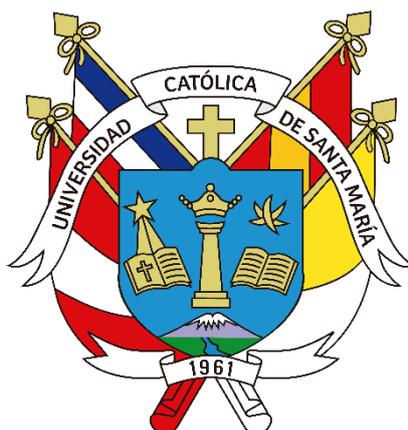


## Universidad Católica de Santa María

Facultad de Ciencias Farmacéuticas, Bioquímicas y Biotecnológicas

Escuela Profesional de Ingeniería Biotecnológica



### TRATAMIENTO DE LACTOSUERO POR CAVITACIÓN HIDRODINÁMICA POSTERIOR PRECIPITACIÓN QUÍMICA Y SUBSECUENTE USO PARA CULTIVO DE MICROALGAS (*Chlorella vulgaris*) EN UN BIORREACTOR TIPO RACEWAY

Tesis presentada por la Bachiller:

**Arenas Jarro, Rafaela Yoselin**

Para optar el Título Profesional  
de Ingeniera Biotecnóloga.

**Asesor:**

Dr. Terán Hilares, Ruly

Arequipa - Perú

2023

UCSM-ERP

**UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA**  
**INGENIERIA BIOTECNOLOGICA**  
**TITULACIÓN CON TESIS**  
**DICTAMEN APROBACIÓN DE BORRADOR**

Arequipa, 24 de Marzo del 2023

**Dictamen: 005906-C-EPIB-2023**

Visto el borrador del expediente 005906, presentado por:

**2016241792 - ARENAS JARRO RAFAELA YOSELIN**

Titulado:

**TRATAMIENTO DE LACTOSUERO POR CAVITACIÓN HIDRODINÁMICA POSTERIOR  
PRECIPITACIÓN QUÍMICA Y SUBSECUENTE USO PARA CULTIVO DE MICROALGAS  
(CHLORELLA VULGARIS) EN UN BIORREACTOR TIPO RACEWAY**

Nuestro dictamen es:

**APROBADO**

**29201360 - VILLANUEVA SALAS JOSE ANTONIO  
DICTAMINADOR**



**43679772 - LOPEZ ALVAREZ NATALIA PAOLA  
DICTAMINADOR**



**47604629 - TEJADA MEZA KEVIN  
DICTAMINADOR**



## DEDICATORIA

Dedico mi trabajo a Dios por siempre protegerme y guiarme. A mi padre Teodoro, a mi madre Trinidad por apoyarme siempre y a mi hermano Alonso por enseñarme a confiar en que puedo lograrlo todo con esfuerzo, perseverancia e inspirarme a ser mejor cada día.



