



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA  
SEDE CUENCA  
CARRERA DE INGENIERÍA AMBIENTAL**

**“PROPUESTA DE DISEÑO DE UN HUMEDAL ARTIFICIAL DE FLUJO  
SUBSUPERFICIAL HORIZONTAL PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS  
RESIDUALES DE LA INDUSTRIA DE LÁCTEOS SAN ANTONIO S.A.”**

Trabajo de titulación previo a la obtención del  
título de Ingeniera Ambiental

AUTORA: MERCY STEFANIA MAINATO ÁLVAREZ

TUTORA: ING. ESTEFANÍA CARIDAD AVILÉS SACOTO, PhD.

Cuenca - Ecuador

2025

**CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE  
TITULACIÓN**

Yo, Mercy Stefania Mainato Álvarez con documento de identificación N° 0302734470 manifiesto que:

Soy la autora y responsable del presente trabajo; y, autorizo a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Cuenca, 30 de septiembre del 2025

Atentamente,



---

Mercy Stefania Mainato Álvarez

0302734470

**CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE  
TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

Yo, Mercy Stefania Mainato Álvarez con documento de identificación N° 0302734470, expreso mi voluntad y por medio del presente documento cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autora del Trabajo experimental: “Propuesta de diseño de un humedal artificial de flujo subsuperficial horizontal para el tratamiento de aguas residuales de la industria de lácteos San Antonio S.A.”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniera Ambiental, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribo este documento en el momento que hago la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, 30 de septiembre del 2025

Atentamente,



---

Mercy Stefania Mainato Álvarez

0302734470

## CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Estefanía Caridad Avilés Sacoto con documento de identificación N° 0104551395, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: “PROPUESTA DE DISEÑO DE UN HUMEDAL ARTIFICIAL DE FLUJO SUBSUPERFICIAL HORIZONTAL PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE LA INDUSTRIA DE LÁCTEOS SAN ANTONIO S.A.”, realizado por Mercy Stefania Maianto Álvarez con documento de identificación N° 0302734470, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción Trabajo experimental que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, 30 de septiembre del 2025

Atentamente,



---

Ing. Estefanía Caridad Avilés Sacoto, PhD.

0104551395

## **DEDICATORIA**

### ***A mi madre, Ana María***

Este logro académico es un reflejo del incansable esfuerzo que ha invertido para brindarme una educación sólida. Cada sacrificio que ha hecho, cada día de trabajo duro y cada decisión que tomo en mi nombre son el fundamento de mi éxito. Su dedicación y compromiso con mi educación son un regalo que valoro más allá de las palabras. Esta tesis es un testimonio de su sacrificio y amor, y me llena de orgullo honrarla de esta manera. Gracias por ser el apoyo en mi vida, por iluminar el camino hacia el conocimiento y por inculcarme la importancia del trabajo duro y la educación. tiene mi admiración y respeto por todo lo que ha hecho por mí por tal razón este logro no es solo mío, si no, también tuyo y es fruto del esfuerzo que ha hecho por darme la mejor vida y educación.

Te amo profundamente.

### ***A mis hermanos, Yolanda, Belen, Kimberly y Nik***

Por ser mi apoyo incondicional por motivarme a ser mejor todos los días, por ser un ejemplo a seguir, por la paciencia y el cariño que me dan, sobre todo por enseñarme que soy capaz de cumplir mis metas por más difíciles que sean.

### ***A mi hija, Danae***

Sé que aún eres pequeñita para entender, pero cuando seas grande vas a leer esto, que está tesis te lo dedico a ti, por darme esas fuerzas necesarias que necesitaba, cuando creía que ya no podía más, te miraba y decía por ella lo voy hacer, por ella lo tengo que lograr y por ti princesa lo hice, juntas lo logramos.

### *A mi esposo, Julio*

Por la constancia y persistencia, por su apoyo inquebrantable y su constante aliento han sido fundamentales en mi camino, a pesar de la distancia nunca dejo de darme motivación a conseguir lo anhelado. Gracias por apoyarme cada paso del camino, por celebrar mis triunfos y por consolarme en los momentos de desafío. Su amor y apoyo incondicional han sido el motor que me impulsa a alcanzar mis metas. Estoy eternamente agradecida por tenerle a mi lado como mi compañero de vida y mi más fiel admirador.

### *A cada persona presente durante este proceso*

Dedicado a quienes se convirtieron en mi apoyo incondicional, a quienes me abrieron su corazón para acogerme como parte de su vida que durante todo este tiempo me han demostrado su ayuda, cariño y lo que realmente significa la amistad a través de la paciencia, concejos, esto no sería posible sin cada uno de ustedes.

## AGRADECIMIENTO

Quisiera comenzar expresando mi más sincero agradecimiento a mi tutora de tesis, a la Dra. Estefanía Avilés, cuya experiencia, paciencia y apoyo constante fueron fundamentales para la realización de este trabajo. Su guía no solo me proporcionó claridad académica, sino también motivación en momentos de duda. Su confianza en mí me impulsó a seguir adelante y superar los desafíos.

Culminó una etapa importante de mi vida, por lo que extendo un profundo agradecimiento, a quienes hicieron posible este éxito, aquellos que junto a mí caminaron en todo momento y siempre fueron mi fortaleza, apoyo e inspiración de perseverancia. De manera especial quiero expresar mi más profundo agradecimiento a mi mamá Ana María, estoy agradecida infinitamente por permitirme vivir esta experiencia, por brindarme su amor y apoyo incondicional, este logro no es solo mío sino también de ella, porque es fruto de todo el esfuerzo que ha hecho por darme lo mejor y no me alcanzaría esta vida para agradecerle.

A mis hermanos, por sus palabras de aliento y apoyo constante, a mi esposo, por su presencia, constancia e inquebrantable apoyo, gracias por ser mi pilar en los momentos difíciles. Sin ustedes, este logro no habría sido posible.

Finalmente, gracias de corazón, a mi familia, por la paciencia, motivación, criterio y aliento prestado durante el desarrollo de este proyecto, sin su apoyo este éxito no habría sido alcanzado.

¡Gracias! a todos aquellos que han sido parte de esta experiencia, por su ayuda, cariño, apoyo, motivación, consejos y brindarme su amistad sincera durante esta etapa universitaria, por hacer de esta experiencia un recuerdo de vida.

Gracias por la confianza en mí.

## ÍNDICE GENERAL

PORTADA.....	I
CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR .....	¡Error! Marcador no definido.
CERTIFICACIÓN .....	¡Error! Marcador no definido.
DECLARATORIA DE RESPONSABILIDAD .....	¡Error! Marcador no definido.
DEDICATORIA.....	V
AGRADECIMIENTO.....	VII
INDICE GENERAL.....	VIII
ÍNDICE DE FIGURAS.....	XII
ÍNDICE DE TABLAS .....	XIII
RESUMEN.....	XIII
ABSTRACT .....	15
1 INTRODUCCIÓN .....	16
1.1 Problema .....	16
1.1.1 Delimitación de la Investigación .....	17
1.1.2 Delimitación Geográfica o Espacial de la Investigación .....	17
1.1.3 Delimitación Estacional de la Investigación.....	18
2 OBJETIVOS .....	19
2.1 Objetivo General.....	19
2.2 Objetivos Específicos.....	19
3 MARCO TEORICO.....	20
3.1 Contaminación Ambiental .....	20
3.2 Aguas residuales en empresas industriales .....	21
3.2.1 Aguas residuales en empresas lácteas.....	21
3.3 Métodos y tecnología de tratamiento para agua residual en la industria láctea....	22
3.3.1 Totorá especie utilizada para la fitorremediación en humedales artificiales ....	22
3.4 Humedales Artificiales.....	23
3.4.1 Características de humedales artificiales .....	25
3.4.2 Ventajas de humedales artificiales.....	26

4	MARCO LEGAL.....	27
4.1	Constitución de la República del Ecuador (2008) .....	27
4.2	Ley Orgánica de Recursos Hídricos, Usos y Aprovechamiento del Agua .....	28
4.3	Ley Orgánica de Prevención y Control de la Contaminación Ambiental (vigente mediante Decreto Supremo 3516) .....	28
4.4	Texto Unificado de Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica (TULSMA, vigente 2023-2025) .....	28
4.5	Para la Norma Técnica INEN 2 169:2013 Requisitos para el vertido de aguas residuales.....	28
4.6	Convenios Internacionales .....	29
5	METODOLOGÍA .....	30
5.1	Procedimientos para la toma de muestras .....	30
5.1.1	Parámetros Físicos y Químicos a Determinar en el Análisis de Laboratorio ...	30
a)	Parámetros definidos para análisis de laboratorio. ....	31
5.1.2	Período de Muestreo .....	31
5.1.3	Cogida de Muestras.....	31
5.2	Transporte, Etiquetado y Almacenamiento de Muestras .....	32
5.2.1	Manejo y Conservación de muestras .....	32
5.2.2	Almacenamiento .....	32
5.2.3	Transporte .....	33
5.2.4	Almacenamiento temporal .....	33
5.3	Procedimiento de análisis de parámetros físicos y químicos del agua residual de la industria lácteos San Antonio S.A. ....	33
5.3.1	Materiales.....	34
5.3.2	Procedimiento de Análisis Parámetros In Situ.....	35
5.3.3	Procedimiento de Análisis de Parámetros Físicos y Químicos.....	35
•	Determinación de Sólidos Totales (ST).....	35
•	Determinación de Sólidos Suspendidos Totales (SST) .....	36
•	Determinación de Sólidos Disueltos Totales (SDT).....	36
•	Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO5).....	37

•	Demanda Química de Oxígeno (DQO).....	37
•	Nitrógeno Total (NTK) .....	37
•	Fósforo Total (PT) .....	37
5.4	Criterio técnico para el diseño del humedal Artificial de flujo subsuperficial horizontal. ....	38
5.5	Fundamentación técnica para el diseño del humedal artificial horizontal .....	39
5.5.1	Caudal efluente .....	39
5.5.2	Temperatura constante del humedal .....	40
5.5.3	Área de la superficie .....	40
5.5.4	Tiempo de retención teórico .....	41
5.5.5	Ancho del humedal artificial.....	41
5.5.6	Largo del humedal artificial.....	42
5.5.7	Importancia del sustrato en el funcionamiento de humedales artificiales de flujo subsuperficial .....	43
6	RESULTADOS.....	44
6.1	Objetivo 1: Caracterizar a nivel de laboratorio las aguas residuales del efluente de la empresa San Antonio S.A. mediante el análisis de pruebas fisicoquímicos. ....	44
6.2	Evaluar la eficiencia de Schoenoplectus californicus(Totora) a través de revisión bibliográfica. ....	45
6.2.1	Vegetación empleada .....	45
6.3	Objetivo 3: Elaborar una propuesta del humedal subsuperficial horizontal para el tratamiento de estas aguas residuales.....	46
6.3.1	Cálculos para un diseño de un humedal superficial horizontal.....	46
6.4	Diagnóstico de la carga contaminante del efluente.....	54
6.5	Parámetros técnicos de diseño del Humedal Artificial de Flujo Subsuperficial... ..	55
6.6	Resultados del dimensionamiento del humedal. ....	56
6.6.1	Primer Criterio de diseño del Humedal Artificial con Área de 2832 m2. ....	56
6.6.2	Segundo Criterio de diseño del Humedal Artificial con Área de 4000 m2. ....	57
6.1	Análisis técnico comparativo.....	59
6.7	Manual de mantenimiento del humedal artificial Sub-superficial para la empresa de lácteos San Antonio S.A .....	60

6.7.1	Introducción .....	60
6.7.2	Mantenimiento de Rutina (Frecuencia semanal o mensual).....	60
6.7.3	Mantenimiento Trimestral o Semestral.....	61
6.7.4	Mantenimiento Anual .....	61
6.7.5	Monitoreo de Parámetros (Frecuencia mensual a trimestral) .....	62
6.7.6	Señales de Alerta.....	62
6.7.7	Registro de Mantenimiento.....	63
7	DISCUSIÓN. ....	64
8	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	66
8.1	Conclusiones .....	66
8.2	RECOMENDACIONES.....	67
9	BIBLIOGRAFIA. ....	68
10	ANEXOS .....	70

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1</b>	Mapa de ubicación de la empresa San Antonio .....	18
<b>Figura 2</b>	Planta depuradora Totorá .....	22
<b>Figura 3</b>	Humedales artificiales .....	24
<b>Figura 4</b>	Humedales artificiales de flujo subsuperficial .....	26
<b>Figura 5</b>	Humedal artificial.....	38
<b>Figura 6</b>	Diseño del Humedal Subsuperficial 1 .....	70
<b>Figura 7</b>	Diseño del Humedal Subsuperficial 2.....	71
<b>Figura 8</b>	Detalle del anclaje del Humedal.....	72
<b>Figura 9</b>	Empresa de lácteos “San Antonio S.A.”. ....	73
<b>Figura 10</b>	Planta de tratamiento de aguas residuales de la empresa láctea “San Antonio S.A.”. 73	
<b>Figura 11</b>	Recolección de las muestras de acuerdo a los protocolos de las normas técnicas NTE INEN. ....	74
<b>Figura 12</b>	Análisis de parámetros in situ, equipo multiparámetro HQ40d. ....	74
<b>Figura 13</b>	Análisis de parámetros in situ, equipo medidor de Ph .....	75
<b>Figura 14</b>	Recolección, etiquetado, transporte y almacenamiento temporal de las muestras.....	75
<b>Figura 15</b>	Determinación de sólidos totales, técnicas de evaporación de las muestras. ....	76
<b>Figura 16</b>	Determinación de sólidos totales, técnicas de evaporación de las muestras. ....	76
<b>Figura 17</b>	Determinación de sólidos suspendidos totales, metodología filtración al vacío. ....	77
<b>Figura 18</b>	Determinación de sólidos disueltos totales, metodología evaporación. ....	77
<b>Figura 19</b>	Determinación de sólidos disueltos totales, metodología evaporación.....	78
<b>Figura 20</b>	Determinación de la DQO, metodología de titulación y calorimetría.....	78
<b>Figura 21</b>	Determinación de la DQO, metodología de titulación y calorimetría.....	79
<b>Figura 22</b>	Determinación de la DBO5, metodología de incubación.....	79
<b>Figura 23</b>	Determinación de NKT, metodología de fotometría.....	80
<b>Figura 24</b>	Determinación de NKT, metodología de fotometría.....	80

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1</b>	Parámetros de aguas residuales lácteas. ....	31
<b>Tabla 2</b>	Materiales y reactivos.....	34
<b>Tabla 3</b>	Características de los medios para los HSS .....	42
<b>Tabla 4</b>	Resultados del Análisis de los Parámetros in situ y fisicoquímicos del efluente.....	44
<b>Tabla 5</b>	Temperatura constante .....	47
<b>Tabla 6</b>	Datos para el cálculo del área superficial.....	48
<b>Tabla 7</b>	Datos para el cálculo del TDH .....	49
<b>Tabla 8</b>	Datos para obtener el Ancho .....	49
<b>Tabla 9</b>	Datos para obtener el Largo del Humedal.....	50
<b>Tabla 10</b>	Datos para el cálculo de la temperatura Constante .....	51
<b>Tabla 11</b>	Datos para el cálculo del Área.....	52
<b>Tabla 12</b>	Datos para el cálculo del TRH .....	52
<b>Tabla 13</b>	Datos para obtener el Ancho .....	53
<b>Tabla 14</b>	Datos para obtener el largo del humedal.....	54
<b>Tabla 15</b>	Parámetros influentes para el diagnóstico de la carga contaminante. ....	54
<b>Tabla 16</b>	Parámetros técnicos de diseño del Humedal Artificial de Flujo Subsuperficial .....	55
<b>Tabla 17</b>	Criterios de dimensión para un área de 2832 m <sup>2</sup> .....	56
<b>Tabla 18</b>	Criterios de dimensión para un área 4000m <sup>2</sup> . ....	57
<b>Tabla 19</b>	Análisis técnico comparativo .....	59
<b>Tabla 20</b>	Consideraciones para señales de alerta .....	62

## RESUMEN

En los últimos años se ha desarrollado un interés y preocupación en el tratamiento de las aguas residuales, con un enfoque más acentuado en las que provienen de las industrias lácteas por su alta carga contaminante, esto genera consecuencias en el medio ambiente que son desequilibrantes con efectos desencadenantes negativos en las matrices ambientales.

