizar esta variable frente a los parámetros, se dejó una profundidad 32 mts, por lo que en la gráfica de SST se logra apreciar que entre valores de 0 mts – 8 mts se presenta un aumento de los sólidos suspendidos entre valores de 20.5 mg/L – 47.9 mg/L.

Por otro lado, se tiene una disminución de los SST entre valores de 16 mts – 32 mts con valores entre 27.9 mg/L – 219 mg/L, para el DQO también se presenta cantidades de 323 mg/L – 443 mg/L y para el DBO<sub>5</sub> se tiene un aumento entre los



valores de 0 mts – 12 mts con cantidades de 12 mg/L – 22.1 mg/L, pero se presenta una disminución entre los valores de 16 mts – 32 mts arrojando resultados de 14.7 mg/L – 74.2 mg/L. El parámetro que menos afectaciones presenta son el total de aniones por lo que se tienen resultados de 5.41 eq/m<sup>3</sup> – 5,17 eq/m<sup>3</sup> siendo valores que cumplen con la norma.

**Gráfica 15.** Análisis de sensibilidad alternativa 2: Profundidad del tanque

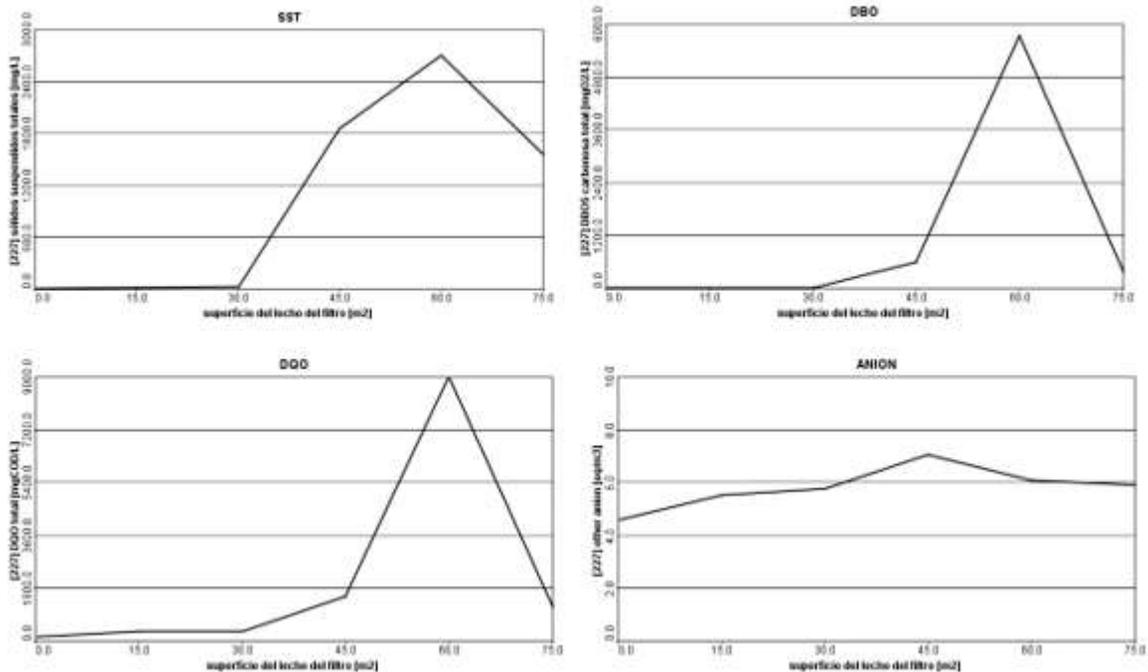


Fuente: Elaboración propia

En cuanto a la demanda biológica de oxígeno (DBO<sub>5</sub>), la demanda química de oxígeno (DQO) y los sólidos suspendidos totales (SST) de la variable de superficie del lecho del filtro, se presenta un aumento de más del 90% entre las superficies de 30 m<sup>2</sup> – 60 m<sup>2</sup> con valores de 1,27 mg/L-5730 mg/L, 154 mgCOD/L – 9030 mg/L y 0.0126 mg/L – 2700 mg/L respectivamente, al igual se presenta una disminución de más del 87% entre las superficies de 60 m<sup>2</sup> – 75 m<sup>2</sup> con valores de 5730 mgO<sub>2</sub>/L-362 mgO<sub>2</sub>/L, 9030 mg/L – 1140 mg/L respectivamente para el valor de los sólidos suspendidos totales se presenta una remoción del 16.7% con valores entre 2700 mg/L – 1550 mg/L, en los valores de los aniones no se presenta variaciones significantes; esto se puede demostrar en la Grafica 16, donde con estos datos se puede determinar que se usara una superficie de 15 m<sup>2</sup>.



**Gráfica 16.** Análisis de sensibilidad alternativa 2: Superficie de lecho del filtro

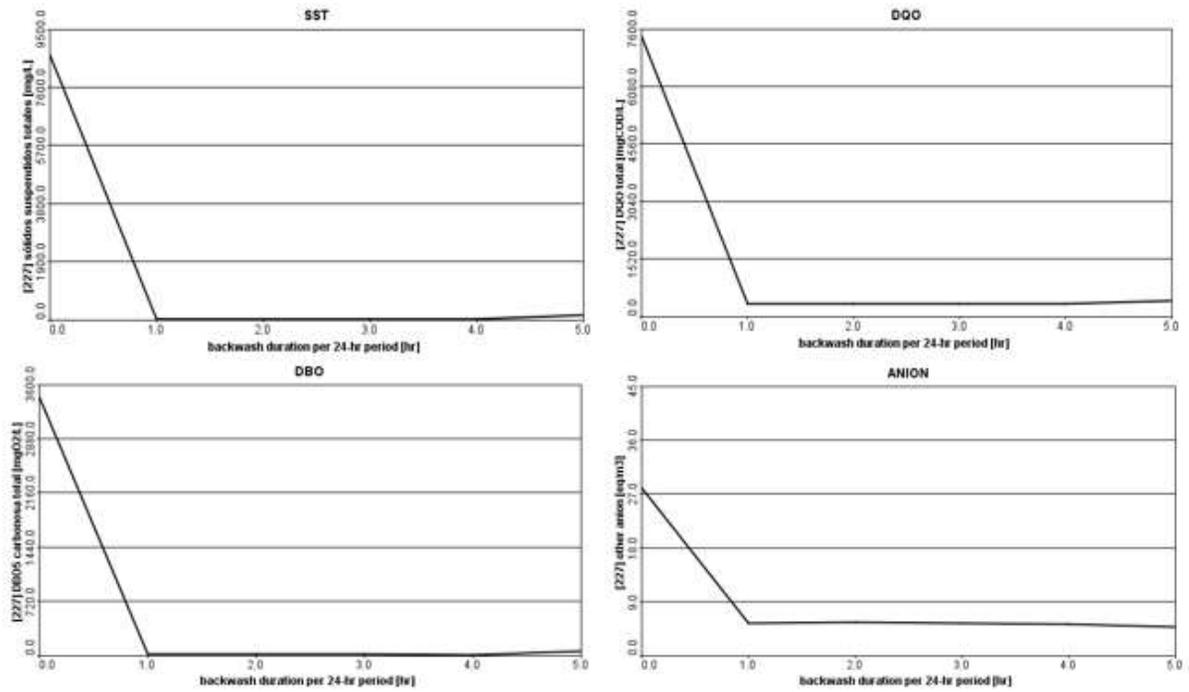


**Fuente:** Elaboración propia

En cuanto a la duración del retro lavado por 24 horas que se encuentra en el filtro aireador biológico simple se logra obtener la Grafica 17, apreciando una sensibilidad crítica indicando que existe una dependencia en el comportamiento, afectando el resultado del modelo Para el filtro aireador biológico simple se trabaja con una duración de 1 hr se dejó una duración máxima de 5 hr apreciando que, para los SST la duración menor a 1 hr arrojaran resultados por encima de lo permitido de 8660 mg/L, mientras que en el rango de 1 hr a 5 hr se tendrá como resultados valores entre 13.7 mg/L – 164 mg/L. Los tres parámetros de estudio restantes, tienen un comportamiento muy similar indicando que trabajar el filtro con una duración menor a 1 hr, hará que se tengan valores por encima de lo permitido por la norma, mientras que en rango de 1 hr a 5 hrs pasa a convertirse en una sensibilidad nula dando como resultados para el DQO un valor de 421 mg/L, en el DBO<sub>5</sub> un valor de 11.8 mg/L y para el total de Aniones 4,77 eq/m<sup>3</sup>.



