



**UNIVERSIDAD CATÓLICA**  
de Colombia

**FACULTAD DE INGENIERÍA  
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL**

**DISEÑO DE UN SISTEMA DE TRATAMIENTO DE EFLUENTES  
PRODUCIDOS POR UNA EMPRESA  
PROCESADORA DE PRODUCTOS LÁCTEOS**

**PRESENTADO POR:  
MICHAEL GIOVANNI BENÍTEZ ABRIL 505168**

**DOCENTE ASESOR:  
FIDEL ALBERTO PARDO OJEDA**

**BOGOTÁ D.C. 04 DE JUNIO 2021**



UNIVERSIDAD CATÓLICA  
de Colombia  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL

DISEÑO DE UN SISTEMA DE  
TRATAMIENTO DE EFLUENTES  
PRODUCIDOS POR UNA  
EMPRESA  
PROCESADORA DE PRODUCTOS  
LÁCTEOS

FECHA: 04/06/2021

ELABORO: MICHAEL GIOVANNI BENÍTEZ

DOCENTE ASESOR:  
Ing. FIDEL ALBERTO PARDO OJEDA



UNIVERSIDAD CATÓLICA  
de Colombia

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL

DISEÑO DE UN SISTEMA DE TRATAMIENTO DE  
EFLUENTES PRODUCIDOS POR UNA EMPRESA  
PROCESADORA DE PRODUCTOS LÁCTEOS

MICHAEL GIOVANNI BENÍTEZ ABRIL 505168

INFORME FINAL  
Línea de investigación

INGENIERO  
FIDEL ALBERTO PARDO OJEDA

BOGOTÁ D.C. 04 DE JUNIO 2021



UNIVERSIDAD CATÓLICA  
de Colombia

FACULTAD DE INGENIERÍA  
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL

DISEÑO DE UN SISTEMA DE  
TRATAMIENTO DE EFLUENTES  
PRODUCIDOS POR UNA  
EMPRESA  
PROCESADORA DE PRODUCTOS  
LÁCTEOS

FECHA: 04/06/2021

ELABORO: MICHAEL GIOVANNI BENÍTEZ

DOCENTE ASESOR:  
Ing. FIDEL ALBERTO PARDO OJEDA



## Atribución 4.0 Internacional (CC BY 4.0)

This is a human-readable summary of (and not a substitute for) the [license](#). [Advertencia](#).

### Usted es libre de:

**Compartir** — copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato

**Adaptar** — remezclar, transformar y construir a partir del material para cualquier propósito, incluso comercialmente.

La licencianta no puede revocar estas libertades en tanto usted siga los términos de la licencia



### Bajo los siguientes términos:



**Atribución** — Usted debe dar [crédito de manera adecuada](#), brindar un enlace a la licencia, e [indicar si se han realizado cambios](#). Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que usted o su uso tienen el apoyo de la licencianta.

**No hay restricciones adicionales** — No puede aplicar términos legales ni [medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otras a hacer cualquier uso permitido por la licencia](#).

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.es>



UNIVERSIDAD CATÓLICA  
de Colombia

FACULTAD DE INGENIERÍA  
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL

DISEÑO DE UN SISTEMA DE  
TRATAMIENTO DE EFLUENTES  
PRODUCIDOS POR UNA  
EMPRESA  
PROCESADORA DE PRODUCTOS  
LÁCTEOS

FECHA: 04/06/2021

ELABORO: MICHAEL GIOVANNI BENÍTEZ

DOCENTE ASESOR:  
Ing. FIDEL ALBERTO PARDO OJEDA

## Nota de Aceptación

---

---

---

---

---

---

Firma presidente de Jurado

---

Firma del Jurado

---

Firma del Jurado

Bogotá, 2021

## TABLA DE CONTENIDO

1. TÍTULO	11
2. LÍNEA DE INVESTIGACIÓN	12
2.1 Línea de investigación	12
2.2 Eje temático	12
3. OBJETIVOS	13
3.1 Objetivo general	13
3.2 Objetivos específicos	13
4. INTRODUCCIÓN	14
5. JUSTIFICACIÓN	16
6. ALCANCES Y LIMITACIONES	18
6.1 Antecedentes	18
7. PLANTEAMIENTO Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	20
8. MARCO DE REFERENCIA	24
8.1. Marco Teórico	24
8.1.1 El agua	24
8.1.2 Características generales del agua	24
8.1.2.1 Características físicas del agua	24
8.1.2.2 Características Químicas	26
8.1.3 Importancia del agua	30
8.1.4 Usos del agua	30
8.1.5 Aguas residuales	31
8.1.6 Aguas residuales industriales	31
8.1.7 Aguas residuales de la industria láctea	32
8.1.8 Tratamiento de aguas residuales	35
8.1.8.1 Demanda teórica de oxígeno	35
8.1.8.2 Demanda química de oxígeno, DQO	36
8.1.8.3 Demanda bioquímica de oxígeno, DBO	36
8.1.8.4 Sólidos sedimentables	37
8.1.8.5 Nitrógeno total Kjeldahl (NTK)	37

8.1.8.6 Grasas y aceites	37
8.1.8.7 Fósforo total	37
8.1.8.8 Sulfatos	38
8.1.8.9 Detergente	38
8.1.8.10 Temperatura	38
8.1.9 Tratamientos de las aguas residuales de la industria láctea	38
8.1.10 Procesos necesarios para el tratamiento de las aguas residuales	40
8.1.10.1 Recepción y envío de efluentes	40
8.1.10.2 Pretratamientos y Tratamientos Primarios	40
8.10.11 Desinfección del agua residual	46
8.2 Marco legal	46
9. MARCO METODOLÓGICO	48
9.1 Tipo de investigación	48
9.2 Unidad de estudio	48
9.3 Procedimientos	48
9.3.1 Origen del agua residual	48
9.3.2 Medición de caudal y recolección de las muestras	49
9.3.3 Caracterización del agua residual	50
9.3.4 Establecimiento de la secuencia de unidades de tratamiento requeridas para depurar el efluente de la industria láctea	51
9.3.5 Evaluar la factibilidad del sistema de tratamiento para los efluentes líquidos a través de un análisis técnico, económico y ambiental	52
9.3.5.1 Factibilidad económica	52
9.3.5.2 Factibilidad técnica	52
9.3.5.3 Factibilidad ambiental	53
9.3.6 Dimensionar las unidades de tratamiento que conformarán el sistema de depuración del efluente proveniente de una empresa procesadora de productos lácteos	53
9.3.6.1 Diseño de la unidad de desbaste	54
9.3.6.2 Parámetros de diseño a utilizar en la presente investigación	54
9.3.6.3 Dimensionamiento de la trampa de grasas	55

9.3.6.4 Dimensionamiento del Tanque de igualación u homogenización	56
9.3.6.5 Diseño y cálculo de la unidad de tratamiento biológico	56
9.3.6.6 Unidad de desinfección	59
9.3.6.7 Lechos de secado	59
10. CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES	62
11. PRODUCTOS POR ENTREGAR	63
12. INSTALACIONES Y EQUIPO REQUERIDO	64
13. PRESUPUESTO DEL TRABAJO Y RECURSOS FINANCIEROS	65
14. ESTRATEGIAS DE DIVULGACIÓN Y COMUNICACIÓN	66
15. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	67
15.1 Caracterización del efluente lácteo	67
15.1.1. Conductividad eléctrica (CE)	68
15.1.2. Cloruros (Cl <sup>-</sup> )	68
15.1.3. Grasas y aceites	68
15.1.4. Nutrientes: Nitrógeno y fósforo	69
15.1.5. Contenido de materia orgánica (DBO y DQO)	70
15.1.6. Contenido de Sólidos Suspendidos Totales (SST) y Suspendidos Volátiles (SSV)	70
15.1.7. Contenido de coliformes	71
15.1.8. Comportamiento del caudal generado en la empresa láctea	72
15.2. Secuencia de las unidades de tratamiento	74
15.2.1 Pretratamiento del agua residual	75
15.2.2 Tratamiento primario del agua residual	76
15.2.3 Tratamiento secundario del agua residual	77
15.2.4 Tratamiento terciario del agua residual	79
15.2.5 Lechos de secado	80
15.1.3. Factibilidad Técnica	80
15.1.4. Factibilidad económica	82
15.4.1 Costos	83
15.2.5 Factibilidad Ambiental	85
15.2.5.1 Aspectos ambientales a considerar	85



UNIVERSIDAD CATÓLICA  
de Colombia  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL

DISEÑO DE UN SISTEMA DE  
TRATAMIENTO DE EFLUENTES  
PRODUCIDOS POR UNA  
EMPRESA  
PROCESADORA DE PRODUCTOS  
LÁCTEOS

FECHA: 04/06/2021

ELABORO: MICHAEL GIOVANNI BENÍTEZ

DOCENTE ASESOR:  
Ing. FIDEL ALBERTO PARDO OJEDA

15.2.6	Dimensionamiento de las unidades del tren de tratamiento	87
15.2.6.1	Diseño de la unidad de desbaste	88
15.2.6.2	Dimensionamiento de la trampa de grasas	92
15.2.6.3	Diseño y cálculo de la unidad de tratamiento biológico	94
16.	CONCLUSIONES	109
	REFERENCIAS	110



## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Clasificación de la biodegradabilidad en aguas residuales .....	36
Tabla 2. Variables medidas durante la caracterización de los efluentes lácteos .....	50
Tabla 3. Productos por entregar .....	63
Tabla 4. Equipos por utilizar para el desarrollo del proyecto. ....	64
Tabla 5. Presupuesto.....	65
Tabla 6. Caracterización del agua residual generada en una industria láctea. .	67
Tabla 7. Cómputos métricos de las unidades del tren de tratamiento: .....	82
Tabla 8. Costos de construcción de la procesadora de aguas .....	83
Tabla 9. Costos del personal mensual.....	83
Tabla 10. Costos operativos .....	84
Tabla 11. Amortización del crédito.....	84
Tabla 12. Dimensiones la unidad de desbaste .....	91
Tabla 13. Dimensiones de unidad de remoción de grasas .....	93
Tabla 14. Dimensiones del tanque de homogenización.....	94
Tabla 15. Coeficientes biocinéticos asumidos para esta investigación.....	94
Tabla 16. Características de un reactor de carga secuencial y equipo de aireación. ....	97
Tabla 17. Parámetros operacionales de los SBR .....	98
Tabla 18. Dimensiones del vertedero Parshall.....	101
Tabla 19. Dimensiones del canal Parshall .....	102
Tabla 20. Dimensiones del tanque de cloración. ....	104
Tabla 21. Dimensiones de los lechos de secado. ....	107

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Características físicas del agua.....	26
Figura 2. Características químicas del agua.....	28
Figura 3. Características microbiológicas del agua.....	29
Figura 4. Características de las aguas residuales de la industria láctea.....	33
Figura 5. Pretratamiento de aguas residuales en industria lechera.....	43
Figura 6. Tratamiento secundario: Anaerobio – biológico con nitrificación y desnitrificación + MBR. Fuente.....	44
Figura 7. Caudal puntal de agua residual generada durante envasado.....	73
Figura 8. Caudal puntal de agua residual generada durante envasado.....	73
Figura 9. Secuencia de unidades de tratamiento propuesto para las aguas residuales de la industria láctea.....	75
Figura 10. Etapas en el funcionamiento de un SBR.....	78
Figura 11. Distribución espacial de la planta de tratamiento.....	81
Figura 12. Unidad de desbaste. (a) Canal de aproximación y reja (corte longitudinal). (b) Reja vista frontal.....	91
Figura 13. Componentes de la trampa de grasas.....	93
Figura 14. Esquema del SBR con sus componentes.....	99
Figura 15. Dimensiones del tanque de contacto.....	103
Figura 16. Corte transversal del Lecho de Secado.....	105
Figura 17. Dimensiones de los lechos de secado.....	107
Figura 18. Tren de tratamiento del agua residual proveniente de la industria láctea.....	108



UNIVERSIDAD CATÓLICA  
de Colombia  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL

DISEÑO DE UN SISTEMA DE  
TRATAMIENTO DE EFLUENTES  
PRODUCIDOS POR UNA  
EMPRESA  
PROCESADORA DE PRODUCTOS  
LÁCTEOS

FECHA: 04/06/2021

ELABORO: MICHAEL GIOVANNI BENÍTEZ


DOCENTE ASESOR:  
Ing. FIDEL ALBERTO PARDO OJEDA

## 1. TÍTULO

### **DISEÑO DE UN SISTEMA DE TRATAMIENTO PARA LOS EFLUENTES PRODUCIDOS POR UNA EMPRESA PROCESADORA DE PRODUCTOS LÁCTEOS**

Los trabajos de grado en la Universidad Católica de Colombia, para optar al título de Ingeniero Civil se reglamentan bajo el Acuerdo 213 de 2015, el cual en su artículo 20 contempla las alternativas dadas para la asignatura de Trabajo de grado.

El presente proyecto se inscribe en la línea Investigación Gestión integral y dinámica de las organizaciones, inmerso en el contexto de Gestión de la Innovación

 <p>UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia</p> <p>FACULTAD DE INGENIERÍA PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL</p>	<p>DISEÑO DE UN SISTEMA DE TRATAMIENTO DE EFLUENTES PRODUCIDOS POR UNA EMPRESA PROCESADORA DE PRODUCTOS LÁCTEOS</p>	<p>FECHA: 04/06/2021</p> <p>ELABORO: MICHAEL GIOVANNI BENÍTEZ</p> <p>DOCENTE ASESOR: Ing. FIDEL ALBERTO PARDO OJEDA</p>
--	---	---

## 2. LÍNEA DE INVESTIGACIÓN

### 2.1 Línea de investigación

El trabajo de grado está enmarcado dentro de la línea de Investigación Gestión Integral y Dinámica de las organizaciones, específicamente Gestión de la Innovación, aprobada por la Universidad Católica de Colombia.

### 2.2 Eje temático

En el eje temático de la propuesta de trabajo de grado, está direccionado a la investigación.

### 3. OBJETIVOS

#### 3.1 Objetivo general

Diseñar mediante un planteamiento esquemático un sistema de tratamiento para los efluentes producidos por una empresa procesadora de productos lácteos.

#### 3.2 Objetivos específicos

- Determinar las principales características físicas, químicas y microbiológicas de un efluente de una industria láctea requeridas para proponer su tratamiento de depuración, siguiendo los procedimientos establecidos en el Método Estándar.
- Establecer la secuencia de unidades de tratamiento requeridas para depurar el efluente de la industria láctea.
- Evaluar la factibilidad del sistema de tratamiento para los efluentes líquidos a través de un análisis técnico, económico y ambiental.
- Dimensionar las unidades de tratamiento que conformarán el sistema de depuración del efluente proveniente de una empresa procesadora de productos lácteos, disminuyendo el impacto ambiental provocado.

## 4. INTRODUCCIÓN

En los últimos años el problema ambiental causado por la actividad industrial a nivel mundial ha generado un tema de discusión para muchos entes gubernamentales, debido al impacto negativo que los residuos y desechos sólidos, líquidos y gaseosos industriales han causado sobre los ecosistemas. Con el aumento de la industrialización las cantidades de residuos generados han comenzado a ser significativos para las zonas donde son depositados. Es por esto, que paralelo a la evolución del sector industrial, también se han tenido que incrementar las regulaciones ambientales que permitan la protección del ambiente, promoviéndose legislaciones más estrictas que minimicen el efecto sobre el entorno y se logre su disposición final de forma correcta (El-Sheikh, 2009; Chen, Luo, Hang y Wan, 2018).

Los cuerpos de agua ya sean ríos, lagos y mares, se han visto afectados por la incorrecta disposición de los residuos sólidos y líquidos industriales, su efecto contaminante es elevado debido a que la carga orgánica e inorgánica supera, en muchos casos, los límites permitidos por la ley (Kolev Slavov, 2017; Ozturk, Aygun y Nas, 2019). Es por ello que es imprescindible brindarles un tratamiento de depuración adecuado antes de ser descargados al ambiente, debido a que de no ser controlados en su descarga pudieran causar daños irreversibles al ambiente, y lo que es peor aún, a las personas que entran en contacto con estas áreas.

Para cumplir las exigencias de ley y disminuir el impacto ambiental que tiene la descarga de los efluentes líquidos de la industria de alimentos, se requiere el conocimiento de sus características para que de esta manera se logre establecer el diseño apropiado para su tratamiento. La caracterización de los efluentes involucra la determinación de los parámetros convencionales, como son la demanda bioquímica de oxígeno (DBO), demanda química de oxígeno (DQO), nitrógeno, fósforo, perfil de sólidos, pH, grasas y aceites entre otros y se debe prestar atención especial a los contaminantes particulares de cada proceso productivo (Metcalf y Eddy, 1985; Ozturk, et al., 2019).

Diversos sectores agroindustriales, tales como empresas lácteas, procesadoras de alimentos, la industria de la pulpa y papel, las beneficiadoras de aves y tenerías, además de producir efluentes de composiciones muy complejas, se caracterizan ser procesos productivos húmedos donde se utilizan elevados volúmenes de agua, y por tanto, se producen grandes cantidades de efluentes contaminados (El-Sheikh, 2009, Kolev, Slavov 2017; Bortoluzzi et al., 2017). Particularmente, la industria del procesamiento de leche es una de las industrias básicas del mundo y suele considerarse la mayor fuente de aguas residuales

industriales en el área de alimentos, especialmente en Europa (Kolev, 2017; Bortoluzzi et al., 2017). Además, se caracteriza por tener una composición muy variable, dependiendo de la etapa del proceso productivo y tipo de producto lácteo que la genera (Carvallo, Prazeres y Rivas, 2013; Chen et al., 2018).

El agua residual proveniente de la industria láctea se caracteriza por ser altamente contaminante, presenta normalmente color gris oscuro, olor desagradable y es turbia con apariencia lechosa, posee una DQO superior a 6 g/L como consecuencia de las altas concentraciones de materia orgánica que posee y en muchos casos es rica en nutrientes (nitrógeno y fósforo), así como también posee pH muy oscilantes (Kolev Slavov, 2017). Estas características hacen que se requiera de la implementación de un tratamiento rentable y efectivo para que las empresas del sector cumplan con las normativas requeridas para realizar la descarga adecuada al sitio de disposición final (Stoop, 2003, Bortoluzzi et al., 2017).

El tratamiento usado por preferencia para la remoción de contaminantes de los efluentes de las industrias lácteas es el biológico, debido principalmente a las características orgánicas biodegradables de los contaminantes presentes en ellas. El tratamiento biológico, como unidad central en la depuración del agua residual, se basa en el uso de microorganismos que bajo condiciones aeróbicas y/o anaeróbicas han mostrado ser efectivos para tratar efluentes industriales, además son económicos en comparación con los tratamientos fisicoquímicos, mecánicos, electroquímicos, membranas, entre otros (Mohseni y Bazari, 2004; Valizadeh y Davarpanah, 2019).

A pesar de lo señalado anteriormente, los efluentes lácteos se caracterizan por ser de composición muy diversa, por lo que usualmente el tratamiento de depuración adecuado debe combinar procesos biológicos con fisicoquímicos o de alguna otra naturaleza que permita remover los contaminantes de interés y generar un agua residual tratada apta para ser dispuesta finalmente sin afectar negativamente el ambiente (Bortoluzzi et al., 2017; Chen et al., 2018; Ozturk, et al., 2019).

Finalmente, el objetivo de esta investigación será proponer el tratamiento requerido para que se reduzca el contenido de los principales contaminantes característicos de los efluentes de las industrias lácteas llamadas “San Jerónimo Cajicá Cabrera” y “Hermanos SAS”, ubicadas en la vereda Hato grande del municipio de Cajicá, para lograrlo se deberá realizar una caracterización del agua residual, establecer la secuencia de operaciones necesarias para la remoción de los principales contaminantes, y por último, se realizará el predimensionamiento de estas unidades de tratamiento.

## 5. JUSTIFICACIÓN

Los efluentes industriales están constituidos por diversos tipos de compuestos, principalmente de naturaleza orgánica, que poseen distintas propiedades físicas y diferentes niveles de biodegradabilidad. Para establecer y diseñar sistemas de tratamiento de aguas residuales, es necesario conocer esas características, que darán información sobre el contenido del material biodegradable y no biodegradable presente en el agua residual, es decir, permitirá conocer la fracción de contaminantes que podrá ser removido por vía biológica (Ekama y Wentzel, 2008).

La caracterización de los efluentes es imprescindible conocerla cuando se realiza el diseño del sistema de tratamiento de depuración, debido a que las unidades que conformarán el sistema se seleccionarán en función del contaminante o grupos de contaminantes que se removerán en cada una de ellas (Metcalf y Eddy, 1985). Conociendo la caracterización, se espera poder establecer las condiciones de tratamiento más adecuadas para el tipo de efluente en estudio. Considerando que los efluentes industriales varían mucho en su composición de acuerdo con los procesos productivos que los generan, realizar una caracterización adecuada es fundamental para garantizar la eficiencia del sistema de tratamiento de las aguas residuales.

En las industrias, principalmente las encargadas de procesar productos alimenticios el mayor tonelaje de material manejado es el agua, de allí que se les conozca como procesos productivos húmedos (El-Sheikh, 2009, Kolev Slavov, 2017, Bortoluzzi et al., 2017). En la industria procesadora de lácteos específicamente este elemento es usado para llevar a cabo diferentes operaciones antes, durante y después del procesamiento de la materia prima, por lo que la cantidad de efluentes líquidos generados es considerablemente alta (Chen et al., 2018).

Los efluentes industriales provenientes de las agroindustrias, además de abundantes, se caracterizan por ser ricos en material orgánico biodegradable, por lo que los procesos de tratamiento basados en sistemas biológicos resultan ser adecuados. La selección del proceso biológico como tratamiento central de depuración de los efluentes lácteos ha sido usado con éxito por diversos investigadores, quienes han señalado que además de ser eficientes en la remoción de sus contaminantes, son ventajosos porque tienen menor costo de aplicación y son más fácil manejo en comparación con los procesos fisicoquímicos, enzimáticos, membranas, entre otros (Mohseni y Bazari, 2004; Nasr et al., 2014; Bortoluzzi et al., 2017; Kolev Slavov, 2017; Chen et al., 2018; Ozturk, et al., 2019).





Las aguas residuales producidas por las industrias lácteas poseen elevadas concentraciones de DBO y DQO, así como también nutrientes (N y P) (Kolev Slavov, 2017; Chen et al., 2018; Ozturk, et al., 2019). Estos contaminantes deben ser removidos antes de disponerlas finalmente, en especial porque al descargar efluentes ricos en nutrientes a los cuerpos de agua se acelera el proceso de eutrofización, es decir, la muerte del cuerpo de agua por el agotamiento del oxígeno disuelto necesario para garantizar la vida acuática (Metcalf & Eddy, 1985).

Desde el punto de vista ambiental, los residuos líquidos vertidos al ambiente sin ningún tipo de tratamiento que disminuya su carga contaminante pueden ser causante de contaminación originando la destrucción de la flora y fauna de la localidad donde estos son depositados, produciendo además, malos olores debido a que estas aguas poseen un alto contenido de materia orgánica en suspensión y disuelta, y por ello, tienden a fermentar favoreciendo el establecimiento de microorganismos anaeróbicos que en su metabolismo producen sustancias que causan esos olores, y lo más grave, es el efecto negativo sobre la salud, debido a que algunos pueden ser patógenos y provocar enfermedades hídricas (Kolev Slavov, 2017).

Por las razones expuestas, es imprescindible efectuar un tratamiento adecuado a los efluentes industriales procesadores de productos lácteos, de allí que en esta investigación se definirán detalladamente las características del agua residual, así como las condiciones más adecuadas para el tratamiento y finalmente, se propondrá y diseñará el sistema de tratamiento más adecuado según las características del efluente toma de las industrias lácteas “San Jerónimo Cajicá Cabrera” y “Hermanos SAS”, ubicadas en la vereda Hato grande del municipio de Cajicá.

## 6. ALCANCES Y LIMITACIONES

La presente investigación aplica a efluentes reales de las industrias procesadoras de lácteos llamadas “San Jerónimo Cajicá Cabrera” y “Hermanos SAS”, ubicadas en la vereda Hato grande del municipio de Cajicá, donde se circunscribe a realizar la propuesta de tratamiento de estos efluentes basándose en las características físicas, químicas y biológicas propias del efluente en estudio. Posteriormente, se realizará el diseño esquemático de la planta de tratamiento y se considerará para el dimensionamiento de las unidades una eficiencia de remoción del contaminante que permita generar un efluente tratado con concentraciones inferiores a los límites de descarga permitidos en la normativa ambiental.

De igual manera, esta investigación incluirá la factibilidad técnica, económica y ambiental que permitirá la realización del sistema de tratamiento para los efluentes líquidos.

Con la caracterización del agua residual de la industria láctea y el estudio de factibilidad se podrá realizar el diseño de los equipos que conformarán el sistema de tratamiento de los efluentes producidos por una empresa procesadora de productos lácteos.

Entre las limitaciones, se deben resaltar aquellas concernientes a las reservas de la información técnica que tenga la empresa debido a la confidencialidad de los trabajadores y accionistas, así como el acceso y permisos de ingreso a sus instalaciones y plantas.

### 6.1 Antecedentes

El sector agroindustrial, en su heterogeneidad de producción aporta un gran número de productos en el ámbito industrial. Lo que deja ver que el rendimiento productivo, conlleva una generación significativa de residuos, afluentes y emisiones atmosféricas. En el caso particular de la industria láctea en Colombia, según Isaza (2013) “genera un impacto ambiental significativo, debido a la importante carga de efluentes que constituyen el principal foco de contaminación” (p. 24). En este sentido, se debe tomar en cuenta los tratamientos de agua residuales.

La industria de productos lácteos se encuentra entre una de las actividades industriales que tienen un mediano impacto ambiental, de acuerdo con Isaza (2013):

Los grandes problemas ambientales asociados a este sector están concentrados básicamente en la problemática de los residuos líquidos

los cuales están cargados de grasas, aceites, sólidos suspendidos y nitrógeno amoniacal; estos presentan una alta carga orgánica, fluctuaciones de pH, temperatura y altos niveles de fósforo y nitrógeno (p.7).

Atendiendo a lo anterior, la industria láctea, en la que no hay controles rigurosos producen emisiones de contaminantes significativos con impactos al ambiente. En lo que corresponde al agua, según Santamaría, Álvarez, Santamaría y Zamora (2015) hay evidencia estadísticamente significativa que las aguas residuales descargadas del sector lácteo presentan alto contenido de materia orgánica. La descarga incontrolada de las aguas residuales al sistema de alcantarillado público está contaminando “(p.23).

Es importante acotar que, en este ramo de producción, según comentan los autores precitados, los empresarios cuentan con el conocimiento de las descargas y los riesgos de estas aguas, sin embargo, no cuentan con la inversión para solventar dicha problemática. Lo que ha mostrado que no hay una preocupación por parte de las empresas de solventar dicha situación.

Santamaría-Freire, Álvarez, Santamaría y Zamora (2015) comentan los impactos ambientales que ocasionan estas aguas residuales, al no aplicarse ningún tipo de tratamiento, produciéndose una eutrofización:

Que es un incremento de los nutrientes en los cuerpos receptores de agua, principalmente por la descarga del suero dulce con pequeñas partes de cuajada, derrames de leche, residuos del lavado de las yogurteras y aguas del lavado de los camiones recolectores de leche y de distribución de los productos de la empresa (p.25).

Por lo que se plantea como alternativa de solución plantas de tratamiento que busquen la disminución de los valores y que estén ajustados a los rangos permisibles por los estándares establecidos en la ley vigente.

## 7. PLANTEAMIENTO Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

La demanda bioquímica de oxígeno (DBO) y la demanda química de oxígeno (DQO) son parámetros de diseño ampliamente usados que reflejan el contenido orgánico total que posee el efluente. En los efluentes agroindustriales, el contenido de materia orgánica medido como DBO y DQO es uno de los problemas principales que debe ser tomado en consideración para el diseño del sistema de tratamiento (Bortoluzzi et al., 2017; Chen et al., 2018; Ozturk, et al., 2019).

La caracterización de los efluentes, particularmente los industriales, se ha convertido en un requisito fundamental debido a que es muy variable de acuerdo a las peculiaridades de cada proceso productivo que lo genera. La caracterización involucra la determinación de los parámetros convencionales como son DQO, nitrógeno total Kjeldahl (NTK), nitrógeno amoniacal ( $\text{NH}_4^+$ ), sólidos suspendidos (SS).

Muchos sectores industriales, tales como empresas lácteas, procesadoras de alimentos, fábricas de pulpa y papel, mataderos y tenerías, además de poseer efluentes de composiciones complejas, utilizan volúmenes muy altos de agua para llevar a cabo sus procesos productivos, generando efluentes con caudales abundantes que oscilan entre 450 y 4128  $\text{m}^3/\text{d}$  (Yilmaz, 2007). Particularmente, las empresas lácteas, generan aproximadamente entre 0,2 y 10 L de aguas residuales por 1 L de leche procesada, teniendo una generación promedio de 2,5 L de aguas residuales por 1 L de leche procesada (Bortoluzzi et al., 2017), por lo que el volumen y la composición del agua residual son dos de las principales problemáticas que tienen que afrontarse cuando se desea proponer un tratamiento a los efluentes lácteos.

La mayor parte de estas aguas residuales proceden fundamentalmente de la limpieza de aparatos, máquinas y salas de tratamiento, por lo que contienen restos de productos lácteos y productos químicos (ácidos, álcalis, detergentes, desinfectantes, entre otros.), aunque también se vierten aguas de refrigeración que de acuerdo con Insacan (1995), si no se recuperan de forma adecuada, pueden suponer hasta dos o tres veces la cantidad de leche que entra en la central, en estos residuos también quedan englobados los generados por los locales sociales, baños y cocina. Es decir, que la cantidad de efluentes producidos de continuar las condiciones mencionadas en una empresa láctea puede llegar a ser tres veces mayor a la cantidad de leche que se procesa.

Las empresas que elaboran productos lácteos han sido catalogadas como uno de los sistemas de producción que generan mayores fuentes de contaminación, aunque no produce cantidades significativas de contaminantes tóxicos o

peligroso, los constituyentes que posee deben ser removidos adecuadamente para evitar el efecto negativo que pudieran tener sobre el ambiente, además se debe considerar que como la materia prima es la leche (líquido rico en nutrientes), es un caldo de cultivo preferido por muchos microorganismos, algunos patógenos, produciendo enfermedades en los seres vivos (Escuela de Organización Industrial, 2008). Además, se debe tomar en cuenta que durante el proceso productivo en la industria láctea se incorporan sustancias químicas requeridas para la limpieza, sanitización y producción de algunos de los productos lácteos. La mayor parte de estos compuestos son detergentes, álcalis, desinfectantes, aguas de salmueras, entre otros y quedan remanentes en las aguas residuales causando un efecto negativo en el ambiente (Gaibor, 2014).

Los efluentes de las industrias procesadoras de lácteos se caracterizan por ser ricas en carbono, por tanto, las concentraciones de DBO y DQO son elevadas, siendo la problemática mayor cuando las descargas son abundantes. Otra situación que agrava la problemática, es que alrededor del 50% de la producción mundial de suero, especialmente en lo que respecta al suero ácido, se descarga a cuerpos de agua sin recibir un tratamiento adecuado afectando negativamente a los ecosistemas (Bortoluzzi et al., 2017; Chen et al., 2018).

Otro aspecto que debe considerarse durante el tratamiento de las aguas residuales provenientes de la industria láctea, es que efluentes que se originan de diversas tecnologías de producción no se descargan simultáneamente (son sistemas que funcionan discontinuos), formando así una corriente residual con amplias variaciones cualitativas y cuantitativas, esto genera problemas durante el tratamiento de las aguas residuales debido a que las variaciones afectan el funcionamiento de las operaciones de depuración (Martins, Salla y Bolanos, 2019). Es importante, definir el tipo de industria láctea a la que se le brindará el tratamiento de depuración, debido a que las características varían significativamente (Kolev, 2017).