En la industria láctea San Antonio S.A se desarrolló las visitas técnicas, para identificar la problemática y tomar las respectivas muestras de agua, esto se realizó a través de un cronograma, en este se diseñó y se especificó los tiempos de muestreo de acuerdo a las líneas de producción de la empresa, la cual, proporcionó una base de datos de los productos a elaborar en el transcurso de este trabajo, siendo este una guía para determinar el periodo y tiempo de muestreo.

El presente proyecto plantea la construcción de un humedal artificial de flujo subsuperficial para tratar las aguas residuales que genera la empresa Láctea San Antonio S.A, por ser considerado un tratamiento fitodepurador, eficaz en la eliminación de materia orgánica, patógenos y nutrientes del agua residual, de mantenimiento sencillo y de bajo costo.

Para alcanzar la calidad de agua deseada que cumpla con los límites máximos permisibles para descargas a un cauce de agua según la Norma Ambiental 002, el humedal artificial tiene un volumen de  $120\text{m}^3$  (28 m de ancho, 35,5 m de largo y de profundidad 0,7m). El humedal artificial tiene Totorá, que forma parte esencial del sistema, se estima ayudará a disminuir un 86 % para DBO<sub>5</sub>, 80-90 % para DQO, 90-95% para sólidos en suspensión, 78.8% coliformes fecales y 80 % para nitrógeno total y fósforo total. Además, se presenta el plano en AUTOCAD 2025, con sus medidas reales, y un plan de mantenimiento para proteger la vida útil del sistema de tratamiento.

**Palabras Clave:** Humedal artificial, tratamiento de aguas residuales, recurso hídrico, industria Láctea, gestión ambiental.

## ABSTRACT

In recent years, there has been growing interest and concern about wastewater treatment, with a particular focus on dairy industry wastewater. Due to its high pollution load and environmental impact, wastewater is highly unbalanced and has a significant impact on environmental factors.

In the dairy industry San Antonio S.A. technical visits were developed to identify the problem and take the respective water samples, this was done through a sampling schedule, in which the sampling times were designed and specified according to the production lines by the company "Lácteos San Antonio S.A.", the same provided a database of the products to be produced during the sampling period, serving as a guide to determine the sampling period and time.

This project proposes the construction of a subsurface flow artificial wetland to treat the wastewater generated by Láctea San Antonio S.A., as it is considered a phytoremediation treatment, effective in removing organic matter, pathogens and nutrients from wastewater, easy to maintain and low cost. To achieve the desired water quality that complies with the maximum permissible limits for discharges to a waterway according to Environmental Standard 002, the artificial wetland has a volume of 120 m<sup>3</sup> (28 m wide, 35.5 m long and 0.7 m deep).

The artificial wetland has totora, which is an essential part of the system, it is estimated that it will help reduce 86% for BOD<sub>5</sub>, 80-90% for COD, 90-95% for suspended solids, 78.8% for fecal coliforms and 80% for total nitrogen and total phosphorus. In addition, the AUTOCAD 2025 plan is presented, with its actual measurements, and a maintenance plan to protect the life of the treatment system.

**Keywords:** Artificial wetland, wastewater treatment, water resources, dairy industry, environmental management.

# 1 INTRODUCCIÓN

## 1.1 Problema

En la actualidad, la contaminación del agua y la creciente demanda de los recursos de origen acuático es un problema de impacto global. Las actividades humanas, especialmente los procesos de industrialización que demandan grandes volúmenes de agua para transformar materias primas, representan una de las principales causas del impacto ambiental. Aunque existen diversas alternativas para optimizar estas prácticas, no son suficientes para garantizar una verdadera conveniencia sostenible con el entorno natural.

Según informes de las Naciones Unidas sobre el uso y desarrollo de los recursos hídricos a nivel global, la producción de un litro de leche requiere aproximadamente 1.000 litros de agua, de los cuales entre el 65 % y el 75 % se convierte en aguas residuales. En la zona central del país, las industrias lácteas impactan significativamente al medio ambiente, de forma particular a los cuerpos hídricos, puesto que, la descarga de residuos provenientes de los procesos de producción y el uso de sustancias químicas como ácidos y bases en las labores de limpieza y desinfección de los equipos, incrementa la carga nociva a estos (Escalante y Fajardo, 2022).

Frente a esta problemática existen diferentes estudios en donde se ha implementado los humedales artificiales como solución para el tratamiento del agua servidas de las industrias lácteas, con una eficacia mayor al 90%. En este sentido Egoavil (2018) menciona la importancia de implementar un sistema de trampa de grasas, para que retenga grasas y demás sedimentos, con ello se conseguiría una mejor remoción del agua tratada. El humedal debe adaptarse según el tipo de contaminante ya sea en función de DBO o de nitratos o sulfatos, pues el que tenga mayor carga debe primar para su diseño.

En el tratamiento de aguas residuales es fundamental que se incorporen tecnologías eficientes y de bajo costo, capaces de cumplir con los estándares establecidos para la remoción de materia orgánica, nutrientes y microorganismos, especialmente cuando se busca su reúso. Entre las tecnologías disponibles, los sistemas biológicos y fisicoquímicos son los más comunes, destacando por sus menores costos de operación y mantenimiento.

En este contexto, se plantea investigar a la empresa de productos lácteos San Antonio S.A., ubicada en Cañar, puesto que, sus actividades generan aguas residuales con una elevada carga orgánica, variaciones significativas en el pH a lo largo de los diferentes procesos, así como altos niveles de DQO (Demanda Química de Oxígeno) y DBO<sub>5</sub> (Demanda Bioquímica de Oxígeno en cinco días), en donde, se realizará un análisis detallado de efluentes generadas por esta industria y se propondrá la implementación de un humedal artificial como alternativa de tratamiento.

Se determinará las condiciones iniciales y el nivel de concentración de los contaminantes presentes, debido que es necesario identificar previamente los tipos de contaminantes involucrados, para que el tratamiento sea eficaz y el proceso unitario seleccionado sea el más adecuado con el fin de optimizar la eficiencia del sistema propuesto.

### **1.1.1 Delimitación de la Investigación**

La cobertura del estudio abarca varios aspectos; disposición espacial y distribución temporal, se define una delimitación para cada aspecto a considerar en la delimitación de la investigación.

### **1.1.2 Delimitación Geográfica o Espacial de la Investigación**

Para conocer y exponer claramente el límite fijado con respecto al objeto de estudio, la investigación se desarrollará en la empresa láctea San Antonio SA, considerando su variable

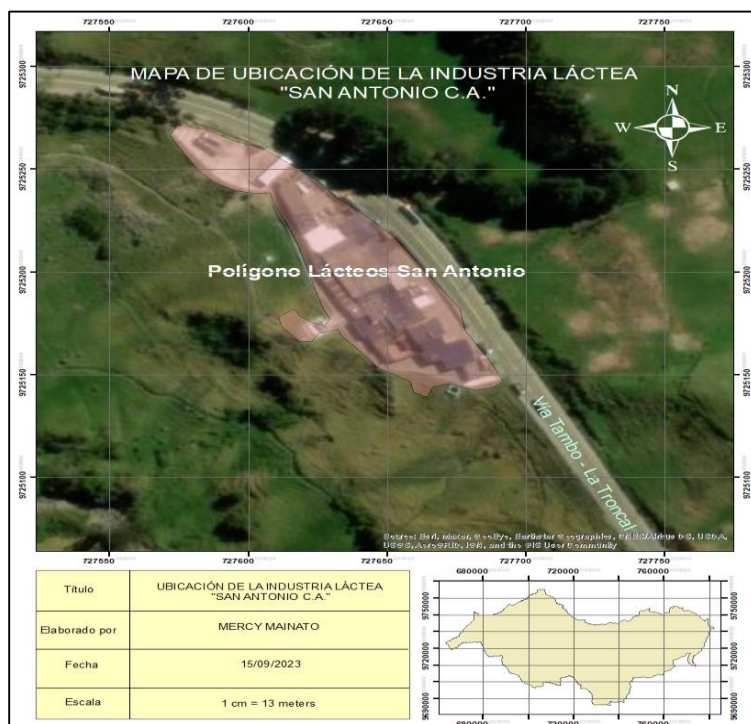
independiente la carga contaminante de su efluente o agua residual, la cual se encuentra ubicada en la provincia del Cañar, cantón Cañar, la ilustración 1 muestra la delimitación geográfica de la investigación.

### 1.1.3 Delimitación Estacional de la Investigación

Para el desarrollo de esta investigación experimental considerando el análisis de las variables intervinientes tales como, el sistema de producción de la empresa, el cronograma de actividades y la variabilidad en la demanda de productos, la investigación en campo fue de un mes, en el cual se recabo información para su análisis.

#### Figura 1.

*Mapa de ubicación de la empresa San Antonio*



**Nota:** Elaborado por la Autora

## 2 OBJETIVOS

### 2.1 Objetivo General

- Proponer el diseño de un humedal artificial de flujo subsuperficial horizontal para el tratamiento de aguas residuales de la empresa San Antonio S.A empleando *Schoenoplectus californicus* (Totorá).

### 2.2 Objetivos Específicos

- Caracterizar a nivel de laboratorio las aguas residuales del efluente de la empresa San Antonio S.A mediante el análisis de pruebas fisicoquímicas y microbiológicas.
- Evaluar la eficiencia de *Schoenoplectus californicus*(Totorá) a través de revisión bibliográfica.
- Elaborar una propuesta del humedal subsuperficial horizontal para el tratamiento de estas aguas residuales.

### **3 MARCO TEORICO**

En años recientes se ha desarrollado un interés y preocupación en el tratamiento de las aguas residuales, en particular en las que provenientes de empresas industriales, debido a su alta carga contaminante, además de sus consecuencias en el entorno son bastantes desequilibrantes y generan efectos desencadenantes en las matrices ambientales.

A continuación, se desarrollará la fundamentación teórica, basada en acentuar y potenciar los conceptos básicos en el desarrollo de la metodología, enfocado en métodos de efluentes residuales provenientes de una industria láctea, además, de plantear una propuesta de diseño de un humedal artificial de flujo subsuperficial horizontal para el tratamiento efluentes de la empresa de lácteos San Antonio S.A.

#### **3.1 Contaminación Ambiental**

La polución ambiental se define como la presencia o incorporación al medio ambiente de elementos físicos, químicos o biológicos que, por su cantidad o persistencia, alteran las condiciones naturales, afectan negativamente a los ecosistemas, comprometen la biodiversidad y representan riesgos para la salubridad humana y el desarrollo sostenible (Chávez et al., 2022). La actividad humana también es considerada otro factor contaminante principalmente aquellas que realizan procesos de industrialización que introducen al entorno sustancias contaminantes, alterando su composición y funcionamiento. Estas alteraciones deterioran la calidad del aire, el agua o el suelo, afectan a la vida de los seres vivos y comprometen la estabilidad de los sistemas ecológicos.

## **3.2 Aguas residuales en empresas industriales**

Se denomina aguas residuales industriales a aquellas que se generan como resultado de actividades relacionadas con la producción, transformación o manipulación de productos en cualquier tipo de industria. Estas incluyen tanto los líquidos residuales como las aguas de proceso y de drenaje, utilizadas durante las distintas etapas del ciclo productivo (Logroño, 2017).

En este contexto, los efluentes que generan las empresas industriales tienen un impacto significativo en el entorno natural, puesto que, dentro de su procedimiento para la transformación de las materias se emplea diferentes procesos que implica la utilización del agua que al ser manipulada y relacionada del ciclo productivo da como resultado el agua residual (Duque-Sarango, P., & Hernández, 2020).

### **3.2.1 Aguas residuales en empresas lácteas**

Las aguas servidas lácteas son los efluentes líquidos generados durante el desarrollo de producción, transformación y limpieza en la industria láctea. Estos desechos se caracterizan por tener altas concentraciones de materia orgánica, grasas, proteínas, lactosa, detergentes y compuestos nitrogenados, esto los convierte en una fuente significativa de contaminación si no reciben un adecuado tratamiento antes de ser desechados al ambiente.

En consecuencia, las aguas residuales generadas por las industrias lácteas suelen presentar un pH neutro o ligeramente alcalino en condiciones iniciales; sin embargo, tienden a acidificarse rápidamente debido a la fermentación de los azúcares de la leche, principalmente la lactosa, lo que da lugar a la formación de ácido láctico y provoca una disminución del pH hasta valores cercanos a 4,5–5,0. La composición de estas aguas incluye compuestos orgánicos disueltos como lactosa, nutrientes inorgánicos y partículas coloidales, principalmente proteínas (Vasco et al., 2023).