Gráfica 17. Análisis de sensibilidad alternativa 2: Duración del retro lavado por 24 horas



Fuente: Elaboración propia

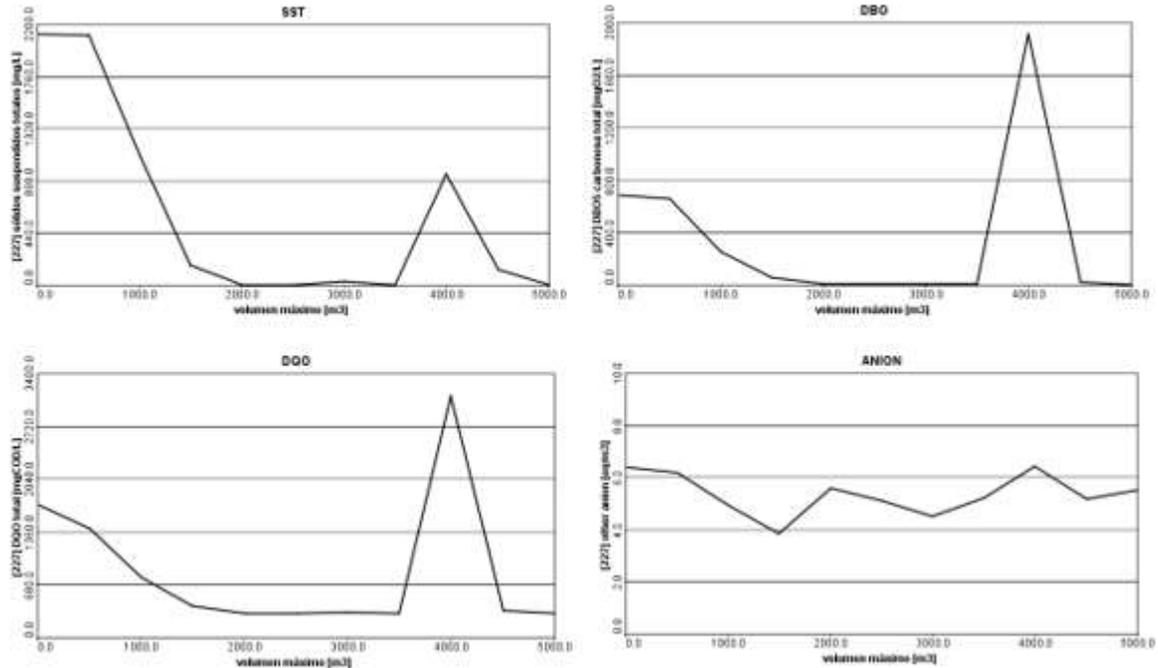
De igual forma para el parámetro físico de volumen máximo del reactor híbrido se realiza el análisis de sensibilidad obteniendo la

Gráfica 18, de esta grafica podemos destacar la disminución de un 99.8% respecto a los sólidos suspendidos totales (SST) con un volumen entre  $0 \text{ m}^3$  -  $2500 \text{ m}^3$  con cantidades de  $2120 \text{ mg/L}$  -  $5,26 \text{ mg/L}$ , también se aprecia un aumento en el volumen  $4000 \text{ m}^3$  con un valor de  $941 \text{ mg/L}$ . Al igual que, los sólidos suspendidos totales, la demanda biológica de oxígeno ( $\text{DBO}_5$ ) presenta una disminución entre el volumen de  $0 \text{ m}^3$  -  $2500 \text{ m}^3$  con valores de  $689 \text{ mg/L}$  -  $8.94 \text{ mg/L}$  que esto correspondería al 98.7% de remoción, el aumento se sigue destacando en el volumen de  $4000 \text{ m}^3$ , en la variable de demanda química de oxígeno (DQO) se presenta la disminución entre el volumen de  $0 \text{ m}^3$  -  $3500 \text{ m}^3$  con valores entre  $1710 \text{ mg/L}$  -  $315 \text{ mg/L}$  con un porcentaje de remoción del 82%, al igual que las variables anteriores el aumento se presenta en el volumen  $4000 \text{ m}^3$ . Para los aniones una remoción del 40% entre los volúmenes de  $0 \text{ m}^3$  -  $1500 \text{ m}^3$  con valores de  $6.4 \text{ eq/m}^3$  -  $3.85 \text{ eq/m}^3$ , en la segunda parte de la gráfica se puede apreciar el mismo aumento con una cantidad de  $6.41 \text{ eq/m}^3$ ; teniendo en cuenta los datos anteriores se decide tener un volumen de  $1000$



m<sup>3</sup> para el reactor, por lo que este remueve lo suficiente para las características del agua residual.

**Gráfica 18.** Análisis de sensibilidad alternativa 2: Volumen máximo



Fuente: Elaboración propia

### 9.3.3. Análisis de sensibilidad para la alternativa No.3.

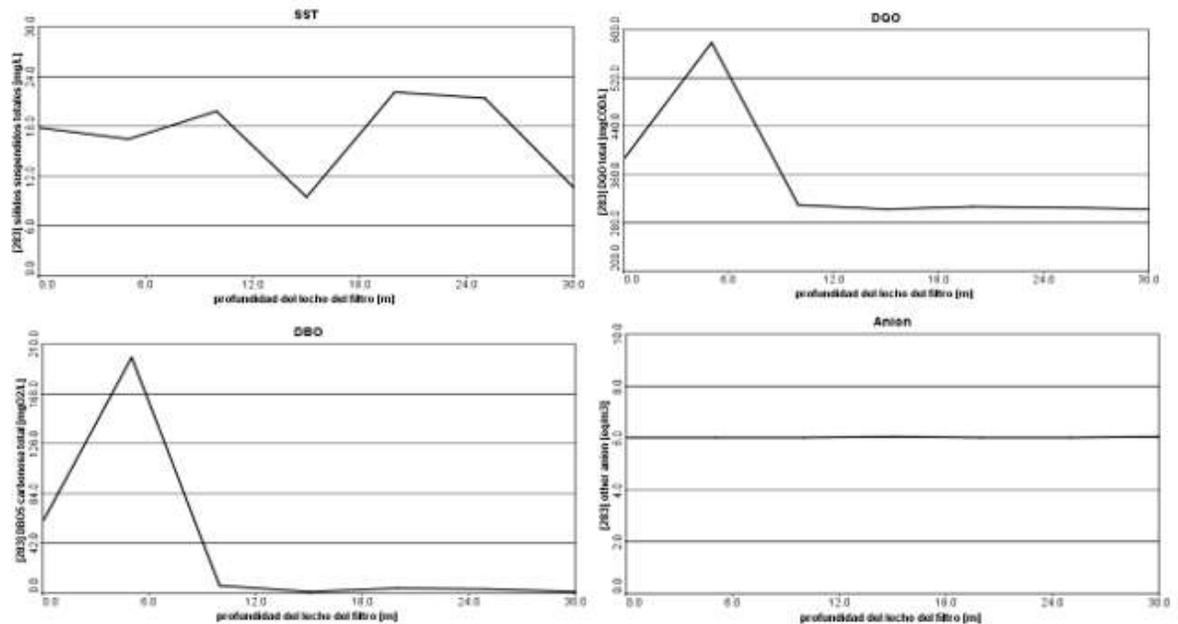
En el uso del filtro desnitrificado fue el proceso uno de los procesos que más removió en cuanto a los parámetros de estudio, por ello se realiza el análisis de la profundidad del lecho del filtro detallándose en la

Gráfica 19. Para el caso de la simulación del filtro, este trabaja con profundidad del lecho de 6 mts optando por analizar esta variable frente a los parámetros, se dejó una profundidad máxima hasta 30 mts. Donde se aprecia que tres de los parámetros de salida presentan una sensibilidad crítica indicando que existe una dependencia en el comportamiento, afectando el resultado del modelo, el DBO<sub>5</sub> se encontrara entre 0.99 mg/L a 198 mg/L, el DQO en 9.47 mg/L a 22.1 mg/L y los SST en 7.2 mg/L a 23.8 mg/L indicando un comportamiento satisfactorio para cualquier profundidad del lecho que se desea tomar en un rango menor a 30 mts puesto se tendrán resultados que cumplan con la norma.



Para el caso de Total de Aniones, se evidencia que la pendiente se mantiene constante conforme aumenta la concentración de la variable, lo cual nos indica que no afecta a los resultados del modelo, presentando una sensibilidad nula que arroja un valor de  $6.05 \text{ eq/m}^3$ .