En el pasado reciente, el objetivo de las plantas de tratamiento de aguas residuales se basaba en la remoción de materia orgánica (DQO y DBO); sin embargo, en la actualidad la remoción de nutrientes como el nitrógeno y fósforo se ha convertido en la necesidad principal de los sistemas de depuración, para lograr la preservación del medio ambiente, evitando la eutrofización de los cuerpos de agua. Los efluentes producidos en la industria láctea son ricos en nutrientes, por lo que es una problemática que debe ser considerada cuando se plantea el tratamiento de sus efluentes.

La remoción convencional de nitrógeno por vía biológica, especialmente para efluentes complejos con concentraciones de nitrógeno superiores a 100 mg/L, como los de la industria láctea y tenerías, puede no ser eficiente si no se le

adiciona una fuente externa de carbono fácilmente biodegradable, ya que puede causar la acumulación de nitritos y nitratos en el efluente, impidiendo la remoción del nitrógeno del agua residual (Artan et al., 2004). Este problema debe ser tomado en cuenta para poder realizar la propuesta correcta del tren de tratamiento y lograr la remoción eficiente de nitrógeno y fósforo del agua residual de industria láctea.

Existe un elevado número de fábricas de productos lácteos que no brindan el tratamiento de depuración adecuado a sus aguas residuales, o más grave aún, no aplican ningún tratamiento y son descargadas irresponsablemente al ambiente (Show, Tay y Hung, 2010). Tikariha y Sahu (2014) señalan que el costo anual del tratamiento y disposición de los efluentes lácteos es de aproximadamente un millón de dólares. Esto hace que la incorrecta disposición de estos efluentes agroindustriales se esté convirtiendo en un problema económico, ambiental, social y de salud pública cada vez mayor (Tirado, Gallo, Acevedo y Mouthon, 2016). A pesar que se ha demostrado que los sistemas biológicos son capaces de tratar eficientemente los efluentes producidos en las empresas que fabrican productos lácteos (Mohseni y Bazari, 2004; Tirado et al., 2016; Kolev Slavov, 2017; Bortoluzzi et al., 2017; Chen et al., 2018), aún persiste el problema que el sistema biológico no es capaz de remover la fracción no biodegradable (inerte) de la materia orgánica (Dosta y col., 2008). De allí que sea necesaria la aplicación de un procedimiento adicional fisicoquímico, electroquímico, membranas, entre otros, es decir, la incorporación de un tratamiento terciario que complemente el proceso de remoción de contaminantes (Arango y Garcéz, 2007; Carvalho, Prazeres y Rivas (2013); Nasr et al., 2014).

Se debe resaltar que los contaminantes presentes en los efluentes lácteos no son de naturaleza tóxica o peligrosa, pero poseen concentraciones elevadas de contaminantes comunes (carbono, nitrógeno, fósforo, pH variables) que causan un impacto negativo sobre el ambiente si fueran descargados a ríos, lagos, mares sin ser removidos de una manera eficiente. Para afrontar esta problemática es fundamental establecer y diseñar un tren de tratamiento de depuración basado en las características reales del efluente y así lograr disminuir la concentración de las sustancias dañinas antes de su disposición final.

El diseño adecuado de una planta de tratamiento de aguas residuales en las empresas garantiza el control de los efluentes líquidos vertidos en el alcantarillado municipal de la localidad, pues estos son una amenaza potencial para la salud humana y el medio ambiente por lo que los habitantes de las zonas adyacentes a la empresa corren el riesgo de sufrir enfermedades tales como: Parasitismo intestinal (también conocidos como helmintos) que infectan a las personas que entran en contacto con suelos contaminados; enfermedades diarreicas, leucemias, el paludismo, que es una enfermedad grave provocada



por un parásito transmitido por ciertos tipos de mosquitos, además de que el acumular estos desechos, es posible la proliferación de plagas de ratas, moscas entre otros; que son unos de los principales vectores de enfermedades producidas por virus y bacterias (Lozano, 2012).

Luego de los planteamientos precedentes, cabría preguntarse, ¿Cuáles son los contaminantes principales de los efluentes de la industria láctea? ¿Cuáles son las unidades de tratamiento requeridas para remover los contaminantes de los efluentes lácteos? Considerando esto ¿Es viable el diseño dicho tratamiento?; partiendo de esta factibilidad ¿Qué criterios se podrían tomar en cuenta para realizar el diseño preliminar de un tratamiento para los efluentes líquidos?



## 8. MARCO DE REFERENCIA

### 8.1. Marco Teórico

#### 8.1.1 El agua

El agua, es un líquido incoloro, inodoro e insípido, formado por la combinación de un átomo de oxígeno y dos átomos de hidrógeno, cuya función principal es la de ser disolvente, por cuanto transporta sustancias solubles y elimina residuos.

A la presión atmosférica hierve a 100 °C y a 0 °C se solidifica cristalizando en formas hexagonales, se evapora a la temperatura ambiente. Es un componente de la naturaleza que ha estado presente en la Tierra desde hace más de 3.000 millones de años, ocupando tres cuartas partes de la superficie del planeta. Debido a su composición química y a su estructura dipolar, forma puentes de hidrógeno que son los responsables de las características del agua (Hernández, 2010), por ejemplo, en estado sólido la estructura de la molécula es estática y ordenada, mientras que en estado gaseoso los puentes de hidrógeno se rompen, también las condiciones de temperatura y presión harán posible que el agua en la naturaleza cambie de estado.

Su capacidad calorífica es superior a la de cualquier otro líquido o sólido, siendo su calor específico de 1 cal/g, esto significa que una masa de agua puede absorber o desprender grandes cantidades de calor (Peral, 2006), sin experimentar apenas cambios de temperatura, lo que tiene gran influencia en el clima (las grandes masas de agua de los océanos tardan más tiempo en calentarse y enfriarse que el suelo terrestre). Sus calores latentes de vaporización y de fusión (540 y 80 cal/g, respectivamente) son también excepcionalmente elevados.

Por otro lado, el agua químicamente pura es escasa y difícil de obtener, dado que frecuentemente se contamina con sustancias con las que entra en contacto (Negai, 2010), esto debido a su característica de solvente universal.

#### 8.1.2 Características generales del agua

##### 8.1.2.1 Características físicas del agua

**Turbiedad:** Es una expresión de la propiedad óptica de una muestra, que hace que los rayos luminosos se dispersen y se absorban, en lugar de que se transmitan en línea recta a través de ella. No son prácticos los intentos para relacionar la turbiedad con la concentración, en peso, de los sólidos en suspensión, pues el tamaño, forma el índice de refracción de las partículas son, ópticamente, de mayor importancia que la concentración y peso específico de las materias suspendidas (Abreu, 1991). La turbiedad es originada por las



partículas en suspensión o coloides (arcillas, limo, tierra finamente dividida). Los materiales que causan la turbiedad pueden ser de muchas clases desde sustancias puramente orgánicas hasta los de carácter puramente inorgánico como partículas coloidales de rocas, de la agricultura o de otras operaciones que alteran el suelo. Las sustancias orgánicas que llegan a los ríos sirven de alimentos a las bacterias y el crecimiento bacteriano que resulta, además de otros microorganismos que alimentan las bacterias, producen turbiedad adicional.

Últimamente, ha cobrado importancia la presencia de fibras de asbesto desprendidas de los accesorios de asbesto-cemento de los sistemas de distribución como un factor causante de turbiedad en las aguas de consumo humano (Sawyer, 2001). La disparidad de la naturaleza de los materiales que causan turbiedad hace imposible establecer reglas rígidas y rápidas para su remoción.

Las mediciones de turbidez se basan en las propiedades ópticas de la suspensión que causan que la luz se disperse o se absorba. Los resultados se comparan luego con los que se obtienen de una suspensión estándar. La medición se puede realizar mediante un turbidímetro o nefelómetro. Las unidades utilizadas son, por lo general, unidades nefelométricas de turbiedad (UNT).

**Potencial de hidrógeno (pH):** Es el término de uso general para expresar la magnitud de acidez o alcalinidad. Es una forma de expresar la concentración de iones hidrógeno y es un factor importante en la coagulación química, la desinfección, el ablandamiento de las aguas y el control de la corrosión (Sawyer, 2001). La escala práctica del pH comprende del 0, muy ácido, al 14 muy alcalino, con el valor medio de pH 7 que corresponde a la neutralidad exacta, a 25 °C. Mientras que los términos alcalinidad y acidez indican la reserva total o capacidad amortiguadora de una muestra, el valor del pH representa la actividad instantánea del Ion hidrógeno.

Aunque el pH no ejerce por lo general un efecto directo en los consumidores, es uno de los principales parámetros operativos de la calidad del agua, a la que se debe prestar gran atención en todas las fases del tratamiento, a fin de que el agua se clarifique y desinfecte satisfactoriamente (Abreu, 1991). Para que la desinfección con cloro sea eficaz, es preferible que el pH sea inferior a 8. Por otra parte, se debe controlar el pH del agua que llega al sistema de distribución, a fin de reducir al mínimo la corrosión de las tuberías maestras y domésticas. Si esto no se consigue, el agua de la bebida puede quedar contaminada, con los consiguientes efectos negativos en su sabor, su olor y su apariencia.

El pH óptimo varía según la composición del agua y el tipo de materiales de construcción utilizados en el sistema de distribución, pero con frecuencia se sitúa entre 6.5 y 9.5. Los valores extremos del pH pueden ser resultados de vertimientos accidentales o de interrupciones del proceso de tratamiento.

**Figura 1.** Características físicas del agua.



**Fuente:** Organización Mundial de la Salud (2018).

La Figura 1 muestra las características física convenientes y tolerables del agua para consumo humano de acuerdo con la Organización Mundial de la salud (OMS, 2018) considerando los riesgos de peligro a los que podría exponerse la salud humana. Por lo tanto, es importante se consideren los valores permisibles.

### 8.1.2.2 Características Químicas

**Sólidos:** Se refiere a la materia que queda como residuo después de la evaporación y el secado entre 103°C y 105°C, todas las sustancias que ejercen presión de vapor a esta temperatura se pierden en dichos procesos, el residuo que queda, es decir, el sólido existente en la muestra, está constituido por sustancias con presión de vapor insignificantes a 105°C. Las pruebas para la determinación son relativamente sencillas, en casi todos los casos se utilizan métodos gravimétricos, los problemas más difíciles se relacionan con los análisis específicos para la información de los diferentes sólidos existentes, e.g. disueltos, suspendidos, volátiles y fijos.

En la gran mayoría de las aguas potables la materia se encuentra en forma disuelta y está constituida principalmente por sales inorgánicas, pequeñas cantidades de materia orgánica y gases disueltos. Los sólidos se pueden distinguir en sólidos disueltos, sólidos en suspensión y sólidos sedimentables, siendo la suma de todos ellos los sólidos totales, los cuales aumentan la turbidez y disminuyen la calidad del agua (Metcalf y Eddy, 1996).

Sólidos disueltos o salinidad total, es una medida de la cantidad de materia disuelta en el agua, determinada por la evaporación de un volumen de agua previamente filtrada, el valor de los sólidos disueltos no es por sí solo suficiente para especificar la calidad del agua. Están relacionados con la conductividad del agua ya que un aumento de estos iones aumenta la capacidad conductiva. (Metcalf y Eddy, 1996).

Sólidos sedimentables se aplican a los sólidos en suspensión que se pueden sedimentar por la acción de la gravedad. Sólo se sedimentan los sólidos más gruesos y con un peso específico mayor al agua. Los lodos son acumulaciones de sólidos sedimentables, la medición es de suma importancia para definir las unidades de sedimentación y el comportamiento físico de las corrientes de residuos que entran a los cuerpos de agua. (Sawyer, 2001). La determinación de los sólidos varía debido a la gran variedad de materiales, es mejor tratarlo en términos de agua, aguas contaminadas y lodos.

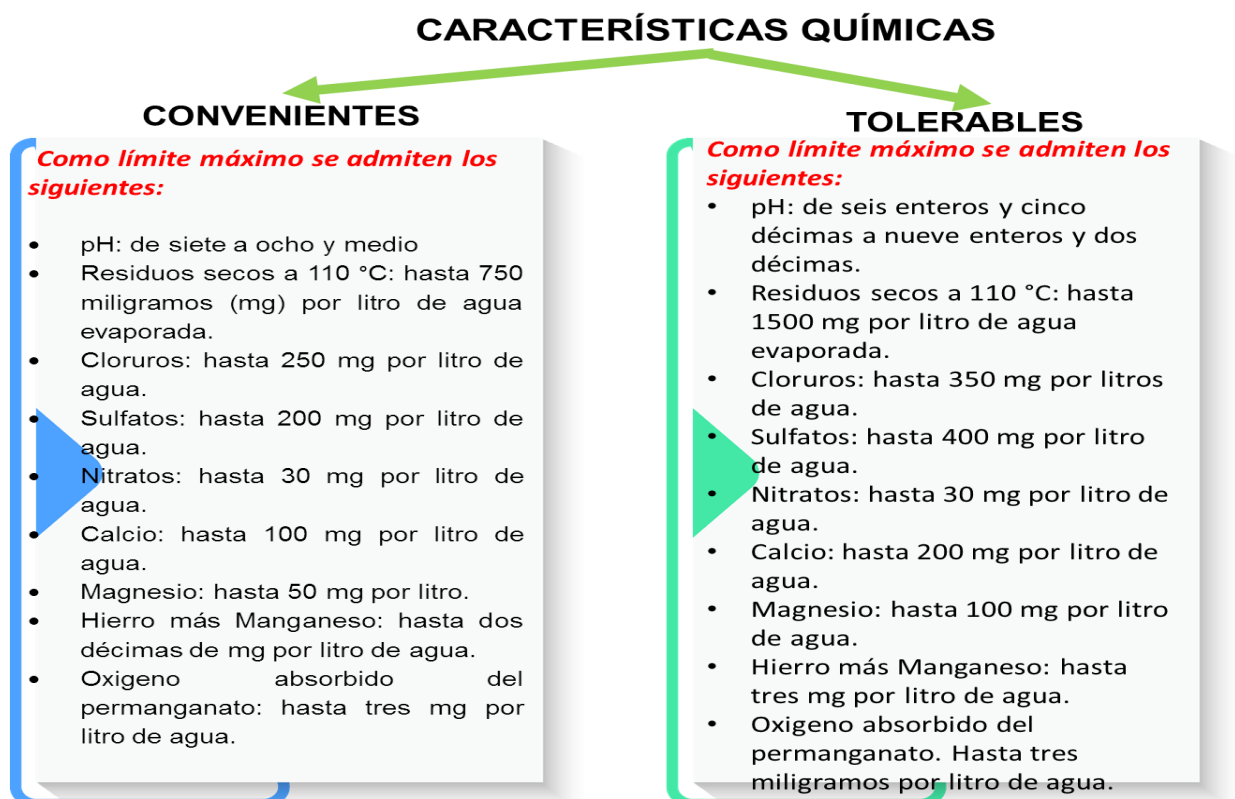
**Materia orgánica natural (MON):** Las aguas naturales contienen concentraciones variables de numerosos compuestos orgánicos, la mayor parte del material orgánico está presente en forma disuelta (DQO), mientras que la mínima parte (generalmente el 10%) está en forma coloidal (Varo, Chillón y Prats (2004).). La concentración de materia orgánica es variable dependiendo de la fuente, usualmente es baja en aguas subterráneas y marinas (alrededor de 1 mg/L), en aguas superficiales en un rango de 5-6 mg/L y en lagos eutrofizados puede llegar a ser bastante alta, igual a 30 mg/L ó superior a este valor.

La composición de la MON depende claramente del lugar de origen; desde ácidos hidrofílicos de bajo peso molecular, carbohidratos, proteínas y aminoácidos hasta compuestos de mayor peso molecular, como los ácidos fúlvicos y húmicos. El estudio de la composición generalmente se lleva a cabo mediante su fraccionamiento en grupos de compuestos con características afines; algunas técnicas empleadas son la extracción líquido-líquido (puede alterar la naturaleza química del soluto, presenta dificultades para solutos orgánicos de alta polaridad y hay riesgo de pérdida de compuestos volátiles) y la absorción sobre carbón activado granular. (Metcalf y Eddy, 1996).

La materia orgánica natural proviene principalmente del arrastre de materia orgánica de los suelos circundantes y de reacciones biológicas, químicas y fotoquímicas que sufren los subproductos orgánicos derivados de la descomposición de las plantas y animales en el medio acuoso. Por lo general, las aguas naturales no contaminadas presentan cantidades mínimas de materia orgánica, salvo aquellas que provienen de bosques o aguas estancadas. (Tchobanoglous, 2000).

**Características químicas del agua:** La caracterización de los compuestos químicos presentes en el agua para consumo humano, considerando la presencia de los elementos, compuestos químicos y mezclas de los compuestos, trae consigo incidencia en la salud humana. Por lo que, se hace necesario que se vigilen las concentraciones de los compuestos, de manera tal que se evalúen sus rangos de acuerdo con el ordenamiento jurídico al que corresponda atendiendo a los criterios establecidos. En la figura 2 se muestran las características químicas del agua.

**Figura 2.** Características químicas del agua

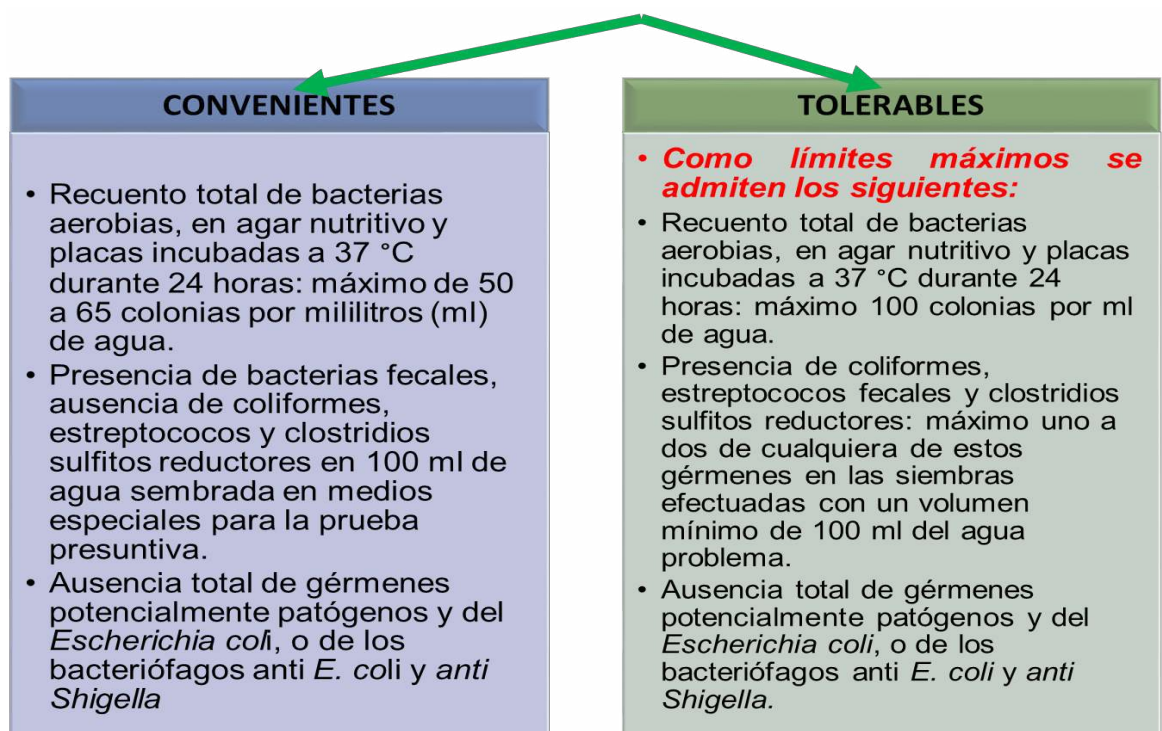


**Fuente:** Organización Mundial de la salud (2018).

La figura 2 muestra las características químicas de los compuestos del agua según la OMS en sus rangos convenientes y tolerables para el consumo humano. Lo cual puede tener implicaciones sanitarias, económicas y ambientales sino se toman en consideración

**Características microbiológicas:** Lo correspondiente a la caracterización microbiológica del agua es un criterio fundamental que se debe tomar en cuenta, por el hecho de sus implicaciones nocivas en la salud humana. En este sentido, se aplican métodos y pruebas estandarizadas que permiten la evaluación de las aguas de manera que se pueda conocer sus rangos de presencia de los patógenos, atendiendo a los estándares establecidos por los organismos reguladores que establecen estos criterios en los cuerpos de Ley. Es por ello, que en la figura 3 se muestran las características microbiológicas del agua.

**Figura 3.** Características microbiológicas del agua



**Fuente:** Organización Mundial de la salud (2018).

La Figura 3 hace referencia a las características microbiológicas convenientes y tolerables que debe tener el agua atendiendo al criterio de la OMS, bajo las cuales se deben regir los organismos competentes para verificarla ausencia o presencia de microorganismos patógenos en las aguas dentro de los procesos agroindustriales que en el caso particular del presente estudio corresponde con una empresa procesadora de lácteos.



### 8.1.3 Importancia del agua

Bien es conocida la importancia de este vital en todos los procesos que realiza el hombre y en el sector industrial no es la excepción, dado que sus usos van desde la elaboración, *per sé* del producto, como también en el mantenimiento de los materiales y los equipos que se utilizan en las fábricas independientemente de su naturaleza. Esto deja ver que el sector industrial, el uso del agua es indispensable, empleándose en industrias de elaboración de alimentos hasta en industrias donde se fabrican aparatos eléctricos.

Por lo tanto, se debe considerar la fuente de agua porque de ello depende su calidad y en función a ello se implementa el tratamiento que se requiera adecuado para garantizar la pureza de la misma al utilizarla en el proceso industrial para lo que se requiere.

En el sector agroindustrial, según Muñoz y Sánchez (2016). La pureza del agua influye directamente en la calidad de los alimentos y bebidas que se procesen. Por tal razón, en este rubro se requiere agua potable, óptima para consumo humano, que cumple con los rangos permisibles por las normas.

En este sentido, la importancia de este recurso, de acuerdo con Tinoco (2016) radica en:

- Sus temperaturas de solidificación y de vaporización, le permiten los tres estados (líquido-sólido-gaseoso).
- Es el líquido vital para la vida en el planeta.
- Se encuentra en una gran proporción en los seres vivos.
- Funciona como transportador natural de nutrientes en la naturaleza.
- Es el único medio en el que se llevan a cabo reacciones organo-biológicas.
- De su calidad depende la calidad de los alimentos.
- Ejerce una gran influencia en el desarrollo de la agricultura, de la industria, de las fuentes de energía, etc.
- Gran número de compuestos toman el estado coloidal en su contacto.

### 8.1.4 Usos del agua

Este recurso vital muestra una versatilidad en su uso, atribuido a las características que se le confieren, por lo que Gaya (2018) plantea de manera genérica usos que se describen:

- Industrial: como materia prima, enfriante, solvente, agente de transporte y como fuente de energía.
- Doméstica: Uso público, comercial y residencial, incluyéndose todos los usos domésticos del agua como beber y comer (agua Potable).
- Agricultura: para riego de cultivos y agua que consume la ganadería

- Minería: para separar los minerales de rocas y limpiar los materiales de desecho.

Para la mayoría de estos usos, es de primordial interés controlar la calidad de la misma, ya que ligera variación en el contenido de alguna de las sustancias presentes puede variar sensiblemente sus propiedades y hasta la puede convertir en inservible, en altamente peligrosa para la salud.

El agua constituye una fuente de energía. En la producción de electricidad al girar unas turbinas instaladas en el agua, como medio de transporte, tanto con fines comerciales como turísticos, para la extracción de peces de su hábitat con finalidad alimenticia o deportiva, como ecosistema de fauna y flora, para la práctica de actividades al aire libre y como disolvente para una gran parte de residuos industriales y humanos (Gaya, 2018).

### 8.1.5 Aguas residuales

Se llama agua residual a las aguas utilizadas provenientes de una comunidad, industria, granja u otro establecimiento, con contenido de materiales disueltos y suspendidos. Según Romero (1999), las aguas residuales son los residuos líquidos resultantes de las diferentes actividades que realiza el hombre no aptas para el consumo desde el punto de vista físico, químico y biológico. Por lo tanto, las aguas residuales contienen sustancias químicas y biológicas nocivas para el ser humano generando contaminación que pone en riesgo el equilibrio ecológico y por ende la salud.

Toda el agua que haya sido usada se considera como agua residual, sin embargo, no todas son iguales, ni todas llevan la misma cantidad y calidad de contaminantes, lo que quiere decir que el grado de contaminación es variable. Es decir que en las aguas residuales de origen doméstico se pueden encontrar químicos, que derivan de los jabones, los detergentes, así como también, productos sólidos, algodón, plástico, papel higiénico, entre otros. Por otra parte, en las aguas residuales de origen industrial, se consiguen metales pesados y otro tipo de compuestos catalogados como peligrosos y/o tóxicos.

### 8.1.6 Aguas residuales industriales

Las aguas residuales, son definidas por Seoanez (1995) como los líquidos originados de la actividad antrópica que han alterado el estado natural del agua generando una composición tóxica que es vertida a cuerpos de agua continentales o marinos. Es por ello, que se consideran vertientes que provienen de procesos industriales, es decir, las aguas que han sido utilizadas en los diversos procesos de fabricación, producción o manejo industrial y que para ser desechadas según Martí (2008) necesitan ser tratadas previamente, de manera tal que puedan ser adecuadas para su ubicación en las respectivas redes de

vertido, depuradoras o sistemas naturales, tales como lagos, ríos, embalses, entre otros.

Los agentes contaminantes que predominan en estas aguas residuales son los que se presentan a continuación, según Pariente (2017):

Residuos de animales y vegetales: Carne, huesos, pelos, fibras vegetales, etc. Materias en suspensión procedentes de arrastres y lavado: Tierra, arena, arcilla, partículas insolubles. Productos putrescibles: Grasas, azúcares, dextrinas, proteínas, fermentos, alpechines. Materias en disolución diversas: Sales disueltas, plaguicidas en mayor o menor cantidad según su solubilidad en agua, entre otros (p.3).

Existen diferencias en las etapas de producción de las industrias lo cual es independiente en cada proceso, lo cual hace que los niveles de agua también sean diferentes, aunque puedan existir operaciones similares en algunos procesos. De manera general, se incluyen las siguientes etapas en el proceso industrial: lavado de la materia prima, eliminación de la parte no comestible, preparación del producto y el envasado.

En la industria agroalimentaria, según Pariente (2017) el proceso se clasifica en las siguientes categorías: agua sanitaria, agua de enfriamiento y calderas, y agua de proceso. Ahora bien, el agua del proceso, involucra todas las actividades operarias que incluyen materia prima para obtener el producto final, es decir el lavado de la materia prima y los equipos, de igual manera, el manejo de las sustancias químicas y compuestos que se implementen para la elaboración del producto. En cuanto al agua de enfriamiento, se implementa en los equipos de refrigeración.

### **8.1.7 Aguas residuales de la industria láctea**

A nivel mundial la industria láctea, tiene como principal labor la producción de leche y a la elaboración de quesos, yogures y mantequillas entre otros productos, genera una gran cantidad de agua residual producto de las mismas actividades. Muchos de estos efluentes residuales se producen por fugas y derrames de materias primas, durante las limpiezas de los equipos de proceso (tanques, pasteurizadores, tinas de cuajo, entre otros), en el lavado de superficies (suelos y paredes) y en el vertido de las salmueras agotadas.

Los efluentes procedentes de las industrias procesadoras de productos lácteos se caracterizan por ser de naturaleza orgánica (Figura 4), al igual que el resto de los efluentes agroindustriales. Los efluentes lácteos poseen una alta demanda biológica de oxígeno (DBO) y demanda química de oxígeno (DQO), oscilando entre 0,8 y 7 g/L. Estas concentraciones representan un elevado contenido orgánico y además indican que poseen altas concentraciones de sólidos disueltos y/o suspendidos, que incluyen grasas, aceites y nutrientes tales como



nitrógeno, fósforo y compuestos inorgánicos o inertes (Elakkiya y Matheswaran, 2013), todos estos contaminantes normalmente superan los límites máximos de descarga permitidos en la normativa ambiental y deben ser removidos antes de su disposición final (Gaibor-Chávez, 2014).

Las aguas residuales de la industria láctea presentan pH muy variables, se caracterizan por ser neutras o ligeramente alcalinas cuando son frescas (recién producidas), pero como contiene azúcares de la leche en su composición, al fermentarse se produce una acidificación muy rápida del agua residual, descendiendo el pH a 4,5 -5,0 por la formación de ácido láctico, principalmente (Tirado *et al.*, 2016). Esta variación debe ser tomada en cuenta al momento de realizar el tratamiento de depuración de estos efluentes industriales.

**Figura 4.** Características de las aguas residuales de la industria láctea

Parámetros	Kushwaha, Srivastava, y Mall, (2010b)	Torres, Rodríguez, y Uribe, (2003)	Arango y Sanches, (2009)	Santamaría, Álvarez, Díaz, y Zamora (2015)	Normatividad colombiana, Resolución 631 de 2015
pH	6,3 - 6,8	4,7	7,6	4,74	6,0-9,0
DQO (mg/L)	3900	-	24813	18400	900
DBO (mg/L)	2300	3300	-	12500	450
DQO/DBO	1,69		-	1,47	2
Sólidos totales (mg/L)	3090	3030	40827	36,620	200
Sólidos volátiles (mg/L)	2810	-	18164	4,848	-
Sólidos totales fijos (mg/L)	280	-	-	4,848.	5
Turbidez	1744	-	-	3921	5
Conductividad (S/cm)	220	-	-	7820	50-1000
Cloruro (mg/L)	31	-	-	101,9	0,5
N total (mg/L)	113,18	191	636	104,4	10

**Fuente:** Tirado et al. (2016)

Las aguas residuales provenientes de la industria láctea contienen lactosa, proteínas, grasas y sales. Esto hace que sean efluentes ricos en nutrientes (nitrógeno y fósforo) y que además posean gran cantidad de materia orgánica. La elevada concentración de DQO de aguas residuales de la industria láctea es atribuible a la presencia de materia grasa, por lo que se recomienda el uso de un pretratamiento (trampa de grasa) para removerla y lograr con esto, que sea más eficiente el tratamiento de depuración (Tirado et al., 2016). A su vez, diversos autores coinciden en señalar que el efluente de la industria láctea es de naturaleza biodegradable o medianamente biodegradable, es decir, la relación  $DBO_{5,20}/DQO$  puede oscilar entre 0,5-0,8, significando que una fracción importante de materia orgánica es susceptible a ser removida a través de tratamientos biológicos (Kolev Slavov, 2017; Chen et al., 2018).

Según Tetra Pak (1996), las aguas residuales de la industria láctea se pueden dividir en tres categorías, según su procedencia en:

- Agua de enfriamiento: Agua utilizada para los bancos de hielo normalmente está libre de contaminante, generalmente se descarga en colectores de aguas pluviales.
- Aguas residuales sanitarias: Generalmente se recogen en colectores que van directamente a la planta de tratamiento de aguas residuales con mezcla inicial o no con las aguas residuales industriales.
- Aguas residuales industriales: Estas aguas proceden del reboce de leche y productos, y de la limpieza de los equipos que han estado en contacto con los productos lácteos. La concentración y la composición de estas aguas residuales dependen del plan de producción, de los métodos de operación y el diseño de la planta de procesos.

El volumen de agua residual producida en la industria láctea es abundante debido a que el proceso productivo es húmedo y se requiere un gran volumen para la limpieza/higienización de las áreas y equipos. Se estima que por unidad de leche procesada se consume entre 0,2 a 10 L de agua por cada litro de leche producida. Esta variación tan amplia depende principalmente del tipo de tecnología aplicada (Gaibor, 2014; Chen et al., 2018). Los puntos donde se producen los volúmenes mayores de agua residual son en las etapas de pasteurización, homogeneización de la leche líquida y elaboración de productos lácteos tales como mantequilla, queso, leche en polvo, entre otros (Tirado et al., 2016).