### **3.3 Métodos y tecnología de tratamiento para agua residual en la industria láctea**

Según Vasco et al. (2023) mencionan que, las técnicas y procedimientos disponibles para el tratamiento de las aguas residuales generadas en la industria láctea son variadas. Entre ellas, se emplean métodos de saneamiento ambiental como el tratamiento primario, que implica la aplicación de procesos físicos enfocados principalmente en la remoción de sólidos presentes en el agua, incluyendo aceites y grasas. Además, se utilizan sistemas biológicos, conocidos como tratamiento secundario, tales como los humedales artificiales diseñados para la neutralización de la materia orgánica y los sedimentos presentes en el efluente (Duque-Sarango & Pinos, 2022).

#### **3.3.1 Tatora especie utilizada para la fitorremediación en humedales artificiales**

La planta *Schoenoplectus californicus*, comúnmente llamada Tatora, puede desarrollarse en distintas condiciones ambientales, lo que la convierte en una especie adecuada para humedales artificiales. Esta planta genera una alta cantidad de biomasa anual y posee un potencial moderado para eliminar nitrógeno y fósforo.

#### **Figura 2.**

*Planta depuradora Tatora*



*Nota:* tomado de (Flores et al., 2018)

Así mismo, uno de los principales beneficios de la Totorá es su capacidad para transferir oxígeno a la zona radicular. La estructura física de la planta que incluye tallos, raíces y rizomas facilita la penetración del oxígeno en el suelo o medio de filtración, permitiendo una oxigenación más profunda. Además, la Totorá absorbe carbono y nutrientes necesarios para llevar a cabo su proceso de fitorremediación (Escalante y Fajardo, 2022).

La fitorremediación es una técnica de depuración que aprovecha la habilidad de las plantas y la energía del sol para eliminar contaminantes del agua residual, ofreciendo además un método de limpieza que resulta visualmente agradable (Duque-Sarango & Zagal-Andrade, 2023).

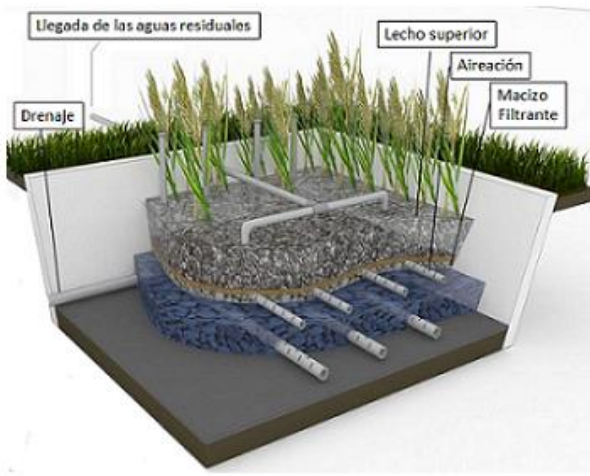
En este método, las plantas actúan como filtros o trampas biológicas que descompondrán parte de los contaminantes en el efluente, además de facilitar la estabilización de metales presentes tanto en el suelo como en el agua (Forero, 2022).

### **3.4 Humedales Artificiales**

Los humedales artificiales (HA) son sistemas diseñados por el ser humano para el tratamiento de aguas residuales en cuerpos poco profundos, como estanques o canales, donde se cultivan plantas acuáticas. Estos sistemas emplean procesos naturales para depurar el agua residual. Su estructura incluye un método primario, un sistema de drenaje automático que puede funcionar con o sin bombas según la topografía, y un tratamiento secundario biológico que se realiza en un lecho filtrante compuesto por arena y materiales granulares, donde crecen las plantas (Logroño, 2017).

### Figura 3.

#### *Humedales artificiales*



**Nota:** tomado de (Flores et al., 2018)

La configuración de los humedales artificiales varía según las propiedades del efluente a tratar, el nivel de purificación requerido y la eliminación de microorganismos patógenos para permitir la reutilización del agua (tratamiento terciario), ajustándose a los límites de contaminación establecidos por las normativas locales.

Los humedales artificiales emplean métodos convencionales que abarcan procesos físicos, químicos y biológicos. En particular, estos sistemas están diseñados para tratar aguas residuales municipales, logrando una eliminación de la DQO de hasta un 95 % durante períodos de estiaje. Además, según información oficial, también son efectivos para tratar aguas residuales de origen industrial. En esencia, los humedales artificiales son estructuras que imitan una zona de transición entre el ecosistema terrestre y acuático, pero están especialmente contruidos para el tratamiento de aguas residuales bajo condiciones controladas en cuanto a su ubicación, tamaño y capacidad de procesamiento (Duque-Sarango & Zagal-Andrade, 2023; Logroño, 2017).

### **3.4.1 Características de humedales artificiales**

Los humedales artificiales (HA) se caracterizan por contar con un suelo saturado de agua y una comunidad viva de plantas y animales adaptados a ambientes acuáticos o suelos húmedos. Existen dos tipos principales de humedales artificiales optimizados para el tratamiento de aguas residuales, los de flujo superficial libre (FWS, por sus siglas en inglés) y los de flujo subsuperficial (SFS). En los sistemas de flujo superficial libre, el nivel del agua se mantiene por encima de la superficie del terreno, y la vegetación crece fija y dispersa sobre la superficie del agua (Forero, 2022). Por otro lado, en los humedales artificiales de flujo subsuperficial (SFS), el nivel del agua se encuentra bajo la superficie del terreno, por lo que no hay inundación visible. El agua circula a través de una capa filtrante compuesta por materiales porosos como arena o grava, mientras que las raíces de las plantas penetran hasta el fondo del lecho. Este sistema funciona como un filtro biológico donde las plantas micrófitas se colocan en la superficie del lecho filtrante, y las aguas residuales pretratadas fluyen horizontalmente a través de este medio granular, manteniéndose el nivel del agua siempre por debajo de la superficie (Duque-Sarango et al., 2019; Stopa et al., 2022).

Los medios filtrantes son fundamentales porque en ellos se llevan a cabo diversos procesos, tales como la retención y sedimentación de partículas en suspensión, la descomposición de materia orgánica, la transformación y absorción de nutrientes, así como la eliminación de microorganismos patógenos. Es imprescindible que el medio granular sea limpio (libre de partículas finas), uniforme, resistente, duradero y capaz de conservar su estructura a lo largo del tiempo (Logroño, 2017).

La vegetación desempeña un papel crucial en el desempeño de los humedales, dado que las plantas absorben nutrientes del agua. Por ello, es fundamental elegir adecuadamente las especies vegetales para un sistema de humedales, considerando las características del área donde

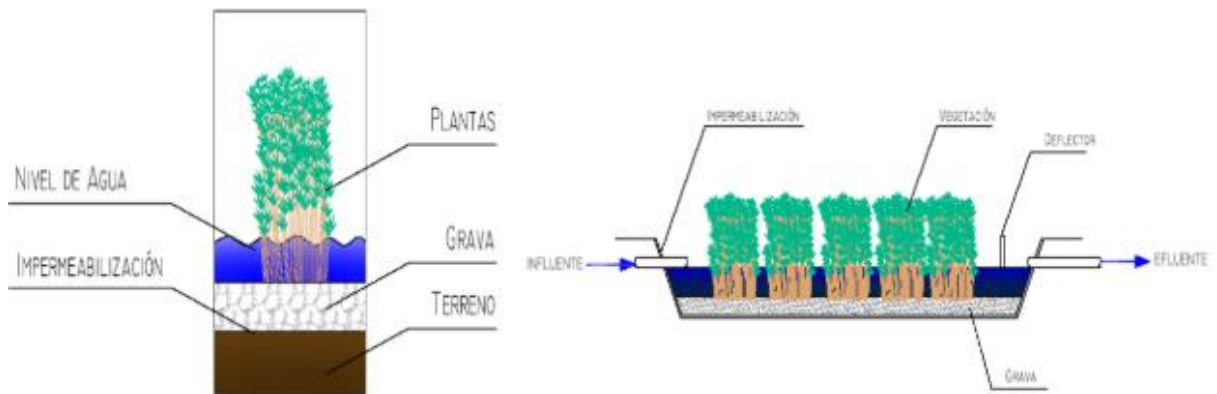
se implementará el proyecto. Además, es importante seleccionar especies que puedan desarrollarse fácilmente en las condiciones ambientales del sistema y que sean capaces de tolerar los contaminantes presentes en las aguas residuales (Forero, 2022).

Los humedales artificiales se plantean como una solución efectiva y natural para tratar efluentes, puesto que, su diseño es combinado con plantas acuáticas como medios filtrantes que permiten la retención de sólidos, Sin embargo, la correcta elección del material granular es crucial para su funcionamiento y durabilidad. Es por todo ello que los humedales representan una solución viable y sostenible para empresas industriales del país.

### 3.4.2 Ventajas de humedales artificiales

#### Figura 4.

*Humedales artificiales de flujo subsuperficial*



**Nota:** tomado de (Flores et al., 2018)

Los humedales construidos presentan ventajas frente a otros sistemas de tratamiento alternativos, dado que su funcionamiento demanda muy poca energía. Por lo tanto, cuando existe una cantidad considerable de terreno disponible cerca del sitio para su instalación, constituyen una opción económica. Además, ofrecen un hábitat para la fauna silvestre y resultan visualmente agradables (Limaymanta y Ochoa, 2020).

Otra ventaja de este sistema es su bajo costo tanto en instalación como en mantenimiento y construcción, especialmente si se compara con los métodos físicos, químicos y biológicos tradicionales. Cuando están bien diseñados y ejecutados, estos sistemas pueden tratar eficazmente las aguas residuales industriales.

## **4 MARCO LEGAL**

Este estudio se desarrolla bajo el marco de la normativa ambiental vigente en la República del Ecuador, así como en conformidad con estándares técnicos y compromisos internacionales que regulan la gestión de aguas residuales y la aplicación de tecnologías. La vegetación tiene un impacto significativo en el funcionamiento de los humedales, dado que las plantas asimilan nutrientes esenciales. Por ello, es fundamental seleccionar adecuadamente las especies vegetales que se utilizarán en un sistema de humedales, considerando las características específicas de la región donde se llevará a cabo el proyecto.

Además, es necesario escoger especies que puedan adaptarse fácilmente a las condiciones ambientales del sistema proyectado y que sean capaces de tolerar los contaminantes presentes en las aguas residuales tratadas mediante humedales artificiales. A continuación, se detallan las principales disposiciones legales aplicables:

### **4.1 Constitución de la República del Ecuador (2008)**

Según la Constitución de la República del Ecuador (2008) detalla los siguientes artículos:

Art. 14: Reconoce el derecho de la población a vivir en un ambiente sano y ecológicamente equilibrado.

Art. 71 y 73: La naturaleza o Pachamama tiene derecho a ser protegida; el Estado debe aplicar medidas preventivas frente a actividades que puedan generar daño ambiental.

## **4.2 Ley Orgánica de Recursos Hídricos, Usos y Aprovechamiento del Agua**

Art. 8.- Gestión integrada de los recursos hídricos. La Autoridad Única del Agua es responsable de la gestión integrada e integral de los recursos hídricos con un enfoque ecosistémico y por cuenca o sistemas de cuencas hidrográficas, la misma que se coordinará con los diferentes niveles de gobierno según sus ámbitos de competencia (Ley Orgánica de Recursos Hídricos Usos y Aprovechamiento del Agua, 2014).

## **4.3 Ley Orgánica de Prevención y Control de la Contaminación Ambiental**

**(vigente mediante Decreto Supremo 3516)**

Art. 7.- El Consejo Nacional de Recursos Hídricos, en coordinación con los Ministerios de Salud y del Ambiente, según el caso, elaborarán los proyectos de normas técnicas y de las regulaciones para autorizar las descargas de líquidos residuales, de acuerdo con la calidad de agua que deba tener el cuerpo receptor (Ley de Prevención y Control de La Contaminación Ambiental , 2004).

## **4.4 Texto Unificado de Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica (TULSMA, vigente 2023-2025)**

Aplica a la industria láctea, obligando a implementar sistemas de tratamiento previo (Texto Unificado de Legislación Secundaria de Medio Ambiente, 2003).

## **4.5 Para la Norma Técnica INEN 2 169:2013 Requisitos para el vertido de aguas residuales**

Establece requisitos técnicos para el diseño y operación de sistemas de tratamiento de aguas residuales .

Según el Instituto Ecuatoriano de Normalización (2013) Aplica a sistemas naturales como los humedales artificiales, las cuales se articulan mediante Ordenanzas Municipales, que establecen normas específicas para descargas industriales, cobros por contaminación y requisitos de tratamiento en zonas urbanas y rurales.

#### **4.6 Convenios Internacionales**

Según el Convenio de Basilea (2025) dentro del control de movimientos de desechos peligrosos, en la Agenda 2030 de Naciones Unidas – ODS 6: Agua limpia y saneamiento, promoviendo el uso de tecnologías sostenibles para tratamiento de aguas.

Convención sobre la Diversidad Biológica: Fomenta el uso de soluciones basadas en la naturaleza, como humedales, para mitigar impactos ambientales.

## **5 METODOLOGÍA**

### **5.1 Procedimientos para la toma de muestras**

El desarrollo del muestreo se realizó a través de un cronograma previamente establecido, en la cual se diseñaron y se especificaron los tiempos de muestreo conforme a las líneas de producción de la empresa Lácteos San Antonio S.A., dicha empresa proporcionó una base de datos de los productos durante el periodo de muestreo, la misma sirvió como guía para determinar el periodo y tiempo de muestreo.

Se procedió a implementar un muestreo combinado, la cual permite recolectar un conjunto compuesto por dos o más de muestras, logrando homogenizarse en porciones conocidas. Permitiendo conseguir un resultado promedio con características específicas. Las igualdades para la mezcla se establecen en función del tiempo y el flujo de producción.

Se recolectaron las muestras de manera manual, extrayendo diversas submuestras en relación al tipo de línea en proceso de elaboración, favoreciendo el contexto de las características estimadas del tipo de efluente, volumen y tiempo.

#### **5.1.1 Parámetros Físicos y Químicos a Determinar en el Análisis de Laboratorio**

Las cuantificaciones físicas y químicas identificados para desarrollar su cuantificación y medición de concentración a nivel de laboratorio, estuvieron definidos de acuerdo a la línea base de evaluación de humedales artificiales.