**Gráfica 19.** Análisis de sensibilidad alternativa 3: Profundidad del lecho del filtro



**Fuente:** Elaboración propia

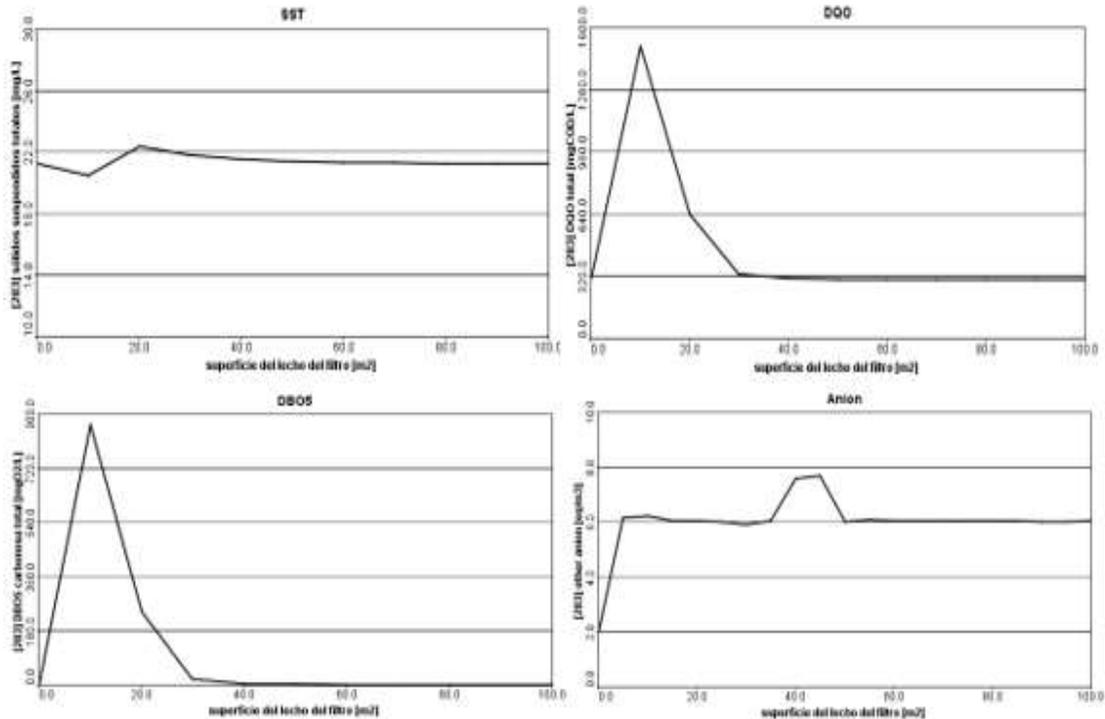
Con respecto al análisis de la superficie del lecho del filtro detallándose en la Gráfica 20. Donde se aprecia que en todos los parámetros de salida se presenta una sensibilidad crítica indicando que existe una dependencia en el comportamiento, afectando el resultado del modelo. Para el caso de la simulación del filtro trabaja con un área de  $20 \text{ m}^2$  optando por analizar esta variable frente a los parámetros, se dejó un área máxima hasta  $100 \text{ m}^2$  apreciando que, el total de Aniones se encontrara entre  $2 \text{ eq/m}^3$  a  $7.57 \text{ eq/m}^3$  tiene un comportamiento satisfactorio para cualquier superficie del lecho que se desea tomar en un rango menor a  $100 \text{ m}^2$  puesto se tendrán resultados que cumplan con la norma.

Para el caso del DQO y DBO<sub>5</sub> estos dos tienen un comportamiento similar presentando un punto crítico, donde la superficie en  $10 \text{ m}^2$  para el DQO hará que arroje un valor de  $1500 \text{ mg/L}$  estando por encima de lo permitido por la norma, lo mismo sucede para el DBO<sub>5</sub> en el mismo valor de superficie de  $10 \text{ m}^2$  con un valor de  $863 \text{ mg/L}$ . Se evidencia que se tiene una combinación de sensibilidad crítica y



nula ya que, después del punto crítico se mantiene constante el valor de DQO con 305 mg/L y el DBO<sub>5</sub> con 2.7 mg/L, lo mismo ocurre para los SST a excepción de que los valores arrojados se encuentran permitidos en la norma en un rango de 20.5 mg/L a 22.4 mg/L.

**Gráfica 20.** Análisis de sensibilidad alternativa 3: Superficie del lecho del filtro



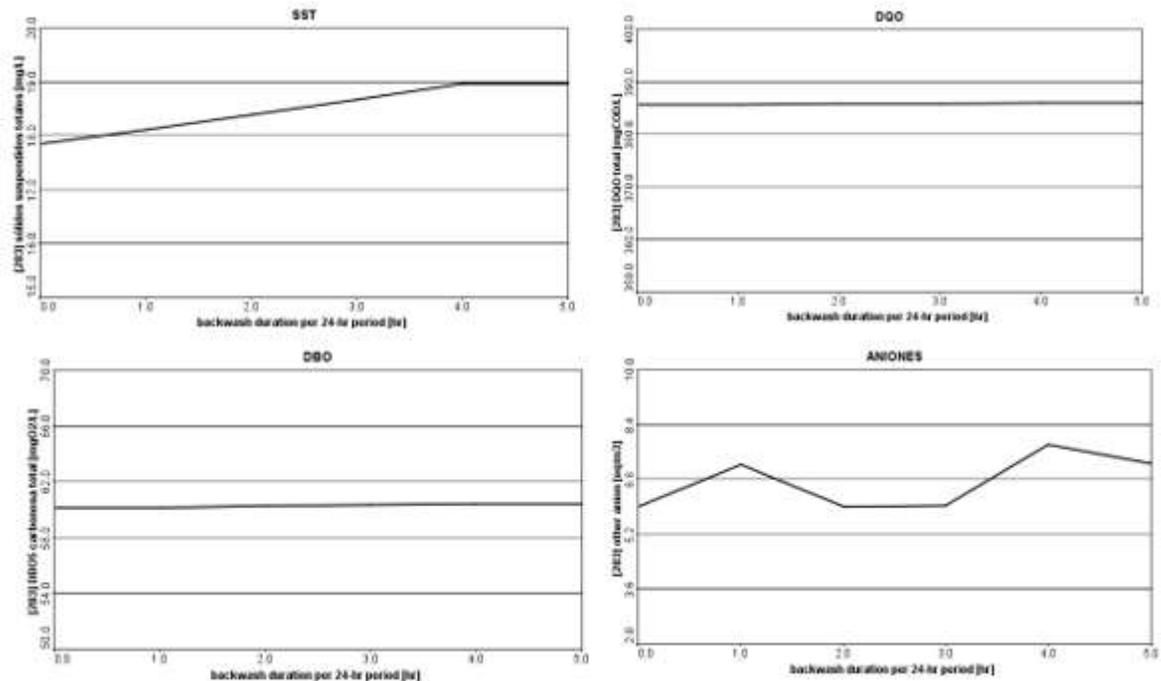
**Fuente:** Elaboración propia

En cuanto a la duración del retro lavado por 24 horas que se encuentra en el filtro desnitrificado se logra obtener la Grafica 21. Para el filtro se trabaja con una duración de 1 hr y se dejó una duración máxima de 5 horas apreciando que, existe una sensibilidad critica que indica que existe una dependencia en el comportamiento, afectando el resultado del modelo para el total de aniones se ven puntos que sobresalen, cabe destacar que no nos arrojan resultados que estén fuera de lo permitido en la norma, se mantienen valores entre 6.01 eq/m<sup>3</sup> a 7.82 eq/m<sup>3</sup>. Los tres parámetros de estudio restantes, tienen un comportamiento muy similar convirtiéndose en una sensibilidad casi nula dando como resultados para el DQO un valor de 386 mg/L, en el DBO<sub>5</sub> valores entre 60.2 mg/L a 60.4 mg/L y para los SST valores entre 18 mg/L a 19 mg/L. Concluyendo, que no tiene gran impacto en cuanto a cumplimiento de la norma, puesto que todos los valores arrojados dentro



de los rangos de duración analizados son satisfactorios, y muestra que cualquier valor de duración del retro lavado del filtro que desee trabajar cualquier empresa de Lácteos cumplirá con la resolución de vertimientos.