La mayoría del agua se utiliza para la limpieza de los equipos e instalaciones donde se fabrican los productos lácteos, En la limpieza se utiliza solución cáustica (hidróxido de sodio) para lavado, enjuague con agua, solución ácida (ácido fosfórico o nítrico) para lavado y, finalmente, hipoclorito de sodio como desinfectante. Estos productos químicos, eventualmente, se convierten en una parte de las aguas residuales (Arango y Sánchez, 2009). Es por esta razón que los efluentes lácteos tienen, adicionalmente, en su composición sustancias químicas, como detergentes, bases, desinfectantes, aguas de salmueras que provienen del proceso de limpieza e higienización de los equipos, maquinarias, laboratorios, zonas de procesamientos, cuartos de maduración, entre otros (Gaibor, 2014; Tirado, et al., 2016)

A pesar de ser volúmenes muy elevados de efluentes residuales, se debe resaltar que la mayoría de los contaminantes no son de naturaleza tóxica, ni peligrosa, son contaminantes comunes (carbono, nitrógeno, fósforo), pero que deben ser removidos antes de ser descargados, debido a que tienen el efecto de consumir el oxígeno disuelto de los cuerpos de agua naturales, así como también

son contaminantes que favorecen la eutrofización de los cuerpos de agua, aspectos que definitivamente son muy negativos sobre el ambiente y deben evitarse (Gaibor, 2014; Tirado et al., 2016; Kolev Slavov, 2017).

Gaibor (2014) y Chen et al. (2018) señalan que los efluentes que provocan más contaminación son los sueros que contienen gran cantidad de lactosa y proteínas, resultados del proceso de obtención de quesos y mantequilla. Independientemente, de la etapa del proceso productivo o del tipo de producto lácteo que se fabrique es una realidad que estos tipos de efluentes requiere tratamientos especializados para cumplir con las normas de descarga de efluentes y para reducir el riesgo de problemas ambientales de ríos, lagos y aguas costeras (Aydiner et al., 2014).

### 8.1.8 Tratamiento de aguas residuales

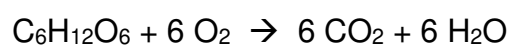
Consiste en una serie de procesos físicos, químicos y biológicos que tienen como finalidad la eliminación de los contaminantes físico-químicos y biológicos presentes en el agua efluente del uso humano. El objetivo del tratamiento es producir agua limpia (o efluente tratado) o reutilizable en el ambiente y un residuo sólido o fango (también llamado biosólido o lodo) convenientes para su disposición o reúso, para proteger la salud, el ambiente y promover el bienestar de los individuos miembros de la sociedad.

El efluente líquido de la industria de lácteos presenta como principales contaminantes aceites y grasas, sólidos suspendidos, DQO, DBO, nitrógeno amoniacal y nitrógeno total Kjeldahl (NTK). El azúcar constituyente de la leche denominada lactosa es uno de los principales aportantes de DBO en los procesos productivos. Adicionalmente, el agua contaminada proveniente de la industria (Ril) presenta variaciones significativas en pH y temperatura durante el día. El Ril es un aportante de nutrientes (fósforo y nitrógeno), lo cual obliga a evaluar su impacto sobre los cuerpos superficiales (Santiago, 1998).

#### 8.1.8.1 Demanda teórica de oxígeno

Es la que corresponde a la cantidad estequiométrica de oxígeno necesaria para oxidar completamente un determinado compuesto. La cual es expresada por Ramírez y Duran (2008):

Es la cantidad teórica de oxígeno requerida para transformar completamente la fracción orgánica de aguas residuales en gas carbónico (CO<sub>2</sub>) y agua (H<sub>2</sub>O). Así, la ecuación para la oxidación de la glucosa es:



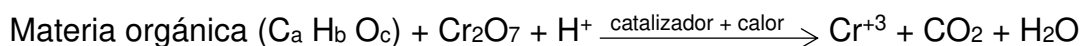
El peso molecular de la glucosa es igual a  $6 \times 12 + 12 \times 1 + 6 \times 16 = 180$ .

El peso molecular el oxígeno es  $6 \times 2 \times 16 = 192$ . Puede estimarse que la DTeO de una solución de 300 mg/L de glucosa corresponde a 320 mg/L, es decir,  $192 / 180 + 300 \text{ mg/L}$  (p.124).

La DTeO en la práctica no puede calcularse; sin embargo, es aproximadamente igual a la DQO, siempre dependiendo de la naturaleza del contaminante presente en el agua residual en estudio.

### 8.1.8.2 Demanda química de oxígeno, DQO

Es una medida indirecta del contenido de materia orgánica e inorgánica oxidable, mediante el uso de un fuerte oxidante en una muestra de agua. Sus unidades son miligramos de oxígeno disuelto por litro (mg O<sub>2</sub>/L). La reacción química dada es la siguiente:



La DQO resulta siempre mayor al valor de la DBO debido al mayor número de compuestos que se oxidan por vía química que en comparación por vía biológica. (Ramírez y Duran, 2008).

### 8.1.8.3 Demanda bioquímica de oxígeno, DBO

Es una medida indirecta del contenido de materia orgánica (M.O.) biodegradable, expresada mediante la cantidad de oxígeno necesaria para oxidar biológicamente la materia orgánica en una muestra de agua, a una temperatura estandarizada de 20°C. Si la medición se realiza al quinto día el valor se conoce como DBO<sub>5</sub>, mientras que, si ésta es tomada luego de que la muestra se ha estabilizado, el valor obtenido se conoce como DBO. Sus unidades son miligramos de oxígeno disuelto por litro (mg O<sub>2</sub>/L) (Ramírez y Duran, 2008).

Se han establecido relaciones entre los parámetros convencionales que permiten estimar relaciones de biodegradabilidad, la más común es la relación DBO<sub>5,20</sub>/DQO, que indica la cantidad de la DQO de un vertido que es susceptible a ser depurada por los microorganismos en 5 días a una temperatura de 20°C (Ahn y col., 1999; INESCOP, 2008). Por tanto, aguas residuales con baja relación de biodegradabilidad indica que parte de la materia orgánica será difícil de degradar biológicamente (Henze y Comeau, 2008). Según esto, la biodegradabilidad de los efluentes se clasifica entre muy biodegradables hasta no biodegradables lo cual se puede observar en la Tabla 1.

**Tabla 1.** Clasificación de la biodegradabilidad en aguas residuales

Relación de biodegradabilidad (DBO <sub>5,20</sub> <sup>1</sup> /DQO <sup>2</sup> )	Carácter del efluente
> 0,8	Muy biodegradable
0,7-0,8	Biodegradable
0,3-0,7	Poco biodegradable
< 0,3	No biodegradable

*Nota:* <sup>1</sup>DBO<sub>5,20</sub> Demanda bioquímica de oxígeno incubada durante 5 días y a 20°C. <sup>2</sup>DQO: Demanda química de oxígeno. Fuente: Elaboración propia.

#### 8.1.8.4 Sólidos sedimentables

Son sólidos que, por acción de la gravedad, pueden separarse de la fase líquida si se dejan en reposo por un tiempo, ya que estas partículas suspendidas poseen peso específico mayor que el del agua. La sedimentación es una de las operaciones unitarias más utilizadas en el tratamiento de las aguas residuales (Romero, 2002).

#### 8.1.8.5 Nitrógeno total Kjeldahl (NTK)

Es un nutriente esencial para el crecimiento de protistas y plantas, además son necesarios para el tratamiento biológico y debe tomarse en cuenta su concentración en el agua de residual a verter. Está compuesto por el nitrógeno amoniacal más el nitrógeno orgánico, y este está constituido por las formas de nitrógeno correspondientes al nitrato, nitrito y amonio (Romero, 2002).

#### 8.1.8.6 Grasas y aceites

Son definidas como cualquier material recubierto con una sustancia soluble a través de un solvente, tales como: compuestos de sulfuro, ciertos colorantes orgánicos y clorofila, también algunos compuestos no volátiles. Según Romero (2002) "Las grasas y aceites (GA) en un agua de desecho se definen como su concentración en grasas y aceites vegetales y animales" (p.43).

#### 8.1.8.7 Fósforo total

El fósforo generalmente se encuentra en aguas naturales, residuales y residuales tratadas como fosfatos. Éstos se clasifican como ortofosfatos, fosfatos condensados y compuestos organofosfatados. Estas formas de fosfatos provienen de una gran cantidad de fuentes, tales como productos de limpieza, fertilizantes, procesos biológicos, etc. El fósforo por ser un nutriente que aporta al desarrollo de los organismos, sus descargas pueden estimular el crecimiento no controlado de organismos fotosintéticos (Romero, 2002)

#### **8.1.8.8 Sulfatos**

Los sulfatos se encuentran en las aguas naturales en un amplio intervalo de concentraciones. Los efluentes industriales contienen grandes cantidades de sulfatos provenientes de la oxidación de la piritita y del uso del ácido sulfúrico.

#### **8.1.8.9 Detergente**

Es una sustancia tensoactiva y anfipática que tiene la propiedad química de disolver la suciedad o las impurezas de un objeto sin corroerlo. Los detergentes producen espumas y añaden fosfato al agua (eutrofización). También interfieren en los procesos de floculación y sedimentación en las estaciones depuradoras y alteran las actividades de las bacterias (Romero, 2002).

#### **8.1.8.10 Temperatura**

La temperatura del agua residual es por lo general mayor que la temperatura del agua para el abastecimiento debido a la incorporación de agua caliente que se utiliza en los procesos de la empresa (Romero, 2002).

### **8.1.9 Tratamientos de las aguas residuales de la industria láctea**

Los tratamientos de las aguas residuales de la industria láctea incluyen la aplicación de métodos físicos/mecánicos, fisicoquímicos y biológicos, también se han probado los electroquímicos, enzimáticos y membranas. Se considera necesario un tratamiento físico/mecánico para homogenizar el caudal, igualar la carga volumétrica y amortiguar los cambios de flujo de masa. También con tratamientos físicos se reduce parte del contenido de sólidos suspendidos.

Por su parte, en los procesos fisicoquímicos se usan las fuerzas naturales como la gravedad y se adicionan sustancias químicas que complementan el tratamiento. Los tratamientos fisicoquímicos de las aguas residuales de la industria láctea son eficaces en la eliminación de compuestos emulsionados, pero la adición de reactivos químicos aumenta los costos de tratamiento de las aguas, además los subproductos producidos por los métodos fisicoquímicos producen una contaminación secundaria que debe ser atendida oportunamente. Otra desventaja es la muy baja eliminación de la demanda química de oxígeno soluble (DQO soluble) (Kolev Slavov, 2017).

Finalmente, entre las opciones convencionales de tratamiento de efluentes lácteos están los sistemas biológicos en los que por acción de los microorganismos se logra la remoción de contaminantes, principalmente los



orgánicos por vía metabólica, pero también actúan procesos físicos como la sedimentación (Metcalf & Eddy, 1995). Por lo tanto, para el tratamiento de las aguas residuales provenientes de la industria láctea se prefieren los sistemas de tratamiento biológicos debido a la alta biodegradabilidad de los contaminantes que posee. Su relación de biodegradabilidad oscila entre 0,52-0,80 haciéndolos efluentes que pueden ser tratados adecuadamente por vía biológica (Chen et al., 2018; Valizadeh y Davarpanah, 2019).

Se han reportado experiencias exitosas de uso de tratamientos biológicos para las aguas residuales de la industria láctea, uno de los sistemas más utilizados se basa en procesos anaeróbicos donde se remueve de manera eficiente la DQO y DBO, pero pueden quedar remanentes los nutrientes en el efluente tratado, así mismo se ha demostrado que sistemas que usan reactores por carga secuencial (SBR) son eficientes en la remoción de los contaminantes comunes de los efluentes lácteos (C, N, P). Otros sistemas biológicos que se han usado con éxito son los humedales artificiales, micro-foto reactores donde las algas ejercen la acción de purificación de las aguas residuales lácteos. El uso de microalgas en comparación con los métodos mencionados, además de reducir los costos del tratamiento en gran medida, también son muy eficientes en la remoción de DQO, nutrientes y en la reducción de los factores que causan enfermedades (Valizadeh y Davarpanah, 2019).

Los beneficios de los tratamientos fisicoquímicos han sido evaluados y se ha demostrado su eficiencia como pretratamientos de las aguas residuales lácteas previo a la aplicación del tratamiento secundario central basado en sistemas biológicos. Particularmente, los pretratamientos de precipitación, sedimentación por gravedad y/o asistida son los tratamientos previos que incrementan la eficiencia de depuración de estos efluentes industriales. Pretratamientos fisicoquímicos basados en la coagulación o precipitación alcalina podría permitir la aplicación de tratamientos de biodegradación aeróbica sin que sea necesaria realizar ninguna dilución previa. Tirado et al. (2016) señalan que resulta económicamente favorable separar las grasas de las aguas residuales lácteas mediante el uso de trampas de grasa antes de la aplicación del tratamiento secundario de depuración, con esto se removería una importante fracción de la DQO del agua residual. Otro pretratamiento efectivo consiste en la precipitación química con cal o NaOH ya que produce un agua residual limpia y genera lodos ricos en materia orgánica y nutrientes como el nitrógeno y el fósforo (Carvalho et al., 2013).

En el tratamiento de aguas residuales, cuyo objetivo principal es eliminar la contaminación antes de su vertido al cauce receptor, se generan una serie de subproductos denominados lodos o fangos, donde se concentran los contaminantes que fueron removidos del agua residual, y cuyo tratamiento y evacuación puede ser problemática (Gaibor, 2014). El uso de los lodos

biológicos, resultantes del tratamiento de las aguas residuales, es prometedor para ser empleados en la agricultura como abonos o enmiendas orgánicas, enriqueciendo los suelos e incrementando la producción de los cultivos, adicionalmente, implementando esta práctica se favorece el sistema de descarga cero (Carvalho, Prazeres y Rivas, 2013). Existe también el lodo que resulta del pretratamiento de las aguas residuales cuando se usaron coagulantes químicos, a pesar de que pudieran ser lodos con alto valor nutricional para los suelos, siempre se debe evaluar el contenido de sustancias químicas que pudieran tener presentes antes de incorporarlos a los suelos.

### **8.1.10 Procesos necesarios para el tratamiento de las aguas residuales**

#### **8.1.10.1 Recepción y envío de efluentes**

Los efluentes de las industrias son dispuestos separadamente en dos líneas constituidas por efluentes de origen doméstico (baños, comedor) y efluentes de proceso.

La recepción y envío de efluentes consiste en la interconexión de la descarga a un sistema de bombeo del cual se envían los efluentes a la planta de tratamiento mediante bombas, las cuales se controlan automáticamente mediante un sensor de nivel. Debido a las fluctuaciones de flujo en el sistema de bombeo, el flujo de la descarga es regulado mediante una válvula de control, la cual recibe señal de nivel. Esto evita que en los periodos de bajo flujo las bombas paren y arranquen constantemente. Por lo tanto, la carga hidráulica del sistema de tratamiento estará constituida por la que generan esos dos efluentes: los industriales y los domésticos.

#### **8.1.10.2 Pretratamientos y Tratamientos Primarios**

Los pretratamientos de aguas residuales implican la reducción de sólidos en suspensión o el acondicionamiento de las aguas residuales para su descarga bien en los receptores pertenecientes al tratamiento primario, en el cual se elimina un gran porcentaje de sólidos sobrenadantes y materia inorgánica. En este nivel se hace sedimentar los materiales suspendidos usando tratamientos físicos o fisicoquímicos. Algunos tratamientos primarios son:

- Cribado: También llamado desbrozo, se emplea para la reducción de sólidos en suspensión de tamaños distintos. La distancia o abertura de las rejillas dependen del objeto de las mismas, y su limpieza se hace bien manualmente o mecánicamente. Los productos recogidos se destruyen por incineración, o se tratan por procesos de digestión anaerobia, o se dirigen directamente al vertedero.



- Tamizado: Elimina los sólidos gruesos antes de la entrada a la planta depuradora.

- Tanques de sedimentación: Se suelen emplear para aquellas industrias lácteas que generen una gran cantidad de sólidos en suspensión.

- Homogeneización y neutralización: Este proceso suele ser imprescindible en la industria láctea, ya que al generarse durante los lavados aguas muy acidas o muy alcalinas, podría provocar un vertido que impidiese cualquier tratamiento biológico posterior, además de incumplir los valores legales. Por ello se suelen instalar tanques de tiempo de retención grande en los cuales se mezclan las aguas acidas y alcalinas procedentes de la factoría, produciéndose una neutralización natural. En ocasiones esto no es suficiente para neutralizar los vertidos, por lo que se suelen emplear sistemas automáticos de adición de ácido o álcali en función del pH del efluente.

Las ventajas del sistema de homogeneización e igualación son las siguientes:

- Aumenta las características de trazabilidad del agua residual.
- Mejora del tratamiento biológico debido a la eliminación o disminución de los efectos causados por cargas bruscas a causa de la dilución de sustancias inhibitoras y estabilización del pH.
- Mejora de la calidad del efluente y del rendimiento de los tanques de sedimentación secundaria al trabajar a cargas de solidas constantes.
- Disminución de las superficies necesarias en la filtración del efluente, mejora el rendimiento de los filtros y posibilidad de obtención de ciclos de lavados más uniformes.
- Mejora el control de la dosificación de reactivos y la fiabilidad del proceso de tratamiento químico.

- Sedimentación: Se utiliza en los tratamientos de aguas residuales para separar sólidos en suspensión de las mismas. La eliminación de las materias por sedimentación se basa en la diferencia de peso específico entre las partículas sólidas y el líquido donde se encuentran, que acaba en el depósito de las materias en suspensión.

En algunos casos la sedimentación es el único tratamiento al que se somete el agua residual. Esta puede producirse en una o varias etapas o en varios de los puntos del proceso de tratamiento. En una planta típica de lodos activos, la sedimentación se utiliza en tres de las fases del tratamiento: 1) en los desarenadores, en los cuales la materia inorgánica (arena, a veces) se elimina del agua residual; 2) en los clarificadores o sedimentadores primarios, que preceden al reactor biológico, y en el cual los sólidos (orgánicos y otros) se separan; 3) en los clarificadores o sedimentadores secundarios, que siguen al reactor biológico, en los cuales los lodos del biológico se separan del efluente tratado.

Este proceso de sedimentación puede realizarse en diversos tipos de sedimentadores entre los cuales se encuentran:

- Sedimentación discreta: las partículas que se depositan mantiene su individualidad, es decir, no se somete a un proceso de coalescencia con otras partículas. En este caso las propiedades físicas de las partículas (tamaño, forma, peso específico) no cambian durante el proceso. La deposición de partículas de arena en los desarenadores es un ejemplo típico de sedimentación discreta.
- Sedimentación con floculación: la aglomeración de las partículas va acompañada de cambios en la densidad y en la velocidad de sedimentación o precipitación. La sedimentación que se lleva a cabo en los clarificadores o sedimentadores primarios es un ejemplo de este proceso.
- Sedimentador por zonas: las partículas forman una especie de manta que sedimenta como una masa total presentando una interface distinta con la fase líquida. Ejemplo de este proceso incluyen la sedimentación de lodos activos en los clarificadores secundarios.
- Flotación: Es un proceso para separar sólidos de baja densidad o partículas líquidas de una fase líquida. La separación se lleva a cabo introduciendo un gas (normalmente aire) en la fase líquida, en forma de burbujas. La fase líquida se somete a un proceso de presurización para alcanzar una presión de funcionamiento que oscila entre 2 y 4 atm., en presencia del suficiente aire para conseguir la saturación en aire del agua. Luego este líquido saturado de aire se somete a un proceso de despresurización llevándolo hasta la presión atmosférica por paso a través de una bomba reductora de presión.

En esta situación, y debido a la despresurización se forman pequeñas burbujas de aire que se desprenden de la solución. Los sólidos en suspensión o las partículas líquidas (por ejemplo, aceites) flotan debido a que estas pequeñas burbujas, asociándose a los mismos, les obligan a elevarse hacia la superficie. Los sólidos en suspensión concentrados pueden separarse de la superficie por sistemas mecánicos. Las burbujas de aire se añaden o se induce su formación por alguno de los métodos siguientes:

Inyección de aire mientras el líquido se haya bajo presión, seguido de la liberación de la presión (flotación por aire disuelto).

Aireación a presión atmosférica (flotación por aire).

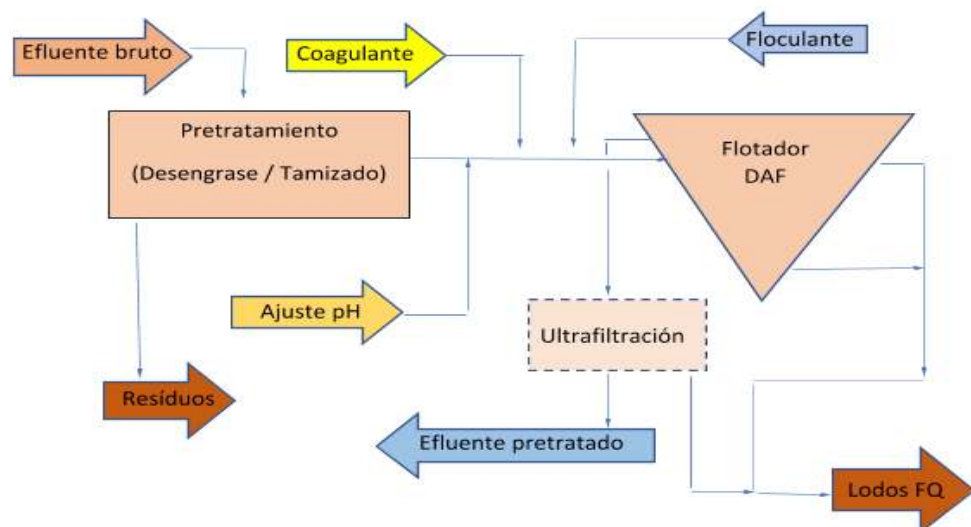
Saturación con aire a presión atmosférica, seguido de aplicación de vacío al líquido (flotación por vacío).

Las ventajas de un sistema de flotación por aire disuelto son las siguientes:

- Se retiran en una sola unidad la grasa y sólidos ligeros que se elevan a la superficie y la arena y sólidos pesados que se depositan en el fondo.

- Es posible emplear altas cargas superficiales y periodos cortos de retención, lo que significa que el tamaño de los tanques es menor y hay unas necesidades menores de espacio, así como posibles ahorros en los costos de construcción.
- Son mínimas las molestias por olores a causa de los cortos periodos de retención y en las unidades de presión y aireación por la presencia de oxígeno disuelto en el efluente.
- Son más densos en muchos casos las espumas y fangos obtenidos de una unidad de flotación que en una unidad de sedimentación por gravedad y limpieza superficial.

**Figura 5.** Pretratamiento de aguas residuales en industria lechera



**Fuente:** Tuset (2013)

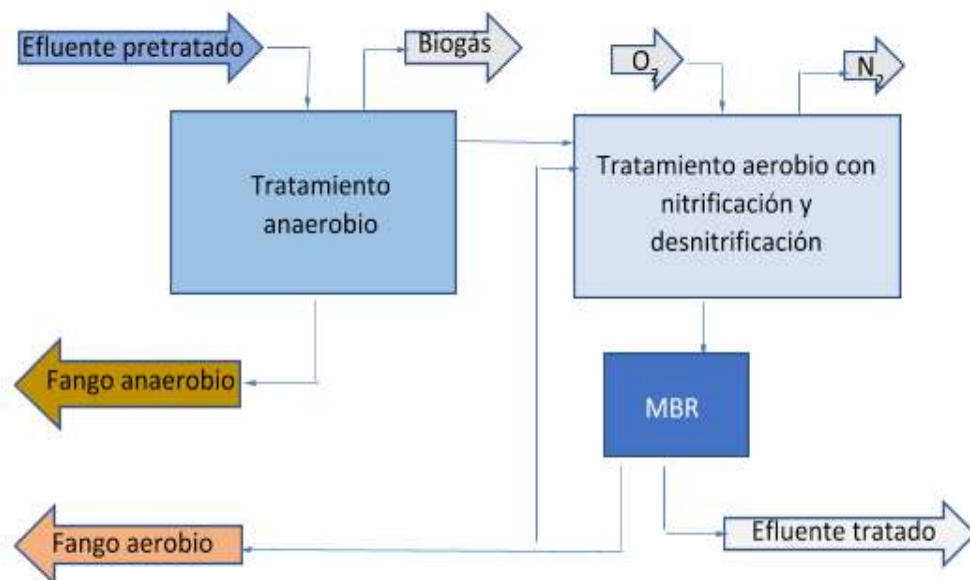
El pretratamiento explicado en los párrafos precedentes se esquematiza en la figura 5, y se desarrolla dependiendo de las concentraciones de los contaminantes que inhiben el proceso biológico, en tal sentido, se aplican tratamientos físico o fisicoquímico. Es importante resaltar que no es suficiente un sistema básico de control y pretratamiento, aunque en ocasiones se cumpla con los parámetros permisibles por los cuerpos legales, en cuanto a los vertidos y los límites permisibles

- Tratamiento Secundario o biológico: Esta etapa del tratamiento se basa en reducir el contenido en materia orgánica acelerando los procesos biológicos naturales. En esta fase del tratamiento se eliminan las partículas coloidales y similares. Puede incluir procesos biológicos y químicos. El tipo de tratamiento

más empleado es el biológico, en el que se facilita que bacterias digieran la materia orgánica que llevan las aguas.

Este proceso se suele hacer llevando el efluente que sale del tratamiento primario a tanques en los que se mezcla con agua cargada de microorganismos. En el caso de los procesos aeróbicos, estos tanques tienen sistemas de burbujeo o agitación que garantizan condiciones aerobias para el crecimiento de los microorganismos. Posteriormente, se conduce este líquido a tanques cilíndricos, con sección en forma de tronco de cono, en los que se realiza la decantación de los lodos. Separados los lodos, el agua que sale contiene muchas menos impurezas

**Figura 6.** Tratamiento secundario: Anaerobio – biológico con nitrificación y desnitrificación + MBR. Fuente



**Fuente:** Tuset (2013)

La figura 6 muestra el tratamiento secundario: Anaerobio – biológico con nitrificación y desnitrificación + MBR. En el que es importante recalcar que dicho proceso tecnológico implica un mínimo consumo de nutrientes, por lo que el nitrógeno consumido en la depuración también es mínimo. Ahora bien, es recomendable si el aporte es alto es necesario implementar un proceso nitrificación-desnitrificación que contribuye a disminuir la DQO para alcanzar los rangos permisibles del vertido.

- **Tratamientos Aeróbicos:** Son los tratamientos habitualmente empleados, siendo el proceso de fangos activados el utilizado normalmente. Se basan en la descomposición de la materia orgánica por los microorganismos en presencia de

oxígeno. Son sistemas adaptables a una gran variedad de vertidos y bastantes flexibles, obteniéndose, si la explotación es adecuada, muy buenos resultados.

No obstante, tienen esencialmente dos inconvenientes importantes, como es la generación de una gran cantidad de lodos y el importante gasto energético para proporcionar el oxígeno necesario para la fermentación. Los lodos generados suponen un residuo sólido de grandes dimensiones.

Normalmente suele ser retirado por las empresas municipales de residuos y van a vertedero, aunque en la actualidad se está estudiando su uso como abono después de diversos tipos de tratamiento. El oxígeno se suele aportar mediante turbinas aireadoras en superficie o mediante difusores de oxígeno situados en el fondo del reactor biológico.

El tratamiento biológico ha mostrado ser efectivo para remover la materia orgánica, nutrientes y ciertas trazas de sustancias tóxicas presentes en las aguas residuales (Ozturk et al., 2019). El proceso consiste en que por acción de los microorganismos se logran remover los contaminantes. La materia orgánica es convertida a formas más estables ( $\text{CO}_2$  y  $\text{H}_2\text{O}$ ) o es utilizada para el crecimiento y reproducción de más microorganismos. Este grupo de microorganismos conforman lo que se conoce como lodo activado o biomasa compuesto mayoritariamente por bacterias, protozoos, rotíferos y hongos (Metcalf y Eddy, 1985).

Dentro de los tratamientos biológicos se puede mencionar el de lodos activados no convencional basado en la tecnología de los reactores por carga secuencial (SBR) Son reactores discontinuos que funcionan por lotes. En su interior contiene biomasa que está aclimatada o acondicionada para trabajar con el tipo de efluente que se va a tratar. El reactor se alimenta de manera cíclica y en su interior ocurre la mezcla, aireación y clarificación del agua residual con la biomasa (EPA, 1999).

Tratamiento terciario: El tratamiento terciario proporciona una etapa final para aumentar la calidad del efluente al estándar requerido antes de que éste sea descargado al ambiente receptor (mar, río, lago, campo, entre otros.). Más de un proceso terciario del tratamiento puede ser usado en una planta depuradora de aguas residuales. Si la desinfección se practica siempre en el proceso final, es siempre llamada pulir el efluente.

Entre las etapas de este tratamiento se encuentran filtración, desinfección, remoción avanzada de nutrientes, color, turbidez, entre otros. Particularmente, para el tratamiento del efluente de la industria láctea interesa la el postratamiento para la desinfección.

### 8.10.11 Desinfección del agua residual

Según la EPA (2004), la desinfección es considerada como el principal mecanismo para la desactivación o destrucción de organismos patógenos con el fin de prevenir la dispersión de enfermedades transmitidas a través del agua, tanto a los usuarios aguas abajo como al ambiente. La desinfección se consigue al provocar una alteración en los mecanismos celulares de los organismos (daños en la pared celular, alteración de la naturaleza coloidal del protoplasma o inhibición de la actividad enzimática). Es muy importante que el agua residual sea tratada adecuadamente antes de realizar las actividades de desinfección para que la acción de cualquier desinfectante sea eficaz.

Para realizar la desinfección se pueden utilizar métodos físicos o químicos, siendo los rayos UV y el cloro los más empleados. Entre los factores que afectan a la eficiencia de la desinfección se encuentra el tipo y la concentración de microorganismos, la naturaleza y concentración del desinfectante y el tiempo de contacto, la temperatura, el pH y el contenido en materia orgánica.

La EPA (2004) define al cloro como el desinfectante más usado para el tratamiento del agua residual doméstica porque destruye los organismos a ser inactivados mediante la oxidación del material celular. El cloro puede ser suministrado en muchas formas que incluyen el gas cloro, las soluciones de hipoclorito y otros compuestos clorinados en forma sólida o líquida. El hipoclorito de calcio  $\text{Ca}(\text{ClO})_2$  es mucho más caro que el cloro líquido  $(\text{Cl})_2$  pero, requiere equipos más sencillos y económicos y, es mucho más seguro de usar (Perruolo, 2010).

## 8.2 Marco legal

El ámbito ambiental es de relevancia especial para la política exterior de Colombia. Desde la realización de la conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo o Cumbre de la Tierra de Janeiro en el año 1992, el posicionamiento internacional de Colombia, en este campo, ha cobrado auge de manera progresiva. La gran y diversa riqueza de recursos naturales del país lo ubican en una posición privilegiada y la posicionan a consolidar una política de preservación y recuperación ambiental, a su vez incurren diligentemente en el modelo de desarrollo de la nación y en las relaciones con otros países.

Todo esto enmarcado en una concepción ecodesarrollista como lo es la filosofía del desarrollo sostenible con incidencias contundentes en el plano político, económico y social. Desde esta perspectiva, Colombia responde a los lineamientos de la Convención Marco de las Naciones Unidas para el Cambio Climático y el Convenio sobre Diversidad Biológica con el objetivo de equilibrar la densidad de gases de efecto invernadero en la atmósfera a un grado que contenga y no permita que el clima se afecte.



Desde este contexto, Colombia busca la protección de sus recursos naturales y el mantenimiento del equilibrio ecológico, lo cual repercute en la calidad de vida y el en desarrollo económico del país. En este caso particular se refiere la normativa para la gestión del recurso agua, desde la perspectiva de Mira (2015) que se expone en la tabla 1 que se presenta a continuación y le da argumento legal a la presente investigación.

En cuanto al marco legal que rige la actividad industrial en relación al tratamiento de las aguas residuales y los parámetros que están estandarizados con respecto a la generación de los vertimientos, de manera tal que las industrias puedan revisar sus procesos y ajustarlos en los casos de ser necesario para evitar daños al ambiente que además les acarrearán sanciones.