**a) Parámetros definidos para análisis de laboratorio.**

**Tabla 1.**

*Parámetros de aguas residuales lácteas.*

<b>Categoría</b>	<b>Parámetro</b>	<b>Unidad</b>
In Situ	Temperatura	(°C)
	Potencial de Hidrógeno (Ph)	-
	Conductividad Eléctrica	μS/cm
	Olor	Cualitativo
Físico	Color	Cualitativo
	Sólidos Totales	mg/L
	Sólidos Suspendedos Totales	mg/L
	Sólidos Disueltos Totales	mg/L
Químico	Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO5)	mg/L
	Demanda Química de Oxígeno (DQO)	mg/L
	Nitrógeno Total (NKT)	mg/L
	Fosforo Total (PKT)	mg/L

*Nota:* tomado de (Flores et al., 2018)

### **5.1.2 Período de Muestreo**

Se ejecutó en un tiempo de 15 días el muestreo compuesto, debido a que, en este periodo se cubrió todas las líneas de producción de productos de la empresa Lácteos San Antonio S.A.

### **5.1.3 Cogida de Muestras**

Para la recolección de las muestras se consideraron los parámetros relevantes, con el objeto de garantizar un muestreo eficiente y la inocuidad de las muestras.

Se utilizó un equipo de muestreo específico para superficies, la cual consiste en un recipiente de boca ancha (fabricado en polietileno). Este se introdujo dentro del tanque de homogenización del efluente y retirado una vez que se llenó completamente.

## **5.2 Transporte, Etiquetado y Almacenamiento de Muestras**

### **5.2.1 Manejo y Conservación de muestras**

Para asegurar un manejo y conservación adecuados de las submuestras y garantizar un análisis preciso en laboratorio, se siguieron ciertos parámetros. Se seleccionaron y prepararon los recipientes apropiados, asegurando que tanto el envase como la tapa no fueran fuentes de contaminación. Se advirtió que los recipientes de vidrio borosilicato o de caseinato de calcio y sodio podrían incrementar los niveles de silicio y sodio en las submuestras.

### **5.2.2 Almacenamiento**

El recipiente empleado para el transporte y almacenamiento de las submuestras fueron de plástico (polipropileno) y vidrio ámbar según correspondiera. Los recipientes fueron lavados a fin de minimizar la contaminación de las muestras. El tipo de limpiador empleado fue de acuerdo a los parámetros requeridos a analizar.

El depósito nuevo de vidrio, se lavó con agua y detergente para retirar el polvo y los residuos del material de empaque, seguido de un enjuague con agua destilada o des ionizada. En cuanto a las muestras destinadas para el fósforo total (NKT), no se empleó detergentes en el lavado de los recipientes.

Los recipientes con las muestras fueron etiquetados de forma clara y duradera, facilitando su correcta identificación en el laboratorio. Durante el muestreo se registraron todos los datos relevantes para garantizar la precisión de los resultados, incluyendo la fecha y hora de la toma, el nombre del responsable, la naturaleza y cantidad de los preservantes añadidos, el tipo de análisis a realizar, entre otros.

### **5.2.3 Transporte**

Para el traslado de las muestras se tuvieron en cuenta sus características físicas y químicas. Los frascos se llenaron por completo y se cerraron herméticamente para evitar la presencia de aire sobre el líquido. Esto reduce la interacción con la fase gaseosa y minimiza la agitación durante el transporte, lo que previene cambios en el dióxido de carbono disuelto y en el pH. Asimismo, evita que los bicarbonatos se transformen en carbonatos precipitados y reduzcan la oxidación del hierro, ayudando a mantener estable el color de la muestra.

### **5.2.4 Almacenamiento temporal**

El almacenamiento temporal se realizó en un envase de poliuretano (cooler) o refrigeradores de campo, se efectuó el almacenamiento de las muestras ineditamente después de su recolección, además de ello se mantuvo una temperatura entre 2°C y 5°C en un lugar oscuro, es factible para el transporte de las muestras.

Las muestras de agua residual láctea, fueron almacenadas en el laboratorio donde se controló a una temperatura cercana a -20°C, sin embargo, el envase plástico (polipropileno) fue el de mejor criterio para su almacenamiento en periodos prolongados.

## **5.3 Procedimiento de análisis de parámetros físicos y químicos del agua**

### **residual de la industria lácteos San Antonio S.A.**

Para la determinación de los parámetros especificados, se implementaron metodologías de laboratorio y técnicas de análisis basadas principalmente en titulación

Cabe destacar que se aplicó un muestreo compuesto, por lo que se homogenizaron las submuestras recolectadas, lo que permitió obtener como resultado muestras representativas por día de muestreo. Las cuales se almacenaron, con un estricto cumplimiento de las Normativas Técnicas

Ecuatorianas INEN NTE 2169 Y INEN NTE 2176 (Instituto Ecuatoriano de Normalización, 1998).

### 5.3.1 Materiales

Descripción de los materiales, reactivos y equipos empleados en el análisis de parámetros físicos, químicos e in situ.

**Tabla 2.**

*Materiales y reactivos*

<b>Materiales</b>	<b>Reactivos</b>	<b>Equipos</b>
Probeta de 25 ml	Agua destilada	Estufa
Probeta de 100 ml	Agua desionizada	Mufla
Vasos de precipitación de 250 y 500 ml	Hidróxido de sodio	Triturador diámetro de 30 y 20 mm
Matraz volumétrico de 100 ml	KIT PKT	Balanza analítica
Pipeta		Higrómetro
Matraz de 1000 ml		Bomba de Vacío
Recipiente de secador de gel de sílice		Fotómetro 680
Capsulas de porcelana de 150 ml		Multiparámetro Hach (HQ40d)
Soporte universal		
Papel filtro		
Filtros de fibra de vidrio de 1µm		
Papel aluminio		
Pipeta		

**Nota:** Elaborado por la Autora

### **5.3.2 Procedimiento de Análisis Parámetros In Situ**

Los parámetros in situ, son aquellos parámetros que por sus características deben ser medibles en el instante de recolección de la muestra, para su efecto, se empleara el equipo multiparámetro marca HACH (HQ40d), el cual presenta un certificado de calibración, garantizando los resultados obtenidos. Los parámetros medidos fueron: temperatura, conductividad eléctrica, pH, y cualitativamente se evaluó el olor y color mediante observación directa.

El procedimiento para el análisis de los parámetros in situ se realizaron, en primera instancia con una recolección de un volumen considerable del efluente, para lo cual fue necesario colocar en una zona apta para la medición, luego de su estabilización de valores se concluyó con los registros de los datos correspondiente al parámetro sujeto a la medición.

### **5.3.3 Procedimiento de Análisis de Parámetros Físicos y Químicos**

El análisis de las muestras consistió en el procedimiento a nivel de laboratorio con el objeto de obtener valores de cuantificación de los parámetros propuestos.

#### **5.3.3.1 Procedimiento de Análisis Parámetros Físicos**

- **Determinación de Sólidos Totales (ST)**

Para la cuantificación de los sólidos totales se procedió de la siguiente manera:

- Se vertieron un volumen de 100 ml de muestra compuesta de agua residual láctea en una capsula de porcelana pesada y registrado su peso.

- La capsula se secó en una estufa a una temperatura de 100°C durante 2 horas, permitiendo la evaporación.

- Una vez transcurrida la evaporación, la temperatura fue elevada a 105°C, durante 4 horas.

- Al finalizar el secado, la capsula fue enfriada en un desecador con la finalidad de evitar el contacto con la humedad ambiental y posterior a ello se pesó el residuo seco en una balanza de precisión.

- y finalmente se obtuvo los sólidos totales, para la cual se estimó la diferencia de su peso final y su peso inicial.

- **Determinación de Sólidos Suspendidos Totales (SST)**

- La determinación de los sólidos suspendidos se realizó por filtración al vacío, de la siguiente manera:

- Una vez configurado el equipo de filtración al vacío y los materiales, se vertió 100 ml de muestra a través del filtro.

- Luego el filtro fue secado en un horno a una temperatura de 105°C durante 2 horas.

- Después del secado, se dejó que el filtro se enfrié y posterior a ello se determinó la retención de los sólidos suspendidos totales.

- **Determinación de Sólidos Disueltos Totales (SDT)**

Para la determinación de los sólidos disueltos, se aplicó el mismo procedimiento empleada para los sólidos suspendidos totales, sin embargo, la diferencia radica en el uso de la muestra a filtrar, debido a que se utiliza las muestras prefiltradas. Por consiguiente, los sólidos disueltos se obtuvieron por la diferencia de los sólidos totales y sólidos suspendidos.

$$SDT = ST - SST$$

### **5.3.3.2 Procedimiento de Análisis Parámetros Químicos**

- **Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO5)**

Para la determinación de la demanda bioquímica de oxígeno se realizó a través de técnicas de incubación y la incorporación de un sensor de medición de DBO5. El agua residual reacciona con hidróxido de sodio colocado en el sensor de medición y se obtienen lecturas de DBO.

- **Demanda Química de Oxígeno (DQO)**

Debido a factores externos al desarrollo de la determinación del parámetro DQO en el laboratorio, se procedió con aplicación de varias técnicas. El análisis se realizó mediante técnicas de titulación y colorimétricas, la misma que comprende el diseño de una curva de calibración, en la cual se empleó muestras estándares de concentración conocida.

- **Nitrógeno Total (NTK)**

Debido a factores externos al desarrollo de la determinación del parámetro en el laboratorio, se procedió con técnicas indirectas a las establecidas para su cuantificación. El análisis se realizó mediante técnicas de fotometría.

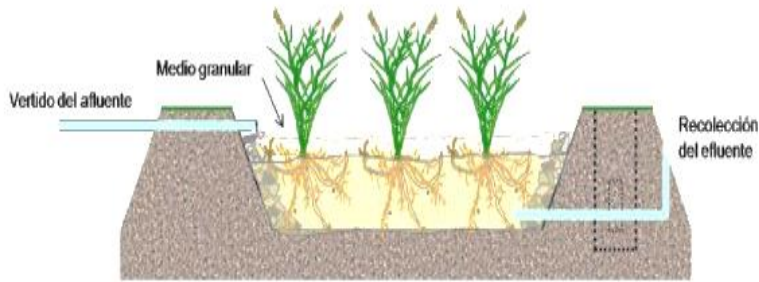
- **Fósforo Total (PT)**

Para la determinación del fósforo total se realizó técnicas fotométricas, a través del equipo fotómetro 680.

#### 5.4 Criterio técnico para el diseño del humedal Artificial de flujo subsuperficial horizontal.

**Figura 5.**

*Humedal artificial*



*Nota:* tomado de (Flores et al., 2018)

El diseño del humedal artificial de flujo subsuperficial horizontal implementado en este proyecto se basa en principios técnicos que garantizan la eficiencia del tratamiento del agua residual. Este tipo de humedal permite que el agua fluya horizontalmente a través de un medio granular, en contacto con las raíces de las plantas, promoviendo la depuración mediante procesos físicos, químicos y biológicos.

Desde el punto de vista técnico, este tipo de humedales requiere un tratamiento primario previo, razón por la cual se incorpora un tanque Imhoff al inicio del sistema. Este tanque actúa como un separador primario, reteniendo sólidos en suspensión y reduciendo la carga orgánica antes de ingresar al lecho filtrante del humedal. Esta etapa es fundamental para evitar la colmatación prematura del sistema y asegurar su eficiencia a largo plazo. A continuación, se detalla lo siguiente.

- El boceto del humedal artificial se basó en los parámetros establecidos en la Guía de la U.S EPA para realizar los cálculos se tomó en consideración algunos criterios de diseño:
- Según Logroño (2017) se propone que primeramente se suponga una proporción de largo ancho 2:1 para alcanzar la reducción deseada de DBO5.

- Para el diseño se recomienda utilizar grava y arena con menos de 30 mm (3/4") de diámetro que parece ser la que funciona mejor
- La profundidad del humedal artificial generalmente varía entre 0.4 a 1 m (valor usual 0.7 m).

## 5.5 Fundamentación técnica para el diseño del humedal artificial horizontal

### 5.5.1 Caudal del efluente

Para deducir el caudal del efluente, se utilizó el método del aforamiento en el cual se ocupó el tiempo de llenado del tanque  $7 \text{ m}^3/\text{h}$  en un lapso de 6 horas; por consiguiente, se calculó el caudal  $Q$  promedio por día en  $\text{m}^3/\text{día}$ .

**Ecuacion1:**

$$Q = \frac{V}{t} \quad (1)$$

Donde:

Q: caudal

V: volumen

T: tiempo

$$Q = 7 \frac{\text{m}^3}{\text{día}} * 4$$

$$Q = 28 \frac{\text{m}^3}{\text{día}}$$

### 5.5.2 Temperatura constante del humedal

La deducción de la temperatura constante se efectúa mediante la ecuación siguiente:

#### Ecuación 2:

$$K_T = K_{20}(1.06)^{T_a-20} \quad (2)$$

Donde.

$K_T$ : Temperatura constante

$K_{20}$ : Constante de temperatura

$T_a$ : Temperatura ambiente

### 5.5.3 Área de la superficie

El dimensionamiento del área superficial se basa en el contaminante a reducir, típicamente este tipo de diseños se ocupan para disminuir la DBO5 (Flores-Gómez et al., 2018)

#### Ecuación 3:

$$A_s = \frac{Q \left( \ln(DBO5_e) - \ln(DBO5_s) \right)}{K_t * y * n} \quad (3)$$

Donde:

$A_s$ : Área de superficie

$Q$ : Caudal

$\ln(DBO5_e)$ : Concentración del contaminante al ingreso

$\ln(DBO5_s)$ : Concentración del contaminante a la salida

$K_T$ : Constante de temperatura en el humedal

$y$ : Profundidad del humedal

$n$ : Porosidad promedio de las capas filtrantes del humedal

#### 5.5.4 Tiempo de retención teórico

En el desarrollo del diseño de un humedal artificial es crucial para así garantizar su rendimiento. En el diseño de humedales Subsuperficiales se ocupan entornos análogos de flujo pistón, por ende, el flujo debe superar la resistencia por fricción, provocado por el medio que lo rodea y las raíces de las plantas; esta relación no debe superar 4:1 (Flores-Gómez et al., 2018)

**Ecuación 4:**

$$TR = \frac{A_s * y * n}{Q} \quad (4)$$

**Donde:**

TRH: tiempo de retención hidráulica en días

As: Área superficial

Y: profundidad del humedal

n: porosidad del medio

#### 5.5.5 Ancho del humedal artificial

**Ecuación 5:**

$$W = \frac{1}{Y} * \left( \frac{Q * A_s}{m * K_s} \right)^{0,5} \quad (5)$$

Datos

W: Ancho del Humedal

Q: Caudal / N° de Unidades

M: Pendiente del Lecho

Ks: Conductividad Hidráulica

As: Área Superficial / N° de Unidades

La conductividad hidráulica del medio va a variar según las partes vacías que estén en este, en la (Tabla 3) se pueden evidenciar los valores aproximados para ciertos medios que pueden ser utilizados en la construcción de HSS (Flores-Gómez et al., 2018).