**Gráfica 21.** Análisis de sensibilidad alternativa 3: Duración de retro lavado por 24 hr



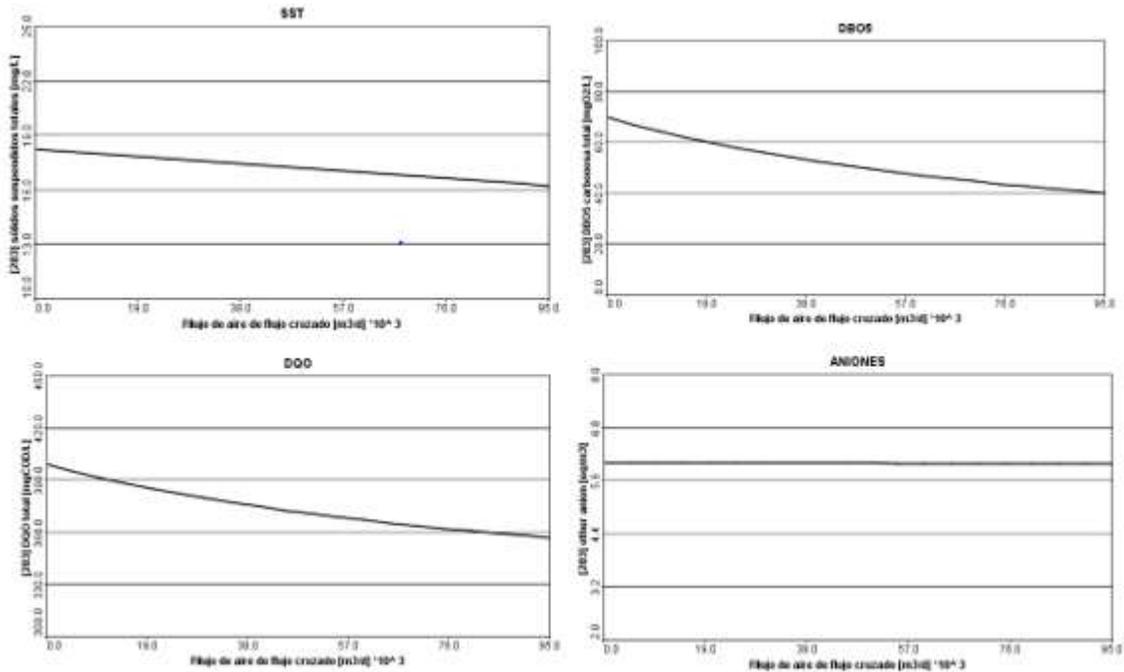
**Fuente:** Elaboración propia

De acuerdo a la variable operacional Flujo de Aire del Flujo Cruzado que se encuentra en el reactor biológico de membrana, se detalla en la Gráfica 22, apreciando una sensibilidad crítica frente a las variables de estudio. Para el flujo de aire trabajado durante la simulación se optó por 19000 m<sup>3</sup>/día, dejando un flujo de aire máximo hasta 95000 m<sup>3</sup>/día. Observando que para SST presenta una pendiente de disminución de del valor de sólidos suspendidos entre valores de 16.2 mg/L a 18.2 mg/L. En el DQO se presenta una pendiente que disminuye el valor de DQO a medida que aumenta el flujo entre valores de 40 mg/L a 69.9 mg/L, ocurre lo mismo para el DBO<sub>5</sub> con valores entre 357 mg/L a 399 mg/L. Aunque la disminución que se presenta muestra un comportamiento satisfactorio para cualquier flujo de aire del flujo cruzado que se desea tomar en rango menor a 95000 m<sup>3</sup>/día, puesto se tendrán resultados que cumplan con la norma.



La variable que menos afectaciones presenta son el total de Aniones por lo que se aprecia que se comporta frente a una sensibilidad casi nula dando como resultados para los aniones valores entre 5.98 eq/m<sup>3</sup> a 6.01 eq/m<sup>3</sup> valores igualmente, satisfactorios porque están por debajo de lo permitido por la norma.

**Gráfica 22.** Análisis de sensibilidad del flujo de aire del flujo cruzado



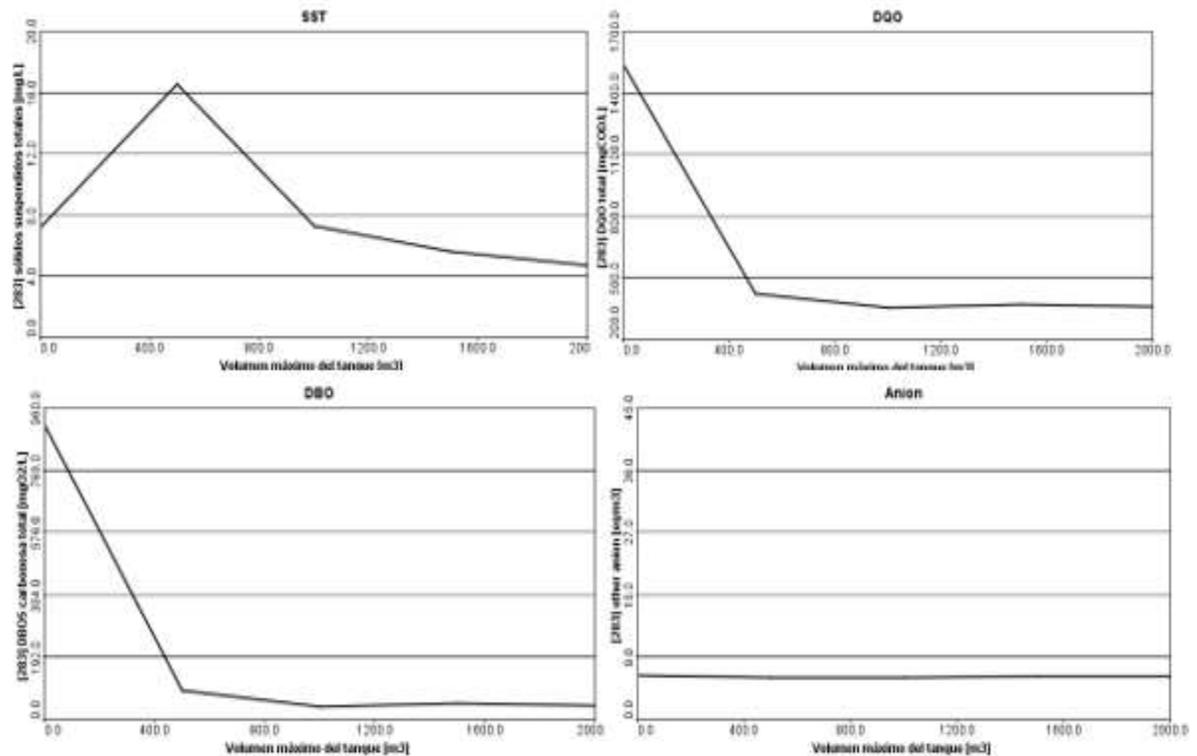
**Fuente:** Elaboración propia

En la Gráfica 23, se analiza la última variable de la alternativa 3: El volumen máximo del tanque del reactor biológico de membrana. Donde se aprecia que en tres de los parámetros de salida se presenta una sensibilidad crítica indicando que existe una dependencia en el comportamiento, afectando el resultado del modelo. Para el caso de la simulación del reactor, este trabaja con un volumen de 400 m<sup>3</sup> optando por analizar esta variable frente a los parámetros, se dejó un volumen hasta 2000 m<sup>3</sup> apreciando que, para el DQO un volumen menor a 500 m<sup>3</sup> dará como resultado valores por encima de lo permitido en la norma, al tomar un rango entre 500 m<sup>3</sup> a 2000 m<sup>3</sup> trabajara con valores de DQO que cumplen con la norma. Para el DBO<sub>5</sub> ocurre el mismo comportamiento del DQO, donde un volumen menor a 500 m<sup>3</sup> dará como resultado valores por encima de lo permitido en la norma, al tomar un rango entre 500 m<sup>3</sup> a 2000 m<sup>3</sup> dará valores entre 41.5 mg/L a 87.2 mg/L.



Para el caso del SST, aunque se evidencia un punto que sobresale este no afecta en cuanto a valor permitido por la norma, ya que se encuentran valores entre 4.71 mg/L a 16.6 mg/L. En el total de aniones se presenta una sensibilidad nula arrojando un valor de 6.02 eq/m<sup>3</sup> un valor satisfactorio por debajo de lo permitido por la norma.

**Gráfica 23.** Análisis de sensibilidad alternativa 3: Volumen máximo



Fuente: Elaboración propia

#### 9.4. SELECCIÓN DE LA ALTERNATIVA DE MEJORA PARA LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES.

##### 9.4.1. Matriz de selección.

La matriz de selección es una metodología estructurada que permite priorizar, evaluar y obtener información para valorar las ideas, lo cual permite tener la mejor opción posible, basándose en hechos y minimizando consecuencias negativas.

#### 9.4.1.1. Criterios de selección.

- **Eficiencia:** Es el criterio con mayor importancia, a la hora de seleccionar una buena alternativa de mejora, debido a que lo que busca el proyecto es brindar una estrategia, por medio de la cual se cumplan los parámetros de la normatividad de vertimientos
- **Costo:** el análisis de las alternativas se deberá realizar teniendo en cuenta el costo, el cual debe ser bajo tanto para la implementación, mantenimiento y operación.
- **Factibilidad:** Se evalúa teniendo en cuenta la disponibilidad de los recursos de la empresa para llevar a cabo la alternativa de mejora.
- **Operatividad:** La alternativa elegida debe brindar un sistema de operación relativamente sencillo que no necesite de una alta capacitación, ni de más personal para llevar a cabo el tratamiento del agua residual.
- **Tiempo:** El tiempo se mide tanto en las operaciones unitarias ligadas al proceso como el tiempo de implementación y puesta en marcha de la propuesta de mejora.