Partiendo de lo anterior se dispone en Colombia de la *Norma de Vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público* que tiene el propósito de disminuir y controlar las sustancias contaminantes en los efluentes que desembocan en los cuerpos de agua naturales, así como a las alcantarillas de la ciudad.

De igual manera, en el país cuenta con la resolución 0631 de 2015, orientada en la reducción de las sustancias contaminantes en las aguas naturales y se logre controlar los vertidos que genera el sector productivo. Cabe acotar que dicha resolución reglamenta el artículo 28 del Decreto 3930 de 2010; mediante el establecimiento de los siguientes parámetros:

Delimitó ocho sectores productivos que representan 73 actividades definidas como prioritarias, y 56 parámetros a cumplir por parte de las actividades industriales, comerciales y de servicios del país. Incorpora la diferenciación entre las aguas residuales domésticas (ARD), y las aguas residuales no domésticas (ARND), para claridad de los usuarios en cuanto al cumplimiento de la norma. Expresa los valores límites máximos permisibles de concentración en (mg/l) para un control directo en el vertimiento, en cuanto a mecanismos de medición, a diferencia del Decreto 1594 de 1984, el cual los expresaba en carga contaminante vertida (kg/día) (p.6).

En el caso que atañe a este estudio que es de aguas de usos industrial, puntualmente el tratamiento de aguas residuales, están bien expresado, estableciéndose los rangos permisibles en los efluentes y que servirán de criterio para el diseño de la propuesta de tratamiento primario que se generara de este estudio.

## 9. MARCO METODOLÓGICO

### 9.1 Tipo de investigación

La investigación será descriptiva definida por Arias, (2006) como la caracterización de un hecho o fenómeno para establecer su estructura o comportamiento. Los estudios descriptivos miden de forma independiente las variables, y aun cuando no se formulen hipótesis, las primeras aparecerán enunciadas en los objetivos de investigación.

En el estudio se describirán una serie de análisis fisicoquímicos realizados al agua residual realizados a nivel de laboratorio a partir de la recolección de muestra de las empresas lácteas llamadas "San Jerónimo Cajicá Cabrera" y "Hermanos SAS", ubicadas en la vereda Hato grande del municipio de Cajicá. Para la propuesta del diseño de los equipos necesarios para el tratamiento de los efluentes líquidos de una planta procesadora lácteos, así como también la realización de un estudio técnico para conocer el tamaño óptimo de la planta, su localización, ingeniería del proyecto y análisis administrativo y a partir de esto conocer la factibilidad para la posterior propuesta del diseño.

### 9.2 Unidad de estudio

La unidad de estudio de acuerdo con Supo y Cavero (2014), es el elemento sobre el cual se requiere la información. Se refiere al conjunto de procesos u operaciones que generan cantidad de efluentes líquidos considerables que deberán ser tratados para alcanzar los parámetros establecidos por las normas antes de ser vertidos al alcantarillado municipal.

Para efecto de esta investigación la unidad de estudio estará representada por el agua proveniente de las siguientes etapas de producción: recepción de la leche, estandarización de la leche, tratamientos térmicos, transporte de los productos lácteos y limpieza de circuitos y equipos.

### 9.3 Procedimientos

#### 9.3.1 Origen del agua residual

Se utilizará un agua residual proveniente de las empresas agroindustrial procesadora de productos lácteos llamadas "San Jerónimo Cajicá Cabrera" y "Hermanos SAS", particularmente la proveniente de la elaboración de leche de consumo que ha sido tratada térmicamente (proceso de pasteurización).



### 9.3.2 Medición de caudal y recolección de las muestras

Para medir el caudal se seguirá el procedimiento establecido por IDEAM (2007) para la toma de muestras de aguas residuales. Se usará el método volumétrico manual, empleando el cronómetro y un balde aforado. Se colocará el balde bajo la descarga de tal manera que reciba todo el flujo; simultáneamente se activará el cronómetro. Se medirá el tiempo (t) que tarde en llenarse el balde hasta la línea de aforo (V).

El caudal (Q) se determinará mediante la aplicación de la siguiente fórmula y se expresará en L/s.

$$Q = \frac{V}{t}$$

Para captar el agua residual se utilizará el método muestreo compuesto que consiste en la combinación de muestras puntuales tomadas en el mismo sitio durante diferentes tiempos. Para el caso particular de esta investigación, se realizará con frecuencia de 30 minutos cada toma de muestra por la duración de un turno de trabajo (8 horas). Posteriormente, cada muestra tomada individualmente se mezclará en un balde de acuerdo con la proporción de agua residual producida, generando la muestra compuesta. Cada porción se calculará usando la siguiente fórmula:

$$V_i = \frac{Q_i \cdot V}{Q_p \cdot n}$$

Donde:

$V_i$  = Volumen de cada alícuota.

$V$  = Volumen total de la muestra compuesta

$Q_p$  = Caudal promedio durante la jornada de aforo.

$Q_i$  = Caudal instantáneo de cada muestra simple/original.

$n$  = Número de muestras tomadas

La muestra compuesta será captada en envase de plástico se preservará refrigerada a 4°C o acidificada (pH<2), siguiendo el procedimiento de captación y conservación de muestras establecido en el Método Estándar (SMWW, 2012).

Se realizarán 5 muestreos compuestos del agua residual de la industria que fabrica leche para consumo. Con el muestreo compuesto se realizará la caracterización del agua residual que permitirá diseñar las unidades del tren de tratamiento.

### 9.3.3 Caracterización del agua residual

Para conocer las características del efluente de la industria de fabricación de leche de consumo se realizaron una serie de análisis, siguiendo los procedimientos establecidos en los métodos estándares internacionales (SMWW, 2012). Las variables medidas a los efluentes (Tabla 2) constituyeron los componentes fundamentales de la caracterización convencional.

**Tabla 2.** Variables medidas durante la caracterización de los efluentes lácteos

Variable	Método N°
pH	4500 HB
Conductividad eléctrica	2510-B
Aceites y Grasas	5520-B
Detergentes	5540
DBO <sub>5,20</sub>	5210
DQO	5220-C
Sólidos suspendidos totales	2540 D
Cloruros	4500 Cl <sup>-</sup>
Nitrógeno total Kjeldahl (NTK)	4500-N <sub>org</sub> B
Fósforo total	4500-P E
Coliformes totales (UFC/100 mL)	9221 C-D

**Fuente:** Elaboración propia.

Los análisis se realizarán inmediatamente después de trasladadas las muestras al laboratorio, se procesarán en un laboratorio privado. Se realizarán cinco repeticiones para determinar la caracterización del agua residual procedente de la industria láctea. Los resultados de las variables se evaluarán mediante estadística descriptiva señalando los valores de tendencia central y su dispersión.

Los valores promedios de cada variable analizada en la caracterización serán comparados con los límites máximos permitidos para la descarga establecidos en la normativa ambiental colombiana, de allí se extraerán los contaminantes que deberán ser removidos durante el tratamiento que se propondrá. Estos contaminantes corresponderán a las variables de diseño que se usarán para realizar el predimensionamiento de la planta de tratamiento.

Análisis de laboratorio, todos los procedimientos estarán apegados a la metodología internacional señalada en el Método Estándar (SMWW, 2012), a continuación, solo se realizará una descripción resumida del basamento de cada análisis a realizar:

pH: Método potenciométrico. Se utilizará un pHmetro de mesa que mide la concentración de iones hidrógeno.

Conductividad eléctrica: Método potenciométrico. Se utilizará un conductímetro portátil.

DQO<sub>5,20</sub>: Método de análisis volumétrico. Se realizará una digestión ácida y posteriormente se titulará con solución de sulfato ferroso amoniacal.

DBO: Método de análisis volumétrico. Se medirá oxígeno disuelto por Winkler en el día 0 y día 5 de incubación.

Sólidos suspendidos totales. Método de análisis gravimétrico. Se filtrará la muestra de aguas residuales láctea, el material filtrado se llevará a la estufa a 103-105°C hasta sequedad y se pesará el resultante. Se debe alcanzar el peso constante entre mediciones de peso. La diferencia entre pesadas no debe ser mayor a 0,5 mg.

Aceites y grasas: Método gravimétrico. Se usará el método de Soxlet para extracción de grasas y aceites.

NTK: Método volumétrico. Se realizará una digestión ácida, seguida de una destilación básica y finalmente una titulación con ácido sulfúrico.

NOx-: Método colorimétrico. Para la determinación de los nitritos y nitratos se utilizarán cintas impregnadas con indicadores que permitirán reportar rangos de las concentraciones de cada una de estas formas de nitrógeno.

Fósforo total: Método colorimétrico. Se realizará una digestión ácida de la muestra láctea, luego una filtración y seguido se desarrollará color en la muestra con el reactivo de Vanadato Molibdato. Se medirá en un espectrofotómetro la coloración de cada muestra. Se usará una curva patrón para la determinación de la concentración de fósforo total.

Coliformes totales y fecales. El método utilizado en el análisis microbiológico para el recuento de coliformes fecales se denomina filtración por membrana, basado en el paso de la muestra de agua a través de un filtro de membrana microporosa, en cuya superficie quedan retenidos los microorganismos. Habitualmente se utilizan membranas con poro de 0,45 µm, ya que la mayoría de los microorganismos tienen un diámetro superior a 0,45 µm. Posteriormente, la membrana se incuba sobre un medio de cultivo adecuado, a la temperatura y durante el tiempo (Corpas y Herreras, 2012).

### **9.3.4 Establecimiento de la secuencia de unidades de tratamiento requeridas para depurar el efluente de la industria láctea**

Basado en la caracterización del agua residual de las industrias lácteas se realizará la propuesta de unidades de tratamiento requeridas para remover los

contaminantes de interés del efluente. Se justificará la selección y ubicación de cada unidad en el tren de tratamiento.

### **9.3.5 Evaluar la factibilidad del sistema de tratamiento para los efluentes líquidos a través de un análisis técnico, económico y ambiental**

Se realizará el estudio de factibilidad técnica, económica y ambiental de la propuesta de planta de tratamiento que se diseñará en la presente investigación.

En el aspecto técnico para diseñar una planta de tratamiento se debe determinar el caudal de diseño y las características del agua residual de la industria láctea. En función de las características se determinarán los contaminantes que deben ser removidos y las unidades que deben conformar el sistema de tratamiento. Por su parte, el aspecto ambiental estará marcado por el cumplimiento de las normativas ambientales vigentes para realizar la descarga segura de los efluentes lácteos luego de ser tratados.

#### **9.3.5.1 Factibilidad económica**

Se refiere a los recursos económicos y financieros necesarios para desarrollar o llevar a cabo las actividades o procesos y/o para obtener los recursos básicos que deben considerarse, como el costo del tiempo, el costo de la realización y el costo de adquirir nuevos recursos.

Generalmente la factibilidad económica es el elemento más importante ya que a través de él se solventan las demás carencias de otros recursos, es lo más difícil de conseguir y requiere de actividades adicionales cuando no se posee: Tiempo del analista, costo de estudio, costo del tiempo del personal, costo del tiempo y costo del desarrollo / adquisición.

Para ello se aplicarán las herramientas administrativas y económicas análisis de los costos actuales de producción evaluando los tres criterios del costo, precios actuales de los requerimientos de maquinarias y equipos, entre otras variables de estudio que determinen la viabilidad del proyecto.

Se realizarán los estudios económicos necesarios para conocer si es requerido un financiamiento para lograr la adquisición de los requerimientos para la puesta en marcha del tren de tratamiento y por último se calcularán los valores del TIR y VAN como indicadores económicos para así poder determinar la viabilidad económica del proyecto.

#### **9.3.5.2 Factibilidad técnica**

Consiste en realizar una evaluación de la tecnología existente. Este estudio está destinado a recolectar información sobre los componentes técnicos que posee la organización y la posibilidad de hacer uso de los mismos en el desarrollo e implementación del sistema a proponer y de ser necesario, los requerimientos

tecnológicos que deben ser adquiridos para el desarrollo y puesta en marcha del proyecto.

En este estudio se realizará la evaluación de los elementos de órdenes materiales existentes en la organización del proyecto para conocer la viabilidad de la propuesta. En este caso los elementos están representados por el terreno necesario para la localización del sistema, tamaño del sistema, equipos implicados y su respectiva distribución en el terreno.

### **9.3.5.3 Factibilidad ambiental**

El estudio ambiental, busca identificar, cuantificar y valorar los distintos impactos de un proyecto tanto del corto plazo como del largo plazo, sobre las especies vivas y especies físicas del entorno del proyecto. Asimismo, debe analizar a profundidad de los posibles efectos del entorno sobre el proyecto: en qué manera y en qué medida pueden las características físico-bióticas del entorno afectar el diseño o desarrollo del proyecto.

La cuestión ambiental se ha transformado en un eje transversal en los niveles de planificación y ejecución de proyectos de diferentes magnitudes y objetivos. Dado que todo proyecto en opinión de Coria (2008) genera cambios irreversibles en el ambiente cercano, lo que hace necesario un estudio de factibilidad ambiental que permita medir los impactos (positivos o negativos) de la obra antes a su ejecución.

El presente estudio de factibilidad ambiental analizará los posibles impactos ambientales que puede originar la construcción de un sistema de tratamiento para los efluentes industriales de la empresa de productos lácteos, con la finalidad de evaluar los componentes físicos y biológicos que se puedan ver afectados por el sistema.

El estudio ambiental se enfoca principalmente en dos temas: el análisis del impacto del proyecto sobre el medio ambiente (con el fin de minimizar deterioros causados por el proyecto) y el análisis del efecto del entorno sobre el proyecto (para aportar a la adecuada formulación del proyecto).

### **9.3.6 Dimensionar las unidades de tratamiento que conformarán el sistema de depuración del efluente proveniente de una empresa procesadora de productos lácteos**

El dimensionamiento de las unidades que conformarán el sistema de tratamiento de aguas residuales de la industria láctea se basará en las siguientes fórmulas tomadas de Metcalf y Eddy (1985) y Ramalhó (1996).

El caudal de diseño se calcula mediante el uso de la fórmula 3 en la que se emplea el factor de seguridad (FS):

$$Q_d = Q + Q(FS) \quad (\text{Ec. 3})$$

Donde:

Q<sub>d</sub>: Caudal de diseño

Q = Caudal promedio medido experimentalmente durante los muestreos

### 9.3.6.1 Diseño de la unidad de desbaste

**Consideraciones generales:** Las aguas residuales de la industria láctea se harán pasar por una zona de desbaste donde se dispondrán de unas rejillas de cribado medianas que retendrán los sólidos, particularmente los inorgánicos, de tamaños mayores a 25 mm que pudieran ocasionar la obstrucción en los canales de la planta de tratamiento. La rejilla se diseñó para limpieza manual.

### 9.3.6.2 Parámetros de diseño a utilizar en la presente investigación

- Rejillas metálicas y de sección rectangular
- Inclinación con respecto a la horizontal de 45°
- Se utilizarán rejillas medianas con una separación entre barras de 25 mm (e = 25 mm).
- Se asumirá un  $\Delta x = 100$  mm
- La velocidad en el canal de aproximación será de 0.60 m/s ( $V_{\text{canal}}$ )
- Se despreciarán las pérdidas por fricción

Para el diseño de la unidad de desbaste (rejillas y canal de aproximación) se utilizarán las siguientes fórmulas:

\*Área transversal del canal de aproximación ( $A_{\text{transversal}}$ ):

$$A_{\text{transversal}} = \frac{Q_d}{V_{\text{canal}}}$$

Para un ancho de canal ( $a$ ) = 0,90 m =  $\phi$ , se calcularía la altura del nivel del agua en el canal ( $h_1$ ):

$$h_1 = \frac{A_{\text{transversal}}}{a}$$

Para conocer la altura máxima ( $h_{\text{max}}$ ) se usa la  $V_{\text{canal}}$  mínimo = 0,40 m/s que correspondería a la velocidad del agua cuando la unidad de desbaste está sucia.

Cálculo estructural de las barras:

\*Longitud de la reja ( $L_{reja}$ ):

$$L_{reja} = \frac{h_{canal}}{\text{Sen } \phi}, \quad \phi = 45^\circ$$

\*Profundidad de la barra ( $h_{barra}$ ):

$$h_{barra} \cong \frac{L_{reja}}{20}$$

\*Ancho de la barra ( $d_{barra}$ )

$$d_{barra} = \frac{h_{barra}}{6}$$

\*Pérdida de carga hidráulica

$$\Delta h = K \cdot \left[ \frac{d}{e} \right]^{4/3} \cdot \frac{V^2}{2 \cdot g}$$

Donde:

g: gravedad (9,8 m/s<sup>2</sup>)

d: distancia entre barras

e: espaciado entre barras

V: velocidad de aproximación en el canal

K: constante: 2,42

\*Cálculo del número de barras ( $N_b$ )

$$(N_b - 1) \cdot (d + e) + d = a$$

\*Área neta entre barras ( $A_{neta \text{ barras}}$ ):

$$A_{neta \text{ barras}} = h_{max} \cdot (a - N_b \cdot d)$$

\*Verificación de la velocidad entre barras ( $V_{entre \text{ barras}}$ ):

$$V_{entre \text{ barras}} = \frac{Qd}{A_{neta \text{ barras}}}$$

### 9.3.6.3 Dimensionamiento de la trampa de grasas

Cálculo del volumen de la cámara de la trampa de grasa ( $V_t$ ):

$$V_t = Q_d \cdot t_r$$



$t_r$ : tiempo de retención

### 9.3.6.4 Dimensionamiento del Tanque de igualación u homogenización

\*Cálculo del volumen del tanque ( $V_t$ ):

$$V_t = 1,6 \cdot Q_m \cdot t_r$$

\*Cálculo del área superficial ( $A_s$ ):

$$A_s = \frac{V_t}{prof}$$

En caso de preferir una configuración rectangular, la relación Largo – Ancho será de  $L = 2 \cdot a$ .

### 9.3.6.5 Diseño y cálculo de la unidad de tratamiento biológico

**Consideraciones generales:** Se diseñará un reactor biológico de lodos activados no convencional que permite la remoción de nutrientes y de materia orgánica en forma de DQO y DBO que son característicos de los efluentes de la industria láctea.

**Dimensionamiento del reactor biológico:** Para poder realizar el dimensionamiento del reactor biológico, además de la caracterización del agua residual es importante conocer los parámetros biocinéticos ( $Y$ ,  $k_d$ ), los cuales serán tomados de la bibliografía existente.

Cálculo del volumen del reactor biológico ( $V$ ):

$$V = \frac{Q_d \cdot \phi \cdot Y \cdot (C_o - C_e)}{k_d \cdot Xv} * FS$$

Donde:

- Co: concentración inicial de DBO del efluente lácteo (antes del tratamiento biológico)
- Ce: concentración final de DBO del efluente lácteo (después del tratamiento biológico)
- Xv: Concentración de sólidos suspendidos volátiles en el licor mezcla
- Kd: Coeficiente decaimiento endógeno



Y: Tasa producción microorganismos heterótrofos

FS: factor de seguridad de 20%

Determinación del tiempo de residencia (t):

$$t = \frac{\phi \cdot Y \cdot (C_o - C_e)}{k_d \cdot Xv}$$

Cálculo del consumo de oxígeno ( $\Delta O_2$ )

$$\Delta O_2 = Q[(1 - 1,42Y_T)(S_o - S_e)] + 1,42K_dXV_a + 4,57Q[NTK_o]$$

donde;

Q: caudal de entrada a la planta.

$Y_T$ : coeficiente de producción.

$S_o$ : concentración del sustrato soluble a la entrada del reactor (DBO).

$S_e$ : concentración del sustrato soluble a la salida del reactor (DBO).

X: concentración de biomasa en el tanque de aireación (SSVLM).

$K_d$ : coeficiente de respiración endógena o de muerte microbiana.

$V_a$ : volumen del tanque de aireación

[ $NTK_o$ ]: concentración de nitrógeno total kjeldhal en el afluente.

**Selección del tipo de aireadores y cálculo de la potencia del motor:** Los aireadores que se utilizaron en este diseño corresponden a aireadores mecánicos en los que la eficiencia depende de la transferencia de oxígeno:

$$CTA = \frac{CTN[(C_s' - C)(1,024)^{T-20^\circ C}] \alpha}{9,17}$$

donde:

CTA: capacidad de transferencia ajustada a las condiciones reales de campo, kg  $O_2$ /HP hora.

CTN: capacidad de transferencia normal (CTN=1,6 Kg $O_2$ /HP\*hora).

T: temperatura del agua (asumió 20°C)

$\alpha$ : factor de corrección de transferencia para aguas residuales, se estima en 0,85 para aguas residuales domésticas.

C: concentración de oxígeno disuelto deseado en el tanque de aireación  
 Cs': concentración de saturación del oxígeno disuelto a la temperatura y presión atmosférica reales.

Para calcular la concentración de saturación del oxígeno a la temperatura y presión atmosférica reales (Cs') fue necesario hallar el valor de la presión de vapor (p) y la concentración de saturación del oxígeno disuelto en agua potable al nivel del mar (Cs) en función de la temperatura real (T=28°C) empleando la Tabla 13 y, usando la Tabla 14 para hallar la presión atmosférica real (b) en función de la altitud. Se utilizó la siguiente ecuación:

$$Cs' = Cs \frac{b - p}{760 - p}$$

donde (Datos tomados de Perruolo, 2010):

Cs: concentración de saturación del oxígeno disuelto en agua potable, a la temperatura real y al nivel del mar (C's 9,17)

b: Presión atmosférica real (a 1.500.000 msnm, 629,6 mmHg)

p: Presión de vapor saturado a la temperatura real (asumió 17,54 mmHg para T: 20°C).

$\beta$ : Factor de corrección de la concentración de saturación en las aguas residuales ( $\beta=0,95$  para AR doméstica).

Considerando por norma una potencia máxima de 10 Hp por aireador, se determinó el número de aireadores. Se emplearon las ecuaciones siguientes:

$$Pot = \frac{\Delta O_2}{CTA}$$

$$\#_a = \frac{Pot}{10 \text{ Hp}}$$

$$Pot_a = \frac{Pot}{\#_a}$$

donde:

Pot: potencia necesaria para producir el oxígeno a consumir.

$\#_a$ : número de aireadores.

Pot<sub>a</sub>: potencia de cada aireador.

### 9.3.6.6 Unidad de desinfección

**Consideraciones de diseño:** La unidad de desinfección se basará en el uso de un agente químico cuya función será reducir la presencia de microorganismos entéricos y otros trasmisores de enfermedades de origen hídrico o indeseables desde el punto de vista sanitario.

**Dimensionamiento del tanque de desinfección:**

\*Cálculo de cámara de cloración ( $V_c$ ):

$$V_c = Q_d \cdot t_r$$

\*Cálculo del área superficial ( $A_s$ ):

$$A_s = \frac{V_c}{h_{H_2O}}$$

\*Cálculo de dimensiones del tanque, considerando  $L = 3 \cdot a$ ,

$$a = \sqrt{\frac{A_s}{3}}$$

### 9.3.6.7 Lechos de secado

**Consideraciones de diseño:** Los lechos de secado consisten en la disposición del lodo producido durante el tratamiento biológico sobre una cama de grava colocada sobre pavimento en donde son secados al aire libre por acción de los rayos solares. El agua infiltrada es recolectada mediante canales y retornada al sistema de tratamiento.

Para el caso del efluente lácteo, la capa de lodo aplicada tendrá un espesor máximo de 25 cm para garantizar que los rayos solares penetren a través de ella para secarlos, mientras que se aprovecha la fracción de rayos UV para que sirva como desinfectante e inactive los microorganismos patógenos.

Los lodos generados durante los tratamientos biológicos, serán conducidos a este lecho donde se deshidratarán por acción del sol y luego podrán ser usados como abono o enmiendas para los suelos.

**Dimensionamiento:** Cálculo del caudal de lodo ( $Q_p$ ):

Se asumió que el caudal de licor mezcla que se colocará en los lechos de secado corresponde al caudal purgado de cada reactor biológico.

$$Q_p = \frac{V_{SBR}}{TRH}$$

Donde

$V_{SBR}$  = volumen de cada reactor biológico tipo SBR

TRH: Tiempo de retención hidráulica, se usó para el diseño 15 d

\*Determinación de la masa de materia orgánica no soluble diaria (nbSSV):

$$nbSSV \left( \frac{kg}{d} \right) = 25 \frac{g}{m^3} \cdot Q_p$$

\*Producción de biomasa dentro del reactor ( $P_{x,bio}$ ):

$$P_{x,bio} = \frac{Q_p \cdot Y \cdot (S_o - S)}{(1 + k_d \cdot SRT)} + \frac{f_d \cdot k_d \cdot Y \cdot Q_p \cdot (S_o - S) \cdot SRT}{(1 + k_d \cdot SRT)}$$

Donde:

$S_o$ : concentración inicial de DBO del efluente lácteo (antes del tratamiento biológico)

$S_e$ : concentración final de DBO del efluente lácteo (después del tratamiento biológico)

\*Producción total de biomasa ( $P_{x,VSS}$ ):

$$P_{x,VSS} = P_{x,bio} + nbSSV$$

\*Producción de sólidos totales ( $P_{x,TSS}$ ):

$$P_{x,TSS} = \frac{P_{x,bio}}{f_s} + nbSSV + Q_p \cdot (SST_o - SSV_o)$$

Donde:

$SST_o$ : Sólidos suspendidos totales iniciales

$SSV_o$ : Sólidos suspendidos volátiles iniciales

$f_s$ : relación  $P_{x,VSS}/P_{x,TSS}$  (adimensional)

\*Cálculo del área del lecho ( $A_{lecho}$ ):

$$A_{lecho} = \frac{P_{x,TSS}}{SLR}$$

Se utilizará una configuración rectangular, en la que  $L = 2 \cdot a$ ;

$$a = \sqrt{\frac{A_{lecho}}{2}}$$

\*Número de lechos de secado ( $N_{LS}$ )

$$N_{LS} = \#días + 1$$

Número de días corresponde al tiempo que se seleccione de permanencia de los lodos en los lechos de secado.

\*Área de cada lecho de secado:

$$A_{c/lecho} = \frac{A_{lecho}}{N_{LS}-1}$$

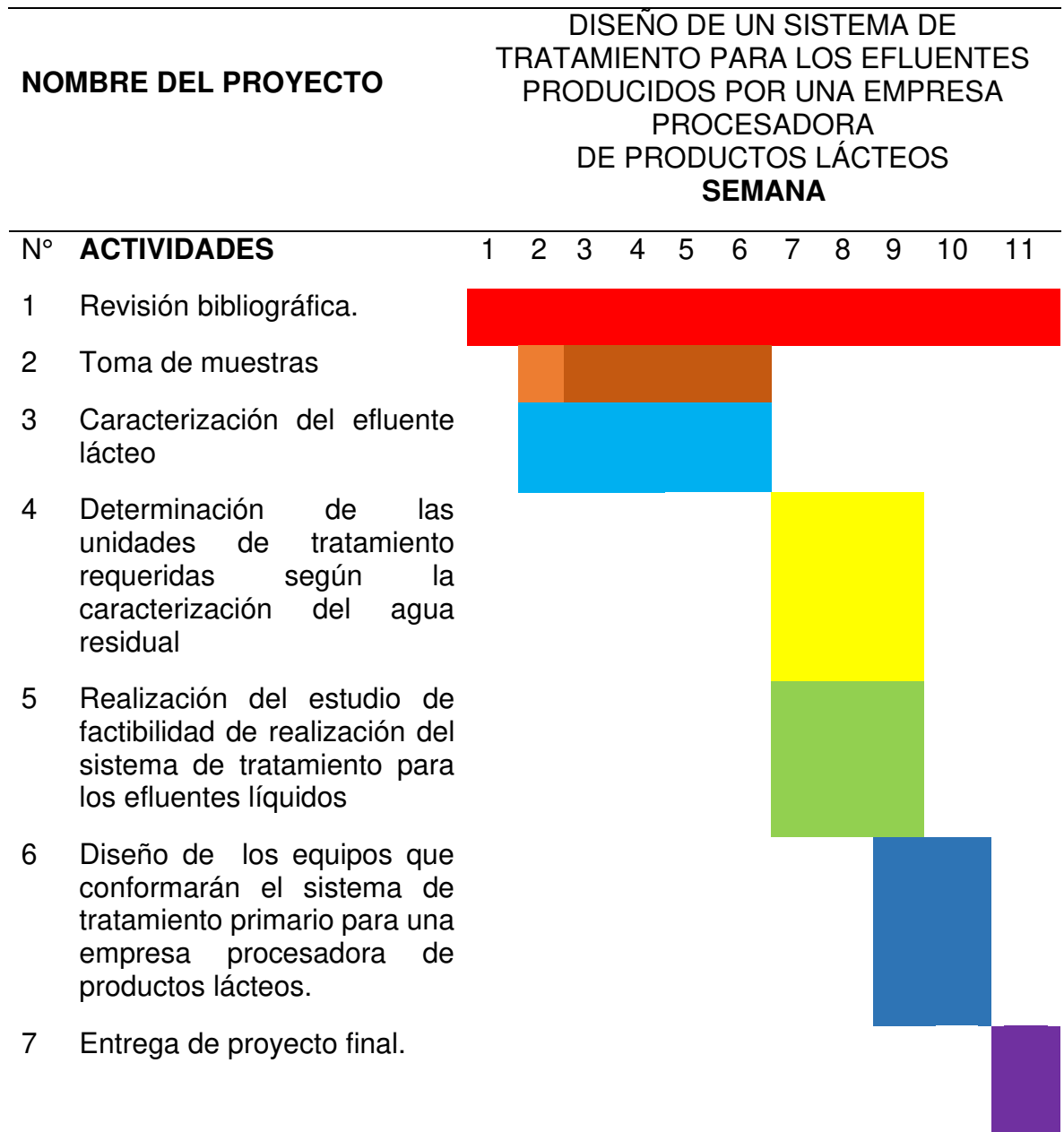
Se asumieron lechos rectangulares y finalmente, se calcularon las dimensiones de largo y ancho de cada lecho de secado:

$$L = 2 \cdot a \quad A_{c/lecho} = 2 \cdot a \cdot a$$

Finalizado el dimensionamiento de las unidades que conformarán el sistema de tratamiento de las aguas residuales de la industria láctea se realizó una diagramación señalando la ubicación de las unidades con sus dimensiones básicas.

El cronograma de trabajo para el desarrollo de los objetivos de la presente investigación se realizará con actividades en base al calendario académico de la Universidad Católica de Colombia.

Se contemplará como fecha de inicio el 3 de enero de 2021 posterior a la aprobación definitiva del anteproyecto y fecha de finalización el 28 de mayo del mismo año cuando termina el periodo académico 2020-IV.



Se presentará en los anexos el cronograma en diagrama de Gantt

Después de realizar las actividades plasmadas en el cronograma, y teniendo en cuenta la metodología propuesta, en cumplimiento de los objetivos del proyecto, se hará entrega de los productos:

**Tabla 3.** Productos por entregar

Productos por entrega		
Tipo	Nombre	Fecha de entrega
Documento trabajo de grado	Diseño de un sistema de tratamiento primario para los efluentes producidos por una empresa procesadora de productos lácteos	Semana 16

**Fuente:** Elaboración propia



Con el fin de cumplir con los objetivos propuestos en este trabajo se debe tener en cuenta los equipos y las instalaciones necesarias para el desarrollo de este a lo largo de la investigación. A continuación, se relacionan los más relevantes:

**Tabla 4.** Equipos por utilizar para el desarrollo del proyecto.

ITEM	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD (Und)
1	Computador portátil	2
2	Salón de estudio	2
3	Celular	2
4	Cámara fotográfica	1
5	Impresora a color	1
6	Impresora fotográfica	1
7	Escáner	1
8	Programa de Diseño grafico	1
9	Obras con sistemas de recolección de aguas lluvias	2

**Fuente:** Elaboración propia.

A la siguiente tabla se refleja el posible presupuesto para la realización de la investigación, los recursos económicos y financieros para el desarrollo de este serán propios y familiares.