**Tabla 3.**

*Características de los medios para los HSS*

<b>Tipo de material</b>	<b>Tamaño Efectivo D10(mm)</b>	<b>Conductividad Hidráulica Ks (m3/m2/d)</b>	<b>Porosidad n (%)</b>
Arena fina	2	100-1000	28-32
Arena Gruesa	8	500-5000	30-35
Grava fina	16	1000-10000	35-38
Grava media	32	10000-50000	36-40
Roca gruesa	128	50000-250000	38-45

*Nota:* Elaborado por la Autora

### 5.5.6 Largo del humedal artificial

**Ecuación 6:**

$$L = \frac{As}{W} \quad (6)$$

Datos

L: largo del Humedal

As: área superficial

W: ancho del Humedal

### **5.5.7 Importancia del sustrato en el funcionamiento de humedales artificiales de flujo subsuperficial**

Es necesario la utilización de sustrato para el desarrollo de Humedales Artificiales de Flujo subsuperficial en el saneamiento de aguas residuales, en esta base se encuentran microorganismos que son fundamentales para que cumplan con la degradación y transformación de los contaminantes, asimismo proporcionan nutrientes para el desarrollo de la flora empleada.

Según la EPA (1995), la selección de los materiales debe basarse en parámetros específicos que aseguren las propiedades adecuadas para cada componente. Por ejemplo, el pH del sustrato debe mantenerse entre 6.5 y 8.5 para favorecer la retención de metales pesados y nutrientes. Además, la conductividad eléctrica debe ser baja, alrededor de 4 dS/m, para permitir un óptimo desarrollo de la actividad microbiana. De igual forma, la capacidad de intercambio catiónico del suelo debe ser superior a 15 mEq/100 g.

## 6 RESULTADOS

### 6.1 Objetivo 1: Caracterizar a nivel de laboratorio las aguas residuales del efluente de la empresa San Antonio S.A. mediante el análisis de pruebas fisicoquímicos.

Los resultados obtenidos de la caracterización de las aguas residuales generadas por la empresa San Antonio S.A. en los tres puntos de descarga establecidos durante cuatro semanas seguidas, se da a continuación.

**Tabla 4.**

*Resultados del Análisis de los Parámetros in situ y fisicoquímicos del efluente.*

Parámetros	Unidad	Valor
Temperatura	°C	18
Conductividad	μS/cm	2722,08
pH	-	4,88
Olor	-	Variable (moderado – fuerte)
Color	-	Blanco espumoso – Blanco Cremoso
DQO	mg/l	7566,25
DBO <sub>5</sub>	mg/l	2808,60
NKT	mg/l	131,03
NPK	mg/l	23,92
ST	mg/l	4858,18
SST	mg/l	1308,00
SDT	mg/l	3550,18

**Nota:** Elaborado por la Autora

En la Tabla 5 se presentan los resultados obtenidos sobre el análisis realizado al agua residual proveniente de la empresa de lácteos evidenciando una alta carga contaminante, reflejada en varios parámetros in situ y fisicoquímicos:

-Parámetros in situ:

La temperatura (18 °C) se encuentra dentro de los rangos ambientales. Debido a que el valor no afecta significativamente a los procesos biológicos. Sin embargo, la conductividad (2722,08  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) y el pH (4,88), Reflejan condiciones típicas de los vertidos generados por industrias lácteas, caracterizados por una alta concentración de sales y compuestos iónicos disueltos. Así mismo, el Olor (moderado – fuerte) y color (blanco espumoso – blanco cremoso) son Característicos de la degradación de materia orgánica manteniendo una alta turbidez, resultado de grasas, proteínas y otros sólidos en suspensión propios de las aguas residuales lácteas.

-En cuanto a los parámetros fisicoquímicos:

DQO (7566,25 mg/l) y DBO<sub>5</sub> (2808,6 mg/l), se evidencio valores muy elevados, con una fuerte presencia de materia orgánica biodegradable y no biodegradable. Mientras que NKT (131,03 mg/l) y NPK (23,92 mg/l), Concentran importantes niveles de nitrógeno y fósforo, elementos que causan eutrofización si llegasen a descargar en cuerpos de agua naturales. Y finalmente, los Sólidos totales (4858,18 mg/l), sólidos suspendidos totales (1308 mg/l) y sólidos disueltos totales (3550,18 mg/L), se evidencian resultados con una elevada concentración de partículas en suspensión y materia disuelta, propios de este tipo de efluente.

## **6.2 Objetivo 2: Evaluar la eficiencia de *Schoenoplectus californicus*(Totora) a través de revisión bibliográfica.**

### **6.2.1 Vegetación empleada**

La elección de la vegetación en los humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal es fundamental para garantizar la eficiencia del tratamiento de aguas residuales. La especie *Schoenoplectus californicus* (Totora) ha demostrado ser altamente eficaz gracias a su capacidad

de adaptarse a suelos anóxicos y ambientes saturados. Esta planta favorece el desarrollo de comunidades microbianas en la zona radicular, permitiendo procesos como la degradación aeróbica y la nitrificación (Forero, 2022). Además, mejora la oxigenación del medio, lo que facilita la remoción de materia orgánica y nutrientes. Su siembra se recomienda con espaciamiento de 10 cm x 15 cm para maximizar el contacto planta-agua. Diversos estudios coinciden en su efectividad en la retención de sólidos suspendidos y nutrientes.

De acuerdo con García (2017) y EPA (1995), el correcto desarrollo de la Totora requiere condiciones específicas del sustrato, como un pH entre 6.5 y 8.5 y baja conductividad eléctrica. Además, debe colocarse una membrana impermeable y capas de arena y tierra agrícola que permitan una filtración adecuada. Según Arias et al. (2003), el sistema radicular de esta macrófita no solo promueve la actividad bacteriana, sino que también captura metales pesados y mejora la calidad del agua tratada. Brix (1997) también destaca la alta tolerancia de esta planta frente a contaminantes orgánicos. Así, su incorporación fortalece la estabilidad ecológica del humedal.

### **6.3 Objetivo 3: Elaborar una propuesta del humedal subsuperficial**

#### **horizontal para el tratamiento de estas aguas residuales**

##### **6.3.1 Cálculos para un diseño de un humedal superficial horizontal.**

Luego de haber concluido con las pruebas de laboratorio, se procedió a realizar los cálculos para la propuesta del diseño del humedal superficial mediante los valores obtenidos de los parámetros.

### 6.3.1.1 Primera Propuesta del área superficial

- **Temperatura constante de Área Superficial.**

Se calculó la constante de temperatura del humedal mediante la siguiente formula:

**Tabla 5.**

*Temperatura constante*

Datos	Símbolos	Valores	Unidad
K20	K 20	0,19	
Temperatura ambiente	Ta	18	°C

**Nota:** Elaborado por la Autora

La fórmula que se empleará será la siguiente:

**Ecuación:** Temperatura Constante

$$K_T = K_{20}(1.06)^{T_a-20}$$

Donde:

$K_T$ = Temperatura constante

$K_{20}$ = Constante

$T_a$ = Temperatura ambiente

Resolución:

$$K_T = 0,19 (1.06)^{18 - 20} = 0,16$$

Por lo tanto, la temperatura constante es de 0,16

- **Área de superficie.**

Se estableció el área de la superficie mediante la siguiente formula:

**Tabla 6.**

*Datos para el cálculo del área superficial*

Datos	Símbolo	Valor	Unidad
Temperatura Constante	KT	0,16	
Caudal	Q	28	m <sup>3</sup> /d
Concentración de DBO de entrada	DBO5 e	2808,60	mg/l
ln Ci	lnCi	7,94	
Altura	Y	0,6	m
Porosidad	n	0,35	
ln Cu	lnCu	4,60517019	
Concentración de DBO en la salida	DBO5 s	100	mg/l

**Nota:** Elaborado por la Autora

La fórmula empleada es la siguiente:

$$As = \frac{Q \left( \ln(DBO5_e) - \left( \ln(DBO5_s) \right) \right)}{K_t * y * n}$$

Donde:

As: Área de superficie

Q: Caudal

ln(DBO5e): Concentración del contaminante al ingreso

ln(DBO5s): Concentración del contaminante a la salida

KT: Constante de temperatura en el humedal

y: Profundidad del humedal

n: Porosidad promedio de las capas filtrantes del humedal

Resolución:

$$As = \frac{\left( 28 \frac{m^3}{dia} \right) * \left( \ln(2808,06) - \left( \ln \left( 100 \frac{mg}{l} \right) \right) \right)}{0,16 * 0,6 m * 0,35} = 2832,05 m^2$$

El Are de la superficie del humedal es 2832,05 m<sup>2</sup>

- **Tiempo de retención hidráulico.**

Para obtener el TDH se realice con la siguiente formula:

**Tabla 7.**

*Datos para el cálculo del TDH*

Datos	Símbolo	Valor	Unidad
Área superficial	As	2832	m <sup>2</sup>
Caudal	Q	28	m <sup>3</sup> /d
Altura	y	0,6	m
Porosidad	n	0,38	

**Nota:** Elaborado por la Autora

**Formula:**

$$TR = \frac{A_s * y * n}{Q}$$

Donde:

TRH: tiempo de retención hidráulica en días

As: Área superficial

Y: profundidad del humedal

n: porosidad del medio

$$TR = \frac{2832m^2 * 06 m * 0,38}{28 \frac{m^3}{día}} = 23 d$$

Por lo tanto, el Tiempo de Retención Hidráulica es de 23 días

- **Ancho del Humedal.**

**Tabla 8.**

*Datos para obtener el Ancho*

Datos	Símbolo	Valor	Unidad
Área superficial	As	2832	m <sup>2</sup>
Caudal	Q	28	m <sup>3</sup> /d
Altura	y	0,6	m
Pendiente en decimales	m	0,01	m/m
Conductividad Hidráulica	Ks	10000	m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> /d

**Nota:** Elaborado por la Autora

La fórmula que usaremos será:

### Ecuación: Ancho del humedal artificial

$$W = \frac{1}{Y} * \left( \frac{Q * A_S}{m * K_s} \right)^{0,5}$$

Datos

W: Ancho del Humedal

Q: Caudal / N° de Unidades

M: Pendiente del Lecho

Ks: Conductividad Hidráulica

As: Área Superficial / N° de Unidades

$$W = \frac{1}{0,6} * \left( \frac{28 \frac{m^3}{dia} * 2832}{0,01 \frac{m}{m} * 100000 \frac{m^3}{m^2}} \right)^{0,5} = 46 m$$

Por lo tanto, el ancho es de 46 m.

- **Largo del Humedal.**

#### Tabla 9.

*Datos para obtener el Largo del Humedal*

Datos	Símbolo	Valor	Unidad
Área superficial	As	2832	m <sup>2</sup>
Ancho	W	46,00	m

**Nota:** Elaborado por la Autora

Formula

La fórmula que se empleará será la siguiente:

### Ecuación: Largo del humedal artificial

$$L = \frac{As}{W}$$

Datos

$L$ : largo del Humedal

$A_s$ : área superficial

$W$ : ancho del Humedal

Resolución:

$$L = \frac{2832 \text{ m}^2}{46 \text{ m}} = 61 \text{ m}$$

### 6.3.1.2 Segunda Propuesta de Área Superficial

- **Temperatura constante.**

Se calculó la constante de temperatura del humedal mediante la siguiente formula:

**Tabla 10.**

*Datos para el cálculo de la temperatura Constante*

Datos	Símbolos	Valores	Unidad
K <sub>20</sub>	K 20	0,19	
Temperatura ambiente	T <sub>a</sub>	18	°C

*Nota:* Elaborado por la Autora

**Desarrollo:**

$$K_T = K_{20} (1.06)^{T_a - 20}$$

$$K_T = 0,19 (1.06)^{18 - 20} = 0,16$$

Por lo tanto, la temperatura constante es de 0,16.

- **Área de Superficie.**

**Tabla 11.**

*Datos para el cálculo del Área*

Datos	Símbolo	Valor	Unidad
Temperatura Constante	KT	0,16	
Caudal	Q	28	m <sup>3</sup> /d
Concentración de DBO de entrada	DBO5 e	2808,60	mg/l
ln Ci	lnCi	7,94	
Altura	Y	0,6	m
Porosidad	n	0,35	
ln Cu	lnCu	4,60517019	
Concentración de DBO en la salida	DBO5 s	100	mg/l

*Nota:* Elaborado por la Autora

$$As = \frac{Q \left( \ln(DBO5_e) - \ln(DBO5_s) \right)}{K_t * y * n}$$

$$As = \frac{\left( 28 \frac{m^3}{día} \right) * \left( \ln(2808,06) - \ln \left( 100 \frac{mg}{l} \right) \right)}{0,16 * 0,6 m * 0,35} = 2832,05 m^2$$

El Área de la superficie del humedal es 2832 pero le cambiamos a 4000 m<sup>2</sup>

- **Tiempo de retención.**

**Tabla 12.**

*Datos para el cálculo del TRH*

Datos	Símbolo	Valor	Unidad
Área superficial	As	4000	m <sup>2</sup>
Caudal	Q	28	m <sup>3</sup> /d
Altura	y	0,6	m
Porosidad	n	0,38	

*Nota:* Elaborado por la Autora

$$TR = \frac{A_s * y * n}{q}$$

$$TRH = \frac{4000m^2 * 06 m * 0,38}{28 \frac{m^3}{dia}} = 32 d$$

Por lo tanto, el Tiempo de Retención Hidráulica es de 32 días

- **Ancho del Humedal**

**Tabla 13.**

*Datos para obtener el Ancho*

<b>Datos</b>	<b>Símbolo</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidad</b>
Área superficial	As	4000	m <sup>2</sup>
Caudal	Q	28	m <sup>3</sup> /d
Altura	y	0,6	m
Pendiente en decimales	m	0,01	m/m
Conductividad Hidráulica	Ks	10000	m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> /d

*Nota:* Elaborado por la Autora

**Formula:**

$$W = \frac{1}{Y} * \left( \frac{Q * A_s}{m * K_s} \right)^{0,5}$$

$$W = \frac{1}{0,6} * \left( \frac{28 \frac{m^3}{dia} * 4000}{0,01 \frac{m}{m} * 10000 \frac{m^3}{m^2 dia}} \right)^{0,5} = \frac{56m}{2} = 28 m$$

Por lo tanto, el ancho de cada humedal es de 28 m

- **Largo del Humedal**

**Tabla 14.**

*Datos para obtener el largo del humedal*

Datos	Símbolo	Valor	Unidad
Área superficial	As	4000	m <sup>2</sup>
Ancho	W	56,00	m

*Nota:* Elaborado por la Autora

**Ecuación: Largo del humedal artificial**

$$L = \frac{As}{W}$$

$$L = \frac{4000 \text{ m}^2}{56 \text{ m}} = \frac{71 \text{ m}}{2} = 35.5 \text{ m}$$

El largo de cada humedal es de 35,5

**6.4 Diagnóstico de la carga contaminante del efluente.**

La tabla 4 presenta los parámetros clave obtenidos del análisis fisicoquímico del agua residual láctea generada por la empresa San Antonio S.A. Estos datos son fundamentales para establecer los criterios técnicos que orientarán el diseño del humedal artificial de flujo subsuperficial, con el fin de reducir la carga contaminante, especialmente la DBO<sub>5</sub>, hasta niveles aceptables antes de su descarga.