De acuerdo a los criterios anteriores, se procede a dar un peso a cada uno donde se deberá tomar el mayor número para el criterio que presente más importancia a la hora de evaluarlos. En la Tabla 35, muestra los porcentajes distribuidos de los criterios de selección para realizar la matriz.

**Tabla 35.** Criterios de selección y asignación de porcentajes

<b>CRITERIO</b>	<b>%</b>
Eficiencia	30
Costo	25
Factibilidad	20
Operatividad	15
Tiempo	10

**Fuente:** Elaboración propia

La valoración de las alternativas propuestas se realiza de acuerdo al grado con que se aproximen al resultado deseado. La Tabla 36, muestra la calificación entre 1 y 5, para evaluar las alternativas de mejora, siendo 5 la calificación más alta y 1 la más baja.

Según Kepner & Tregoe<sup>3</sup>, el desarrollo de la matriz se realiza en dos etapas, en la primera etapa se analiza cada una de las alternativas de acuerdo a los criterios mínimos que se definieron utilizando SI, si la alternativa cumple o NO, en caso contrario. La segunda etapa se asigna una calificación a las alternativas de 1 a 5, y se multiplica por el peso respectivo del criterio analizado.

**Tabla 36.** Calificación para evaluar las alternativas

<b>NIVEL</b>	<b>RANGO</b>
Muy adecuado	5
Adecuado	3 - 4
Poco adecuado	1 - 2

**Fuente:** Elaboración propia

En la Tabla 37 se detalla la nomenclatura optada para en el este proyecto, la cual se implementará en el método de Kepner & Tregoe.

**Tabla 37.** Listado de alternativas y nomenclatura

<b>ALTERNATIVA</b>	<b>NOMENCLATURA</b>
Alternativa 1	P <sub>1</sub>
Alternativa 2	P <sub>2</sub>
Alternativa 3	P <sub>3</sub>

**Fuente:** Elaboración propia

La sumatoria calificativa de la evaluación de las alternativas se obtiene por la jerarquización de los resultados, utilizando la siguiente ecuación:

$$\Sigma = C * Ca$$

Dónde:

$\Sigma$ : resultado Total de la evaluación.

C: Peso, es decir, % de cada criterio de selección.

Ca: calificación asignada para cada alternativa

<sup>3</sup> SÁNCHEZ GUERRERO, Gabriel de las Nieves. Técnicas participativas para la planeación. Procesos breves de intervención. Fundación ICA. 2003. p. 197.

La Tabla 38 presenta el análisis del cumplimiento de los criterios mínimos de SI o No.

**Tabla 38.** Matriz de cumplimiento de los criterios mínimos (SI/NO)

CRITERIO	ALTERNATIVAS CONSIDERADAS		
	P <sub>1</sub>	P <sub>2</sub>	P <sub>3</sub>
Eficiencia	NO	SI	SI
Costo	SI	SI	SI
Factibilidad	SI	SI	SI
Operatividad	SI	SI	SI
Tiempo	NO	SI	SI

**Fuente:** Elaboración propia

Como se observa en la Tabla 39, ilustra la matriz de selección de alternativas como adaptación de Kepner & Tregoe. Donde la alternativa 3 es la más adecuada para tratar el agua residual. A pesar de que la alternativa 2 tuvo un valor muy cercano a la alternativa seleccionada, esta no se escogió porque su factibilidad y operatividad son menores a la alternativa 3.

**Tabla 39.** Matriz de selección de la alternativa, adaptación de Kepner & Tregoe

CRITERIO	ALTERNATIVAS CONSIDERADAS			
	C (%)	P <sub>1</sub>	P <sub>2</sub>	P <sub>3</sub>
Eficiencia	30	1	4	4
Costo	25	2	4	3
Factibilidad	20	2	2	4
Operatividad	15	1	3	4
Tiempo	10	1	4	4
Promedio $\Sigma$		1,45	3,45	<b>3,75</b>

**Fuente:** Elaboración propia

#### 9.4.2. Alternativa seleccionada.

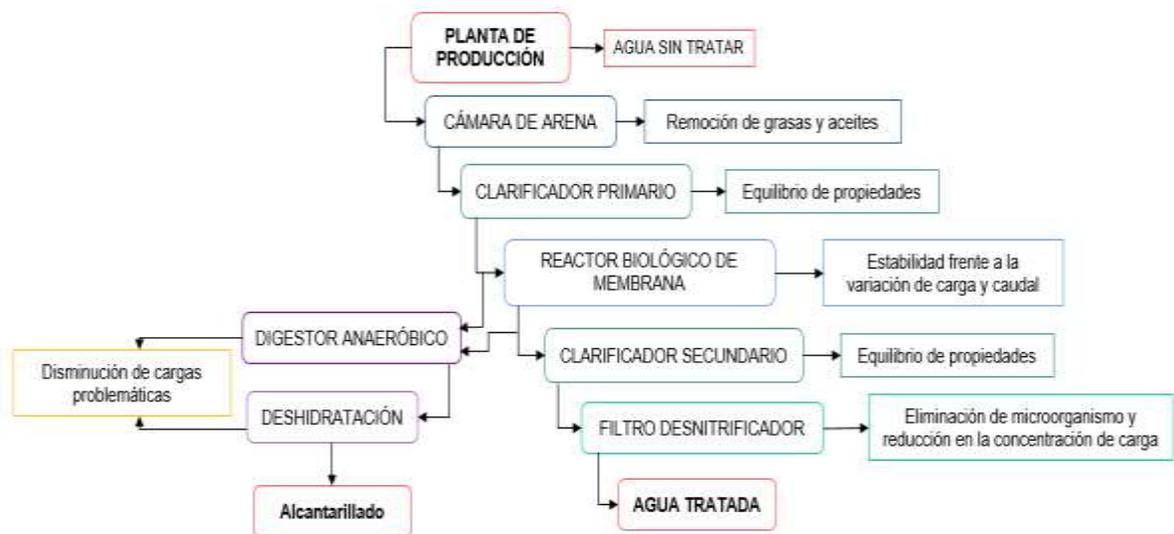
Una vez analizadas las alternativas de tratamiento que fueron planteadas anteriormente en base a los datos obtenidos en las pruebas piloto de simulación del software GPS-X, mediante el análisis de sensibilidad y acorde a los requerimientos de calidad de agua que se necesita para que las descargas (agua tratada) puedan cumplir la normatividad vigente, se plantea la siguiente propuesta final optada por la

alternativa 3 para la planta de tratamiento de la industria láctea que consta de los siguientes procesos/operaciones:

- Cámara de arena
- Clarificador primario
- Reactor biológico de membrana
- Clarificador secundario
- Filtro desnitrificador
- Digestor anaeróbico y deshidratación (Tratamiento de lodos)

Teniendo en cuenta la alternativa de mejora elegida, se plantea el diseño metodológico de implementación, desarrollando cada operación de tratamiento. La Figura 21, describe la metodología de implementación de la alternativa 3, teniendo en cuenta las operaciones que ayudaran a la mejora del sistema de tratamiento de aguas residuales para cualquier empresa de lácteos.

**Figura 21.** Paso del agua por el sistema final en la PTAR



**Fuente:** Elaboración propia

Es importante recordar que el diseño para esta alternativa puede ser modificada, de acuerdo a la necesidad de la empresa de lácteos que desee tomarla para ser implementada en el tratamiento del agua de la industria láctea y considerando aspectos económicos, espacio físico disponible que posee o tal vez un incremento de la producción. El caudal que entrega la planta de producción del presente proyecto para pre-diseño de la planta de tratamiento es de 5000 m<sup>3</sup>/día,

 <p><b>UNIVERSIDAD CATÓLICA</b> de Colombia</p> <p>FACULTAD DE INGENIERÍA PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL</p>	<p><u>PROPUESTA PLANTA DE TRATAMIENTO</u> <u>AGUAS RESIDUALES (PTAR) PARA EMPRESA</u> <u>DE LÁCTEOS</u></p>	<p>PRESENTADO POR: JULIANA CHACÓN <u>CÓDIGO: 506807</u> ISABELA RAMÍREZ <u>CÓDIGO: 506911</u></p>
--	---	---

presentándose a continuación, los parámetros físicos y operacionales de cada proceso.

Los variables físicas y operacionales de la cámara de arena o trampa de grasas para la planta se establecieron con ayuda del software GPS –X, he implementándolas a un contexto más real, cuyos datos empleados para el modelo se observan en la Tabla 40.