**Tabla 5. Presupuesto**

Ítem	Actividad	Un	Cant	V. Unitario	V. Total
1	Transporte visitas a bibliotecas y obras				
1.1	Visitas a bibliotecas universidades en Bogotá	Un	30	\$ 4.800	\$ 144.000
1.2	Visitas a obras en Bogotá	Un	6	\$ 4.800	\$ 28.800
				<u>Subtotal visitas</u>	<b>\$ 172.800</b>
<b>2</b>	<b>Gastos de papelería</b>				
2.1	Impresiones y fotocopias	Mes	11	\$ 12.000	\$ 132.000
2.2	Agendas para organización de actividades	Un	2	\$ 5.000	\$ 10.000
				<u>Subtotal gastos de papelería</u>	<b>\$ 142.000</b>
<b>3</b>	<b>Software y equipos</b>				
3.1	Equipos de cómputo (computadores, celulares, cámara)	Glb	1	\$ 100.000	\$ 100.000
3.2	Toma de datos y muestras	Glb	1	\$ 300.000	\$ 300.000
3.3	Análisis de laboratorio para la caracterización del agua residual	Análisis	1	1.800.000	1.800.000
				<u>Subtotal software y equipos</u>	<b>\$ 400.000</b>
				<b>Valor total</b>	<b>\$ 2.814.800</b>

**Fuente:** Elaboración propia.



UNIVERSIDAD CATÓLICA  
de Colombia  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL

DISEÑO DE UN SISTEMA DE  
TRATAMIENTO DE EFLUENTES  
PRODUCIDOS POR UNA  
EMPRESA  
PROCESADORA DE PRODUCTOS  
LÁCTEOS

FECHA: 04/06/2021

ELABORO: MICHAEL GIOVANNI BENÍTEZ

DOCENTE ASESOR:  
Ing. FIDEL ALBERTO PARDO OJEDA

Uno de los objetivos de esta investigación es realizar la recopilación de información, analizarla y plasmarla en un documento el cual contempla todas las posibles variables en la adecuación de los sistemas de recolección de aguas lluvias en las instalaciones de la sede el claustro de la universidad católica de Colombia

Se hará entrega de un documento como trabajo de grado, con la investigación realizada, con el fin de que no solo la parte administrativa de la universidad tenga conocimientos sobre estos procesos, sino que también tenga alcance a toda la comunidad educativa de la universidad y así se pueda dar conocimiento principalmente a las facultades de ingeniería y arquitectura.

## 10. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 15.1 Caracterización del efluente lácteo

En la composición de la leche además de agua se encuentran grasas, proteínas (tanto en solución como en suspensión), azúcares y sales minerales. Todos estos componentes aparecen en las aguas residuales en mayor o menor cantidad, combinados con las aguas y productos de limpieza y sanitización que se emplean. Los contaminantes esperados en la limpieza son materia orgánica, sólidos en suspensión, aceites y grasas, nitrógeno orgánico y detergentes.

La Tabla 6 muestra los resultados experimentales de la caracterización realizada a los efluentes producidos por la industria láctea dedicada a producción de leche pasteurizada. El aspecto físico del agua residual muestra una coloración blanquecina y turbia, con olor desagradable, estas mismas características han sido reportadas en otras investigaciones quienes han estudiado este tipo de efluentes (Quasim y Mane, 2013; Bharati, Shete y Shinkar, 2013; Chen et al., 2018).

**Tabla 6.** Caracterización del agua residual generada en una industria láctea.

Parámetros	Unidad	Promedio	SD	Límites permitidos*
pH	--	7,8	± 0,31	6-9
Conductividad eléctrica	μS/cm	2283,2	± 507,78	--
Cloruros	mg/L	128,0	± 36,17	
Aceites y grasas	mg/L	298,9	± 73,98	10
DBO <sub>5,20</sub>	mg/L	1943,0	± 499,37	100
DQO	mg/L	2470,0	± 256,52	250
DBO/DQO	--	0,79		
NTK	mg/L	69,6	± 11,59	10**
Fósforo total	mg/L	38,6	± 16,12	2
Sólidos suspendidos volátiles	mg/L	72,0	± 2,92	
Sólidos suspendidos totales	mg/L	1434,0	± 282,19	100
Surfactantes	mg/L	5,1	± 1,25	
Coliformes totales	UFC/100 mL	42.340		1000
Coliformes fecales	UFC/100 mL	ND		Ausentes
Caudal producido	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>	1,13	0,2	---

**Fuente:** Elaboración propia con información de MINAMBIENTE (2015).

En la Tabla 6 se pueden comparar los resultados de los análisis fisicoquímicos y microbiológicos con los límites de descarga máximos establecidos en la normativa ambiental colombiana (MINAMBIENTE, 2015), se evidencia que varias de las variables estudiadas en la caracterización se encontraban fuera del límite máximo permisible. A continuación, se analizará cada una de las variables medidas.

#### **15.1.1. Conductividad eléctrica (CE)**

La conductividad eléctrica promedio fue de 2283,2  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , se considera que es alta en el efluente lácteo debido principalmente a la presencia de sales usadas durante el proceso productivo de la leche. La presencia de iones sodio en altas concentraciones señalan el uso de gran cantidad de limpiadores, principalmente de naturaleza alcalina (NaOH) en las plantas lácteas (Demirel et al., 2005; Bharati, Shete y Shinkar, 2013). Resultados similares fueron reportados por investigadores como Gaibor-Chávez (2014) y Andrades Balao (2008) quienes señalaron conductividades eléctricas comprendidas entre 1220 y 4040  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .

#### **15.1.2. Cloruros (Cl<sup>-</sup>)**

El agua residual de la industria láctea analizada en la presente investigación arrojó concentraciones de iones cloruros de 128 mg/L. Esta concentración estuvo dentro de los rangos reportados por otros investigadores (100-200 mg/L) quienes también han estudiado el mismo tipo de agua residual (Kolev Slavov, 2014; Osama, Patil y Salve, 2015). La presencia de cloruros en las aguas residuales de los lácteos se debe a la adición de sal en la producción de salmueras y licores de enfriamiento, así como también a la concentración de Cl<sup>-</sup> en el agua dulce (agua de abastecimiento) y concentración de Cl<sup>-</sup> propia existente en la leche (Bortoluzzi et al., 2017).

#### **15.1.3. Grasas y aceites**

La caracterización del agua residual de la industria láctea mostró la presencia de aceites y grasas. Se considera que el origen de este contaminante graso proviene de la propia leche que luego de ser procesada queda remanente la nata y parte de ella pasa a las aguas residuales y se descarga como efluente del proceso productivo de la leche durante su pasteurización. La concentración de aceites y grasas en las muestras analizadas en la presente investigación reportaron valores medios de 298,9 mg/L, siendo ligeramente inferiores a los reportados por otros investigadores como Osama, Patil y Salve (2015), Santamaría-Freire et al. (2015), Borjas et al. (2017) quienes reportaron concentraciones de aceites y grasas en efluentes lácteos comprendidos entre 380-7800 mg/L. Sin embargo, se debe dejar claro que la variable Aceites y Grasas excede los límites establecidos, existe abundante grasa que proviene de

la leche cruda y por tanto, se debe remover antes de descargar estos efluentes al sistema de alcantarillado, a cuerpos de aguas o a sistemas marinos costeros.

Es muy importante conocer la concentración de las grasas y los aceites en el efluente lácteo, ya que corresponden a uno de los problemas principales en la disposición las aguas residuales, así como también representan un problema para el manejo de lodos crudos que se generan durante el tratamiento de los efluentes (Santamaría-Freire et al., 2015). Se debe procurar remover los aceites y grasas durante el pretratamiento de las aguas residuales estudiadas en esta investigación. Las grasas y aceites afectan adversamente la transferencia de oxígeno del agua a las células e interfieren con su desempeño dentro del proceso de tratamiento biológico aeróbico. La rotura de las emulsiones aceitosas puede requerir acidificación o agregación de coagulantes (Romero, 2009).

#### **15.1.4. Nutrientes: Nitrógeno y fósforo**

La concentración de nitrógeno fue medida como nitrógeno total Kjeldahl (NTK) que determinó las formas de nitrógeno orgánico y nitrógeno amoniacal presentes en el agua residual de la industria láctea. La concentración de NTK promedio fue de 69,6 mg/L, siendo muy cercana a las reportadas por otros investigadores como Andrades Balao (2008). Se presume que el origen del nitrógeno en el efluente lácteo proviene principalmente de las proteínas propias de la leche (Demirel et al., 2005; Chen et al., 2018), aunque también parte del nitrógeno presente en la aguas residuales lácteas está relacionado con el uso de productos químicos empleados en la sanitización de la industria (Santamaría-Freire et al., 2015).

Por su parte, en el efluente lácteo la concentración promedio de fósforo total fue de 38,6 mg/L (Tabla 6). Los niveles elevados de fósforo, en este tipo de agua residual se relacionan con el uso de productos de limpieza y desinfección (Gaibor-Chávez, 2014; Santamaría-Freire et al, 2015).

El fósforo es un elemento esencial en el crecimiento de plantas y animales, junto al nitrógeno en cualquiera de sus formas inorgánicas (nitritos, nitratos e iones amonio) actúan como nutrientes en los cuerpos de agua, acelerando procesos indeseados como la eutrofización del cuerpo de agua (Bharati, Shete y Shinkar, 2013), por este motivo es fundamental realizar una remoción adecuada de estos nutrientes del efluente lácteo y adecuarlos a concentraciones inferiores a las indicadas en la normativa ambiental colombiana y que se han señalado en la Tabla 6 (MINAMBIENTE, 2015). Se puede observar que ambos nutrientes superan la concentración máxima permitida para la descarga de estos efluentes a cuerpos de agua.

### 15.1.5. Contenido de materia orgánica (DBO y DQO)

La materia orgánica en el efluente lácteo fue medida como la demanda bioquímica de oxígeno ( $DBO_{5,20}$ ) y como la demanda química de oxígeno (DQO). Los resultados mostraron que las concentraciones promedio de DBO y DQO fueron 1943 mg/L y 2470 mg/L, siendo significativamente superiores a los límites máximos para su descarga establecidos en la normativa ambiental colombiana (Tabla 6, MINAMBIENTE, 2015), indicando que deben ser removidos del agua residual antes de ser descargados a su lugar de disposición final.

El efluente lácteo contiene sustancias orgánicas solubles, sólidos en suspensión y trazas orgánicas. Todos estos componentes contribuyen en gran medida a su alta DBO y DQO (Bharati, Shete y Shinkar, 2013). Se ha estimado que el 90% de la DQO de las aguas residuales de una industria láctea es atribuible a componentes propios de la leche y sólo el 10% a sustancias ajenas a la misma. En la composición de la leche además de agua se encuentran grasas, proteínas (tanto en solución como en suspensión), azúcares y sales minerales (Andrades Balao, 2008; Chen et al., 2018).

Las altas concentraciones de  $DBO_{5,20}$  y DQO indican que las aguas residuales de la industria láctea son fuertes y de naturaleza fluctuante, evidenciándose en las elevadas desviaciones estándares obtenidas durante los muestreos realizados para esta investigación (Tabla 6). Los resultados señalan que las aguas residuales de la industria láctea deben recibir un tratamiento de depuración adecuado que permita la remoción de la DBO y DQO y de esta manera evitar que al descargar el agua sin el debido tratamiento se consuma y/o agote el oxígeno disuelto presente en los cuerpos de agua receptores y que es vital para los seres vivos que allí habitan.

A pesar de las elevadas concentraciones de  $DBO_{5,20}$  y DQO que posee el efluente lácteo, se considera que la materia orgánica es altamente biodegradable. El índice de biodegradabilidad ( $DBO/DQO$ ) es un factor que se emplea para conocer la fracción de la materia orgánica que es susceptible a ser removida por vía biológica. Para el agua residual en estudio el índice de biodegradabilidad fue 0,79 (Tabla 6), indicando que es altamente biodegradable (INESCOP, 2008, Chen et al., 2018), este aspecto es de gran importancia al momento de seleccionar el tipo de tratamiento de depuración al que será sometido el efluente.

### 15.1.6. Contenido de Sólidos Suspendidos Totales (SST) y Suspendidos Volátiles (SSV)

El contenido de SST en el efluente lácteo fue de 1434 mg/L en promedio, mientras que los SSV oscilaron alrededor de 72 mg/L. La normativa colombiana regula los SST, en la Tabla 6, se puede observar lo elevado que se encontraba durante las caracterizaciones realizadas al efluente crudo.



Las concentraciones de SST y SSV también se utilizan para evaluar la fortaleza y tratabilidad de las aguas residuales. Los sólidos en suspensión en las aguas residuales lácteas se originan a partir de leche coagulada, así como también de ingredientes aromatizantes que se adicionan durante el proceso productivo (Demirel et al., 2005). En cualquier caso, los SST y SSV deben ser removidos del agua residual antes de ser dispuestas, al remover estos contaminantes también se disminuye el contenido de DQO y DBO (Metcalf y Eddy, 1996).

### 15.1.7. Contenido de coliformes

El análisis microbiológico del efluente lácteo mostró la presencia de coliformes totales (42.340 UFC/100 mL) en concentraciones superiores a los límites establecidos en la normativa ambiental colombiana (Tabla 6). La presencia de este grupo de microorganismos en los efluentes lácteos fue similar a la carga reportada por Corpas y Herrera (2012) y está relacionada con la procedencia y características propias del efluente que proveen condiciones adecuadas para la reproducción de los coliformes totales. De allí que sea muy importante una adecuada desinfección de las aguas residuales antes de su disposición final.

Por su parte, los coliformes fecales estuvieron ausentes en el efluente lácteo, es decir, su concentración estuvo por debajo del límite de detección del método analítico empleado, esto indica que el aporte de aguas residuales sépticas domésticas (descargas de inodoros) no afectaron negativamente el contenido microbiológico del agua residual de la industria láctea. Esto se puede deber a que la corriente de los efluentes domésticos provenientes de los sanitarios de las oficinas y resto de la empresa estuvo en una proporción mucho menor al caudal generado por el proceso productivo de pasteurización de la leche, haciendo imperceptible el aporte de coliformes fecales producidos en la empresa.

Haciendo una evaluación general de los resultados reportados en la Tabla 6 que corresponden a la caracterización del efluente lácteo al que se le realizó el diseño de la planta de tratamiento que se muestra en la siguiente sección de este trabajo. Los datos recogidos durante el análisis del agua residual indican la presencia de materia orgánica en alta concentración, siendo el principal contaminante que debe ser removido del agua residual.

Los resultados mostrados en la Tabla 6 coinciden con lo señalado por Bharati, Shete y Shinkar (2013), Bortoluzzi et al. (2017) y Chen et al. (2018) quienes señalan que las aguas residuales de las industrias lácteas contienen principalmente materiales orgánicos y biodegradables que pueden alterar los ecosistemas acuáticos y terrestres. Debido a la alta carga contaminante de las aguas residuales de los lácteos, las industrias de procesamiento de leche que descargan aguas residuales sin tratar o parcialmente tratadas causan serios problemas ambientales. De ahí la importancia de realizar un tratamiento de depuración adecuado para tratar todo el efluente lácteo.

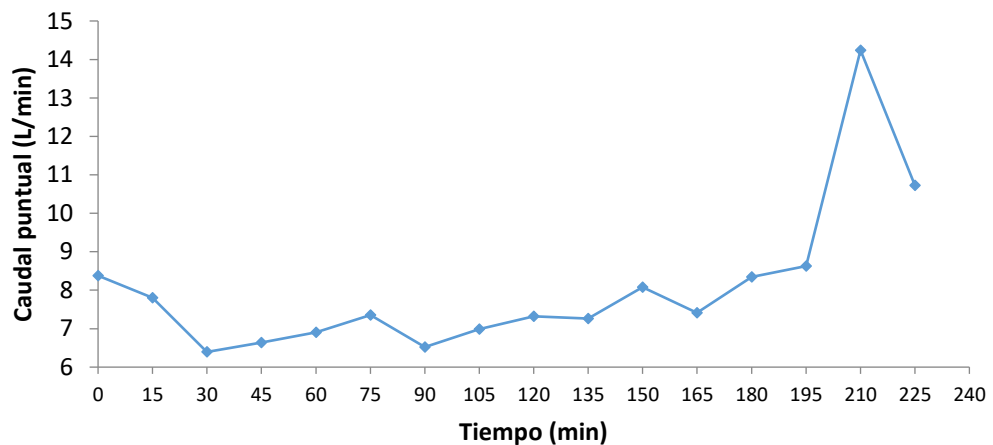
La caracterización del agua residual de la industria láctea estudiada en esta investigación indicó que es necesaria la implementación de un sistema de tratamiento de las aguas residuales generadas en estas empresas. Los resultados muestran que se debe hacer énfasis especial en la remoción de material orgánico, aceites y grasas, nutrientes, sólidos suspendidos y coliformes totales que fueron los parámetros que sobrepasaron en gran medida los límites establecidos en la normativa ambiental colombiana (MINAMBIENTE, 2015). La caracterización ha permitido establecer que por la naturaleza orgánica del efluente y su alta biodegradabilidad se debe considerar el uso de tratamientos biológicos que permitan la remoción de los contaminantes, ya sean tratamientos anaeróbicos, aeróbicos o combinados (Kolev Slavov, 2015). Teniendo esta consideración, se logrará abatir el contenido orgánico de los efluentes lácteos, teniendo un valor agregado que es que el lodo o fango producido durante el tratamiento pudiera ser utilizados en el futuro como posible abono o enmienda orgánica para fertilizar suelos agrícolas (Metcalf y Eddy, 1996, Romero, 2009).

#### **15.1.8. Comportamiento del caudal generado en la empresa láctea**

Las mediciones de caudal, pH y temperatura fueron hechas en la tanquilla ubicada inmediatamente después de la unidad de separación de grasas. El muestreo se realizó en cinco fechas diferentes, iniciándose a las 7:30 am y finalizando a las 2 pm cuando culminó el proceso de pasteurizado y envasado de la leche. La frecuencia de muestreo fue de 15 minutos.

En la Figura 7 se muestran los caudales medidos durante un turno típico de pasteurizado de la leche. Al inicio del proceso el caudal fue de 8 L/min y al transcurrir el tiempo el caudal de entrada fue disminuyendo y se estabilizó entre 6 y 8 L/min durante la mayor parte del proceso productivo de la leche pasteurizada. Entre los minutos 210 y 235, se observó un pico en el caudal (10.000 a 14.000 mL/min) correspondiendo a la fase final del envasado. Presumiblemente, se estaba descartando el resto del producto de las tuberías y además se realizaba el proceso de sanitizado de las maquinarias antes de cambiar de turno de trabajo.

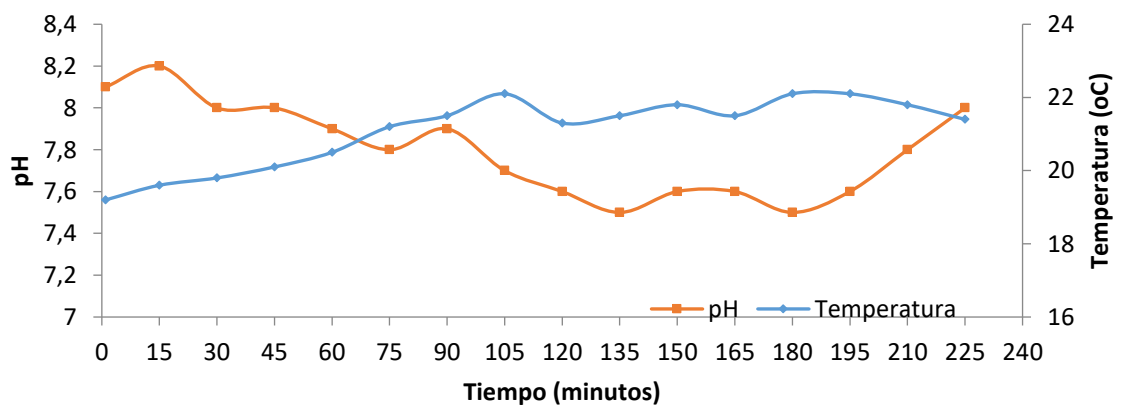
**Figura 7.** Caudal puntual de agua residual generada durante envasado de la leche pasteurizada.



**Fuente:** Elaboración propia.

En la producción de la leche pasteurizada, el pH del agua residual se mostró ligeramente básico, iniciando en 8,1, para luego estabilizarse entre 7,5 y 7,6 unidades de pH. Al iniciar y finalizar el proceso de envasado el pH tendió a ser ligeramente básico correspondiendo al proceso de limpieza de las tuberías y adaptación para el envasado (Figura 8).

**Figura 8.** Caudal puntual de agua residual generada durante envasado de la leche pasteurizada.



**Fuente:** Elaboración propia.

Se observa que el pH se mantuvo cercano a la neutralidad y la temperatura osciló entre 19 y 22°C para el efluente del proceso de pasteurización de leche (Figura 8). Con estas características se reafirma que es factible la aplicación de tratamientos biológicos para eliminar los contaminantes presentes en el agua residual. Es importante que para aplicar tratamiento biológico el pH oscile entre 6 y 9 y la temperatura no exceda la recomendada para la vida acuática. En la Tabla 6 se puede observar que el pH final de la muestra compuesta fue de 7,8, lo que indica que el caudal de efluente generado durante el proceso de sanitización de las tuberías (pH de 8 unidades) no afectó significativamente el pH de la muestra compuesta, lo que indica que no es necesaria la inclusión de un tanque de homogenización en el sistema de tratamiento de aguas residuales del proceso de envasado de leche pasteurizada.

Finalmente, el diseño de la planta de tratamiento para el efluente lácteo caracterizado para esta investigación se realizó utilizando un caudal promedio de 1,13 L / L leche producida. El caudal estuvo en función de la producción de leche pasteurizada y el tiempo de producción de la misma. Para esta caracterización, la producción de leche pasteurizada promedio fue de 2790 L por períodos de 6,5 horas.

El caudal del efluente lácteo producido en las industrias en estudio estuvo dentro del rango señalado por GMTD (2005) en España para el sector lácteo quienes indicaron que las empresas del sector se caracterizan por producir entre 1 y 2 litros de agua residual por litro de leche procesada; sin embargo, fue ligeramente inferior a lo señalado por Andrades Balao (2008) quien señala que en una central lechera se puede esperar un volumen de vertido comprendido entre 1,5 y 2,5 L por cada litro de leche procesada.

El problema ambiental más importante de las empresas dedicadas al sector lácteo es la producción de aguas residuales abundantes y además con alto grado de contaminantes, fundamentalmente de carácter orgánico. La mayor parte del agua consumida en el proceso productivo se convierte finalmente en agua residual, por lo que es catalogado como un proceso productivo húmedo, como son la mayoría de las empresas agroindustriales.

## 15.2. Secuencia de las unidades de tratamiento

La caracterización del agua residual producida en la industria láctea permitió determinar los contaminantes de importancia que deben ser removidos antes de disponerla en un cuerpo de agua y de esta manera minimizar el impacto negativo que su descarga pudiera tener en el ambiente.

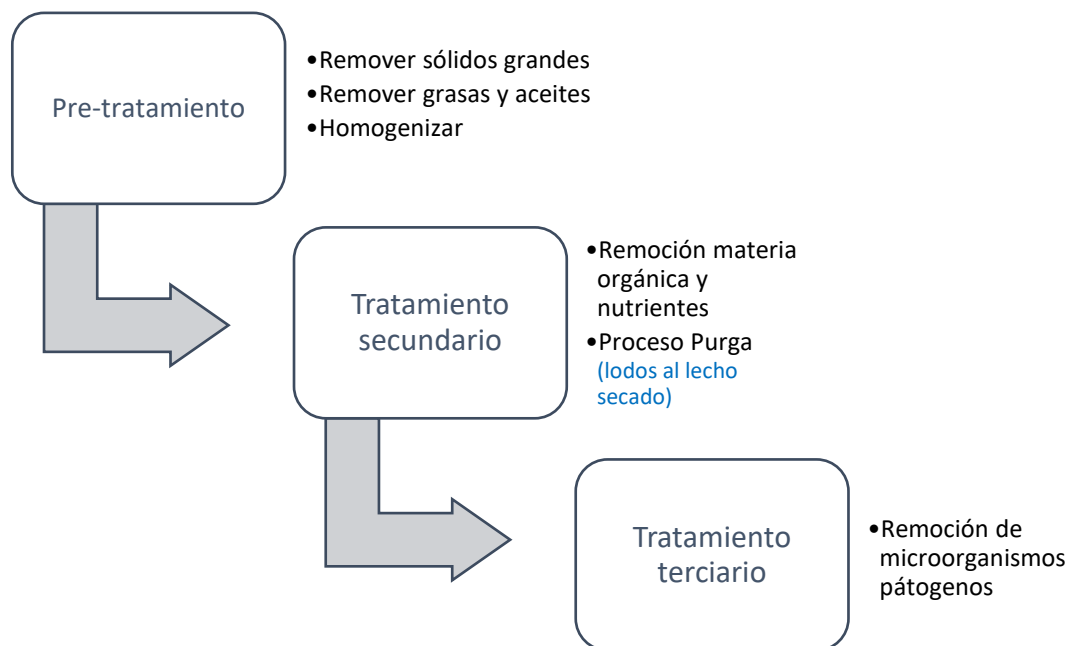
Los contaminantes detectados en el agua residual de la industria láctea que presentaron concentraciones superiores a los límites permisibles en la normativa colombiana (MINAMBIENTE, 2015) fueron:

- Materia orgánica (medida como DBO<sub>5,20</sub> y DQO)

- Nutrientes (N y P)
- Aceites y grasas
- Sólidos suspendidos totales
- Coliformes totales

La selección del tratamiento propuesto para el efluente de la industria láctea, se realizó considerando las particularidades del agua residual (Tabla 6). El sistema de tratamiento para reducir la carga contaminante del efluente lácteo debería incorporar un pretratamiento, un tratamiento primario (opcional), un tratamiento secundario y un tratamiento terciario (Figura 9). Se construirá en concreto armado y algunas partes serán de acero inoxidable.

**Figura 9.** Secuencia de unidades de tratamiento propuesto para las aguas residuales de la industria láctea.



**Fuente:** Elaboración propia.

### 15.2.1 Pretratamiento del agua residual

En el pretratamiento se contempla realizar tres operaciones de importancia para preparar el agua residual al tratamiento al que será sometida posteriormente. En primer lugar, se removerán los sólidos de gran tamaño, luego se retirarán las

grasas y aceites, típicas del efluente lácteo, y posteriormente, se uniformizarán las características del agua residual antes del tratamiento central.

Los sólidos de gran tamaño, como trapos, envases, palos, entre otros, que pudieran ser arrastrados por el agua residual a través de los canales de recogida y descarga de las aguas residuales serán retenidos por un sistema de desbaste mediano que consistirá en una reja que retendrá los sólidos con tamaños superiores a 5 cm, importante removerlos debido a que pudieran ocasionar obstrucción en los canales de la planta o un posible daño al sistema de bombeo. La reja fue diseñada para ser de limpieza manual, por lo que un operario debe supervisar esta unidad de tratamiento y retirar los sólidos retenidos frecuentemente mediante el uso de un rastrillo.

En segundo lugar, el agua residual, libre de sólidos grandes, pasará a una unidad de separación de grasas y aceites, que fue diseñada para operar de forma natural, sin automatización, por lo que el mismo operario debe retirar las capas de nata que floten sobre agua residual de forma manual. Tanto los sólidos grandes, así como las grasas y aceites deben ser manejados correctamente luego de ser removidos de la corriente de agua residual. Se deben seguir los protocolos teniendo en consideración que los sólidos grandes luego de escurrirlos se pueden disponer como residuos sólidos no peligrosos, mientras que las grasas y aceites son sustancias peligrosas e inflamables que deben ser manejadas por una persona autorizada para darle el destino final correspondiente.

Al final del pretratamiento, se propone utilizar un tanque de homogenización que permita recoger y almacenar el agua residual producida durante un día de operación (24 horas) de la empresa. El efluente en esta etapa estará libre de sólidos grandes, grasas y aceites. En este tanque se realizará la combinación de las diferentes fracciones del agua residual producida, es decir, la corriente propia residual que se genera durante el proceso de pasteurización y envasado de la leche, así como el agua residual producto de la limpieza e higienización de las maquinarias, equipos y línea de envasado.

La caracterización del agua residual de la industria láctea en estudio mostró que el pH del efluente se encuentra dentro del rango permitido para su descarga a cuerpos de agua y además es el adecuado para que se utilice un tratamiento biológico de depuración del agua residual, por tanto, no se requiere ninguna adición de sustancias químicas para ajustar el pH.

Al final del tratamiento preliminar se espera haber logrado remover el 100% de sólidos grandes y al menos el 95% de aceites y grasas.

### **15.2.2 Tratamiento primario del agua residual**

El tratamiento primario consiste en el uso de un sedimentador primario que permite la remoción de sólidos y también de parte de la  $DBO_{5,20}$  y DQO (Metcalf



& Eddy, 1996). Basándose en la caracterización del agua residual empleada en esta investigación, no se consideró necesaria el uso de un sedimentador primario debido a que la naturaleza orgánica y altamente biodegradable del efluente, indica que el tratamiento biológico sería capaz de abatir ambos contaminantes y de esta forma se simplifica el tren de tratamiento y se disminuyen los costos por construcción y mantenimiento de una unidad de tratamiento primario (sedimentador por gravedad).

### 15.2.3 Tratamiento secundario del agua residual

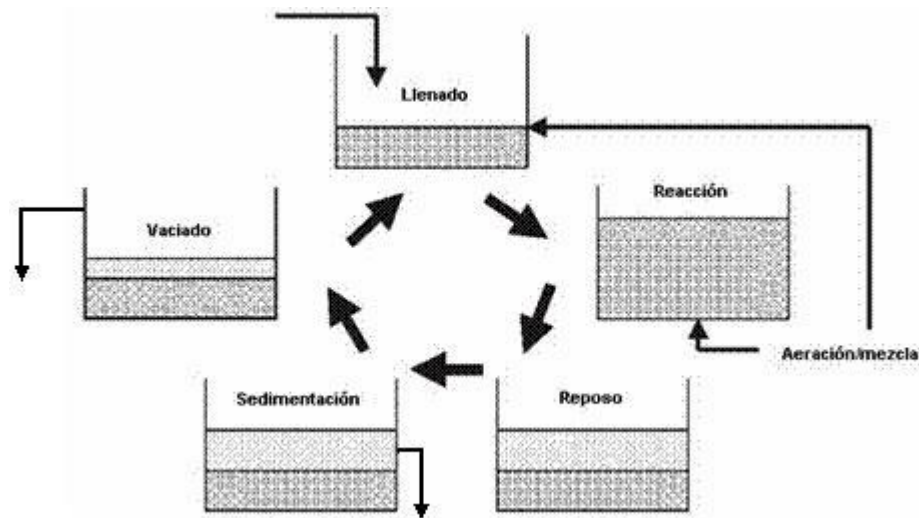
El tratamiento secundario es empleado para la reducción del contenido de sólidos orgánicos biodegradables mediante la oxidación biológica, utilizando microorganismos en un ambiente controlado, además en esta parte del proceso se da también la separación sólido-líquido.

La caracterización del agua residual de la industria láctea señalada en la Tabla 6, mostró que el agua residual es rica en sólidos suspendidos y materia orgánica, y su relación de biodegradabilidad indicó la alta biodegradabilidad de estos contaminantes (DBO/DQO  $\approx$  79%). Por tanto, a partir de esta investigación, se propone emplear un reactor por carga secuencial (SBR), que es un sistema de lodos activados no convencional, que se caracteriza por permitir una mejor selección y aclimatación de la biomasa a los componentes orgánicos del efluente de industrial debido a los procesos cíclicos de llenado y vaciado sucesivos que ocurren en el sistema (Farabegoli y Col., 2004).