**Tabla 15.**

*Parámetros influyentes para el diagnóstico de la carga contaminante.*

Parámetro	Unidad	Valor	Descripción
Caudal efluente diario	m <sup>3</sup> /día	28	Volumen de agua residual generado por día
DBO <sub>5</sub> del efluente	mg/l	2808,60	Concentración de demanda biológica de oxígeno
Temperatura del agua residual	°C	18	Temperatura media del agua influente

DBO <sub>5</sub> objetivo del efluente	mg/l	1000	Meta de calidad para el agua tratada
--	------	------	--------------------------------------

*Nota:* Elaborado por la Autora

## 6.5 Parámetros técnicos de diseño del Humedal Artificial de Flujo

### Subsuperficial.

Para el diseño eficiente del humedal artificial se consideran varios parámetros técnicos que permiten dimensionar adecuadamente el sistema, garantizando una remoción efectiva de la carga contaminante presente en el agua residual láctea. Estos parámetros son definidos a partir del diagnóstico del efluente y criterios basado en bibliografía como mencionan (Asprilla et al., 2020), y normativa aplicable.

**Tabla 16.**

*Parámetros técnicos de diseño del Humedal Artificial de Flujo Subsuperficial*

Parámetro	Valor utilizado	Recomendación bibliográfica
Tipo de humedal	Subsuperficial H.	Adecuado para remoción de materia orgánica
Caudal (Q)	28 m <sup>3</sup> /día	-
DBO <sub>5</sub> valor del efluente	2808,6 mg/l	-
DBO <sub>5</sub> objeto del efluente	1000 mg/l	-
Temperatura	18 °C	Se corrige la constante cinética a esta T°
Porosidad del medio (n)	35%	30%–40% recomendado
Pendiente hidráulica (m)	1%	0,5–2% recomendado
Profundidad (h)	0,70 m	0,30–0,80 m recomendado
Sustrato	Grava <30 mm	Grava o arena menor a 25–30 mm
Vegetación	Schoenoplectus californicus	Plantas nativas de raíz robusta

*Nota:* Elaborado por la Autora

Estos parámetros permiten establecer un diseño técnico funcional y eficiente, que asegure una reducción significativa de la DBO<sub>5</sub> y otros contaminantes, conforme a los estándares de vertido ambiental.

## 6.6 Resultados del dimensionamiento del humedal.

Se dimensionan dos escenarios para evaluar y optimizar.

### 6.6.1 Primer Criterio de diseño del Humedal Artificial con Área de 2832 m<sup>2</sup>.

**Tabla 17.**

*Criterios de dimensión para un área de 2832 m<sup>2</sup>.*

<b>Parámetro</b>	<b>Símbolo</b>	<b>Unidad</b>	<b>Valor</b>
Área superficial	As	m <sup>2</sup>	2832
Ancho del humedal	W	m	(46) 23
Largo del humedal	L	m	(61) 30,5
Profundidad del humedal	h	m	0,70
Volumen total	V	m <sup>3</sup>	120
Área transversal	Ac	m <sup>2</sup>	8,47
Tiempo de retención hidráulico	Trh	días	23
Carga orgánica superficial	-	g DBO/m <sup>2</sup> /día	27

**Nota:** Elaborado por la Autora

La Tabla 17 muestra los criterios para el diseño del humedal artificial de flujo subsuperficial horizontal, planteado como una solución de tratamiento para aguas residuales proveniente de la empresa San Antonio S.A. Para los criterios se tomó en cuenta el diagnóstico de la carga contaminante, los criterios técnicos establecidos en la bibliografía con estudios similares. El humedal está diseñado para tratar un caudal diario de 28 m<sup>3</sup>/día con una concentración inicial de DBO<sub>5</sub> de 2808,6 mg/l, y reducirla hasta un valor objetivo de 1000 mg/L, lo que representa una remoción superior al 60%. Para alcanzar este nivel de eficiencia, se consideró un área superficial de 2832 m<sup>2</sup>, que permite una carga orgánica aproximada de 27 g DBO<sub>5</sub>/m<sup>2</sup>·d, dentro del rango permitido para este tipo de sistemas.

Las dimensiones estructurales del humedal incluyen un ancho de 46 m, largo de 61 m y

una profundidad de 0,70 m, considerando su gran extensión (61m \* 46m) es recomienda construir dos humedales con las disposiciones siguientes: 30,5 m de largo, 23 m de ancho con separación entre construcciones de 1 m, lo que genera un volumen útil de tratamiento de 120 m<sup>3</sup>. Asimismo, se obtuvo un tiempo de retención hidráulico (TRH) de 23 días, considerado adecuado para permitir la degradación biológica de la materia orgánica.

Se utilizó una porosidad del sustrato del 35% y una pendiente hidráulica del 1%, lo cual garantiza un flujo estable y evita la colmatación temprana. El sustrato propuesto es grava con un diámetro menor a 30 mm, ideal para facilitar la aireación y el desarrollo de raíces de plantas macrófitas.

#### 6.6.2 Segundo Criterio de diseño del Humedal Artificial con Área de 4000 m<sup>2</sup>.

**Tabla 18.**

*Criterios de dimensión para un área 4000m<sup>2</sup>.*

Parámetro	Símbolo	Unidad	Valor
Área superficial	As	m <sup>2</sup>	4000
Ancho del humedal	W	m	(56m) 28
Largo del humedal	L	m	(71m) 35,5
Profundidad del humedal	h	m	0,70
Volumen total	V	m <sup>3</sup>	120
Área transversal	Ac	m <sup>2</sup>	8,47
Tiempo de retención hidráulico	Trh	días	32
Carga orgánica superficial	-	g DBO/m <sup>2</sup> /día	19,6

**Nota:** Elaborado por la Autora

La Tabla 18 presenta los resultados del diseño optimizado de un humedal artificial de flujo subsuperficial horizontal, considerando una ampliación del área superficial a 4000 m<sup>2</sup>. Este redimensionamiento responde a la necesidad de mejorar la capacidad de tratamiento y lograr una

mayor eficiencia en la remoción de la DBO<sub>5</sub>, reduciendo la carga contaminante del efluente lácteo hasta niveles aceptables.

Este diseño optimizado mantiene los parámetros técnicos fundamentales del diseño original, como la profundidad efectiva de 0,70 m, el sustrato filtrante de grava/arena menor a 30 mm, y la pendiente hidráulica del 1%. Sin embargo, al aumentar la superficie del humedal, se logra una disminución de la carga orgánica superficial a 19,6 g DBO<sub>5</sub>/m<sup>2</sup>/d, lo cual mejora la eficiencia biológica y reduce el riesgo de sobrecarga del sistema. Sin embargo, para la construcción del humedal se propone que este sea separado en dos partes, considerando su gran extensión (56m \* 71m) por lo que es factible construir dos humedales con las disposiciones siguientes: 35.5 m de ancho, 28 m de largo con separación entre construcciones de 1 m.

Además, se conserva un tiempo de retención hidráulico (TRH) de 32 días, suficiente para garantizar una adecuada interacción entre el efluente, el medio filtrante y la biopelícula.

Este criterio de diseño representa una mejora tanto en términos de eficiencia hidráulica como de sostenibilidad del sistema de tratamiento, permitiendo una operación más robusta, adaptada a variaciones de carga y caudal.

## 6.1 Análisis técnico comparativo.

**Tabla 19.**

*Análisis técnico comparativo*

<b>Criterio</b>	<b>Primer criterio (2832 m<sup>2</sup>)</b>	<b>Segundo criterio (4000 m<sup>2</sup>)</b>	<b>Recomendación Bibliográfica</b>
Carga superficial orgánica (g/m <sup>2</sup> /d)	27	19,60	≤ 20
Tiempo de retención (días)	23	32	
Área superficial total	Adecuado	Más eficiente	Mayor área → mayor eficiencia
Costo de construcción	Menor	Mayor	Depende del presupuesto
Capacidad de remoción	Moderada	Alta	Mejora con menor carga

**Nota:** Elaborado por la Autora

Los criterios establecidos para el área superficial de 2832 m<sup>2</sup>, con carga orgánica aplicada de 27 g DBO<sub>5</sub>/m<sup>2</sup>/día. Esta carga se encuentra dentro del límite superior aceptable para humedales de flujo subsuperficial horizontal. Sin embargo, al estar cerca del límite máximo, existe mayor riesgo de colmatación, reducción en la eficiencia del sistema a largo plazo, y necesidad de mayor mantenimiento.

Por otro lado, un área superficial de 4000 m<sup>2</sup>, con carga orgánica aplicada de 19,60 g DBO<sub>5</sub>/m<sup>2</sup>/día. Se encuentra en un rango más conservador y sostenible, lo cual favorece una mayor estabilidad del proceso, menor riesgo de saturación del sustrato, y mejor rendimiento en la remoción de contaminantes a largo plazo. También ofrece una mayor capacidad de adaptación frente a variaciones en el caudal o la concentración de contaminantes.

Por lo tanto, con base en el análisis del caudal (28 m<sup>3</sup>/día) y la alta carga de DBO<sub>5</sub> (2808,6 mg/l), se estimó que el mejor criterio para el diseño del humedal es del área de 4000 m<sup>2</sup> ya que, garantiza un mejor cumplimiento de las normas ambientales al mantener una carga orgánica por debajo del límite recomendado (20 g DBO/m<sup>2</sup>/día).

Mediante los resultados de los análisis en el laboratorio de la Universidad Politécnica Salesiana, se estableció que los parámetros de la DBO<sub>5</sub> no validan con los criterios de calidad del agua permitidos por lo que es factible emplear un procedimiento de fitorremediación con el que se intenta reducir la concentración del mismo, por lo tanto, el prototipo de humedal ideal para tratar estos parámetros y según estudios tiene inclusive un 95% de efectividad en eliminación y disminución de DBO<sub>5</sub> y de coliformes fecales de un 78.8 % es el Humedal Artificial Horizontal de Flujo Subsuperficial.

Finalmente, el diseño técnico fue digitalizado mediante el programa AutoCAD, y se estructuró un manual de operación y mantenimiento del humedal artificial, con instrucciones claras para su monitoreo, cuidado y registro operativo, expresado en el manual técnico a continuación.

## **6.7 Manual de mantenimiento del humedal artificial Sub-superficial para la empresa de lácteos San Antonio S.A**

### **6.7.1 Introducción**

Los humedales artificiales de flujo subsuperficial tratan aguas residuales mediante procesos físicos, químicos y biológicos. En este tipo de sistema, el agua fluye por debajo de la superficie a través de un medio filtrante (grava o arena) plantado con vegetación acuática.

### **6.7.2 Mantenimiento de Rutina (Frecuencia semanal o mensual)**

#### **6.7.2.1 Inspección visual**

- Revisar si hay zonas encharcadas en la superficie (posible obstrucción o desnivel).
- Verificar la salud de la vegetación: color, crecimiento y presencia de plagas.
- Comprobar que el flujo del agua sea uniforme desde la entrada hasta la salida.

#### **6.7.2.2 Control de maleza**

- Retirar malezas o plantas invasoras manualmente.
- Asegurar que no se obstruyan las entradas/salidas del sistema.

#### **6.7.2.3 Monitoreo de caudal**

- Verificar que el caudal de entrada esté dentro del diseño original.
- Registrar el caudal de entrada y salida para evaluar el desempeño.

### **6.7.3 Mantenimiento Trimestral o Semestral**

#### **6.7.3.1 Limpieza de estructuras hidráulicas**

- Asegurarse de que no haya acumulación de sedimentos o residuos flotantes.

#### **6.7.3.2 Evaluación del medio filtrante**

- Revisar si hay colmatación (saturación por sólidos).
- Si es necesario, remover una capa superficial de grava y reemplazarla.

#### **6.7.3.3 Poda de vegetación**

- Podar las plantas acuáticas para evitar sombreado excesivo y promover oxigenación.
- Retirar biomasa muerta para evitar acumulación de materia orgánica.

### **6.7.4 Mantenimiento Anual**

#### 6.7.4.1 Inspección técnica completa

- Evaluar la estructura del sistema: bordes, pendientes, recubrimientos (si los hay).
- Hacer pruebas de eficiencia de remoción de contaminantes (DQO, DBO, SST, N, P).

#### 6.7.4.2 Revisión del medio filtrante (colmatación severa)

- Si se observa una reducción importante en el flujo o malos olores, puede ser necesario un recambio parcial del medio filtrante.

#### 6.7.4.3 Replantado (si aplica)

- Sustituir plantas muertas o enfermas

#### 6.7.5 Monitoreo de Parámetros (Frecuencia mensual a trimestral)

- pH
- Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO5)

#### 6.7.6 Señales de Alerta

**Tabla 20.**

*Consideraciones para señales de alerta*

Síntoma	Posible causa	Acción recomendada
Agua en superficie	Obstrucción o colmatación	Revisar nivel, limpiar medio filtrante
Mal olor	Exceso de materia orgánica	Poda y remoción de vegetación muerta
Vegetación amarilla/seca	Contaminantes excesivos o plagas	Analizar agua, aplicar control biológico
Reducción en calidad del efluente	Sobre carga o colmatación	Verificar caudal, evaluar mantenimiento

**Nota:** Elaborado por la Autora

### **6.7.7 Registro de Mantenimiento**

Llevar un cuaderno o archivo digital con los siguientes datos:

- Fecha de cada inspección.
- Acciones realizadas.
- Personal responsable.
- Observaciones de vegetación, agua, olores, etc.
- Resultados de análisis de agua.

## 7 DISCUSIÓN.

De acuerdo a la problemática en el agua residual de la empresa láctea San Antonio se propone el tratamiento de Humedal Artificial Subsuperficial para efectuar la reducción del DBO<sub>5</sub> y los coliformes fecales, esto se escogió considerando los parámetros con valores más altos en base a los resultados obtenidos del análisis del agua residual, puesto a que es necesario para la correcta depuración del agua residual.