**Tabla 40.** Datos físicos y operacionales de la cámara de arena

	VARIABLE	DATO	UNIDAD
<b>Físicas</b>	Temperatura	20	° C
	Producción de arena por flujo	20	mg/L
<b>Operacionales</b>			

**Fuente:** Elaboración propia

Los variables físicas y operacionales del clarificador primario para la planta se establecieron con ayuda del software GPS –X, he implementándolas a un contexto más real, cuyos datos empleados para el modelo se observan en la Tabla 41.

**Tabla 41.** Datos físicos y operacionales del clarificador o sedimentador primario

	VARIABLE	DATO	UNIDAD
<b>Fondo plano</b>			
<b>Físicas</b>	Punto de alimentación desde el fondo	1.0	m
	Superficie	100	m <sup>2</sup>
	Profundidad del agua	3.0	m
	Temperatura	20	° C
<b>Operacionales</b>	Tasa de circulación	10	m <sup>3</sup> /día
	Flujo de bombeo	0	m <sup>3</sup> /día
	Concentración limite del manto de lodos	2000	mgSST/L
	Nivel del manto de lodo critico	0.1	m

**Fuente:** Elaboración propia

Los variables físicas y operacionales del reactor biológico de membrana para la planta se establecieron con ayuda del software GPS –X, he implementándolas a un

 <p><b>UNIVERSIDAD CATÓLICA</b> de Colombia</p> <p>FACULTAD DE INGENIERÍA PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL</p>	<p><u>PROPUESTA PLANTA DE TRATAMIENTO</u> <u>AGUAS RESIDUALES (PTAR) PARA EMPRESA</u> <u>DE LÁCTEOS</u></p>	<p>PRESENTADO POR: JULIANA CHACÓN CÓDIGO: 506807 ISABELA RAMÍREZ CÓDIGO: 506911</p>
--	---	---

contexto más real, cuyos datos empleados para el modelo se observan en la Tabla 42.

**Tabla 42.** Datos físicos y operacionales del reactor

	VARIABLE	DATO	UNIDAD
<b>Físico - Membrana</b>	Tasa de captura de sólidos	0.99	-
	Tasa de captura de sustrato coloidal	0.1	-
	Tasa de captura inerte soluble	0.1	-
<b>Físico - Tanque</b>	Volumen	400	m <sup>3</sup>
	Superficie	125	m <sup>2</sup>
<b>Operacional- Membrana</b>	Flujo de aire de flujo cruzado	19000	m <sup>3</sup> /día
	Factor alfa para flujo de aire cruzado	0.65	-
	Eficiencia estándar de transferencia de oxígeno (Flujo cruzado)	0.1	-
<b>Operacional- Tanque</b>	Flujo de aire hacia el tanque de aireación	20000	m <sup>3</sup> /día
	Flujo bombeado	50	m <sup>3</sup> /día

**Fuente:** Elaboración propia

Los variables físicas y operacionales del clarificador secundario para la planta se establecieron con ayuda del software GPS –X, he implementándolas a un contexto más real, cuyos datos empleados para el modelo se observan en la Tabla 43.

**Tabla 43.** Datos físicos y operacionales del clarificador o sedimentador secundario

	VARIABLE	DATO	UNIDAD
<b>Físicas</b>	Punto de alimentación desde el fondo	1.0	m
	Superficie	100	m <sup>2</sup>
	Profundidad del agua	3.0	m
	Temperatura	20	° C
<b>Operacionales</b>	Tasa de circulación	2000	m <sup>3</sup> /día
	Flujo de bombeo	40	m <sup>3</sup> /día
	Concentración limite del manto de	2000	mgSST/L
	Nivel del manto de lodo critico	0.1	m

**Fuente:** Elaboración propia

 <p><b>UNIVERSIDAD CATÓLICA</b> de Colombia</p> <p>FACULTAD DE INGENIERÍA PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL</p>	<p><u>PROPUESTA PLANTA DE TRATAMIENTO</u> <u>AGUAS RESIDUALES (PTAR) PARA EMPRESA</u> <u>DE LÁCTEOS</u></p>	<p>PRESENTADO POR: JULIANA CHACÓN <u>CÓDIGO: 506807</u> ISABELA RAMÍREZ <u>CÓDIGO: 506911</u></p>
--	---	---

Los variables físicas y operacionales del filtro desnitrificador para la planta se establecieron con ayuda del software GPS –X, he implementándolas a un contexto más real, cuyos datos empleados para el modelo se observan en la Tabla 44.

**Tabla 44.** Datos físicos y operacionales del filtro desnitrificador

	<b>VARIABLE</b>	<b>DATO</b>	<b>UNIDAD</b>
<b>Físicos</b>	Superficie específica de los medios filtrantes	1000	1/m
	Porosidad de los medios	0.4	-
	Espesor máximo de la película líquida de cultivo fijo	0.00005	m
	Espesor máximo de la biopelícula	0.001	m
	Densidad de la biopelícula	1020000	mg/L
	Contenido de material seco de la biopelícula	0.1	-
	Número de capas horizontales	6	Cant.
	Periodo de integración soluble	0.05	día
	Longitud de integración soluble	0.05	día
	<b>Operacionales</b>	Fracción de captura de sólidos (Concentración básica)	0.9
Duración del retro lavado por un periodo de 24 horas		1	hr
<b>Operacionales</b>	Flujo del retro lavado	1000	m <sup>3</sup> /día
	Tasa de desprendimiento	0.04	kg/(m <sup>2</sup> *d)
	Tasa de intercambio interno de sólidos	0.00002	m/día
	Tasa de cultivo fijo	0.5	m/día

**Fuente:** Elaboración propia

En el caso de tratamiento de lodos propuesto, se propuso realizar dos procesos previos antes de ser desechados al alcantarillado. Donde os variables físicas y operacionales del digester anaeróbico para la planta se establecieron con ayuda del software GPS –X, he implementándolas a un contexto más real, cuyos datos empleados para el modelo se observan en la Tabla 45.

 <p><b>UNIVERSIDAD CATÓLICA</b> de Colombia</p> <p>FACULTAD DE INGENIERÍA PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL</p>	<p><u>PROPUESTA PLANTA DE TRATAMIENTO</u> <u>AGUAS RESIDUALES (PTAR) PARA EMPRESA</u> <u>DE LÁCTEOS</u></p>	<p>PRESENTADO POR: JULIANA CHACÓN <u>CÓDIGO: 506807</u> ISABELA RAMÍREZ <u>CÓDIGO: 506911</u></p>
--	---	---

**Tabla 45.** Datos físicos y operacionales del digester anaeróbico

	<b>VARIABLE</b>	<b>DATO</b>	<b>UNIDAD</b>
<b>Físicos</b>	Volumen máximo	400	m <sup>3</sup>
	Fracción de volumen efectivo	1.0	-
	Volumen del espacio de cabeza	20	m <sup>3</sup>
	Presión del gas total	1.0	atm
	Caída del suelo	1.0	m
	Relación altura- diámetro	1.5	-
<b>Operacionales</b>	Flujo de bombeo	0	m <sup>3</sup> /día

**Fuente:** Elaboración propia

Para el caso del deshidratador se detalla en la Tabla 46.

**Tabla 46.** Datos físicos y operacionales de deshidratación de lodos

	<b>VARIABLE</b>	<b>DATO</b>	<b>UNIDAD</b>
<b>Físicas</b>	Temperatura	20	° C
<b>Operacionales</b>	Flujo de bombeo	1.5	m <sup>3</sup> /día
	Eficiencia de remoción	95	%

**Fuente:** Elaboración propia



## 10. CONCLUSIONES

- Debido a que la construcción de la caracterización del agua residual utilizada para el proyecto se manejó por medio de recopilaciones de fuentes confiables y no de una empresa en específico de una planta de tratamientos de aguas residuales, se tuvo en cuenta manejar una caracterización crítica la cual puede ser utilizada para toda industria que fabrique productos lácteos y sus derivados como son de leche, mantequilla, queso entre otros.
- Para solucionar el incumplimiento de la normatividad vigente, se plantearon teóricamente 3 alternativas de mejora para el sistema de tratamiento de aguas residuales con la implementación de un sistema biológico. Las alternativas fueron simuladas cierta cantidad de veces en el programa GPS-X con el fin, de lograr resultados permitidos expuestos en la Tabla 10.
- En la propuesta 1 con el uso de un sistema aerobio como la laguna de oxidación y anaerobio como el reactor UASB, no cumplió en su totalidad con los parámetros de estudio, sin embargo, mediante el análisis de sensibilidad se detalló que los procesos utilizados para esta alternativa, pueden realizar resultados que cumplan con la norma con el aumento del flujo de bombeo del reactor, la profundidad y superficie del filtro desnitrificador, pero en el caso de los Sulfatos y Cloruros estos tampoco cumplieron.
- En la propuesta 2 se logra demostrar que esta cumple en su totalidad con el uso de un sistema aerobio de filtro aireado biológico simple y un sistema anaerobio de reactor híbrido de película fija, concluyendo que las dimensiones manejadas para los procesos de esta propuesta arrojaran resultados satisfactorios.
- En la propuesta 3 se decidió solo utilizar un sistema aerobio que es el reactor biológico de membrana (MBR) puesto que este tipo de reactor posee un proceso de separación de sólido- líquido por medio de la membrana, lo cual ayuda a que los resultados obtenidos en esta propuesta sean óptimos y cumplan con la normatividad.
- Uno de los procesos que presenta mayor remoción en todas las propuestas planteadas fue el tratamiento terciario en cuanto a  $DBO_5$ , DQO, con el uso del filtro desnitrificador y el filtro de membrana, reduciendo en su totalidad la carga