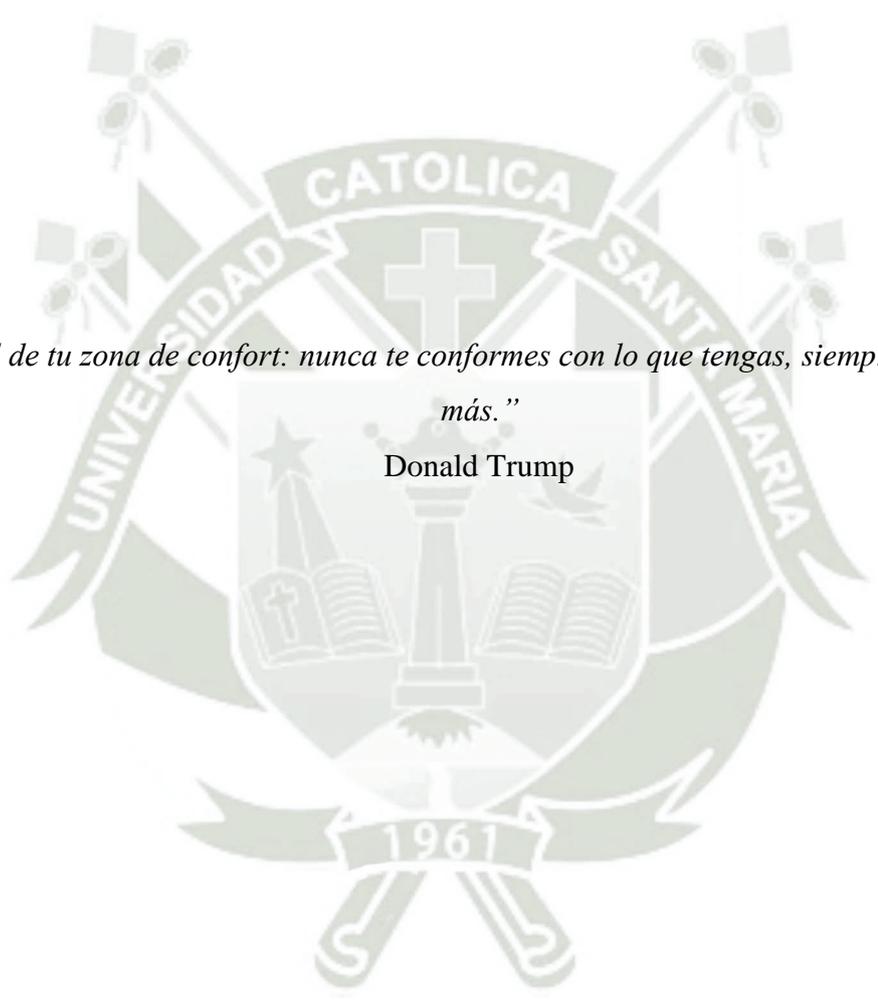
## AGRADECIMIENTOS

Mi agradecimiento al Vicerrectorado de Investigación UCSM, quien a través del concurso para acceder a la adjudicación de Fondos para la Investigación del Plan de Funcionamiento y Desarrollo 2021 brindó el financiamiento al proyecto titulado "TRATAMIENTO DE EFLUENTES POR TECNOLOGÍA DE CAVITACIÓN HIDRODINÁMICA, PROCESO BIOLÓGICO (CULTIVO DE MICROALGAS) Y SISTEMAS DE FILTRACIÓN POR MEMBRANAS", que permitió la realización de mi tesis.

A Dios por darme tantas habilidades, a mis padres Teodoro y Trinidad por darme la vida y la oportunidad de ser una excelente profesional. A mi hermano por ser mi guía y mantenerme siempre disconforme.

Agradezco a todo el equipo del laboratorio de bioproceso de la UCSM por darme la oportunidad de ser tesista del presente proyecto, especialmente agradezco al PhD. Ruly Terán por su paciencia, dedicación, permanente buena disposición, sus enseñanzas y por ser mi mentor en el ámbito científico.

Mi agradecimiento a Kiara García, quien animó a postular como tesista de este proyecto. Agradezco a mis docentes Dr. Jaime Cárdenas, Dr. Roque, Dr. Edilberto Medina, Mg. Joshelyn Paredes por sus enseñanzas durante mi formación académica.



*“Sal de tu zona de confort: nunca te conformes con lo que tengas, siempre ve a por más.”*

Donald Trump

## ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA .....	ii
AGRADECIMIENTOS .....	iii
ÍNDICE GENERAL .....	v
ÍNDICE DE FIGURAS .....	ix
ÍNDICE DE TABLAS .....	xii
RESUMEN .....	xiv
ABSTRACT .....	xv
INTRODUCCIÓN .....	1
HIPÓTESIS .....	3
DEFINICIÓN OPERACIONAL Y CONCEPTUAL DE LAS VARIABLES.....	4
OBJETIVOS .....	5
Objetivo General.....	5
Objetivos Específicos .....	5
CAPÍTULO I .....	6
1. MARCO TEÓRICO .....	6
1.1 Lactosuero.....	6
1.1.1 Generalidades .....	6
1.1.2 Contaminación de agua por lactosuero.....	7
1.1.3 Procesamiento del queso.....	7
1.2 Tratamientos de aguas residuales de lactosuero .....	8
1.2.1 Tratamientos biológicos .....	8
1.2.2 Tratamiento fisicoquímico.....	9
1.2.3 Humedales construidos.....	10
1.2.4 Reutilización agrícola de CWW pretratados .....	11