Los resultados obtenidos de la caracterización del efluente de la empresa San Antonio S.A. evidencian una alta carga contaminante, con valores elevados de DQO y DBO<sub>5</sub> que superan ampliamente los límites permisibles para descarga. Estos hallazgos son consistentes con otros estudios realizados en industrias lácteas, donde se reportan concentraciones similares debido al uso intensivo de agua en el lavado de equipos y la presencia de materia orgánica fácilmente biodegradable (Santos et al., 2020). Además, parámetros como el pH ácido y la alta conductividad corroboran la naturaleza agresiva del efluente hacia los ecosistemas acuáticos.

El análisis de los nutrientes presentes, como NKT y NPK, reflejan un potencial riesgo de eutrofización si estos efluentes fueran descargados sin tratamiento adecuado. De acuerdo con Lozano y Rodríguez (2018), este tipo de aguas residuales requiere de procesos que promuevan la remoción eficiente de nutrientes, principalmente nitrógeno y fósforo, los cuales son claves en la proliferación de algas en cuerpos hídricos. La elevada presencia de sólidos totales también señala la necesidad de una solución de tratamiento que incluya fases de sedimentación y filtración, aspectos contemplados en los humedales artificiales.

La revisión bibliográfica sobre el uso de *Schoenoplectus californicus* (Totora) como especie vegetal en humedales artificiales destaca su gran adaptabilidad a suelos anóxicos y su capacidad para favorecer procesos como la nitrificación y la degradación de la materia orgánica (Forero, 2022). Esta planta promueve la formación de zonas aeróbicas y anaeróbicas en su sistema

radicular, facilitando el trabajo de microorganismos que descomponen los contaminantes. Su implementación ha sido respaldada por varios estudios en humedales en América Latina, donde se ha demostrado su eficacia en el tratamiento de aguas residuales agroindustria (Garcia et al., 2024).

Finalmente, el diseño propuesto del humedal de flujo subsuperficial horizontal con un área de 4000 m<sup>2</sup> se justifica técnicamente por su mayor eficiencia y sostenibilidad a largo plazo. Según Ur Rehman et al. (2024) este tipo de humedales es capaz de remover hasta el 95% de la DBO<sub>5</sub> y reducir significativamente los sólidos suspendidos y nutrientes, siempre que se respeten las cargas orgánicas recomendadas. Por tanto, esta alternativa resulta viable para la empresa San Antonio S.A., no solo desde el punto de vista ambiental, sino también como una solución de bajo costo operativo frente a tratamientos más complejos.

## 8 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 8.1 Conclusiones

La caracterización fisicoquímica de las aguas residuales generadas por la empresa San Antonio S.A. se evidenció una elevada carga contaminante. Los altos niveles de DBO<sub>5</sub>, DQO, sólidos totales y nutrientes (nitrógeno y fósforo) demuestran la necesidad urgente de aplicar un tratamiento eficiente antes de su vertido, ya que el efluente actual representa un riesgo ambiental considerable, especialmente para los cuerpos receptores de agua.

A través de la revisión bibliográfica, se confirmó que *Schoenoplectus californicus* (Totora) es una especie vegetal adecuada para su implementación en humedales artificiales debido a su alta capacidad de remoción de contaminantes orgánicos y nutrientes. Su sistema radicular favorece la actividad microbiana, la oxigenación del sustrato y la absorción de compuestos tóxicos, convirtiéndola en una opción eficiente y sostenible para procesos de fitorremediación.

El diseño del humedal subsuperficial horizontal con un área de 4000 m<sup>2</sup>, propuesto para el tratamiento de las aguas residuales, representa una solución técnica viable y ambientalmente sostenible. El sistema estimado podría alcanzar una remoción del 86 % de la DBO<sub>5</sub>, hasta un 95 % de sólidos suspendidos, más del 80 % de nutrientes, garantizando el cumplimiento de normativas ambientales.

La implementación de este tipo de humedal, en combinación con una trampa de grasas en la entrada, no solo mejora la eficiencia del tratamiento, sino que también aporta beneficios adicionales como bajo consumo energético, escaso mantenimiento, control de olores y fomento de la biodiversidad. De igual manera, permite una posible reutilización del agua tratada en actividades como riego o limpieza industrial, alineándose con los principios de economía circular y gestión responsable del recurso hídricos.

## **8.2 RECOMENDACIONES**

Implementar y mantener adecuadamente el humedal artificial subsuperficial horizontal, asegurando una correcta distribución de flujo, densidad vegetal y monitoreo periódico de parámetros clave (DBO<sub>5</sub>, DQO, sólidos, nutrientes y coliformes). Se recomienda también realizar mantenimientos rutinarios como la limpieza de entradas, retiro de sólidos y control del crecimiento vegetal para evitar la colmatación del sistema.

Instalar una trampa de grasas previa al ingreso del efluente al humedal, con revisiones periódicas, para prevenir acumulación de sólidos que puedan obstruir el flujo del sistema y dañar las plantas acuáticas. Esta acción garantizará la eficiencia del proceso de depuración y prolongará la vida útil del sistema.

Incorporar la gestión del tratamiento de aguas residuales dentro de la política ambiental de la empresa, estableciendo como prioridad la implementación del humedal artificial como una solución sostenible y de bajo costo operativo. Esto incluye asignar presupuesto, personal y cronogramas claros para su ejecución y seguimiento.

Promover la educación ambiental y la capacitación continua del personal, en temas relacionados con el manejo de aguas residuales, fitorremediación y operación de humedales artificiales. Además, se sugiere integrar prácticas de reutilización del agua tratada para riego de áreas verdes o limpieza industrial, fomentando la economía circular y el uso eficiente de recursos hídricos.

## 9 BIBLIOGRAFIA.

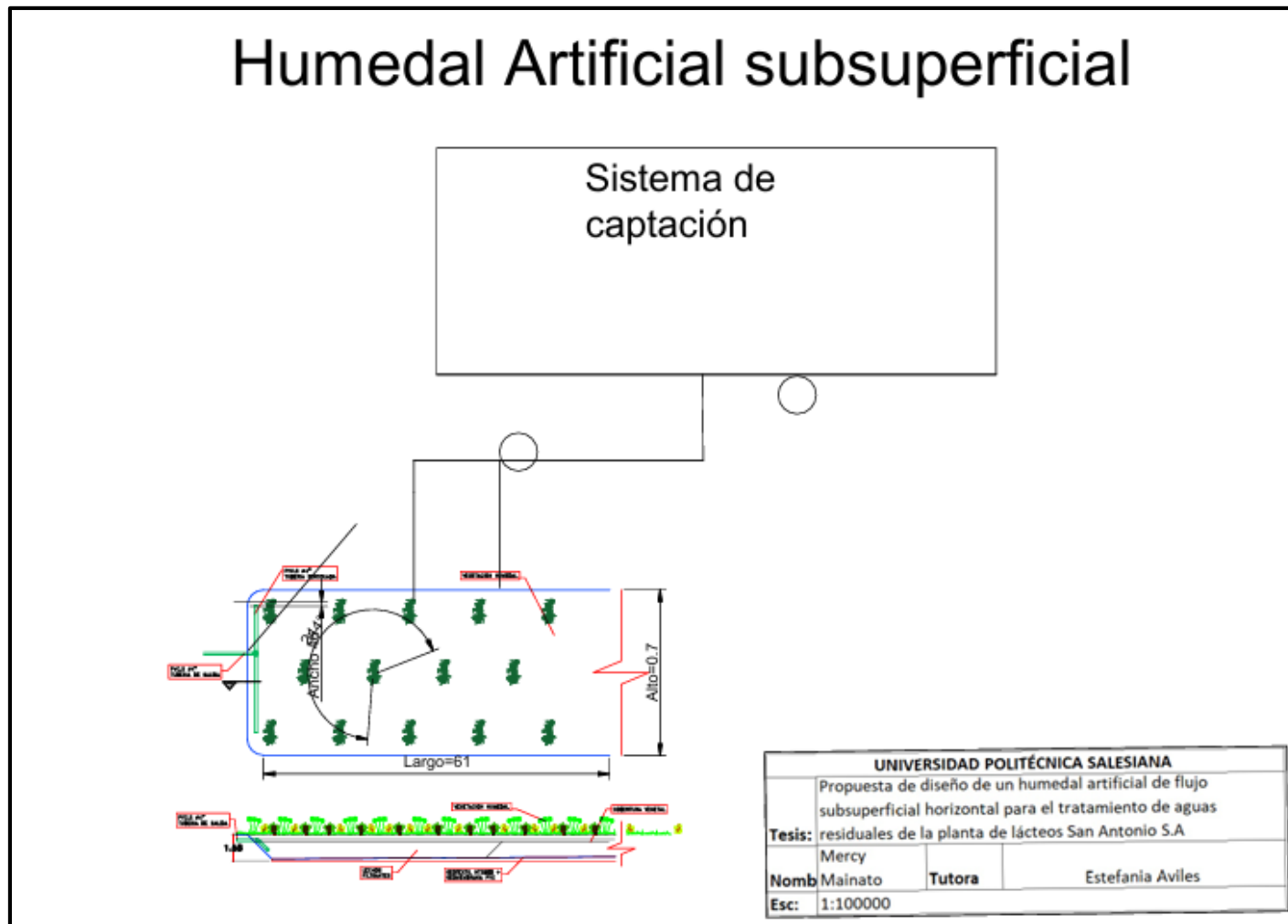
- Asensi, E., Alemany, E., Duque-Sarango, P., & Aguado, D. (2019). Assessment and modelling of the effect of precipitated ferric chloride addition on the activated sludge settling properties. *Chemical Engineering Research and Design*, 150, 14–25. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2019.07.018>
- Asprilla, W., Ramírez, J., & Rodríguez, D. (2020). Humedales artificiales de flujo subsuperficial: comparación de metodologías de diseño para el cálculo del área superficial basado en la remoción de materia orgánica. *USBMed*, 11(1), 65–73. <https://acortar.link/x9Cmba>
- Chávez, E., Humani, L., Yauri, Y., & Ataucusi, R. (2022). Determinación de la calidad del agua de consumo humano mediante parámetros físicos, químicos y microbiológicos en la ciudad de Huancavelica. *Revista Científica Siglo XXI*, 2(2), 16–25. <https://doi.org/10.54943/rcsxxi.v2i2.191>
- Constitución de La República Del Ecuador, Pub. L. No. Registro Oficial 449 de 20-oct.2008 Última modificación: 25-ene.2021 (2008). [https://www.defensa.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2021/02/Constitucion-de-la-Republica-del-Ecuador\\_act\\_ene-2021.pdf](https://www.defensa.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2021/02/Constitucion-de-la-Republica-del-Ecuador_act_ene-2021.pdf)
- Convenio de Basilea. (2025, July 20). *Basel Convention on the Control of Transboundary Movements of Hazardous Wastes and their Disposal*. <https://www.basel.int>. <https://www.basel.int/Home/tabid/10035/Default.aspx>
- Duque-Sarango, P., & Hernández, B. (2020). Estudio integral del recurso hídrico de la microcuenca del río guarango, cuenca – ecuador. *Revista Ibérica de Sistemas e Tecnologías de Informação*, 30, 240–252. <https://search.proquest.com/docview/2404399354?accountid=32861>.
- Duque-Sarango, P., Patiño, D. M., & López, X. E. (2019). Evaluación del Sistema de Modelamiento Hidrológico HEC-HMS para la Simulación Hidrológica de una Microcuenca Andina Tropical. *Información Tecnológica*, 30(6), 351–362. <https://doi.org/10.4067/s0718-07642019000600351>
- Duque-Sarango, P., & Pinos, V. (2022). *Modeling of the Guangarcucho Municipal Wastewater Treatment Plant Using WEST, Cuenca-Ecuador*. 33–46. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-93718-8\\_4](https://doi.org/10.1007/978-3-030-93718-8_4)
- Duque-Sarango, P., & Zagal-Andrade, C. (2023). Análisis de la eficiencia de una planta de experimentación de humedal subsuperficial de flujo vertical para el tratamiento de aguas residuales: Efficiency analysis of a vertical flow subsurface wetland experiment plant for wastewater treatment. *Brazilian Journal of Animal and Environmental Research*, 6(2), 1625–1634. <https://doi.org/10.34188/BJAERV6N2-054>
- Egoavil, G. (2018). *Implementación de humedal artificial en el tratamiento de agua residual domestica del proyecto Don Javier 79 Yarabamba-Arequipa* [Tesis de grado, Universidad Nacional Federico Villarreal]. <https://hdl.handle.net/20.500.13084/2312>
- Escalante, S., & Fajardo, J. (2022). Evaluación de la descontaminación de la cuenca media del río Bogotá y alternativas de solución con humedales artificiales. *INVENTUM*, 17(33), 27–43. <https://doi.org/10.26620/uniminuto.inventum.17.33.2022.27-43>
- Flores, S., Siu, J., Ttira, E., Cerna, T., & Castro A. (2018). Parámetros de calidad del agua y estado trófico de humedal artificial costero: caso de laguna “La Mansión” – Lima (Perú). *Revista de Investigación Ciencia, Tecnología y Desarrollo*, 4(1). <https://doi.org/10.17162/rictd.v4i1.1070>
- Forero, J. (2022). *Propuesta de dos sistemas de tratamiento biológicos de aguas residuales domésticas en la finca Flores de Tenjo de la empresa C.I. Sunshine Bouquet S.A.S* [Tesis de grado, Universidad El Bosque ]. <https://repositorio.unbosque.edu.co/items/69c776a4-e110-430c-a50a-1c94a2924290>
- García, P., Morales, L., Romero, G., Arenazas, A., Ticona, J., Pizarro, R., Vanzin, G., & Sharp, J. O. (2024). Constructed wetlands to treat polluted waters in Latin America and the Caribbean. *International Journal of Water Resources Development*, 40(5), 906–914. <https://doi.org/10.1080/07900627.2024.2341272>
- Instituto Ecuatoriano de Normalización. (1998). *Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 22176:1998* (13.060.01). <https://es.scribd.com/document/271787055/2176-TEcnicas-de-Muestreo>
- Instituto Ecuatoriano de Normalización. (2013). *Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 2169:2013* (13.060.01). <https://acortar.link/b3a03e>
- Ley de Prevención y Control de La Contaminación Ambiental , Pub. L. No. Suplemento 418, Registro

- Oficial 1 (2004).
- Ley Orgánica de Recursos Hídricos Usos y Aprovechamiento Del Agua, Pub. L. No. Suplemento 305, Registro Oficial 1 (2014). <https://acortar.link/3hP386>
- Limaymanta, C., & Ochoa, K. (2020). *Revisión sistemática: Técnicas para la remoción de metales pesados en humedales artificiales* [Tesis de grado, Universidad César Vallejo]. <https://acortar.link/1dzzT5>
- Logroño, J. (2017). *Diagnóstico y plan de manejo ambiental de la microcuenca del río totoras, parroquia san juan, cantón Riobamba, provincia, de Chimborazo* [Tesis de grado, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo]. <https://acortar.link/sIJlKk>
- Stopa, J., Benassi, R., Bueno, R., & Coelho, L. (2022). Horizontal subsurface flow constructed wetlands as post-treatment of aerated pond effluent. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 19(5), 4447–4458. <https://doi.org/10.1007/s13762-021-03418-8>
- Texto Unificado de Legislación Secundaria de Medio Ambiente, Pub. L. No. Decreto Ejecutivo 3516, Registro Oficial Edición Especial 1 (2003). <https://www.ambiente.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2018/05/TULSMA.pdf>
- Ur Rehman, T., Waseem, H., Ali, B., Haleem, A., Abid, R., Ahmed, S., Gilbride, K., & Ali, M. (2024). Mitigation of Sugar Industry Wastewater Pollution: Efficiency of Lab-Scale Horizontal Subsurface Flow Wetlands. *Processes*, 12(7), 1400. <https://doi.org/10.3390/pr12071400>
- Vasco, M., Ati, G., Guilcapi, E., & Lara, D. (2023). Revisión bibliográfica: uso de especies vegetales como biopurificadoras del recurso hídrico. *Polo Del Conocimiento*, 8(5), 352–372.