Se propone que el sistema de tratamiento del efluente en la industria láctea incluya dos reactores SBR en paralelo que trabajarán de forma alterna, en cada uno ocurrirán las fases de llenado, reacción, sedimentación, descarga y purga de lodos (Figura 10). Las fases del proceso son secuenciales y se repiten periódicamente. En la etapa de Reacción se deben alternar fases de aireación con fases sin aireación, de esta manera se favorece la remoción conjunta de DQO, DBO y nutrientes. Durante toda la etapa de reacción la mezcla microorganismos + agua residual (licor mezcla) debe estar completamente mezclado, por lo que la agitación permanecerá encendida durante toda la duración de la etapa. Posteriormente, ocurrirá la etapa de sedimentación, en la que el licor mezcla se dejará en reposo por un tiempo de 30 minutos, el lodo sedimentará y se separará del agua clarificada por acción de la gravedad. El tiempo de carga y descarga durará 15 minutos.



**Figura 10.** Etapas en el funcionamiento de un SBR



**Fuente:** Elaboración propia.

Las características de los SBR han demostrado que son eficientes para remover simultáneamente materia orgánica (DBO y DQO) y nutrientes (nitrógeno y fósforo). El reactor consiste en un recipiente dotado de un eje y propela que permitirá la homogenización del contenido del reactor. Por ser un sistema biológico, debe ser inoculado con microorganismos que serán los responsables de la remoción de los contaminantes del agua residual. Los microorganismos a través de su metabolismo consumirán los contaminantes (compuestos carbonados, nitrogenados y fosforados), los usarán como sustrato y los convertirán en productos no contaminantes para el agua residual (Suresh, Tripathi y Gernal Rana, 2011), según lo muestran las siguientes reacciones bioquímicas:



Otra ventaja por la que se seleccionó un SBR fue la versatilidad que tiene para ajustar los tiempos y secuencias de las fases óxicas y anóxicas del sistema, permitiendo probar diversas estrategias para realizar la nitrificación y desnitrificación biológica, (Durai y Rajasimman, 2011; Mekonnen y Leta, 2011).

Se observa en la Figura 10 que en el SBR se da el proceso de sedimentación para separar los microorganismos del agua residual tratada, por lo que no se requiere una unidad de sedimentación secundaria posterior al SBR, de esta

manera se ahorra espacio al momento de construir el tren de tratamiento de los efluentes de la industria láctea.

Para mantener un tiempo de residencia celular determinado, el exceso de lodo producido diariamente debe ser purgado del sistema periódicamente. El tiempo de residencia celular para que ocurra la nitrificación se fijará en 15 días. Éste será enviado hacia un lecho de secado, donde se le aplicará cal apagada ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) para su estabilización final. La cal permite la elevación del pH hasta 12, lo cual favorece la eliminación de coliformes y otros microorganismos dañinos para la salud (Metcalf & Eddy, 1996).

Al final del tratamiento secundario se espera haber logrado remociones de DBO y DQO de al menos 98%, mientras que de nutrientes y sólidos totales de 90%.

#### **15.2.4 Tratamiento terciario del agua residual**

El postratamiento del efluente lácteo se basará en la remoción de los coliformes totales presentes (Tabla 6). El efluente clarificado tratado en la etapa anterior se hará pasar a la unidad de desinfección. Para la desinfección se propone utilizar la cloración, por lo que se diseñó un serpentín donde se adicionará la dosis de cloro al inicio de este.

El agua residual clarificada que fue tratada en los SBR será conducida hacia el tratamiento terciario a través de una canaleta Parshall donde se adicionará una dosis de 2 mg/L de hipoclorito de calcio para realizar el proceso de desinfección. A continuación del Parshall, se dispondrá de un tanque de contacto cuya función será la de incrementar el tiempo en que el hipoclorito de calcio permanecerá en contacto con el agua, es decir, garantizar que se cumpla el tiempo mínimo requerido de contacto entre el agua residual y el agente desinfectante.

El tanque de contacto se diseñó de forma rectangular y se le colocaron baffles o deflectores que permitirán que el agua residual tratada circule a través del tanque en forma de zig-zag (serpentín), lo que incrementa el tiempo de permanencia del agua dentro del tanque (disminuye la velocidad de circulación del fluido) y por tanto, incrementa el tiempo de contacto con el desinfectante.

Al culminar el recorrido del agua residual por el serpentín, se habrá permitido el tiempo de contacto mínimo necesario para que el agente desinfectante actúe y elimine los coliformes totales en 99,9%.

Se seleccionó el hipoclorito de calcio como agente desinfectante, debido a que es una sustancia química que garantiza una completa destrucción de los microorganismos implicando un costo razonable, es fácil y seguro de almacenar, manipular, transportar y dosificar en el agua residual. Es importante determinar la dosis óptima de desinfectante, y esto se deberá hacer cuando el sistema esté por comenzar a arrancar a funcionar y consistirá en pruebas de laboratorio (no

señaladas en esta investigación, ya que aquí sólo se contempló el diseño de las unidades que conformarán el tren de tratamiento).

Se ha probado que más del 90% de los organismos que existen en el agua son destruidos durante los primeros segundos después de aplicado el cloro, antes de que este haya tenido tiempo de interactuar con los compuestos nitrogenados u otros componentes que no hayan sido previamente removidos del agua residual.

### 15.2.5 Lechos de secado

El lodo o biomasa activa excedente extraída de los reactores biológicos (SBR) se enviará hacia los lechos de secado donde serán deshidratados por efecto de los rayos solares. En esta etapa la radiación UV se encargará de eliminar los microorganismos patógenos. Posteriormente, los lodos estabilizados serán llevados al lugar donde serán dispuestos finalmente.

Para esta investigación se consideró un tiempo de secado de los lodos en el lecho de 7 días, por lo que se diseñaron 2 unidades que funcionarán de forma alterna.

Es importante resaltar que el lodo estabilizado (deshidratado-secado) pudiera ser reutilizado para compostaje (abono orgánico o enmienda orgánica), pero previamente se deben realizar análisis que permitan conocer las características del lodo respecto a su contenido nutricional (N, P, K, microelementos), así como determinar la presencia de metales pesado, pH, presencia de microorganismos patógeno u otra sustancias tóxica que pudiera contaminar los suelos o afectar los cultivos donde se deseen utilizar.

El estudio de factibilidad técnica, ambiental y económica se realizó basado en las características de la planta de tratamiento de aguas residuales de la industria láctea. Los resultados se muestran a continuación:

#### 15.1.3. Factibilidad Técnica

El diseño de la planta de tratamiento para la industria láctea arrojó que se requiere de una superficie mínima 769,5 m<sup>2</sup> sólo para las unidades de la planta de tratamiento, discriminado de la siguiente manera:

U1: Área Desbaste = 1 m<sup>2</sup>

U2: Área Trampa de grasa = 2 m<sup>2</sup>

U3: Área Tanque de homogenización = 172,9 m<sup>2</sup>

U4: Área Reactores biológicos = 442,4 m<sup>2</sup>

U5: Área Canaleta Parshall = 1 m<sup>2</sup>

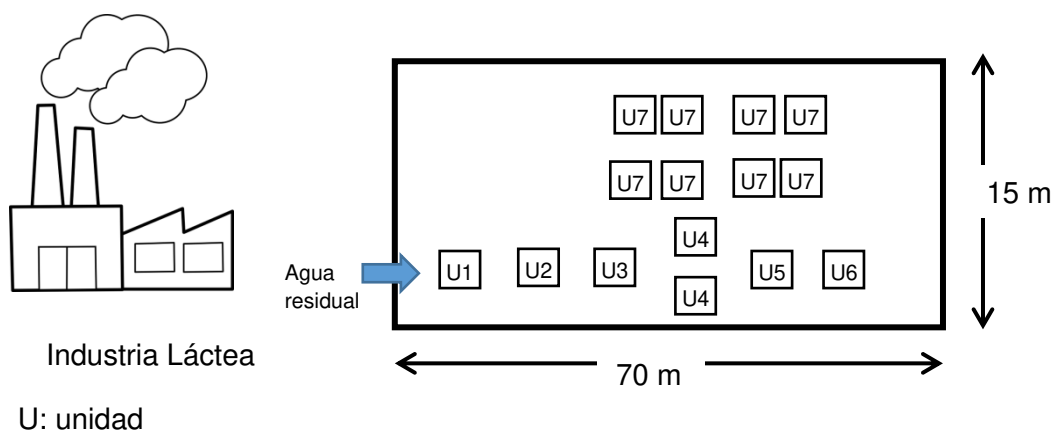
U6: Área Desinfección = 12,6 m<sup>2</sup>

U7: Área Lechos secado = 137,6 m<sup>2</sup>

Se debe adicionar las vías de circulación para acceder a estas unidades y brindarles el mantenimiento, sustitución o reparación que pudieran requerir durante su funcionamiento. Estimando está área adicional en 20% del área señalada, se concluye que el área requerida para la instalación y funcionamiento de la planta de tratamiento debe ser de 924 m<sup>2</sup>.

La empresa láctea dispone de un terrero en la parte posterior de sus instalaciones productivas que pudiera ser utilizado para la construcción de la planta de tratamiento. El terreno es de forma rectangular lo que permitiría la instalación de la planta de tratamiento con una secuencia lineal (Figura 11).

**Figura 11.** Distribución espacial de la planta de tratamiento



**Fuente:** Elaboración propia.

Las unidades que conforman la planta de tratamiento corresponderán a obras civiles que utilizarán bloques, cabillas, concreto, arena, grava. El sistema será interconectado con tubería de PVC de 1" y 4".

Para la construcción de la planta de tratamiento, la empresa deberá hacer la adecuación del espacio físico sugerido, con los respectivos estudios de suelo, nivelación del terreno y demás aspectos necesarios para iniciar los trabajos de instalación y puesta en marcha de la planta de tratamiento diseñada.

Los equipos y materiales que deben adquirirse se han señalado en la Tabla 7 donde se realizó un estimado de los materiales y equipos requeridos para la instalación y arranque del sistema.

**Tabla 7.** Cómputos métricos de las unidades del tren de tratamiento:

DESCRIPCIÓN	UNID AD	CANTID AD
<b>SISTEMA DE TRATAMIENTO AGUAS RESIDUALES DE LA INDUSTRIA LÁCTEA</b>		
Platinas de acero inoxidable (L:60 cm, p:2,83 cm, a:0,47)	UND	12
Tanque igualación 484 m <sup>3</sup> (a:9 m, L:18m, h:3 m)	UND	1
Reactor biológico rectangular 553 m <sup>3</sup> (a:10,5 m, L: 21 m, h: 2,7 m)	UND	2
Tanque de desinfección 18,9 m <sup>3</sup> (L: 6 m, a: 2 m, h:1,5 m)	UND	1
Lechos de secado (L=6,2 m, a: 3,1 m, h: 0,95 m)	UND	8
Tubería Ø 1"	m	16
Tubería Ø 4"	m	20
Llaves de control de caudal (llave de paso estándar de 1")	UND	4
Manguera para medir nivel	m	1.50
Codo 90° φ75 mm	UND	1
Grava (3-12 mm)	m <sup>3</sup>	46,4
Arena (0,5-1,5 mm)	m <sup>3</sup>	38,4
<b>EQUIPOS/MATERIALES REQUERIDOS</b>		
<b>SISTEMA DE TRATAMIENTO</b>		
Compresor (7 HP)	UND	2
Motoreductor eje extendido con aspa (1,5 HP) 200 -250 rpm	UND	2
Aireadores burbujas finas (10 HP)	UND	6
Válvula solenoide 1" completamente cerradas de acero Inoxidable 240 v (una para activación aire y otra para descarga agua residual)	UND	4
Temporizadores digitales (timers) 240 v	UND	6
Bomba de alimentación de aguas residuales (10 m <sup>3</sup> /h, 1 HP)	UND	1
Flotantes eléctricos** (máximo y mínimo nivel)	UND	4
Dosificador desinfectante	UND	1
Desinfectante (Ca(ClO) <sub>2</sub> (sólido)	kg/año	56
Tanque almacenamiento desinfectante (50 L)	UND	1

**Fuente:** Elaboración propia.

El estudio muestra que técnicamente es viable la construcción y puesta en marcha de esta planta de tratamiento de aguas residuales que le permitirá a la empresa cumplir con la normativa ambiental colombiana, pero también dará el sentido sustentable que desea transmitir la empresa a sus trabajadores y a la sociedad en general.

#### 15.1.4. Factibilidad económica

Para realizar el presupuesto de costo para analizar la factibilidad económica del proyecto para el diseño de un sistema de tratamiento de efluentes producidos

por una empresa procesadora de productos lácteos, se puede observar en la tabla 8, los costos de los productos para la construcción del procesador.

**Tabla 8.** Costos de construcción de la procesadora de aguas

Sistema de tratamiento aguas residuales de la industria láctea	Precio
Platinas de acero	800.000,00
Tanques	8.000.000,00
Reactor	5.000.000,00
Tanque de desinfección	1.200.000,00
Tuberías	1.200.000,00
Llaves	1.400.000,00
Compresores	3.500.000,00
Motores	18.200.000,00
Bombas	2.500.000,00
Motoreductor	4.500.000,00
Otros	5.000.000,00
Total	51.300.000,00

**Fuente:** Elaboración propia

#### 15.4.1 Costos

Para determinar los costos de operación y mantenimiento del proyecto para el diseño de un sistema de tratamiento de efluentes producidos por una empresa procesadora de productos lácteos, se dividen los costos en los prevenientes directo de personal y costos operativos. Para cada uno de ellos se efectuará una tabla donde estarán expresados los mismos.

Los costos directos de personal, se refiere a la cantidad de personas necesarias para el funcionamiento de la planta, los salarios son establecidos en base a salarios promedios de empleados en el sector, como se muestra en la tabla 9.

**Tabla 9.** Costos del personal mensual

Personal	Cantidad	Sueldo	Total
Administrativo	2	1.000.000,00	2.000.000,00
Secretaria	1	1.000.000,00	1.000.000,00
Ingeniero sanitario	1	6.000.000,00	6.000.000,00
Ingeniero jefe	1	8.000.000,00	8.000.000,00
Químico	1	5.000.000,00	5.000.000,00
Laboratorista	1	3.000.000,00	3.000.000,00
Operarios	3	1.000.000,00	3.000.000,00
			28.000.000,00

**Fuente:** Elaboración propia

Los costos operativos se presentan en la tabla 10.

**Tabla 10.** Costos operativos

Costo	
Arriendo	5.000.000,00
Equipos	25.000.000,00
Transporte	6.000.000,00
Materiales	5.000.000,00
Total	41.000.000,00

**Fuente:** Elaboración propia

La inversión inicial para el funcionamiento del sistema de tratamiento de efluentes producidos por una empresa procesadora de productos lácteos sería la suma de la construcción de la planta, los gastos de operación y de personal, el cual es de 120.300.000,00 pesos, la cual se puede solicitar al banco mediante un crédito a 5 años a una tasa de interés anual de 28,16%, la tabla de amortización del crédito se presenta en la tabla 11.

**Tabla 11.** Amortización del crédito

	Inicial	Interés	Amortización	Cuota	Final
AÑO 0					\$ 120.300.000, 0
2021	\$ 120.300.000, 0	\$ 33.876.480,0	\$ 13.784.922,3	\$ 47.661.402,3	\$ 106.515.077, 7
2022	\$ 106.515.077, 7	\$ 29.994.645,9	\$ 17.666.756,4	\$ 47.661.402,3	\$ 88.848.321,3
2023	\$ 88.848.321,3	\$ 25.019.687,3	\$ 22.641.715,0	\$ 47.661.402,3	\$ 66.206.606,3
2024	\$ 66.206.606,3	\$ 18.643.780,3	\$ 29.017.622,0	\$ 47.661.402,3	\$ 37.188.984,3
2025	\$ 37.188.984,3	\$ 10.472.418,0	\$ 37.188.984,3	\$ 47.661.402,3	-

**Fuente:** Elaboración propia

Debido a que la creación del sistema de tratamiento de efluentes producidos por una empresa procesadora de productos lácteos, no produce ingresos económicos, no tiene un rendimiento en el futuro, ni una tasa interna de retorno de la inversión, el beneficio que se obtiene principalmente con esta procesadora de agua, es que al momento de ser desechada a los afluentes, estas aguas no



sean contaminantes, de esta manera cumple con tratados internacionales sobre el uso y proceso de aguas residuales al momento de ser devueltas al ambiente, de manera no contaminante, de esta manera la empresa evita ser multada inclusive ser cerrada,

### 15.2.5 Factibilidad Ambiental

El diseño, planificación, construcción, arranque y funcionamiento de una planta de tratamiento de aguas residuales tiene un impacto sobre el ambiente y sobre la sociedad en general. Es decir, el factor ambiental está íntimamente relacionado con el componente social debido a que la industria láctea está un polígono industrial, pero existen comunidades que se encuentra alrededor de la empresa y que por tanto, hacen parte del ambiente que pudiera ser impactado por las actividades de construcción y puesta en marcha de la planta de tratamiento de efluentes lácteos. De esta manera, las soluciones que se generan para el ambiente implícitamente beneficiarán también a la sociedad, y lo contrario también ocurriría, aspectos negativos, redundarán en impactos que serán perjudiciales.

#### 15.2.5.1 Aspectos ambientales a considerar

**Efecto de las aguas residuales en el ambiente:** Una de las principales razones por las que se debe diseñar adecuadamente un sistema de tratamiento de aguas residuales industriales es reducir el efecto negativo que tiene la descarga de estos efluentes sobre los cuerpos de aguas y suelos. El diseño planteado en esta investigación se realizó con el conocimiento certero de las características reales del efluente lácteo generado, esto implica un elevado grado de eficiencia del sistema al momento que comience a operar. En base a la caracterización fisicoquímica y microbiológica realizada al agua residual se estima lograr una reducción de 98% de DBO<sub>5,20</sub> y DQO, una remoción del 90% de sólidos, 95% de grasas y aceites, una disminución entre 90 y 95% de nutrientes (N y P); y por último, una eliminación del 99,9% de microorganismos patógenos. El tratamiento del agua residual proveniente de la industria láctea contribuiría con la mejora de la calidad del agua del cuerpo receptor (río, lago o mar).

**Generación de Emisiones Gaseosas:** afecta tanto a la calidad del aire, a la fauna en el Medio Natural y en muchos casos causa afecciones a los seres vivos en general. Para minimizar el impacto que las emisiones gaseosas puedan producir se deberá verificar la correcta y completa combustión de los motores de los equipos y maquinarias que utilicen combustibles fósiles, reduciendo así reducir la producción de gases de efecto invernadero (CO<sub>2</sub>, CO, SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub>).

**Emisión de olores:** Otro aspecto importante a considerar, es que el diseño adecuado de la planta de tratamiento reducirá la emisión de olores desagradables que afectan negativamente el ambiente circundante de la empresa, así como a las comunidades vecinas. Un aspecto importante para

considerar es la colocación de una cerca viva (grupo de árboles autóctonos de la región) que corte o reduzca la dispersión de los posibles olores que se producen en la planta de tratamiento. Una planta correctamente operada no genera olores desagradables en proporciones elevadas.

**Generación de lodos biológicos:** Los lodos generados durante el tratamiento biológico del efluente lácteo que serán ricos en nutrientes pueden ser usados como enmiendas y/o abonos orgánicos en suelos y cultivos, pero deben ser adecuadamente tratados y estabilizados en los lechos de secado diseñados en esta investigación. Esto ejercerá un efecto positivo sobre el suelo, permitiendo la recuperación edafológica de los mismos e incluso mejorando el entorno paisajístico de la zona, lo que también se verá reflejado en la calidad de vida de los empleados de la empresa y los habitantes de las comunidades cercanas.

Siempre existe el riesgo que los lodos no queden bien estabilizados, y por tanto, no cumplan las exigencias ambientales, con la consecuencia que no podrían ser incorporados al suelo como abonos. En este caso, el lodo podría ser utilizado en un relleno sanitario como material de cubrimiento de los desechos sólidos, lo que garantizaría como mínimo que al lodo se le está brindando la disposición final apropiada y que este no generará impactos adicionales.

**Generación de polvo:** Otro aspecto a considerar en la factibilidad ambiental de esta investigación, es la generación de polvo durante la construcción de las obras civiles. Según Gaceta N° 39704-S (2016) para mitigar este factor se debe:

1. Cubrir el banco de materiales a utilizar en la obra, mediante lonas o plásticos.
2. Mantener humedecidas las rutas no asfaltadas que den acceso al lugar donde se construirá la planta de tratamiento para reducir el levantamiento de partículas.
3. Cubrir con lonas los camiones (vagonetas) que transportan material granulado para evitar la dispersión por acción del viento.
4. Utilizar estructuras cortavientos para evitar la dispersión de material y residuos por acción de fuertes vientos.

**Generación de Ruidos y Vibraciones:** La actividad de Generación de Ruidos y Vibraciones afecta la fauna del ecosistema, la calidad del aire, la seguridad de operarios y causa molestia en el entorno. Por tanto, debe considerarse como un aspecto ambiental de importancia durante la construcción de la planta de tratamiento. La generación de ruidos y vibraciones se evidencian desde la etapa de preparación del terreno para la instalación de la planta de tratamiento, su construcción y su funcionamiento, así como en el transporte de insumos, materiales y equipos.

La elevada emisión de una o varias fuentes generadoras de vibraciones y/o ruidos, deberán estar planeadas adecuadamente para mitigar la emisión total lo máximo posible. Otra acción importante para considerar es que durante la construcción y funcionamiento de la planta se evite la utilización de maquinaria

que produzca elevados niveles de ruidos, como son los martillos neumáticos, la retroexcavadora, la motoniveladora, la máquina compactadora simultáneamente con la carga y transporte de camiones cargados con escombros o suelo extraído en las excavaciones. La solución que se propone es que se alternen estas tareas y así se mitiga el efecto del ruido y las vibraciones.

**Generación de Residuos Peligrosos:** como son las grasas, aceites, hidrocarburos, afecta a los componentes calidad de agua superficial y calidad de suelo, fauna y flora de la localidad. Se debe mitigar cualquier posible impacto negativo sobre el ecosistema durante la construcción, puesta en marcha y funcionamiento de la planta de tratamiento en la industria láctea.

Durante el tratamiento del agua residual se pueden producir sustancias tóxicas y/o peligrosas como lodos contaminados con metales pesados, sin embargo, esto no se espera que ocurra por la naturaleza del proceso productivo. Sin embargo, se menciona aquí por cualquier contingencia que pueda surgir.

**Excavaciones, Remoción del Suelo y Cobertura Vegetal:** Las excavaciones, remoción del suelo y cobertura vegetal afectan directamente al suelo, produce escurrimiento superficial, incrementa los niveles de erosión, afecta a la fauna y flora tanto en el medio natural, como en el antrópico. Estas operaciones son inherentes al proceso de construcción de la planta de tratamiento, por lo que no pueden ser eliminadas, ni sustituidas, por tanto sólo se pueden aplicar medidas paliativas que reduzcan su efecto. Deberán evitarse excavaciones y remociones de suelo innecesarias y darle prioridad al trabajo manual, siempre que no expongan al trabajador a riesgos mayores (evitar o reducir uso de maquinaria pesada).

Finalmente, en todo el proceso de diseño, planificación, construcción, arranque y funcionamiento de la planta de tratamiento se debe evitar la generación de efectos negativos sobre la calidad estética del paisaje que afecte a la empresa, sus trabajadores y a las comunidades vecinas.

### 15.2.6 Dimensionamiento de las unidades del tren de tratamiento

Luego que se realizó el estudio técnico de cada componente que debe incluirse en la planta de tratamiento, se procedió a realizar el dimensionamiento de cada unidad.

Cálculo del caudal de diseño

El caudal se calculó utilizando 2,0 como factor de seguridad (FS), este caudal correspondió al caudal máximo ( $Q_{max}$ ):

$$Q_{max} = Q_d + Q_d(FS)$$

Para el diseño de la planta de tratamiento del efluente generado en la industria láctea, se utilizó el caudal promedio determinado experimentalmente y señalado en la sección anterior ( $Q = 1,13 \text{ L agua residual/L leche producida}$ ).

Asumiendo que un día promedio de producción de leche para esta empresa es de 400.000 L/d, queda que:

Caudal promedio:

$$Q_{prom} = 1,13 \frac{L}{L} \cdot \frac{400.000 L}{1 d} = 452.000 L/d$$

Caudal máximo:

$$Q_{max} = 1,13 \frac{L}{L} \cdot \frac{400.000 L}{1 d} \cdot 2 = 904.000 L/d$$

En resumen, el caudal de diseño:

$Q_{prom}$	$Q_{max}$
452.000 L/d	904.000 L/d
452 m <sup>3</sup> /d	904 m <sup>3</sup> /d
5,23 L/s	10,5 L/s
$5,23 \times 10^{-2} \text{ m}^3/\text{s}$	$1,05 \times 10^{-2} \text{ m}^3/\text{s}$

### 15.2.6.1 Diseño de la unidad de desbaste

El tratamiento preliminar de desbaste consistió en una reja de cribado de sólidos medianos. En esta unidad se retienen los sólidos de gran tamaño que pudieran estar presentes en las aguas residuales y que por tanto, pudieran ocasionar obstrucción en los canales de la planta o un posible daño al sistema de bombeo. La reja se diseñó para limpieza manual. El agua residual llegará a la planta de tratamiento por un canal abierto de 0,25 m y descargará al canal de aproximación a la reja.

Criterios de diseño utilizados en la presente investigación:

- Ángulo de inclinación de la reja 45°
- Separación entre barras (e): 25 mm
- Se asumió un  $\Delta x = 100 \text{ mm}$
- Velocidad en el canal de aproximación 0,60 m/s ( $V_{canal}$ ) cuando la reja este limpia y 0,4 m/s cuando la reja esté sucia.
- Se despreciaron las pérdidas por fricción

En primer lugar, se calculó el área transversal y la altura del agua en el canal.

\*Área transversal del canal de aproximación ( $A_{transversal}$ ):

$$A_{transversal} = \frac{Q_{max}}{V_{canal}} = \frac{0,0105 \text{ m}^3/s}{0,6 \text{ m/s}} = 1,75 \times 10^{-2} \text{ m}^2 = 175 \text{ cm}^2$$

Para un ancho de canal ( $a$ ) = 0,25 m =  $\phi$ , se calculó la altura del nivel del agua en el canal ( $h_1$ ):

$$h_1 = \frac{175 \text{ cm}^2}{25 \text{ cm}} = 7 \text{ cm}$$

Para conocer la altura máxima ( $h_{max}$ ) se usó la  $V_{canal}$  mínimo = 0,40 m/s que correspondería a la velocidad del agua cuando la unidad de desbaste está sucia.

$$A_{transversal} = \frac{Q_{max}}{V_{canal}} = \frac{0,0105 \text{ m}^3/s}{0,4 \text{ m/s}} = 2,6 \times 10^{-2} \text{ m}^2 = 260 \text{ cm}^2$$

$$h_{max} = \frac{260 \text{ cm}^2}{25 \text{ cm}} = 10,4 \text{ cm}$$

Como  $h_{max} < a_{canal}$  entonces;  $h_{max} = a_{canal}$ , por tanto, la altura definitiva del canal será:

$$h_{canal} = h_{max} + \Delta h + BL = a_{canal} + \Delta h + BL$$

$$h_{canal} = 0,25 \text{ m} + 0,10 \text{ m} + 0,05 \text{ m} = 0,40 \text{ m} = 40 \text{ cm}$$

Cálculo estructural de las barras:

\*Longitud de la reja ( $L_{reja}$ ):

Para calcular la longitud se consideró que la reja ocupa la altura del canal (Figura 12):

$$L_{barra} = \frac{h_{canal}}{\text{sen } 45^\circ} = \frac{40 \text{ cm}}{0,707} = 56,57 \text{ cm}$$

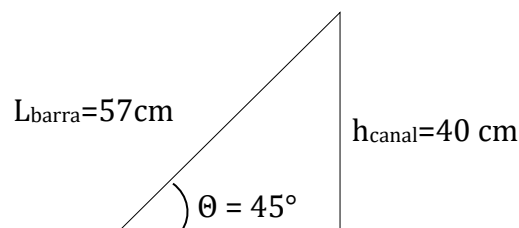


Figura 12. Longitud de la barra en el canal.

\*Profundidad de la barra ( $h_{\text{barra}}$ ):

$$h_{\text{barra}} \cong \frac{L_{\text{Reja}}}{20} = \frac{56,57 \text{ cm}}{20} = 2,83 \text{ cm}$$

\*Ancho de la barra ( $d_{\text{barra}}$ )

$$d_{\text{barra}} = \frac{2,83 \text{ cm}}{6} = 0,47 \text{ cm}$$

\*Número de barras de la reja:

$$N = \frac{(a_{\text{canal}} - d)}{(d + e)} + 1 = \frac{(250 \text{ mm} - 4,7 \text{ mm})}{(4,7 \text{ mm} + 25 \text{ mm})} + 1 = 9,3 \text{ barras} \approx 9 \text{ barras}$$

El espaciamiento de las barras extremas ( $e_E$ ) fue de:

$$\text{ancho}^* = (N - 1)(d + e) + d = (9 - 1)(4,7 \text{ mm} + 25 \text{ mm}) + 4,7 \text{ mm} = 242,3 \text{ mm}$$

$$\Delta_a = a_{\text{canal}} - \text{ancho}^* = 250 \text{ mm} - 242,3 \text{ mm} = 7,7 \text{ mm}$$

$$e_E = e + \frac{\Delta_a}{2} = 25 \text{ mm} + \frac{7,7 \text{ mm}}{2} = 28,85 \text{ mm}$$

\*Área neta entre barras ( $A_{\text{neta barras}}$ ):

$$A_{\text{neta barras}} = h_{\text{max}} \cdot (a - N_b \cdot d) = 10,4 \text{ cm} (25 \text{ cm} - 9 \times 0,47 \text{ cm}) = 216 \text{ cm}^2$$

\*Verificación de la velocidad entre barras ( $V_{\text{entre barras}}$ ):

$$V_{\text{entre barras}} = \frac{Q_{\text{max}}}{A_{\text{Neta barras}}} = \frac{1,05 \times 10^{-2} \text{ m}^3/\text{s}}{0,0216 \text{ m}^2} = 0,486 \text{ m/s}$$

$V_{\text{entre barras}}$  osciló entre 0,4 y 0,7 mg/s, entonces se acepta el dimensionamiento de la reja de cribado.

Para la longitud del canal de desbaste se consideró el valor mínimo que establece la norma en la separación entre la reja y el punto de descarga (Tabla 8), obteniendo:

$$L_{\text{canal}} = 4 \text{ m}$$

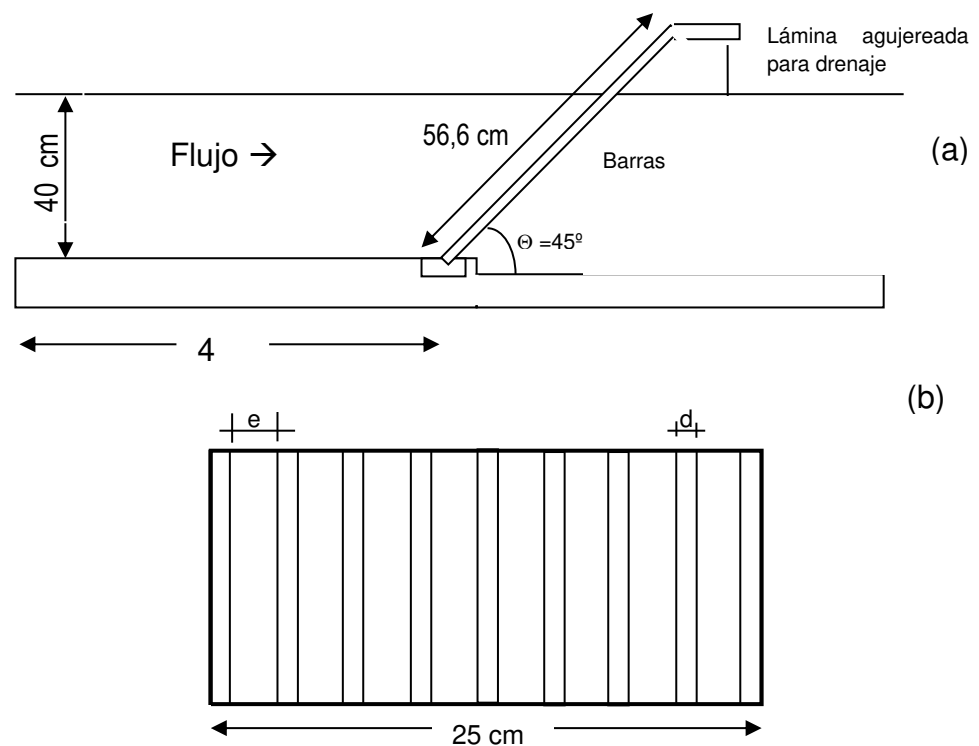
**Tabla 12.** Dimensiones la unidad de desbaste

Elemento de la planta	Descripción		Cant.	Unidad
Canal de cribado	Ancho del canal	$a_{\text{canal}}$	25	mm
	Altura total	$h_{\text{canal}}$	40	cm
	Longitud del canal	$L_{\text{canal}}$	4	m
Rejilla	Longitud de la barra	$L_{\text{barra}}$	56,57	cm
	Pendiente con la horizontal	$\theta_{\text{barra}}$	45	grados
	Profundidad	$h_{\text{barra}}$	2,83	cm
	Ancho de la barra	$d$	0,47	cm
	Número de barras	$N$	9	UND
	Espaciamiento entre barras	$e$	25	mm

**Fuente:** Elaboración propia

En la Figura 12 se muestra el detalle del canal de aproximación y la reja de cribado mediana.