1.3	Cavitación .....	12
1.3.1	Cavitación óptica (OC) .....	13
1.3.2	Cavitación de partículas (PC) .....	13
1.3.3	Cavitación acústica (CA) .....	13
1.3.4	Cavitación hidrodinámica (HC).....	13
1.4	Microalgas .....	16
1.4.1	Definición y clasificación .....	16
1.4.2	Tipos de cultivo .....	18
1.4.3	Modos de cultivo .....	19
1.4.4	Parámetros de cultivo .....	22
1.4.5	Reactores para el cultivo de microalgas .....	23
1.4.6	Tratamiento de efluentes usando microalgas.....	26
1.5	Filtración por membrana.....	28
1.6	Parámetros importantes en el análisis de aguas .....	31
1.6.1	Parámetros organolépticos.....	31
1.6.2	Parámetros fisicoquímicos.....	31
CAPÍTULO II.....		34
2. MATERIALES Y MÉTODOS.....		34
2.1	Materiales .....	34
2.1.1	Muestras y/o unidades biológicas .....	34
2.1.2	Material de laboratorio .....	34
2.1.3	Insumos y reactivos químicos.....	34
2.1.4	Equipos e instrumentos.....	35
2.2	Métodos .....	36
2.2.1	Obtención y caracterización de la muestra de lactosuero .....	36
2.2.2	Modelamiento por fluidodinámica computacional (CFD) .....	37
2.2.3	Tratamiento de cavitación hidrodinámica del lactosuero .....	37

2.2.4	Precipitación química .....	38
2.2.5	Obtención y cultivo de la microalga “ <i>Chlorella vulgaris</i> ” .....	40
2.2.6	Cultivo continuo de microalgas “ <i>Chlorella vulgaris</i> ” en un biorreactor tipo raceway 41	
2.2.7	Filtración por membranas .....	44
2.2.8	Métodos analíticos .....	45
3.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	51
3.1	Propiedades fisicoquímicas del lactosuero .....	51
3.2	Modelado del dispositivo de cavitación por fluidodinámica computacional (CFD) .....	53
3.3	Tratamiento de cavitación hidrodinámica del lactosuero .....	55
3.4	Precipitación química del lactosuero .....	57
3.4.1	Precipitación del lactosuero sin cavitación .....	57
3.4.2	Tratamiento de lactosuero con cavitación hidrodinámica – Placa de 12 orificios .....	62
4.3	Lactosuero cavitado con el sistema Venturi .....	65
3.5	Obtención y cultivo de la microalga “ <i>Chlorella vulgaris</i> ” .....	69
3.5.1	Velocidad de crecimiento .....	70
3.5.2	Tiempo de duplicación .....	70
3.6	Cultivo de microalgas “ <i>Chlorella vulgaris</i> ” en un biorreactor tipo raceway alimentado con lactosuero pretratado proceso continuo.....	73
3.6.1	Dilución .....	73
3.6.2	Tiempo de retención hidráulica .....	73
3.6.3	Flujo de alimentación .....	74
3.6.4	Filtración por membranas .....	78
4.	CONCLUSIONES.....	81
5.	RECOMENDACIONES .....	82
6.	REFERENCIA .....	82