## 10 ANEXOS

**Figura 6.**

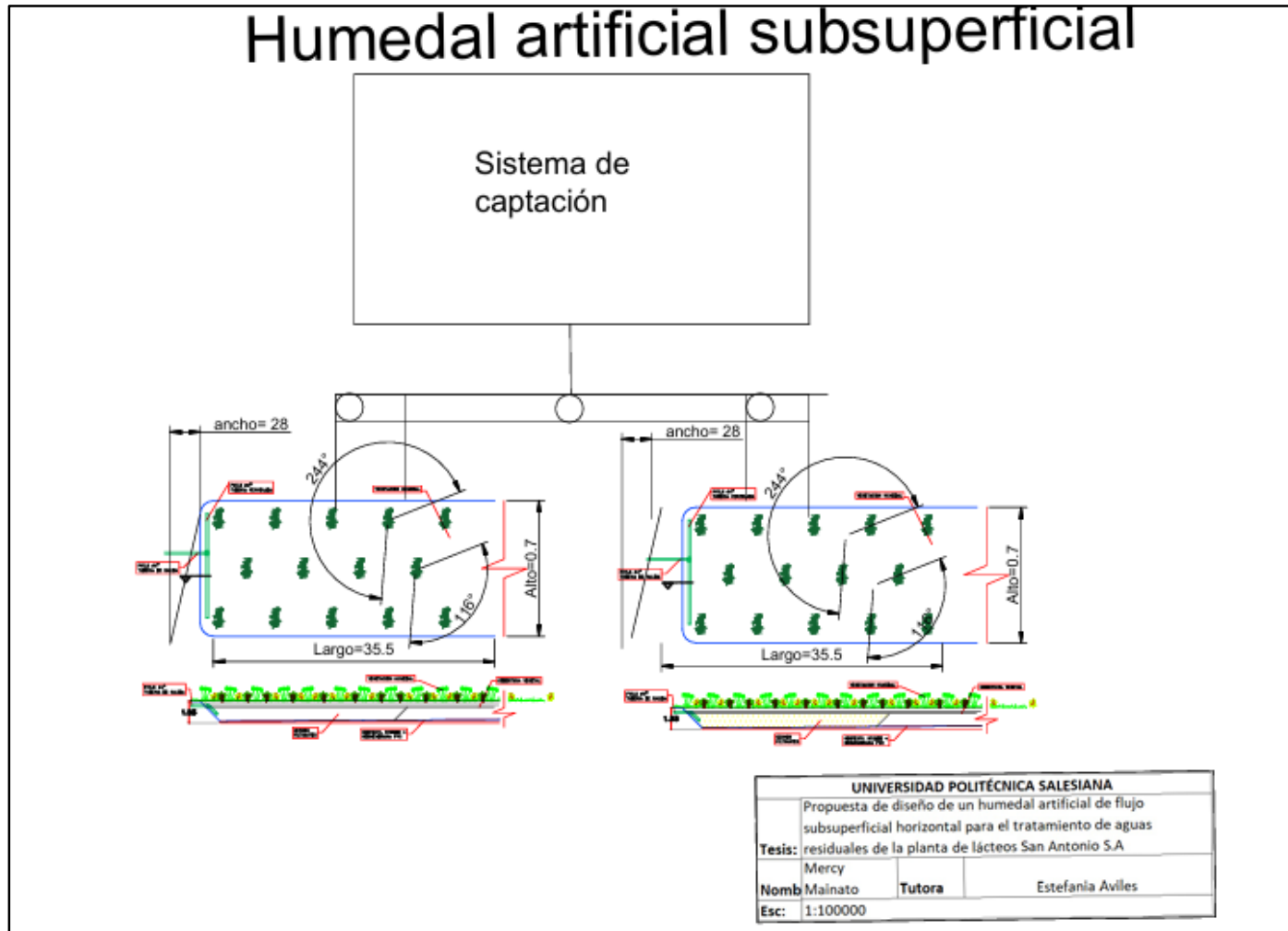
*Diseño del Humedal Subsuperficial 1*



*Nota:* Elaborado por la Autora

**Figura 7.**

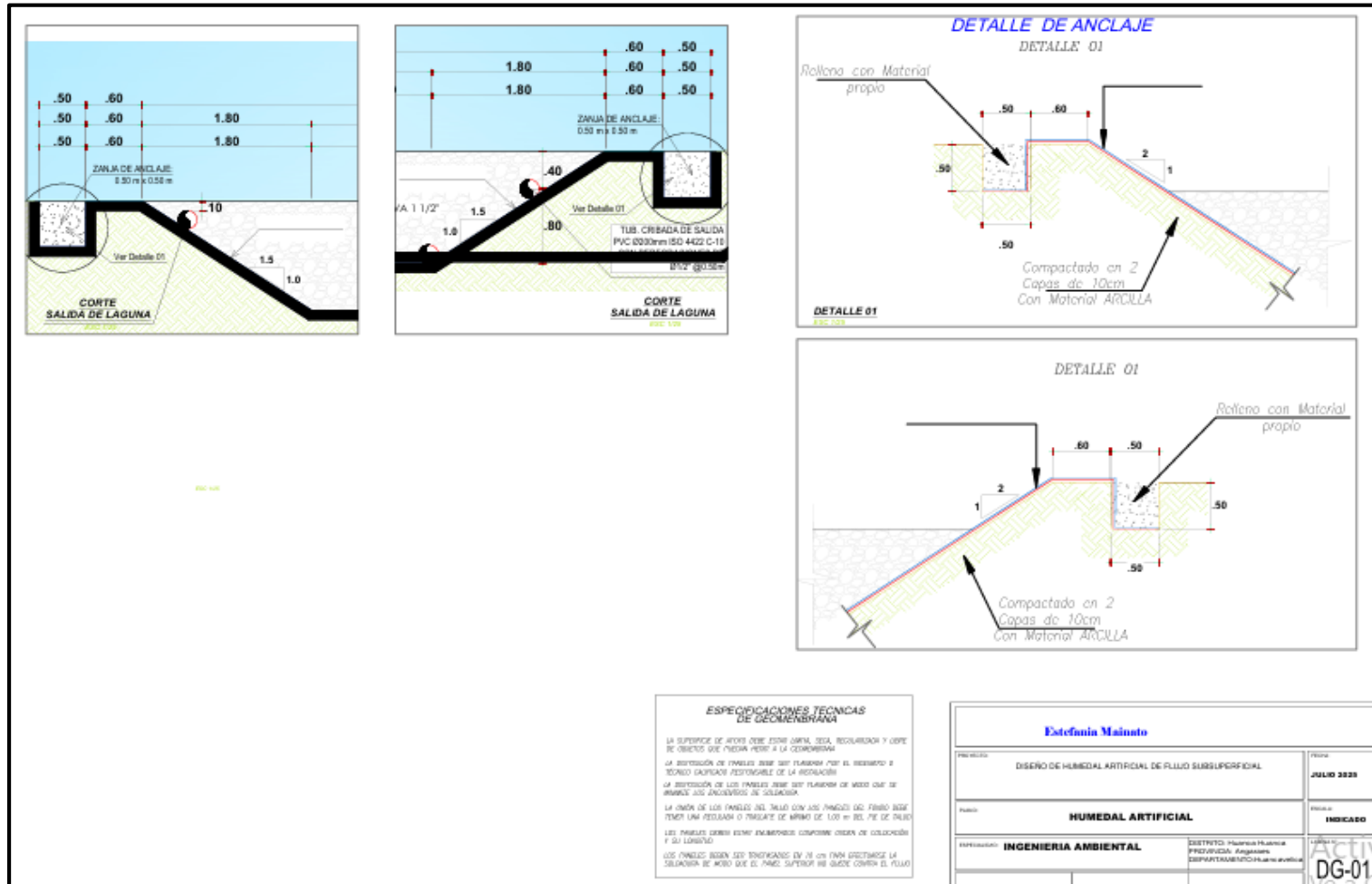
*Diseño del Humedal Subsuperficial 2*



*Nota:* Elaborado por la Autora

**Figura 8.**

*Detalle del anclaje del Humedal*



*Nota:* Elaborado por la Autora

**Figura 9.**

*Empresa de lácteos “San Antonio S.A.”.*



*Nota:* Elaborado por la Autora

**Figura 10.**

*Planta de tratamiento de aguas residuales de la empresa láctea “San Antonio S.A.”.*



*Nota:* Elaborado por la Autora

## Anexos Recolección de las Muestras

### Figura 11.

*Recolección de las muestras de acuerdo a los protocolos de las normas técnicas NTE*

*INEN.*



*Nota:* Elaborado por la Autora

## Anexos Análisis de parámetros in situ

### Figura 12.

*Análisis de parámetros in situ, equipo multiparámetro HQ40d.*



*Nota:* Elaborado por la Autora

**Figura 13.**

*Análisis de parámetros in situ, equipo medidor de Ph*



*Nota:* Elaborado por la Autora

### **Anexos recolección, etiquetado, transporte y almacenamiento temporal de las muestras**

**Figura 14.**

*Recolección, etiquetado, transporte y almacenamiento temporal de las muestras*



*Nota:* Elaborado por la Autora

**Anexos Procedimiento de análisis de parámetros físico químicos del agua residual de la industria láctea “San Antonio S.A.”**

**Figura 15.**

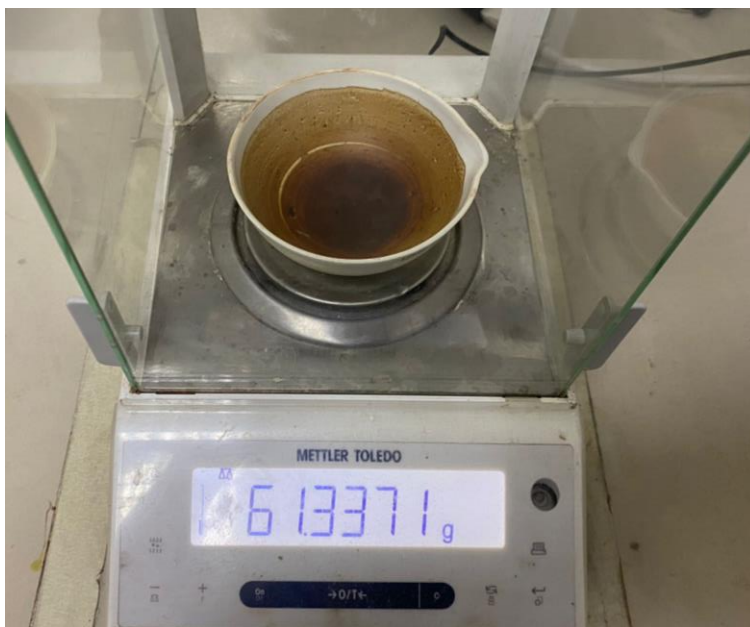
*Determinación de solidos totales, técnicas de evaporación de las muestras.*



*Nota:* Elaborado por la Autora

**Figura 16.**

*Determinación de solidos totales, técnicas de evaporación de las muestras.*



*Nota:* Elaborado por la Autora

**Figura 17.**

*Determinación de sólidos suspendidos totales, metodología filtración al vacío.*



*Nota:* Elaborado por la Autora

**Figura 18.**

*Determinación de sólidos disueltos totales, metodología evaporación.*



*Nota:* Elaborado por la Autora

**Figura 19.**

*Determinación de sólidos disueltos totales, metodología evaporación*



*Nota:* Elaborado por la Autora

**Figura 20.**

*Determinación de la DQO, metodología de titulación y calorimetría.*



*Nota:* Elaborado por la Autora

**Figura 21.**

*Determinación de la DQO, metodología de titulación y calorimetría.*



*Nota:* Elaborado por la Autora

**Figura 22.**

*Determinación de la DBO5, metodología de incubación.*



*Nota:* Elaborado por la Autora

**Figura 23.**

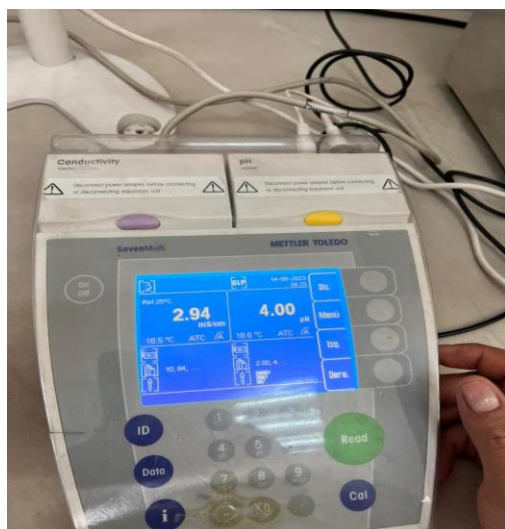
*Determinación de NKT, metodología de fotometría.*



*Nota:* Elaborado por la Autora

**Figura 24.**

*Determinación de NKT, metodología de fotometría.*



*Nota:* Elaborado por la Autora