**Figura 12.** Unidad de desbaste. (a) Canal de aproximación y reja (corte longitudinal). (b) Reja vista frontal



**Fuente:** Elaboración propia.



\*Pérdida de carga hidráulica

$$\Delta h = 2,42 \cdot \left[ \frac{0,0047 \text{ m}}{0,025 \text{ m}} \right]^{\frac{4}{3}} \cdot \frac{\left( 0,6 \frac{\text{m}}{\text{s}} \right)^2}{2 \cdot 9,8 \text{ m/s}^2} \cdot \text{sen } 45^\circ = 0,0034 \text{ m}$$

### 15.2.6.2 Dimensionamiento de la trampa de grasas

Cálculo del volumen de la cámara de la trampa de grasa ( $V_t$ ):

$$V_t = Q_{max} \cdot t_r$$

Asumiendo un tiempo de retención ( $t_r$ ) de 3 minutos, queda que:

$$V_t = 0,0105 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \cdot 180 \text{ s} = 1,89 \text{ m}^3$$

Para el diseño de la trampa de grasa se consideró la relación ancho largo de 2:1 ( $L = 2a$ ) y una profundidad de 1,0 m ( $h=1,0 \text{ m}$ ).

$$V_t = L \cdot a \cdot h = 2a \cdot a \cdot h$$

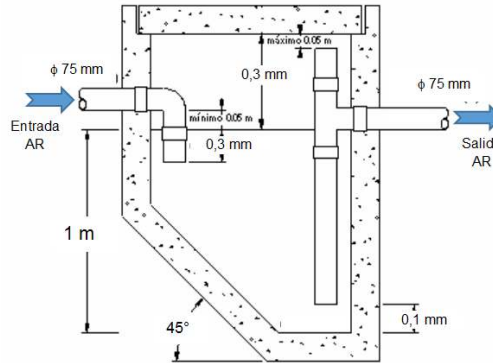
$$a = \sqrt{\frac{V_t}{2 \cdot h}} = \sqrt{\frac{2,34 \text{ m}^3}{2 \cdot 1,0 \text{ m}}} = 0,97 \text{ m} \cong 1 \text{ m}$$

$$L = 2 \cdot 1 \text{ m} = 2 \text{ m}$$

Las características de la trampa de grasa se muestran en la Figura 13 y el resumen de las dimensiones se observa en la Tabla 13.

Es importante resaltar que el ingreso del agua residual a la trampa de grasa se hará por medio de codo de 90° con diámetro de 75 mm. La salida será por medio de una tee con un diámetro de 75 mm. La parte inferior del codo de entrada deberá prolongarse hasta 0,15 m por debajo del nivel de líquido. Por su parte, la parte superior del dispositivo de salida deberá dejar una luz libre para ventilación de no más de 0,05 m por debajo del nivel de la losa del techo (OPS/CEPIS, 2003).

**Figura 13.** Componentes de la trampa de grasas



**Fuente:** Elaboración propia.

**Tabla 13.** Dimensiones de unidad de remoción de grasas

Elemento de la planta	Descripción	Cantidad	Unidad
Trampa de grasas	Volumen $V_t$	1,89	$m^3$
	Altura $h$	1	m
	Longitud $L$	2	m
	Ancho $a$	1	m

**Fuente:** Elaboración propia.

Dimensionamiento del Tanque de igualación u homogenización

\*Cálculo del volumen del tanque ( $V_t$ ):

$$V_t = 1,6 \cdot Q_{max} \cdot t_r$$

Asumiendo un tiempo de retención ( $t_r$ ) de 8 horas, queda que

$$V_t = 1,6 \cdot 0,0105 \frac{m^3}{s} \cdot 8 h \frac{3600 s}{1 h} = 484 m^3$$

\*Cálculo del área superficial ( $A_s$ ):

La relación largo ancho fue de 2:1 ( $L = 2a$ ) y la profundidad ( $h$ ) seleccionada fue de 3 m (Tabla 14).

$$A_s = \frac{V_t}{prof} = \frac{484 \text{ m}^3}{2,8 \text{ m}} = 172,9 \text{ m}^2$$

$$A_s = 2a \cdot a$$

$$a = \sqrt{\frac{172,9 \text{ m}}{2}} = 9,3 \text{ m}$$

$$L = 2 \times 9,3 \text{ m} = 18,6 \text{ m}$$

**Tabla 14.** Dimensiones del tanque de homogenización

Elemento de la planta	Descripción	Cantidad	Unidad
Tanque de homogenización	Volumen	$V_t$	484 $\text{m}^3$
	Profundidad total	$h_T$	3 m
	Longitud	L	18,6 m
	Ancho	A	9,3 m
	Borde libre	BL	0,2 m

**Fuente:** Elaboración propia.

### 15.2.6.3 Diseño y cálculo de la unidad de tratamiento biológico

**Dimensionamiento del reactor biológico:** El dimensionamiento del reactor biológico requiere seleccionar parámetros biocinéticos ( $Y$ ,  $k_d$ ), que permitirán completar los cálculos, estos fueron tomados de la bibliografía existente (Tabla 15).

**Tabla 15.** Coeficientes biocinéticos asumidos para esta investigación

Coeficiente	Valor
$Y_{T20}$	0,50 g SSV/g DBO
$k_{d20}$	0,05 $\text{d}^{-1}$
$k_{20}$	0,03 $\text{m}^3/\text{g} \cdot \text{d}$
$\Theta_c$	15 días

**Fuente:** Benefield (1980)

Cálculo del volumen del reactor biológico ( $V$ ):

Se diseñaron dos reactores tipo SBR para que funcionen en paralelo, por tanto, el caudal de diseño se dividió entre dos.

$$V = \frac{Q_d \cdot \phi \cdot Y \cdot (C_o - C_e)}{k_d \cdot Xv \cdot Ce} * FS$$

Asumiendo una eficiencia de 98% de DBO<sub>5,20</sub> y una concentración de biomasa (Xv) de 3.500 g/m<sup>3</sup>. El caudal usado para cada SBR fue de 226 m<sup>3</sup>/d, quedando:

$$V = \frac{226 \frac{m^3}{d} \cdot 15d \cdot 0,50 \frac{g \text{ SSV}}{g \text{ DBO}} \cdot (1943 - 40) \frac{g}{m^3}}{0,05 d^{-1} \cdot 3.500 \frac{g}{m^3} \cdot 40 \frac{g}{m^3}} * 1,2$$

$$V = 552,95 m^3 = 553 m^3$$

Se asumió una profundidad útil del tanque de h=2,5 m y se calculó el área:

$$\text{Área} = \frac{V_a}{h} = \frac{553 m^3}{2,5 m} = 221,2 m^2$$

Se asumió un tanque rectangular con un largo igual a dos veces el ancho, de esta manera:

$$\text{ancho} = \sqrt{\frac{\text{Área}}{2}} = \sqrt{\frac{221,2 m^2}{2}} = 10,5 m$$

$$\text{largo} = 2 * \text{ancho} = 2 * 10,5 m = 21 m$$

El borde libre asumido fue de 0,20 m resultando una profundidad total de 2,7 m. Por otro lado, se calculó el volumen de lodos y de agua residual correspondiente según el volumen del tanque SBR (V<sub>a</sub> = 30% Lodo + 70% AR):

$$V_{\text{Lodo}} = 0,30 * 553 m^3 = 165,9 m^3$$

$$V_{\text{Agua residual}} = 0,70 * 553 m^3 = 387,1 m^3$$

El consumo de oxígeno ( $\Delta O_2$ ) se calculó utilizando el  $Y_T$  y  $K_d$  (Tabla 10) y la concentración de nitrógeno NTK promedio en la caracterización (NTK:  $69,6 \text{ g/m}^3$ , Tabla 6), se obtuvo:

$$\Delta O_2 = Q_m [(1 - 1,42Y_T)(S_o - S_e)] + 1,42K_dXVa + 4,57Q_m[\text{NTK}_o]$$

Sustituyendo los datos:

$$\Delta O_2 = 226 \frac{\text{m}^3}{\text{d}} \left[ \left( 1 - 1,42 * 0,5 \frac{\text{g SSV}}{\text{g DBO}} \right) \left( 1943 \frac{\text{g}}{\text{m}^3} - 40 \frac{\text{g}}{\text{m}^3} \right) \right] + 1,42 * 0,05 \text{ d}^{-1} \\ * 3500 \frac{\text{g}}{\text{m}^3} * 553 \text{ m}^3 + 4,57 * 226 \frac{\text{m}^3}{\text{d}} * 69,6 \frac{\text{g}}{\text{m}^3}$$

$$\Delta O_2 = 334.027,4 \text{ g/d}$$

$$\Delta O_2 = 334 \text{ KgO}_2/\text{d} = 13,9 \text{ KgO}_2/\text{h}$$

La capacidad de transferencia de oxígeno se calculó considerando la presión y temperatura real del lugar donde está ubicada la fábrica de lácteos ( $C's$ )

$$CTA = \frac{CTN[(C's - C)(1,024)^{T-20^\circ\text{C}}]}{9,17} \propto$$

$$C's = C_s \frac{b - p}{760 - p} \beta$$

CTN: capacidad de transferencia normal (CTN=1,6  $\text{KgO}_2/\text{HP} \cdot \text{hora}$ ).

$$T = 20^\circ\text{C}$$

$$C_s = 7.12 \text{ g/m}^3$$

$b = 629,6 \text{ mmHg}$  (considerando la ubicación de la planta a una altura de 1500 m.s.n.m.)

$$p = 17,54 \text{ mmHg}$$

$$\beta = 0,95$$

$$\alpha = 0,85$$

$c = 2 \text{ g/m}^3$  (considerando al caudal promedio como dato)

Sustituyendo los datos se obtuvo  $C's$  y CTA:

$$C's = C_s \frac{b - p}{760 - p} \beta = 7,12 \frac{\text{mg}}{\text{L}} * \frac{629,6 \text{ mmHg} - 17,54 \text{ mmHg}}{760 \text{ mmHg} - 17,54 \text{ mmHg}} * 0,95 = 5,58 \text{ mg/L}$$

$$\begin{aligned} \text{CTA} &= \frac{\text{CTN}[(C's - C)(1,024)^{T-20^\circ\text{C}}]}{9,17} \propto \\ &= \frac{1,6 \text{ kgO}_2/\text{HP} * \text{h} [(5,58 - 2)(1,024)^{20-20}] * 0,85}{9,17} \\ &= 0,53 \text{ kgO}_2/\text{HP} * \text{h} \end{aligned}$$

La potencia total, el número de aireadores y la potencia individual de cada aireador se calculó de la siguiente manera (Tabla 16):

$$\text{Pot} = \frac{\Delta\text{O}_2}{\text{CTA}} = \frac{27,8 \text{ kgO}_2/\text{h}}{0,53 \text{ kgO}_2/\text{HP} * \text{h}} = 26,2 \text{ HP}$$

$$\#_a = \frac{\text{Pot}}{10 \text{ Hp}} = \frac{26,2 \text{ HP}}{10 \text{ HP}} = 2,62 \approx 3 \text{ aireadores}$$

$$\text{Pot}_a = \frac{\text{Pot}}{\#_a} = \frac{26,2 \text{ HP}}{3 \text{ aireador}} = 8,7 \approx 9 \text{ HP/aireador}$$

**Tabla 16.** Características de un reactor de carga secuencial y equipo de aireación.

Descripción		Cantidad	Unidad
Volumen	$V_a$	553	$\text{m}^3$
Profundidad total	$h_T$	2,7	m
Borde Libre	BL	0,2	m
Área	Área	221,2	$\text{m}^2$
Ancho	Ancho	10,5	m
Largo	Largo	21	m
Número de aireadores	$\#_a$	3	UND
Potencia del aireador	$\text{Pot}_a$	9	HP
Número de SBR		2	

**Fuente:** Elaboración propia.

**Funcionamiento del reactor biológico (SBR):** El reactor biológico por carga secuencial (SBR) funcionará de forma discontinua, inicialmente con ciclos de 12 horas (que luego podrán ser ajustados, según la eficiencia del proceso). Se utilizarán dos SBR que funcionarán en paralelo, por lo que el caudal se dividió en dos. El tiempo de funcionamiento del SBR de 12 h será discriminado en media hora para llenar el reactor, 10 horas de reacción, una hora de sedimentación y media hora de descarga del agua residual tratada (Tabla 13). El volumen de agua residual que utilizará en cada tanda será de 381,1 m<sup>3</sup> en cada SBR.

**Tabla 17.** Parámetros operacionales de los SBR

Parámetros	Dimensión	Unidades
Duración Total del Ciclo	12	Horas
Cada ciclo estará dividido etapas:		
Llenado del SBR (387,1 m <sup>3</sup> )	0,5	Horas
Tiempo de reacción (t):	10	Horas
Fase anaeróbica (aire off)	2	Horas
Fase aeróbica (aire on)	6	Horas
Fase anóxica (aire off)	2	Horas
Sedimentación de la biomasa	1	Hora
Vaciado del SBR (387,1 m <sup>3</sup> )	0,5	Horas

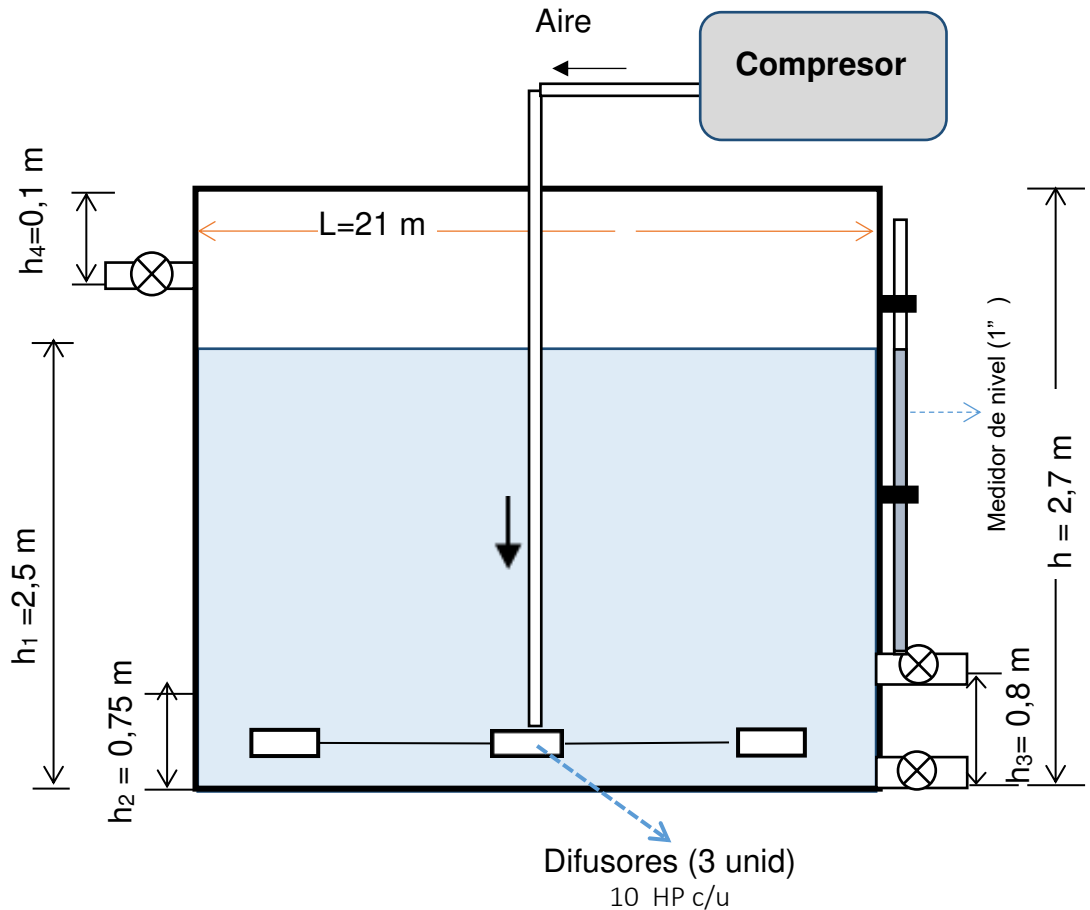
**Fuente:** Elaboración propia.

Se estima que el sistema será capaz de remover 90% de DBO<sub>5</sub> y cantidades suficientes de nitrógeno y fósforo, logrando producir un efluente que cumpla con la legislación ambiental colombiana. En el reactor biológico se establecerá y crecerá un consorcio de microorganismos mixtos: aeróbicos (funcionan con oxígeno), anaeróbicos facultativos y anóxicos (no requieren oxígeno) provenientes de las mismas aguas residuales negras, quienes serán los responsables del tratamiento del agua residual.

Durante el tiempo de reacción se alternarán fases con suministro de aire, con fases sin suministro del mismo, esto permitirá la remoción simultánea de carbono, nitrógeno y fósforo en el reactor biológico. Esta acción se logrará mediante la activación de una válvula solenoide controlada por un temporizador que abrirá el paso del aire desde el compresor al reactor biológico solamente durante la fase aeróbica (Figura 14).



**Figura 14.** Esquema del SBR con sus componentes



**Fuente:** Elaboración propia.

Leyenda Figura 14:

L: Longitud del reactor = 21 m

h: altura total reactor = 2,7 m

h<sub>1</sub>: altura del volumen de agua con biomasa =2,5 m

h<sub>2</sub>: altura de biomasa sedimentada = 0,75 m

h<sub>3</sub>: altura de la tubería de salida del agua tratada = 0,80 m

h<sub>4</sub>: altura punto de alimentación de agua residual = 2,6 m

Se debe colocar una salida en la parte más baja del tanque para los procesos de purga y limpieza del mismo.

Las tuberías de alimentación, descarga y limpieza serán de PVC de 4"

- Punto de carga/descarga agua residual. Tubería + llave de paso (toma de muestras).

Posteriormente, se pasará a la etapa de sedimentación, que se realizará en el mismo SBR, donde permanecerá en reposo la mezcla de agua residual y biomasa, es decir, no existirá suministro de aire, ni entrada o salida de agua residual. En este período la biomasa, por ser más densa, se separa del agua residual, por lo que por el punto de descarga del biodigestor sólo saldrá agua residual. La biomasa permanecerá en el reactor para tratar el siguiente lote de agua residual.

Diariamente se realizará un proceso de purga, para extraer las células muertas del reactor biológico, esto se realizará abriendo manualmente la llave de purga/limpieza del SBR (ubicada en el fondo del reactor). Es muy importante que esta actividad se realice durante la fase aeróbica, es decir, cuando el aire y la agitación estén encendidos. Este licor mezcla extraído, será conducido a los lechos de secado, donde permanecerá deshidratándose y estabilizándose por un período de 7 días. El agua residual que percole debe ser alimentada nuevamente al sistema de tratamiento.

Por tanto, como se mencionó, el SBR deberá funcionar con una automatización mínima, mediante el uso de una válvula solenoide + temporizador para el control del aire, válvula solenoide + flotante eléctrico + temporizador para la descarga del agua residual tratada y un equipo de bombeo de aguas negras + flotantes eléctricos + temporizadores para la activación y control del ingreso del agua residual del sistema.

Para que la carga y descarga del reactor se cumpla en los lapsos señalados en la Tabla diseñada para la descripción de los mismos, se deben ajustar el caudal de entrada y salida mediante las llaves de paso ubicadas a la entrada y salida del reactor.

Unidad de desinfección: El agua residual tratada (sobrenadante) es conducida hacia el tratamiento complementario a través de una canaleta Parshall donde se adiciona una dosis de 2 mg/L de hipoclorito de calcio para el proceso de desinfección en el punto de salto hidráulico donde ocurre la mezcla rápida y por tanto, se dosifica mejor el desinfectante.

El canal se diseñó con el caudal máximo ( $Q_{\text{máx}} = 0,0105 \text{ m}^3/\text{s}$ ), entrando en la Tabla 14 se obtuvieron los valores de las medidas características del vertedero Parshall.

**Tabla 18.** Dimensiones del vertedero Parshall.

W	A	B	C	D	F	G	K	N	CAPACIDAD (m <sup>3</sup> /s)	
									MÁXIMA	MÍNIMA
7,60	46,70	45,70	17,80	25,90	15,20	30,50	2,50	5,70	0,031	0,001
15,20	62,10	61,00	39,40	39,70	30,50	61,00	7,60	11,40	0,111	0,001
22,90	88,00	86,40	38,10	57,50	30,50	45,70	7,60	11,40	0,250	0,003
30,50	137,20	134,38	61,00	84,50	61,00	91,50	7,60	22,90	0,457	0,010
45,70	144,90	142,00	76,20	102,60	61,00	91,50	7,60	22,90	0,698	0,014
61,00	152,50	149,60	91,50	120,70	61,00	91,50	7,60	22,90	0,939	0,019
91,50	167,70	164,60	122,00	157,30	61,00	91,50	7,60	22,90	1,430	0,028
122,00	183,00	179,50	152,50	193,80	61,00	91,50	7,60	22,90	1,927	0,036
183,00	213,50	209,40	213,50	266,90	61,00	91,50	7,60	22,90	2,937	0,075
244,00	244,00	239,20	274,50	339,90	61,00	91,50	7,60	22,90	3,958	0,131
305,00	435,30	305,00	366,00	475,90	91,50	183,00	15,20	34,30	5,675	0,170

**Fuente:** Elaboración propia.

Todas las dimensiones de la tabla 18 están dadas en cm

Para completar el diseño de la canaleta Parshall, se debe calcular “x” y “Ha”

$$Q_{\max} = 0,5353 * H_a^{1,53}$$

Despejando Ha

$$H_a = \sqrt[1,53]{\frac{Q_{\max}}{0,5353}} = \sqrt[1,53]{\frac{0,013 \text{ m}^3/\text{s}}{0,5353}} = 0,088 \text{ m}$$

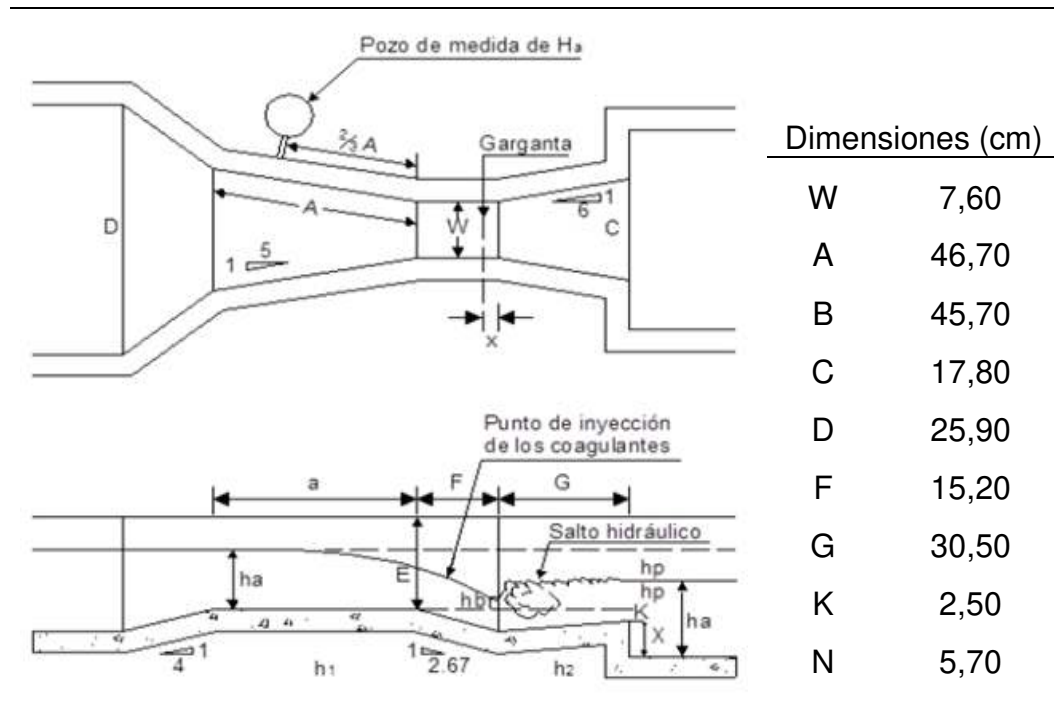
$$H_b \leq 0,60 * H_a$$

$$H_b = 0,60 * H_a = 0,60 * 0,088 \text{ m} = 0,0528 \text{ m}$$

$$x = H_a - (H_b + k) = 0,088 \text{ m} - (0,0528 \text{ m} + 0,025 \text{ m}) = 0,010 \text{ m} \cong 1,0 \text{ cm}$$

Las dimensiones del canal Parshall se muestran resumidas en la Tabla 19.

**Tabla 19.** Dimensiones del canal Parshall



**Fuente:** Elaboración propia.

La canaleta Parshall servirá para adicionar el agente desinfectante en el punto de salto hidráulico, esto permitirá una mezcla rápida con el agua residual y luego se disminuirá la velocidad de flujo cuando el efluente pase al tanque de cloración.

El volumen del tanque de cloración se calculó para un tiempo de contacto de 30 minutos.

$$V_{TC} = Q_{\max} * TRH = \left( 0,0105 \text{ m}^3/\text{s} * \frac{60 \text{ s}}{1 \text{ min}} \right) * 30 \text{ min} = 18,9 \text{ m}^3$$

Se asumió una profundidad del tanque de  $h=1,5 \text{ m}$ , el resultado del área fue:

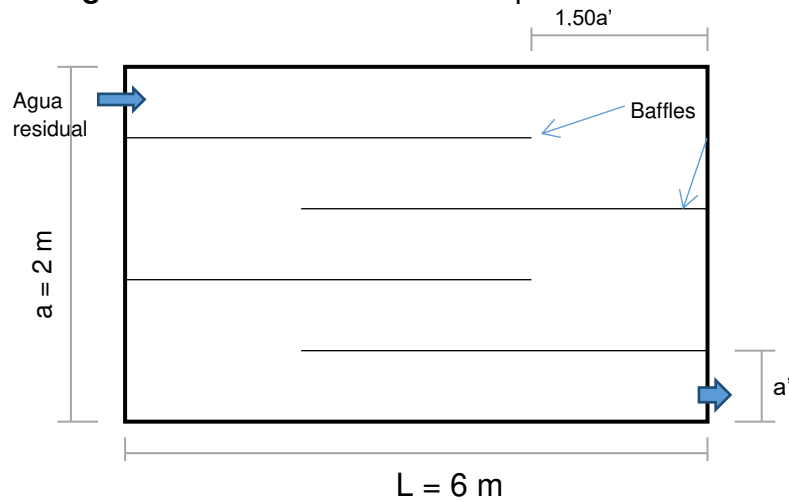
$$\text{Área} = \frac{18,9 \text{ m}^3}{1,5 \text{ m}} = 12,6 \text{ m}^2$$

\*Cálculo de dimensiones del tanque (Figura 16), considerando  $L = 3 \cdot a$ , el área de un rectángulo es  $\text{Área} = L \times a = 3a^2$

$$a = \sqrt{\frac{A_s}{3}} = \sqrt{\frac{12,6 \text{ m}^2}{3}} = 2,0 \text{ m}$$

$$L = 3 a = 3 \times 2 \text{ m} = 6 \text{ m}$$

**Figura 15.** Dimensiones del tanque de contacto



**Fuente:** Elaboración propia.

Se seleccionaron cuatro tabiques o deflectores de 0,1 m de espesor para reducir cortocircuitos hidráulicos. Se determinó la longitud de recorrido del agua ( $L'$ ) y la separación entre deflectores ( $a'$ ) (Tabla 16).

$$L' = L * n = 6 \text{ m} * 4 = 24 \text{ m}$$

$$a' = \frac{a}{n + 1} = \frac{2 \text{ m}}{4 + 1} = 0,4 \text{ m}$$

$$\frac{L'}{a'} = \frac{24 \text{ m}}{0,4 \text{ m}} = 60 > 10$$

**Tabla 20.** Dimensiones del tanque de cloración.

Elemento de la planta	Descripción		Cantidad	Unidad
Tanque de contacto	Volumen	$V_{TC}$	18,9	$m^3$
	Profundidad	H	1,50	m
	Borde libre	BL	0,2	m
	Área	Área	12,6	$m^2$
	Ancho	ancho	2	m
	Largo	Largo	6	m
Deflectores	Número de deflectores	#deflectores	4	UND
	Espesor	E	0,10	m
	Longitud de recorrido del agua	L'	24	m
	Separación entre deflectores	a'	0,4	m

**Fuente:** Elaboración propia.

**Lechos de secado:** Para el caso del efluente lácteo, la capa de lodo aplicada tendrá un espesor máximo de 25 cm para garantizar que los rayos solares penetren y logren deshidratar al lodo y a su vez, inactivar a los microorganismos que estén presentes, aprovechando la fracción de rayos UV del sol.

Cuando los lodos estén secos deberán ser analizados y luego de verificar que cumplen con la normativa ambiental vigente, podrían ser usados como abono o enmiendas para los suelos.

Los lechos de secado se diseñaron como tanques rectangulares preferiblemente de hormigón con un tubo perforado de desagüe que lo atravesará longitudinalmente por la mitad, para esto debe existir una pendiente hacia el centro de 1,5%. Se les dejará un borde libre de 15 cm.

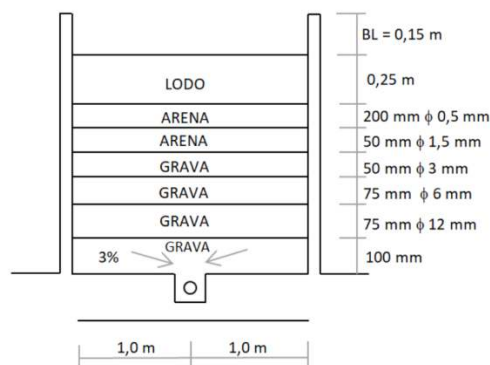
Los drenajes de los lechos estarán formados por tubos colectores con juntas abiertas, cubiertos por grava (por encima de la corona del tubo) del orden de 15 a 20 cm, generalmente lleva 12 cm con grava entre 0,5 y 2 pulgadas, y los otros 8 cm con grava de 1 pulgada (Figura 17). El líquido drenado por los lechos de secado debe ser recirculado nuevamente al inicio de la planta de tratamiento (al tanque de homogenización).

Las características de los componentes de los lechos de secado se especifican a continuación:

1. El diámetro del tubo perforado de drenaje será de 110 mm.

2. Pendiente del canal de concreto rectangular para colocación de los tubos: 1,5 %.
3. Material del piso del lecho: concreto.
4. Pendiente transversal del piso del lecho hacia el canal: 3 %.

**Figura 16.** Corte transversal del Lecho de Secado



**Fuente:** Elaboración propia.

\*Cálculo del caudal de lodo:

Diariamente se purgarán de cada SBR la cantidad de 36,9 m<sup>3</sup>/d de licor mezcla que corresponde al caudal de purga (Q<sub>p</sub>):

$$Q_p = \frac{V_{SBR}}{TRH} = \frac{553 \text{ m}^3}{15 \text{ d}} = 36,9 \text{ m}^3/\text{d}$$

Este caudal se enviará desde cada SBR a los lechos de secado, como se diseñaron 2 SBR entonces el caudal de alimentación de los lechos será 2 x Q<sub>p</sub> (73,8 m<sup>3</sup>/d).