7. ANEXOS ..... 88



## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura. 1.</b> <i>Proceso de producción de queso. Modificado de Fátima Carvalho et al.<sup>2</sup>...</i>	7
<b>Figura 2.</b> <i>Panorama general de la producción de efluentes de la industria quesera. Principales formas de valorización. Resumen de los sistemas de tratamiento actuales y soluciones futuras. Modificado de Fátima Carvalho et al.<sup>2</sup> .....</i>	12
<b>Figura. 3.</b> <i>Mecanismo de degradación de contaminantes orgánicos. Referencia modificada de Mancuso et al<sup>28</sup>. .....</i>	14
<b>Figura. 4.</b> <i>Esquema de Clasificación de los Diferentes Grupos de Algas. ....</i>	17
<b>Figura. 5.</b> <i>Curva de crecimiento de una población de algas en condiciones de cultivo por lotes. Modificado de Barsanti L. et al.<sup>34</sup>. .....</i>	19
<b>Figura. 6.</b> <i>Representación esquemática de A) Lotes o Batch, B) Lotes alimentado o Fed Batch y C) Continuo. ....</i>	22
<b>Figura. 7.</b> <i>Esquema del reactor raceway. Modificado de M.Barceló et al.<sup>33</sup>. ....</i>	24
<b>Figura. 8.</b> <i>Principales aplicaciones descritas para microalgas. Modificado de Vale et al.<sup>36</sup>. ....</i>	28
<b>Figura. 9.</b> <i>La selección de un proceso de filtración se basa en los tamaños o pesos moleculares de los componentes objetivo. Modificado de Chiam C, et al.<sup>40</sup>. ....</i>	29
<b>Figura. 10.</b> <i>Forma, tipo, configuración y fuerzas impulsadas de las membranas. Modificado de Frenkel V. et. al.<sup>41</sup>. ....</i>	30
<b>Figura 11.</b> <i>Sistema de cavitación hidrodinámica: A) Bomba de 4 HP, B) Válvula, C) Manómetro, D) Dispositivo de cavitación, E) Tuberías, F) Vessel y G) Serpentín. ....</i>	35
<b>Figura 12.</b> <i>Parte del biorreactor usado para el cultivo de microalgas “Chlorella vulgaris”: A) Motor, b) Rueda de paletas, c) Canal, d) Deflector y e) Profundidad del líquido. ....</i>	36
<b>Figura. 13.</b> <i>Ejemplificación de los cuadrantes de la cámara de Neubauer. ....</i>	42
<b>Figura 14.</b> <i>Curva de calibración para el análisis de demanda química de oxígeno. ....</i>	45
<b>Figura. 15.</b> <i>Curva de calibración para determinar azúcares reductores totales. ....</i>	46
<b>Figura 16.</b> <i>Curva de calibración para la cuantificación de proteínas. ....</i>	48
<b>Figura. 17.</b> <i>Esquema del tratamiento: a) Caracterización del lactosuero, b) Cavitación hidrodinámica del lactosuero, c) Precipitación química, d) Cultivo continuo en Raceway y e) Microfiltración .....</i>	51
<b>Figura. 18.</b> <i>Muestra de lactosuero. ....</i>	52

<b>Figura. 19.</b> <i>Diseño del dispositivo de cavitación hidrodinámica en el software ANSYS 2022 R2.1.....</i>	53
<b>Figura. 20.</b> <i>A) Presión y B) Velocidad del fluido en diferentes zonas del dispositivo de cavitación. C) Volumen de fracción de vapor de agua generado en la placa de orificio. Obtenido de Flores Alarcón et al.<sup>53</sup>.....</i>	55
<b>Figura. 21.</b> <i>Precipitación básica del lactosuero.....</i>	58
<b>Figura. 22.</b> <i>Índice de sedimentación del lactosuero sometido a una precipitación básica.....</i>	58
<b>Figura. 23.</b> <i>Precipitación ácida de los sobrenadantes obtenidos a partir de la precipitación alcalina.....</i>	60
<b>Figura. 24.</b> <i>Índice de sedimentación de los sobrenadantes resultantes de la precipitación básica sometidos a una precipitación ácida.....</i>	60
<b>Figura. 25.</b> <i>Precipitación básica de lactosuero cavitado con la placa de 12 orificios.....</i>	62
<b>Figura. 26.</b> <i>Índice de sedimentación del lactosuero cavitado usando la placa de 12 orificios sometido a una precipitación básica.....</i>	63
<b>Figura. 27.</b> <i>Precipitación ácida de los sobrenadantes resultantes de la precipitación básica del lactosuero cavitado con la placa de 12 orificios.....</i>	64
<b>Figura. 28.</b> <i>Índice de sedimentación de los sobrenadantes resultantes de la precipitación básica del lactosuero cavitado con la placa de 12 orificios sometidos a una precipitación ácida.....</i>	64
<b>Figura. 29.</b> <i>Precipitación básica del lactosuero cavitado con el sistema Venturi.....</i>	65
<b>Figura. 30.</b> <i>Índice de sedimentación del lactosuero cavitado usando el sistema Venturi sometido a una precipitación básica.....</i>	66
<b>Figura. 31.</b> <i>Índice de sedimentación de los sobrenadantes resultantes de la precipitación básica del lactosuero cavitado con el sistema Venturi sometidos a una precipitación ácida.....</i>	67
<b>Figura. 32.</b> <i>Comparación de las muestras de A) Agua, B) Lactosuero sin tratar y C) Lactosuero después de la precipitación química (Precipitación química a pH 13 y precipitación acida a pH 4).....</i>	69
<b>Figura. 33.</b> <i>Curva de crecimiento de “Chlorella vulgaris”.....</i>	71
<b>Figura. 34.</b> <i>El crecimiento celular de C. vulgaris durante un período de cultivo de 12 días con fases de crecimiento: (1) Fase de retraso; (2) Fase exponencial; (3) Fase lineal; (4) Fase de crecimiento decreciente; (5) Fase estacionario; y (6) Fase de muerte. Recopilado de S Ma'mun et al.<sup>61</sup>.....</i>	71