 <p><b>UNIVERSIDAD CATÓLICA</b> de Colombia</p> <p>FACULTAD DE INGENIERÍA PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL</p>	<p><u>PROPUESTA PLANTA DE TRATAMIENTO</u> <u>AGUAS RESIDUALES (PTAR) PARA EMPRESA</u> <u>DE LÁCTEOS</u></p>	<p>PRESENTADO POR: JULIANA CHACÓN <u>CÓDIGO: 506807</u> ISABELA RAMÍREZ <u>CÓDIGO: 506911</u></p>
--	---	---

contaminante del agua residual que transcurría por la planta para así, llegar a la descarga.

- Pará industrias que superan el pH de 9 o tienen un pH inferior a 6, en la propuesta seleccionada si esto ocurre, se deberá implementar un tanque de homogenización, el cual podrá reemplazar el clarificador primario que se encuentra presente en el modelo expuesto, para que ayude a mantener el pH permitido por la norma.
- La empresa que implemente la planta de tratamiento de aguas residuales propuesta en el proyecto, la misma que no solo ayudara a mantener los parámetros por debajo de los límites permisibles para cumplir la normatividad vigente, sino también se estará aportando con el cuidado del recurso hídrico evitando que estos sigan contaminando.
- La propuesta presentada brinda a las industrias lácteas, la implementación de reúso de agua mediante actividades a utilizar en descargas de aparatos sanitarios, limpieza mecánica de equipos para la producción de los productos lácteos, sistemas de redes contraincendios y sistema de riego para pasto; realizándose con los indicadores de la Resolución 1207 de 2014.

 <p><b>UNIVERSIDAD CATÓLICA</b> de Colombia</p> <p>FACULTAD DE INGENIERÍA PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL</p>	<p><u>PROPUESTA PLANTA DE TRATAMIENTO</u> <u>AGUAS RESIDUALES (PTAR) PARA EMPRESA</u> <u>DE LÁCTEOS</u></p>	<p>PRESENTADO POR: JULIANA CHACÓN <u>CÓDIGO: 506807</u> ISABELA RAMÍREZ <u>CÓDIGO: 506911</u></p>
--	---	---

## 11. RECOMENDACIONES.

- Este proyecto se puede complementar con el manejo y disposición de lodos, y control de olores, puesto que, son problemáticas cotidianas en las plantas de tratamiento de agua residual industrial por sus diferentes características de producción productos lácteos.
- El método de toma de decisiones puede ser complementado con una comparativa de precios para implementar cada alternativa, donde se debe incluir el costo de actividades como el mantenimiento, operación, construcción, montaje, y puesta en marcha de cada tecnología.
- Implementar análisis de costos operacionales para la alternativa seleccionada, de dicha empresa que desee implementarla, debido a que lo realizado es de manera de investigación.



## 12. BIBLIOGRAFÍA

- [1] A. Alvaro, «Diseño de una celda de electrocoagulación para el tratamiento de aguas residuales de la industria láctea,» 2011. [En línea]. Available: <http://publicaciones.eafit.edu.co/index.php/revista-universidad-eafit/article/view/764>.
- [2] A. B. & S. Sanchez, Tratamiento de aguas residuales de la industria láctea en sistemas anaerobios tipo UASB, Bogotá: Sector Agropecuario y Agroindustrial , 2009.
- [3] A. R. & Gonzales, Apoyo didáctico en la enseñanza de aprendizaje de la asignatura de plantas de tratamiento de aguas residual, Bolivia: Universidad Mayor de San Simón de Bolivia, 2008.
- [4] A. M. Abdel-kader, «Studying the efficiency of grey water treatment by using rotating biological contactors system.,» Journal of King Saud University - Engineering Sciences, p. 89–95, 2012.
- [5] Á. M. Gonzales, «Modelado y simulación de una planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) empleando el software GPS-X.,» Universidad Autónoma de San Luis de Potosí, 2017. [En línea]. Available: <http://ciep.ing.uaslp.mx/tesis/tesisPDF/233201813958.pdf>
- [6] A. S. S. A. C. R. Riyaj k-mulla, «Effluent Treatment Plant of Dairy Wastewater – A Performance Evaluation,» International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET), vol. 02, 2015.
- [7] A. Pinto, «Sector lechero en Colombia: Potencial desperdiciado,» 2017. [En línea]. Available: <https://agronegocios.uniandes.edu.co/2017/09/22/sector-lechero-en-colombia-potencial-desperdiciado/>.
- [8] CEPIS, «Manual de disposición de aguas residuales,» p. Página 156, 1991.
- [9] C. A. Andrés, «PROCESO DE FLOCULACIÓN,» 2011. [En línea]. Available: <http://manu2-2011.blogspot.com/2011/05/proceso-de-floculacion.html>.
- [10] C. D. L. República, Por la cual se establece el procedimiento sancionatorio ambiental y se dictan otras disposiciones, Bogotá D.C., 2009.
- [11] Congreso de Colombia, «Ley 2003,» 2003. [En línea]. Available: [http://www.minambiente.gov.co/images/normativa/leyes/1997/ley\\_0373\\_1997.pdf](http://www.minambiente.gov.co/images/normativa/leyes/1997/ley_0373_1997.pdf).

 <p><b>UNIVERSIDAD CATÓLICA</b> de Colombia</p> <p>FACULTAD DE INGENIERÍA PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL</p>	<p><u>PROPUESTA PLANTA DE TRATAMIENTO</u> <u>AGUAS RESIDUALES (PTAR) PARA EMPRESA</u> <u>DE LÁCTEOS</u></p>	<p>PRESENTADO POR: JULIANA CHACÓN <u>CÓDIGO: 506807</u> ISABELA RAMÍREZ <u>CÓDIGO: 506911</u></p>
--	---	---

[12] C. & C. N. d. P. M. Limpia, «manual de producción y consumo sostenible gestión de recursos hídricos» Sector lacteo, 2016.

[13] Departamento de asuntos Económicos y Sociales de Naciones Unidas , «EL AGUA, FUENTE DE VIDA,» 2015. [En línea]. Available: [https://www.un.org/spanish/waterforlifedecade/human\\_right\\_to\\_water.shtml](https://www.un.org/spanish/waterforlifedecade/human_right_to_water.shtml).

[14] D. M. L. Campaña, «PDF,» 2013. [En línea]. Available: <http://dspace.espace.edu.ec/bitstream/123456789/2636/1/236T0068.pdf>.

[15] D. J. P. Farfán, «Facultad de ciencia y tecnología,» 2013. [En línea]. Available: [dspace.uazuay.edu.ec/bitstream/datos/3265/1/10039.pdf](http://dspace.uazuay.edu.ec/bitstream/datos/3265/1/10039.pdf).

[16] D. A. & H. O. Z. S. Bravo, «Desarrollo de una propuesta de mejora en el sistema de tratamiento de aguas residuales de lácteos Levelma Municipio de Cajicá.,» Fundación Universidad de América. Facultad de Ingeniería. , Bogotá D.C., 2016

[17] D. J. Farfán, «Valoración de impactos ambientales generados en la industria láctea y cárnica en la ciudad de Cuenca,» Ecuador, Universidad del Azuay, Facultad de ciencia y tecnología, 2013.

[18] D. F. G. G. L. A. A. C. D. B. J. A. Tirado, «Biotratamientos de aguas residuales en la industria láctea,» 2016.

[19] D. M. Llanos, «Diseño de la planta de tratamiento de aguas residuales de la industria de productos lácteos “Pillaro” ubicada en el cantón Pillaro-Tungurahua,» Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Facultad de ciencias, 2013.

[20] E. Á. C. F. Santamaría, «Caracterización de los parámetros de la calidad del agua para disminuir la contaminación durante el procesamiento de los lácteos,» Escuela de ingeniería agro industrial, 2015.

[21] El tiempo, «VIDA – MEDIO AMBIENTE,» [En línea]. Available: <https://www.eltiempo.com/vida/medio-ambiente/tratamiento-de-aguas-residuales-en-colombia-69962>.