\*Determinación de la masa de materia orgánica no soluble diaria (nbSSV):

$$nbSSV \left( \frac{kg}{d} \right) = 25 \frac{g}{m^3} \cdot Q_p = 25 \frac{g}{m^3} \cdot 73,8 \frac{m^3}{d} \cdot \frac{1 \text{ kg}}{1000 \text{ g}} = 1,845 \frac{kg}{d}$$

\*Producción de biomasa dentro del reactor (P<sub>x,bio</sub>):

$$P_{x,bio} = \frac{Q_p \cdot Y \cdot (S_o - S)}{(1 + k_d \cdot SRT)} + \frac{f_d \cdot k_d \cdot Y \cdot Q_p \cdot (S_o - S) \cdot SRT}{(1 + k_d \cdot SRT)}$$



$$\begin{aligned}
 P_{x,bio} &= \frac{73,8 \text{ m}^3/\text{d} \cdot 0,4 \text{ gSSV/gDBO} \cdot (1943 - 40) \text{ gDQO/m}^3}{(1 + 0,1 \text{ d}^{-1} \cdot 15 \text{ d})} \\
 &+ \frac{0,15 \frac{\text{g}}{\text{g}} \cdot 0,1 \frac{\text{gSSV}}{\text{gSSV d}} \cdot 0,4 \frac{\text{gSSV}}{\text{gDBO}} \cdot 73,8 \frac{\text{m}^3}{\text{d}} \cdot \frac{(1943 - 40) \text{ gDBO}}{\text{m}^3} \cdot 15 \text{ d}}{(1 + 0,1 \text{ d}^{-1} \cdot 15 \text{ d})} \\
 P_{x,bio} &= 27.526,5 \frac{\text{gSSV}}{\text{d}}
 \end{aligned}$$

\*Producción de sólidos totales ( $P_{x,TSS}$ ):

$$P_{x,TSS} = \frac{P_{x,bio}}{f_s} + nbSSV + Q \cdot (SST_o - SSV_o)$$

$f_s$ : 0,85 (valor teórico)

$$P_{x,TSS} = \frac{27.526,5 \frac{\text{gSSV}}{\text{d}}}{0,85} + 1,845 \frac{\text{g}}{\text{d}} + 73,8 \frac{\text{m}^3}{\text{d}} \cdot (72) \frac{\text{g}}{\text{m}^3}$$

$$P_{x,SST} = 37.699,5 \frac{\text{gSSV}}{\text{d}}$$

**Cálculo del área del lecho ( $A_{lecho}$ ):** Para calcular el área del lecho de secado, se determina la producción anual de lodos del sistema y luego se divide entre la carga superficial de sólidos (SLR). En este caso se refiere a una SLR específica para lechos de secado, la cual depende del proceso del cual provenga el lodo. En el caso de lodos provenientes de procesos de lodos activados, un rango típico de 60 – 100 Kg sólidos secos/m<sup>2</sup>·año.

$$A_{lecho} = \frac{P_{x,TSS}}{SLR} = \frac{37,7 \text{ kg/d}}{100 \frac{\text{kg}}{\text{año m}^2}} \cdot \frac{365 \text{ d}}{1 \text{ año}} = 137,6 \text{ m}^2$$

Se consideró un tiempo de secado del lecho de 7 días, de esta manera se obtuvo el número de lechos con la siguiente ecuación:

$$N_{LS} = \# \text{días} + 1 = 7 + 1 = 8 \text{ Lechos}$$

Por tanto, el área de cada lecho es:

$$A_{lecho} = \frac{A_L}{N_{LS}-1} = \frac{137,6 \text{ m}^2}{8-1} = 19,7 \text{ m}^2$$

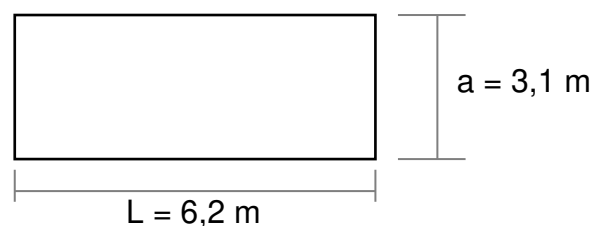
Se asumieron lechos rectangulares (Figura 18), se calcularon las dimensiones de largo y ancho de cada lecho de secado:

$$L = 2 \cdot a \quad A_{\text{lecho}} = 2 \cdot a \cdot a$$

$$a = \sqrt{\frac{A_{\text{lecho}}}{2}} = \sqrt{\frac{19,7 \text{ m}^2}{2}} = 3,1 \text{ m}$$

$$L = 2 \cdot 3,1 \text{ m} = 6,2 \text{ m}$$

**Figura 17.** Dimensiones de los lechos de secado



**Fuente:** Elaboración propia.

$h_{\text{lodo}} \leq 0,25 \text{ m}$  ; se consideró 0,025 m en la altura de la capa de lodo.

Basándose en los espesores de las capas del material de drenaje, la altura total de los lechos de secado fue de 0,95 m (Tabla 21).

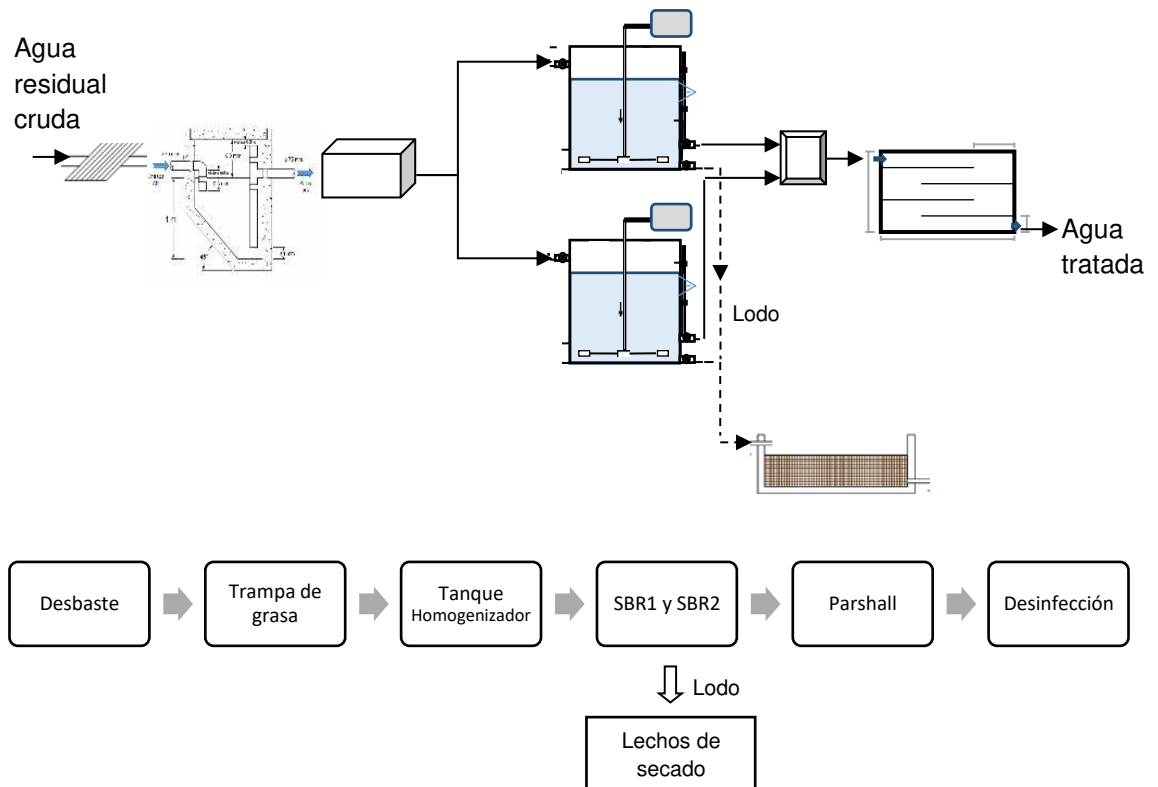
**Tabla 21.** Dimensiones de los lechos de secado.

Descripción		Cant.	Unidad
Área Total	$A_T$	137,6	$\text{m}^2$
Tiempo de secado	$t_s$	7	d
Numero de lechos	$N_{LS}$	8	UND
Área de cada lecho	$A_{\text{lecho}}$	19,7	$\text{m}^2$
Ancho	$a$	3,1	m
Largo	$L$	6,2	m
Altura del lodo en el lecho	$h_{\text{Lodo}}$	0,025	m
Altura total del lecho	$h_T$	0,95	m
Cantidad de material de relleno por cada lecho			
Grava (3-12 mm)		5,8	$\text{m}^3$
Arena (0,5 – 1,5 mm)		4,8	$\text{m}^3$

**Fuente:** Elaboración propia.

Finalizado el dimensionamiento de las unidades que conformarán el sistema de tratamiento de las aguas residuales de la industria láctea se realizó la diagramación señalando la ubicación de las unidades en el tren de tratamiento (Figura 18).

**Figura 18.** Tren de tratamiento del agua residual proveniente de la industria láctea



**Fuente:** Elaboración propia.

## 16. CONCLUSIONES

La caracterización del agua residual de las industrias lácteas de “San Jerónimo Cajicá Cabrera” y “Hermanos SAS”, ubicadas en la vereda Hato grande del municipio de Cajicá, mostró que es un efluente con características orgánicas biodegradables, rico en  $DBO_{5,20}$  y DQO, con presencia de aceites y grasas, nutrientes, sólidos suspendidos y coliformes totales que deben ser removidos antes de su disposición final.

La factibilidad técnica del efluente generado en las industrias lácteas estuvo orientada a la aplicación de un tratamiento biológico debido a la alta biodegradabilidad del agua residual. Por tanto, el uso de un reactor por carga secuencial se presentó como la opción central del tratamiento. Previamente, se diseñó una unidad de desbaste y remoción de grasas y aceites, posteriormente, como postratamiento se incluyó una unidad de desinfección que permitirá eliminar a los coliformes y otros microorganismos presentes en el agua residual, antes de ser vertidas al medio ambiente.

Se realizó el dimensionamiento de las unidades que conformarán el sistema de tratamiento iniciando por las rejillas de separación de sólidos medianos, la trampa de grasa, el tanque de homogenización, el reactor biológico (SBR), lechos de secado, y finalmente, la unidad de desinfección, con el fin de ser implementados en la industria láctea, objeto del proyecto.

En el diseño se contempló que las unidades de tratamiento con las dimensiones señaladas lograrán eficiencias de remoción de 98% de DBO y DQO, 90% de sólidos, 95% de grasas y aceites, una disminución entre 90 y 95% de nutrientes (N y P); y, por último, una eliminación del 99,9% de microorganismos patógenos.

Con el desarrollo de este proyecto se logró diseñar un sistema de tratamiento para los efluentes producidos por una empresa procesadora de productos lácteos adaptado a las características propias del efluente generado. Con la implementación de estos diseños se genera un alto desarrollo en el deterioro ambiental y sanitario de las zonas aledañas a estas industrias.

Es por esta razón, que se recomienda a las empresas visitadas y demás, implementar las propuestas de mejoramiento a las estructuras mencionadas en el capítulo anterior, para que todo el equipamiento cumpla con los requisitos establecidos en la norma y finalmente no arrojar estos vertimientos sin ser tratados a las cuencas cercanas a esta infraestructura, generando impactos ambientales como se evidenció en la visita realizada.

## REFERENCIAS

- ACS Medio Ambiente, (2010). *Sistema para tratamiento de agua*. Recuperado de: <http://www.acsmedioambiente.com/clarificadordaf.html>
- Aguamarket, (2010). *Diccionario del agua*. Recuperado de: <http://www.aguamarket.com/diccionario/terminos.asp?Id=3051&termino=Usos+del+agua+en+las+industrias>
- Andrades Balao, J.A. (2008). *Los vertidos del sector lácteo*. Master Profesional en Ingeniería y Gestión Medio Ambiental. Contaminación de las aguas. Sector Lácteo. Escuela de Organización Industrial. Sevilla, España. 22 p.
- Arango, A. y García, L. (2007). *Tratamiento de aguas residuales de la industria láctea*. Recuperado de: [http://repository.lasallista.edu.co/dspace/bitstream/10567/526/1/PL\\_V2N\\_2\\_23-30\\_electrocoagulaci%C3%B3n.pdf](http://repository.lasallista.edu.co/dspace/bitstream/10567/526/1/PL_V2N_2_23-30_electrocoagulaci%C3%B3n.pdf)
- Arango-Ruiz, A., Garcés Giraldo, L.F. (2007). *Diseño de una celda de electrocoagulación para el tratamiento de aguas residuales de la industria láctea*. Revista Universidad EAFIT, 43(147): 56-67.
- Arias, F. (2009) *El proyecto de investigación*. Recuperado de: [https://www.academia.edu/9153815/Fidias\\_G\\_Arias\\_El\\_Proyecto\\_de\\_Investigaci%C3%B3n\\_5ta\\_Edici%C3%B3n](https://www.academia.edu/9153815/Fidias_G_Arias_El_Proyecto_de_Investigaci%C3%B3n_5ta_Edici%C3%B3n)
- Artan, N.; Orhon, D.; Choi, E. (2004). *Appropriate design of activated sludge systems for nitrogen removal from high strength wastewaters*. Journal of Environmental Science and Health. Part A-Toxic/Hazardous Substances & Environmental Engineering, 39(7):1913-1924
- Arundel J, (2000). *Tratamiento de aguas negras y efluentes industriales*. Editorial Acribia, S.A. España.
- Aydiner, C.; Sen, U.; Topcu, S.; Ekinci, D.; Altinay, A. D.; Koseoglu-Imer, D. Y y Keskinler, B. (2014). Techno-economic viability of innovative membrane systems in water and mass recovery from dairy wastewater. Journal of Membrane Science, 458, 66-75
- Balestrini (2006). *Como se elabora el proyecto de investigación*. Recuperado de: [https://issuu.com/sonia\\_duarte/docs/como-se-elabora-el-proyecto-de-inve](https://issuu.com/sonia_duarte/docs/como-se-elabora-el-proyecto-de-inve)
- Bharati S. Shete and N. P. Shinkar. (2013). Dairy Industry Wastewater Sources, Characteristics & its Effects on Environment. *International Journal of Current Engineering and Technology*, 3(5), pp. 1611-1615.

- Bavaresco, A. (2013). *Proceso metodológico en la investigación*. Recuperado de: [proceso-metodologico-en-la-investigacion-bavaresco-reduc.pdf](#)
- Borjas, X., Almeida, C., Cuvi, K., Espinoza, R. (2017). *Caracterización de efluentes de las industrias láctea y confites y evaluación del crecimiento de la biomasa por el uso de polielectrolitos en reactores*. XXIV Simposio Peruano de Energía Solar y del Ambiente (XXIV- SPES). 10 p.
- Bortoluzzi, A., Faitao, J., Di Luccio, M., Dallago, R., Steffens, J., Zobot, G., Tres, M. (2017). *Dairy wastewater treatment using integrated membrane systems*. Journal of Environmental Chemical Engineering <http://dx.doi.org/10.1016/j.jece.2017.09.018>
- Carvalho, F., Prazeres, A., Rivas, J. (2013). *Cheese whey wastewater: Characterization and treatment*. Science of the Total Environment, 445-446: 385-396.
- Catalán, J. (1969). *Química del agua*. Editorial Blume, primera edición, España.
- Cervant, E. (2006). *Degradación del medio ambiente*. Recuperado de: <http://www.edcervant.blogspot.com>
- Chen, Z., Luo, J., Hang, X., Wan, Y. (2018). *Physicochemical characterization of tight nanofiltration membranes for dairy wastewater treatment*. Journal of Membrane Science, 547: 51-63.
- Coria, I. (2008). *El estudio del impacto ambiental: características y metodologías. Argentina: Universidad Educativo Latinoamericano*. Recuperado de: [https://uvirtual.unet.edu.ve/file.php/617/Estudio\\_impacto\\_ambiental.pdf](https://uvirtual.unet.edu.ve/file.php/617/Estudio_impacto_ambiental.pdf)
- Crites & Tchobanoglous, (2000). *Tratamiento de aguas residuales para núcleos pequeños y descentralizados*. Editorial Mc Graw Hill. Bogotá. Colombia.
- Demirel, B., Orhan, Y., Onay, T.T. (2005). *Anaerobic treatment of dairy wastewaters: a review*. Process Biochemistry 40: 2583–2595
- Díaz O, (2008). *Bioquímica del agua*. Recuperado de: <http://elaguadigital.blogspot.com/2008/03/bioquimica-del-agua.html>
- Dosta, J.; Rovira, J.; Galí, A.; Macé, S.; Mata-Álvarez, J. (2008). Integration of a Coagulation/Flocculation step in a biological sequencing batch reactor for COD and nitrogen removal of supernatant of anaerobically digested piggy wastewater. Biosource Technology, 99 (13):5722-5730.
- Durai, G.; Rajasimman, M. (2011). *Biological Treatment of tannery wastewater – A review*. Journal of Environmental Science and Technology, 4(1):1-17.
- Ekama, G.; Wentzel, M. (2008). Organic Material Removal. In: Biological Wastewater Treatment: Principles, Modelling and Design. Edited by M.

Henze, M.C.M. van Loosdrecht, G.A. Ekama and D. Brdjanovic. Published by IWA Publishing, London, UK. 511 p. Capítulo 4. pp 53-86.

Elakkiya, E. y Matheswaran, M. (2013). Comparison of anodic metabolisms in bioelectricity production during treatment of dairy wastewater in Microbial Fuel Cell. *Bioresource Technology*, 136, 407-412.

El-Sheikh, M.A.S. (2009). Tannery wastewater pre-treatment. *Water Science and Technology-WST*, 60(2):433-440.

EPA. U.S.Environmental Protection Agency. (1999). Folleto informativo de tecnología de aguas residuales. Reactores secuenciales por tandas. EPA 832-F-99-073. 11 p.

EPA. U.S.Environmental Protection Agency. (2004). Guidelines for Water Reuse. EPA/625/R-04/108. 28 p.

Escuela de Organización Industrial (2008). *Los vertidos del sector lácteo*. Recuperado de: <file:///C:/Users/MESTANGA/Downloads/componente48157.pdf>

Gaceta N° 39704-S (2016). Norma para mitigar las molestias y riesgos a la salud de las personas por el polvo producido por la construcción de obras, tanto privadas como públicas. Fecha 1 de julio 2016. 5 p.

Gaibor-Chávez, J.A. (2014). *Caracterización del agua residual generada en la planta de lácteos El Salinerito –parroquia Salinas – cantón Guaranda para el diseño de una planta de tratamiento* Revista de Investigación Talentos, 1(1):107-112.

Garces, L. y Arango, A. (2008). *Tratamiento de aguas residuales de la industria láctea por electrocoagulación*. Recuperado de: [http://www.lasallista.edu.co/fxcul/media/pdf/RevistaLimpia/vol2n2/PL\\_V2\\_N2\\_23-30\\_electrocoagulaci%C3%B3n.pdf](http://www.lasallista.edu.co/fxcul/media/pdf/RevistaLimpia/vol2n2/PL_V2_N2_23-30_electrocoagulaci%C3%B3n.pdf).

Gaya, Y. (2018). *Los usos del agua*. Recuperado de: <https://www.iagua.es/blogs/joan-gaya-fuertes/usos-agua>

GMTD (2005). *Guía de Mejores Técnicas Disponibles en España del Sector Lácteo*. Ministerio del Medio Ambiente. ISBN 9788483203217. 182 p.

Grant, (1980). *Ingeniería Sanitaria y Ambiental Las grasas, aceites y soluciones de tratamiento de efluentes aceitosos*. Recuperado de: <http://www.e-seia.cl/archivos/gyaAP.pdf>

Guía para el control y prevención de la contaminación industrial (2001). *Fabricación de productos lácteos por un trabajo sano y seguro. Chile*. Recuperado de: <http://www.achs.cl/.../control-y-prevencion-de-la-contaminacion-industrial>



- Henze, M.; Comeau Y. (2008). Wastewater Characterization. *In: Biological Wastewater Treatment: Principles, Modelling and Design*. Edited by M. Henze, M.C.M. van Loosdrecht, G.A. Ekama and D. Brdjanovic. Published by IWA Publishing, London, Reino Unido. 511 p. Capítulo 3.
- IDEAM. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. Toma de muestras de aguas residuales. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial – República de Colombia. 17 p.
- INESCOP. Centro de Innovación y Tecnología (2008). *Aplicación de bioensayos respirométricos en aguas de tenerías*. Departamento del Medio Ambiente de INESCOP. Alicante, España. 16 p
- Ingeniería de tratamiento de aguas residuales, (2008). *Tratamiento fisicoquímico y biológico de aguas residuales*. Recuperado de: <http://www.oocities.org/edrochac/residuales/tratamientobiologico4.pdf>
- Isaza, M. (2013). *Compromiso ambiental y sustentabilidad de la industria de alimentos lácteos en Colombia*. Recuperado de: <https://repository.unimilitar.edu.co/bitstream/handle/10654/10498/IsazaVargasMariaFernanda2013.pdf;jsessionid=DDD71A9B41F38122CBBCA2BF507C0B78?sequence=1>
- Kolev Slavov, A., (2017). *General Characteristics and Treatment Possibilities of Dairy Wastewater – A Review*. Food Technol. Biotechnol. 55 (1): 14–28.
- Lozano, W. (2012). Diseño de plantas de tratamiento de aguas residuales. Recuperado de: [https://www.researchgate.net/publication/298354134\\_Disenos\\_de\\_Plantas\\_de\\_Tratamiento\\_de\\_Aguas\\_Residuales](https://www.researchgate.net/publication/298354134_Disenos_de_Plantas_de_Tratamiento_de_Aguas_Residuales)
- Martí, J. (2008). *Biodigestores familiares. Guía de diseño y manual de instalación. Biodigestores de polietileno tubular de bajo costo para trópico, valle y altiplano. GTZ (Cooperación Técnica Alemana)*. Recuperado de: <https://www.beegroup-cimne.com/biodigestores-familiares-guia-de-diseno-y-manual-de-instalacion/>
- Martínez F. y Ysase T (2007). “Descripción de los tipos de plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas”. México
- Martínez F. y Ysase T (2007). *Descripción de los tipos de plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas*. México
- Martins, A., Salla, M. y Bolanos, M. (2019). *Tratamiento de aguas residuales provenientes de industria de productos de limpieza y desinfectantes por ozonización convencional y catalítica*. Recuperado de: [https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0718-33052019000200223](https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-33052019000200223)

- Mekonnen, A.; Leta, S. (2011). *Effects of cycle and fill period length on the performance of a single sequencing batch reactor in the treatment of composite tannery wastewater*. *Natura and Science*, 9(10):1-8.
- Metcalf & Eddy, (1985). *Ingeniería de aguas residuales tratamiento vertidos y reutilización*. Editorial Mc Graw Hill. Segunda edición, México D.F.
- Metcalf & Eddy. (1996). *Ingeniería de las aguas residuales, tratamiento, vertido y reutilización*. Ed. Mc Graw Hill
- Mira, C. (2015). *Normatividad sobre recurso hídrico en Colombia*. Recuperado de: <http://legislacionaguagrupo5.blogspot.com/>
- Mohseni-Bandpi, A., Bazari, H. (2004). *Biological Treatment of Dairy Wastewater by Sequencing Batch Reactor*. *Iranian J Env Health Sci Eng*, 1(2): 65-69.
- Muñoz S. y Sánchez R. (2016). *El agua en la industria alimentaria*. Recuperado de: [http://hidromed.org/hm/images/pdf/BSEHM%202018\\_33\(2\)157-171\\_Mu%C3%B1oz-S.pdf](http://hidromed.org/hm/images/pdf/BSEHM%202018_33(2)157-171_Mu%C3%B1oz-S.pdf)
- Nasr, M., Elreedy, A., Abdel-Kader, A., Elbarki, W., Moustafa, M. (2014). *Environmental consideration of dairy wastewater treatment using hybrid sequencing batch reactor* *Sustain. Environ. Res.*, 24(6), 449-456.
- Nemerow N. & Dasgupta A, (1998) *Tratamiento de vertidos industriales y peligrosos*. Editorial Díaz de Santos, S.A. Madrid.
- Ngai, T. (2010): *Characterizing the Dissemination Process of Household Water Treatment Systems in Developing Countries*. Recuperado de: [www.enpho.org](http://www.enpho.org)
- OPS/CEPIS/03.81. UNATSABAR. (2003). *Especificaciones Técnicas para el Diseño de Trampa de Grasa Unidad de apoyo técnico para el saneamiento básico del área rural*. Lima, Perú. 11 p.
- Ordoñez, J. (2019). *Nuevos límites máximos permisibles de vertimientos para aguas residuales*. Recuperado de: <https://revista-mm.com/administracion/nuevos-limites-maximos-permisibles-de-vertimientos-aguas-residuales/>
- Organización Mundial de la Salud (2018) *Guías para la calidad del agua de consumo humano*. Recuperado de: <https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/272403/9789243549958-spa.pdf?ua=1>
- Osama, A., Patil, S.S., Salve, K.S. (2015) *Characerization of dairy waste wáter and its effects on the environmets*. *World Journal of Pharmaceutical Research*, 4(7) 6 p.

- Ozturk, A., Aygun, A.,m Nas, B. (2019). *Application of sequencing batch biofilm reactor (SBBR) in dairy wastewater treatment*. Korean J. Chem. Eng, DOI: 10.1007/s11814-018-0198-2.
- Pariante, M. (2017). *Problemática de las aguas residuales de la industria alimentaria*. Recuperado de: <https://www.madrimasd.org/blogs/remtavares/2017/07/13/133242>
- Peral, X. (2006) *Química ambiental de sistemas terrestres*. Editorial Reverté, S.A.
- Quasim W, Mane AV. Characterization and treatment of selected food industrial effluents by coagulation and adsorption techniques. *Water Res Ind.* 2013;4:1–12. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wri.2013.09.005>
- Ramalho R.S, (1996). *Tratamiento de aguas residuales*. Editorial Reverté, S.A. España.
- Ramírez, L. y Duran, M. (2008). *Demanda química de oxígeno de muestras acuosas(a) método alternativo (b) tratamiento de los residuos generados por el método tradicional de refluo abierto y por el método alternativo*. Recuperado de: [http://cmas.siu.buap.mx/portal\\_pprd/work/sites/redica/resources/LocalContent/127/2/Libro%20DQO%202008.pdf](http://cmas.siu.buap.mx/portal_pprd/work/sites/redica/resources/LocalContent/127/2/Libro%20DQO%202008.pdf)
- Romero, J. (2000). *Tratamiento de aguas residuales, teoría y principios de diseño*. Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería, edición I. Bogotá, Colombia.
- Romero, M. (2009). *Desarrollo de un plan de manejo ambiental para la industria procesadora de leche Florap*. Quito: Escuela Politecnica Nacional. Obtenido de <http://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/1671/1/CD-2601.pdf>
- Ruiz, C. (2002). *Instrumentos y Técnicas de Investigación Educativa*. Recuperado de: [https://www.academia.edu/37886948/Instrumentos\\_y\\_Tecnicas\\_de\\_Investigaci%C3%B3n\\_Educativa\\_Carlos\\_Ruiz\\_Bolivar\\_pdf](https://www.academia.edu/37886948/Instrumentos_y_Tecnicas_de_Investigaci%C3%B3n_Educativa_Carlos_Ruiz_Bolivar_pdf)
- Sainz J, (1995). *Tecnologías para la sostenibilidad. Procesos y operaciones unitarias en depuración de aguas residuales*. Colección EOI medio ambiente. Madrid.
- Salcedo, J. (2010). *Rediseño de una planta de tratamiento de agua residual para los efluentes líquidos provenientes de la receptoría de leche cruda, en Calichito La Fría, de la empresa Pasteurizadora Táchira, C.A.* Venezuela.
- Santamaría-Freire, E., Álvarez Calvache, F., Santamaría Díaz, E., Zamora Carrillo, M. (2015). *Caracterización de los parámetros de calidad del agua*

*para disminuir la contaminación durante el procesamiento de lácteos.*  
Agroindustrial Science, 5(1): 13-26.

Sawyer C., McCarty P. & Parkin G. (2001). *Química para Ingeniería Ambiental*. 4ta. Ed. McGraw-Hill Interamericana, S.A. Bogotá, D.C., Colombia.

Seoanez, M. (1995). *Aguas residuales urbanas: Tratamientos naturales de bajo costo y aprovechamiento*. Recuperado de: <https://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=XF2015040019>

Show, K. Y.; Tay, J. H y Hung, Y. T. (2010). Global perspective of anaerobic treatment of industrial wastewater. In *Environmental Bioengineering*, p. 773-776.

SMWW (2012) *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. American Public Health Association, American Water Works Association, Water Pollution Control Federation. 21 ed., New York.

Stoop, M.L.M. (2003). Water management of production systems optimised by environmentally oriented integral chain management: case study of leather manufacturing in developing countries. *Technovation*, 23, 265-278  
Stoop, M.L.M. (2003). Water management of production systems optimised by environmentally oriented integral chain management: case study of leather manufacturing in developing countries. *Technovation*, 23, 265-278

Supo, F. y Cavero, H. (2014). *Fundamentos teóricos y procedimentales de la investigación científica*. Recuperado de: <https://www.felipesupo.com/wp-content/uploads/2020/02/Fundamentos-de-la-Investigaci%C3%B3n-Cient%C3%ADfica.pdf>

Suresh, S., Tripathi, R., Gernal Rana, M.N. (2011). *Review on treatment of industrial wastewater using sequential batch reactor*. *International Journal of Science Technology & Management*, 2 (1): 64-84.

Tchobanoglous, G. (2000). *Ingeniería de aguas residuales tratamiento, vertido y Reutilización*. Editorial McGraw-Hill. MADRID.

Tikariha, A. y Sahu, O. (2014). Study of characteristics and treatments of dairy industry waste water. *Journal of Applied y Environmental Microbiology*, 2(1), 6-22.

Tinoco, G. (2016). *El agua en la industria alimentaria*. Recuperado de: [http://www.produccion-animal.com.ar/agua\\_cono\\_sur\\_de\\_america/82-El\\_agua\\_en\\_la\\_industria.pdf](http://www.produccion-animal.com.ar/agua_cono_sur_de_america/82-El_agua_en_la_industria.pdf)

Tirado-Armesto, D.F., Gallo García, L.A., Acevedo-Correa, D., Mouthon Bello, J.A. (2016). *Biotratamientos de aguas residuales en la industria láctea*. *Producción + limpia*, 11(1): 171-184.

- Troconis, A. (2010). *Tratamiento de Aguas Residuales*. Recuperado de: [https://www.belzona.com/es/solution\\_maps/wastewater/money\\_map.pdf](https://www.belzona.com/es/solution_maps/wastewater/money_map.pdf)
- Tuset, S. (2013). *Tratamiento de aguas residuales de la industria láctea*. Recuperado de: <https://blog.condorchem.com/tratamiento-de-aguas-residuales-de-la-industria-lactea/>
- Valencia G, (1999). *Tratamientos primarios*. Recuperado de: <http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/scan2/010439/010439-05.pdf>
- Valizadeh, K., Davarpanah, A. (2019). Design and construction of a micro-photo bioreactor in order to dairy wastewater treatment by micro-algae: parametric study. *Energy Sources, Part A: Recovery, utilization and environmental effects*. <https://doi.org/10.1080/15567036.2019.1588425>
- Varo, P., Chillón M. y Prats D. (2004). *Características Fisicoquímicas de las Aguas Ablandadas*. Recuperado de: <http://www.googleacadémico.com>
- Yilmaz, G.; Lemaire, R.; Keller, J.; Yuan, Z. (2007). Effectiveness of an alternating aerobic, anoxic/anaerobic strategy for maintaining biomass activity of BNR sludge during long-term starvation. *Water Research*, 41, 2590-2598