**Figura. 35.** *Crecimiento de microalgas en un reactor Raceway* A) Reactor raceway en el día 0, B) Reactor raceway a las 72 horas de cultivo..... 72

**Figura. 36.** *Fotografía del sistema continuo usado en el cultivo de “Chlorella vulgaris” con cultivo de lactosuero:* A) Línea de entrada, B) Línea de salida, C) Depósito del medio, D) Depósito de salida, E) Bomba peristáltica, F) Reactor raceway, G) Rueda de paletas, H) Iluminación, I) Motor, J) Deflector, K) Canal, L) Profundidad del líquido..... 75

**Figura. 37.** *Cultivo de microalgas “Chlorella vulgaris” en un biorreactor tipo raceway alimentado con lactosuero pretratado proceso continuo:* a) Reactor en un tiempo 0, b) Reactor después de 20 horas, c) Reactor después de 40 h, d) Reactor después de 60 horas..... 76

**Figura. 38.** *Fotografía del sistema de microfiltración implementado:* a) Membrana tubular de 600nm, b) Flujo de salida, c) Depósito de efluente tratado, d) Bomba peristáltica, e) Depósito de efluente de microalgas del raceway continuo..... 78

**Figura. 39.** a) Muestra de lactosuero cavitado, b) Muestra de lactosuero pretratado por precipitación química, c) Muestra del cultivo de *Chlorella vulgaris* en el reactor raceway con lactosuero y d) Muestra de lactosuero del cultivo en raceway después de la microfiltración..... 79

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Variables dependientes e independientes. ....	4
<b>Tabla 2.</b> Composición, pH y tamaño de partícula de aguas residuales lácteas. Recopilado de Gopinatha Kurup et. al. <sup>9</sup> y Fátima Carvalho et. al. <sup>2</sup> .....	6
<b>Tabla 3.</b> Ventajas y desventajas de los diferentes tipos de cultivo. Modificado de Medina E <sup>29</sup> . ....	18
<b>Tabla 4.</b> Descripción de las seis fases sucesivas de crecimiento de una población de algas en condiciones de cultivo discontinuo o por Lotes. Modificado de Barsanti L. et al. <sup>34</sup> . ....	20
<b>Tabla 5.</b> Características del lactosuero. ....	52
<b>Tabla 6.</b> Contenido de proteínas, grasas y cenizas del lactosuero. ....	53
<b>Tabla 7.</b> Parámetros fisicoquímicos del lactosuero cavitado con el sistema Venturi. ...	55
<b>Tabla 8.</b> Parámetros fisicoquímicos del lactosuero cavitado con la placa de 12 orificios. ....	56
<b>Tabla 9.</b> Tamaño de partículas del lactosuero sometido a cavitación hidrodinámica usando el sistema de Venturi. ....	56
<b>Tabla 10.</b> Parámetros fisicoquímicos del lactosuero sometido a una precipitación básica. ....	59
<b>Tabla 11.</b> Parámetros fisicoquímicos de los sobrenadantes resultantes de la precipitación básica sometidos a una precipitación ácida. ....	61
<b>Tabla 12.</b> Parámetros fisicoquímicos de los sobrenadantes resultantes del lactosuero cavitado con la placa de 12 orificios sometido a una precipitación básica. ....	63
<b>Tabla 13.</b> Parámetros fisicoquímicos sobrenadantes resultantes de la precipitación básica del lactosuero cavitado con la placa de 12 orificios sometidos a una precipitación ácida. ....	65
<b>Tabla 14.</b> Parámetros fisicoquímicos de los sobrenadantes del lactosuero cavitado usando el sistema Venturi sometido a una precipitación básica. ....	67
<b>Tabla 15.</b> Parámetros fisicoquímicos de los sobrenadantes resultantes de la precipitación básica del lactosuero cavitado con el sistema Venturi sometidos a una precipitación ácida. ....	68
<b>Tabla 16.</b> Contenido de proteínas, grasas y cenizas del lactosuero de las muestras de lactosuero crudo, lactosuero pretratado a pH 13 y lactosuero pretratado a pH 13 y pH 4. ....	68