[22] F. AQUAE, «Principales datos de agua en el mundo,» 2019. [En línea]. Available: <https://www.fundacionaquae.org/wiki-aquae/principales-datos-del-agua-en-el-mundo/>.

[23] G. R. L. W. S. A. J. W. J. O. C. M. M. Langergraber, «A guideline for simulation



studies of wastewater treatment plants,» *Water Science and Technology: A Journal of the International Association on Water Pollution Research*, vol. 50(7), p. 131–138, 2004.

[24] G. C. M. López, «Tratamiento biológico de aguas residuales: principios, modelación y diseño,» *Iwa Publishing*, 2017

[25] HYDROMANTIS, «GPS-X Guía Tutorial. Guía paso a paso para aprender y familiarizarse con GPS-X,» Hydromantis Ambiental Software Solutions, Inc, 2017.

[26] H. Ölmez, «Water Consumption, Reuse and Reduction Strategies in Food Processing. Sustainable Food Processing,» vol. DOI 10.1002/9781118634301.ch17., pp. 401-434, 2013

[27] INSACAN, «Contaminación en la industria láctea,» 1996. [En línea]. Available: <http://www.insacan.org/racvao/anales/1995/articulos/08-1995-02.pdf>.

[28] J. A. G. Chávez, «Revista de Investigación Talentos,» [En línea]. Available: <https://talentos.ueb.edu.ec/index.php/talentos/article/view/92/121>

[29] J. P. & F. A. M. R. Chaves, «Eficiencia de remoción de materia orgánica mediante carbón activado, en agua residual de la industria lechera,» Bogotá D.C., 2019.

[30] J. Hernández, «Propuesta para la implementación de planta tratadora de residuos líquidos en una empresa de lácteos,» Universidad Iberoamericana Puebla, 2016. [En línea]. Available: <https://repositorio.iberopuebla.mx/bitstream/handle/20.500.11777/1488/Hernandez%20Rivera,%20Javier.pdf?sequence=4>.

[31] J. D. S. P. V. F. A. H. R. y. D. E. Hoinkis, «Membrane Bioreactor (MBR) Technology – a Promising Approach for Industrial Water Reuse. Procedia Engineering,» vol. 33, pp. 234-241, 2012. [En línea]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705812012301>.

[32] J. A. Romero R, «Tratamiento de Aguas Residuales-Teoría y Principios de Diseño,» *Escuela Colombiana de Ingeniería*, 1996.

[33] J. R. K. & S. V. Makinia, «Long-term simulation of the activated sludge process at the Hanover-Gümmerwald pilot WWTP,» vol. 39, p. 1489– 1502, 2005.



- [34] K. H. J. Cameron, «A new method to treat farm dairy effluent to produce clarified water for recycling and to reduce environmental risks from the land application of effluent,» *Iwa Publishing. Springer-Verlag GmbH Germany, part of Springer Nature*, 2018.
- [35] L. D. F. T. Armesto, «Artículo de revisión,» 2016. [En línea]. Available: <http://repository.lasallista.edu.co:8080/ojs/index.php/pl/article/view/1125/828>.
- [36] L. G. D. A. J. M. Tirado, «Articulos de revisión,» 2016. [En línea]. Available: [repository.lasallista.edu.co:8080/ojs/index.php/pl/article/view/1125/828](http://repository.lasallista.edu.co:8080/ojs/index.php/pl/article/view/1125/828)
- [37] L. F. G. G. A. Ruíz, «Articulo original,» 2007. [En línea]. Available: [file:///C:/Users/juli\\_/Downloads/PL\\_V2N2\\_23-30\\_electrocoagulación.pdf](file:///C:/Users/juli_/Downloads/PL_V2N2_23-30_electrocoagulación.pdf).
- [38] L. C. M. T. A. Lafargue, «Impactos y riesgos ambientales en el combinado lácteo de Bayamo, cuba Parte I,» 2016.
- [39] M. D. J. G. Cáceres, «Mundo pecuario,» 2012. [En línea]. Available: [http://www.produccion-animal.com.ar/produccion\\_bovina\\_de\\_leche/leche\\_subproductos/37-industria.pdf](http://www.produccion-animal.com.ar/produccion_bovina_de_leche/leche_subproductos/37-industria.pdf).
- [40] M. H. y. L. P. Lesly Da Cámara, «PDF,» [En línea]. Available: [file:///C:/Users/juli\\_/Downloads/MANUAL\\_DE\\_DISENO\\_PARA\\_PLANTAS\\_DE\\_TRATAMI.pdf](file:///C:/Users/juli_/Downloads/MANUAL_DE_DISENO_PARA_PLANTAS_DE_TRATAMI.pdf).
- [41] M. P. Seyed mahdi, «Simulation of the wastewater treatment Plant of the dairy Industry in the environmental of GPS-X with a case study,» Iranian national congress of Chemical, 2019.
- [42] M. D. Cáceres, «Mundo pecuario,» 2012. [En línea]. Available: [http://www.produccionanimal.com.ar/produccion\\_bovina\\_de\\_leche/leche\\_subproductos/37-industria.pdf](http://www.produccionanimal.com.ar/produccion_bovina_de_leche/leche_subproductos/37-industria.pdf).
- [43] M. A. & F. C. Espinosa-rodríguez, «Optimización de la producción de lodos en un sistema de lodos activados a través de la calibración del modelo ASM1,» 2015, pp. 16(1), 93–104.
- [44] M. T. MDG, «Drinking wáter and sanitation target: the urban and rural challenge of the decade,» vol. ISBN92 4 156325 7.

 <p><b>UNIVERSIDAD CATÓLICA</b> de Colombia</p> <p>FACULTAD DE INGENIERÍA PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL</p>	<p><u>PROPUESTA PLANTA DE TRATAMIENTO</u> <u>AGUAS RESIDUALES (PTAR) PARA EMPRESA</u> <u>DE LÁCTEOS</u></p>	<p>PRESENTADO POR: JULIANA CHACÓN <u>CÓDIGO: 506807</u> ISABELA RAMÍREZ <u>CÓDIGO: 506911</u></p>
--	---	---

[45] Naciones unidas, «Informe sobre el desarrollo de los recursos hídricos del mundo, Agua para todos, agua para la vida,» 2003.

[46] P. E. Colombia, «Sector Lácteo en Colombia,» 2011.

[47] R. & G. G. Ayala, «Apoyo didáctico en la enseñanza de aprendizaje de la asignatura de plantas de tratamiento de aguas residual.,» Universidad Mayor de San Simón de Bolivia. Facultad de ciencias y tecnología, 2008.

[48] S. & S. N. Bharati, «Anaerobic Digestion of Dairy Industry Wastewater - Biogas Evolution-A Review.,» International Journal of Applied Environmental Sciences, pp. ISSN 0973-6077 Volume 12, Number 6, pp. 1117-1130, 2017.

[49] UNESCO, «UNESCO,» 2019. [En línea]. Available: <https://es.unesco.org/news/son-aguas-residuales-nuevo-oro-negro>.

[50] ONU, «Obras por expansión,» 22 Marzo 2017. [En línea]. Available: <https://obras.expansion.mx/soluciones/2017/03/22/el-mundo-solo-trata-20-de-sus-aguas-residuales-alerta-la-onu>.

[51] U. Departamento de asuntos económicos y sociales de naciones unidas, «Decenio internacional para la acción “El agua fuente de vida “2000-2005,» 2015. [En línea]. Available: [https://www.un.org/spanish/waterforlifedecade/human\\_right\\_to\\_water.shtml](https://www.un.org/spanish/waterforlifedecade/human_right_to_water.shtml).

[52] UNESCO, 2019. [En línea]. Available: <https://es.unesco.org/news/son-aguas-residuales-nuevo-oro-negro>.

[53] U. Acnur, «La agencia de la ONU para los refugiados 2019,» 2019. [En línea]. Available: [https://eacnur.org/blog/escasez-agua-en-el-mundo-tc\\_alt45664n\\_o\\_pstn\\_o\\_pst/](https://eacnur.org/blog/escasez-agua-en-el-mundo-tc_alt45664n_o_pstn_o_pst/).

 <p><b>UNIVERSIDAD CATÓLICA</b> de Colombia</p> <p>FACULTAD DE INGENIERÍA PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL</p>	<p><u>PROPUESTA PLANTA DE TRATAMIENTO</u> <u>AGUAS RESIDUALES (PTAR) PARA EMPRESA</u> <u>DE LÁCTEOS</u></p>	<p>PRESENTADO POR: JULIANA CHACÓN <u>CÓDIGO: 506807</u> ISABELA RAMÍREZ <u>CÓDIGO: 506911</u></p>
--	---	---

### 13. ANEXOS

Anexo 01. Plano de propuesta de planta de tratamiento.



PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES (PTAR) PARA EMPRESA  
DE LÁCTEOS.

PROPUESTA FINAL