<i>Tabla 17. Crecimiento de Chlorella vulgaris en un reactor raceway en 72 horas.....</i>	69
<i>Tabla 18. Parámetros de cultivo continuo de Chlorella vulgaris alimentada con lactosuero pretratado. ....</i>	74
<i>Tabla 19. Crecimiento de Chlorella vulgaris en un reactor raceway alimentado con soluciones de lactosuero pretratado .....</i>	76
<i>Tabla 20. Parámetros fisicoquímicos del Cultivo de microalgas “Chlorella vulgaris” en un biorreactor tipo raceway alimentado con lactosuero pretratado proceso continuo. 77</i>	
<i>Tabla 21. Parámetros fisicoquímicos del Cultivo de microalgas “Chlorella vulgaris” en un biorreactor tipo raceway alimentado con lactosuero pretratado proceso continuo y microfiltración.....</i>	79
<i>Tabla 22. Equipos e instrumentos usados.....</i>	97



## RESUMEN

El lactosuero es uno de los principales subproductos de la producción de queso, representando entre un 85 y 95% del volumen total de leche. Dicho subproducto contiene diferentes nutrientes como son la lactosa (4.5-5.0% p/v), lípidos (0.4-0.5% p/v), proteínas solubles (0.6-0.8% p/v) y sales minerales (8-19% extracto seco). Al año se producen alrededor de 145 millones de toneladas de lactosuero, que no pueden ser vertidos directamente a plantas de tratamiento de aguas convencionales debido a su alta carga orgánica, por lo que se están buscando implementar diferentes tratamientos, entre ellos biológicos, químicos, electroquímicos, para lograr disminuir la carga orgánica de estos efluentes y lograr aprovechar los nutrientes presentes en el mismo, generando un proceso sostenible ambiental y económicamente. En este estudio se realizó el tratamiento del lactosuero por cavitación hidrodinámica usando un sistema de Venturi y una placa de 12 orificios como generador de cavidades (microburbujas), seguidamente se realizó una precipitación química básica modificando el pH del efluente usando NaOH y una subsecuente precipitación ácida utilizando H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> para realizar el cambio de pH. Posteriormente, el sobrenadante resultante después de la precipitación química (ácida y básica) fue utilizado como sustrato para el cultivo de la microalga *Chlorella vulgaris* en un biorreactor tipo raceway en sistema continuo usando a diferentes concentraciones (10%, 20%, 30%, 50%, 100%) con un tiempo de retención hidráulica (TRH) de 20.8 h. Encontrando que la concentración del 10% de lactosuero pretratado fue la más eficiente, alcanzando una mayor producción de biomasa ( $3.73 * 10^7 \text{ Cell/ml}$ ), una reducción del DQO residual a 418 mg/L (99.23%), carbohidratos 0.03 mg/L (99.93%), proteínas 46.83 mg/L (99.72%), conductividad 1852 uS/cm (71.73%), sólidos disueltos de 926 ppm Tds (70.38%) y sales 0.94 PSU (72.43%). Como estudio preliminar se evaluó la eficiencia de la membrana cerámica tubular de 600 nm para la recuperación de la microalga *Chlorella vulgaris* y la reducción de la conductividad 1622 uS/cm (75.24%), sólidos disueltos de 812 ppm STD (74.02%) y sales 0.08 PSU (97.60%). El presente trabajo demostró el potencial de la cavitación hidrodinámica para desestabilizar y acelerar la precipitación química (alcalino y ácido) de los componentes del lactosuero, y la eficiencia del método propuesto para la reutilización del agua tratada y el aprovechamiento de residuos como el lactosuero sedimentado y la biomasa microalgal.

**Palabras clave:** Aguas residuales de productos lácteos, *Chlorella vulgaris*, precipitación ácida, precipitación alcalina y precipitación química.

## ABSTRACT

Whey is one of the main by-products of cheese production, representing between 85 and 95% of the total volume of milk. Said by-product contains different nutrients such as lactose (4.5-5.0% w/v), soluble proteins (0.6-0.8% w/v), lipids (0.4-0.5% w/v), mineral salts (8-19% extract dried). Around 145 million tons of whey are produced per year, which cannot be discharged directly to conventional water treatment plants due to its high organic load, which is why different treatments are being sought, including biological, chemical, electrochemical, in order to reduce the organic load of these effluents and to take advantage of the nutrients present in it, generating an environmentally and economically sustainable process. In this study, the whey treatment was carried out by hydrodynamic cavitation using a Venturi system and a 12-hole plate as a generator of cavities (microbubbles), followed by a basic chemical precipitation modifying the pH of the effluent using NaOH and a subsequent acid precipitation. using  $H_2SO_4$  to make the pH change. Subsequently, the resulting supernatant after chemical precipitation (acid and basic) was used as a substrate for the cultivation of the *Chlorella vulgaris* microalgae in a raceway-type biorreactor in a continuous system using different concentrations (10%, 20%, 30%, 50 %, 100%) with a hydraulic retention time (HRT) of 20.8 h. Finding that the concentration of 10% of pretreated whey was the most efficient, reaching a higher biomass production  $3.73 * 10^7 \text{ Cell/ml}$ , a reduction of the residual COD to 418 mg/L (99.23%), carbohydrates 0.03 mg/L (99.93%), proteins 46.83 mg/L (99.72%), conductivity 1852 uS/cm (71.73%), dissolved solids of 926 ppm Tds (70.38%) and salts 0.94 PSU (72.43%). As a preliminary study, the efficiency of the 600 nm tubular ceramic membrane was evaluated for the recovery of *Chlorella vulgaris* microalgae and the reduction of conductivity 1622 uS/cm (75.24%), dissolved solids 812 ppm STD (74.02%) and salts 0.08 PSU (97.60%). The present work demonstrated the potential of hydrodynamic cavitation to destabilize and accelerate the chemical precipitation (alkaline and acid) of whey components, and the efficiency of the proposed method for the reuse of treated water and the use of residues such as settled whey and microalgal biomass.

**Keywords:** *Wastewater from dairy products, Chlorella vulgaris, acid precipitation, alkaline precipitation and chemical precipitation.*

## INTRODUCCIÓN

Según la Organización para la Agricultura y la Alimentación (FAO)<sup>1</sup> el queso es uno de los principales productos agrícolas a nivel mundial. Sea cual sea el tipo de queso (parmesano, gouda, mozzarella, azul danés, brie, feta, camembert, serpa, etc.), las plantas elaboradoras generan efluentes que representan un impacto ambiental importante<sup>2</sup>. Siendo el lactosuero uno de los principales subproductos de la producción de queso, ya que representa entre un 85 y 95% del volumen de leche<sup>3-5</sup>.

El lactosuero contiene diferentes nutrientes como la lactosa (4.5-5.0% p/v), proteínas solubles (0.6-0.8% p/v), lípidos (0.4-0.5% p/v) y sales minerales (8-19% extracto seco)<sup>6</sup>, al año se producen alrededor de 145 millones de toneladas de lactosuero por lo que resulta un gran problema tanto para el medio ambiente como para la salud debido a su alta carga orgánica<sup>5</sup>. Actualmente, se están realizando diferentes tratamientos, entre ellos biológicos, químicos, electroquímicos, entre otros, para lograr disminuir la carga orgánica de estos efluentes y lograr aprovechar los nutrientes. Por ejemplo, en el estudio realizado por Panagiotis Charalambous et al.<sup>6</sup>, se realizó la digestión anaerobia de aguas residuales industriales lácteas y suero de queso en un biorreactor de circulación interna, obteniendo un 80% de remoción de DQO<sup>6</sup>. A su vez, en el estudio realizado por Ana R. Prazeres et al.<sup>5</sup>, se realizó la precipitación ácida y básica de lactosuero usando  $H_2SO_4$ ,  $HNO_3$ ,  $HCl$ ,  $Ca(OH)_2$  y  $NaOH$ . Encontrando que el  $H_2SO_4$ ,  $HNO_3$  y  $HCl$  no disminuyeron la materia orgánica, sin embargo, si lograron disminuir el fósforo total (hasta un 57,0 %), la turbidez (hasta un 90,3 %) y los fenoles totales (hasta un 49,9 %). En cuanto a la precipitación básica  $Ca(OH)_2$  y  $NaOH$ , lograron disminuir la DQO (hasta un 43,7 %), fósforo (hasta un 95.6%), fenoles totales (hasta un 49,9 %) y la turbidez (hasta un 98.9 %)<sup>5</sup>.

Por otro lado, las microalgas son una excelente alternativa para el tratamiento de aguas debido a su rápido crecimiento, su metabolismo heterotrófico, y la aplicabilidad de su biomasa: i) Nutrición humana, ya que es una fuente de proteínas, carbohidratos, vitaminas y minerales esenciales de la nutrición humana; ii) Nutrición animal, es una fuente de proteínas, carbohidratos, vitaminas y otros compuestos adecuados para formulaciones de alimentos para animales; iii) Nutraceuticos/aditivos alimentarios, debido a que es una fuente de  $\beta$ -caroteno, astaxantina, PUFAs (Ácidos grasos poliinsaturados como el

omega-3), clionasterol, luteína y ficocianina, con aplicación como nutraceuticos y aditivos alimentarios; iv) Cosméticos y farmacéuticos, por ser fuente de  $\beta$ -caroteno, astaxantina, PUFAs, ficocianina y otros compuestos de especialidad, con aplicación en cosmética y farmacéutica; v) Captura de  $CO_2$ , De la atmósfera o de las emisiones de gases de combustión; vi) Tratamiento de aguas residuales debido a su capacidad de remoción de nutrientes en el agua residual, vii) Biofertilizantes, Residuos de biomasa ricos en N y P como materia prima para la producción de fertilizantes y viii) Bioenergía, por ser materia prima de aceite a granel para combustibles de aviones y biodiésel. Además, los residuos de biomasa son usados como materia prima para bioetanol, biogás, biocarbón y biohidrógeno.

El objetivo de este estudio fue proponer un sistema eficiente de tratamiento de lactosuero por cavitación hidrodinámica posterior precipitación química y subsecuente uso para cultivo de microalgas "*Chlorella vulgaris*" en un biorreactor tipo raceway.

## HIPÓTESIS

Dado que la cavitación hidrodinámica genera implosiones que pueden desestabilizar moléculas, es posible que dicha tecnología al desestabilizar las moléculas del lactosuero mejore la precipitación química del mismo, convirtiéndose en un método alternativo para tratar efluentes de lactosuero y posteriormente facilitar el cultivo de microalgas en un biorreactor raceway continuo.



## DEFINICIÓN OPERACIONAL Y CONCEPTUAL DE LAS VARIABLES

**Tabla 1.** Variables dependientes e independientes.

<i>Variables independientes</i>	<i>Variables dependientes</i>
<p>Diseño del sistema de cavitación por fluidodinámica computacional:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Diámetro de orificios, cm</li> <li>• Geometría de los orificios</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Número de cavitación (Cv).</li> <li>• Fracción de vapor de agua, (%).</li> <li>• Velocidad del fluido (m/s).</li> </ul>
<p>Tratamiento de lactosuero por cavitación hidrodinámica:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Tiempo, min</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• % Remoción DQO (mg/L).</li> <li>• % Remoción Proteínas (mg/L).</li> <li>• % Remoción Carbohidratos (mg/L).</li> <li>• % Remoción Sales (PSU).</li> <li>• % Remoción Conductividad (uS/cm).</li> <li>• % Remoción Sólidos disueltos (ppm Tok).</li> <li>• % Remoción Turbidez (NTU).</li> <li>• Tamaño de partícula (nm).</li> </ul>
<p>Precipitación alcalina</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• pH 8, 9, 10, 11, 12 y 13</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• % Remoción DQO (mg/L).</li> <li>• % Remoción Proteínas (mg/L).</li> <li>• % Remoción Carbohidratos (mg/L).</li> <li>• % Remoción Sales (PSU).</li> <li>• % Remoción Conductividad (uS/cm).</li> <li>• % Remoción Sólidos disueltos (ppm Tok).</li> <li>• % Remoción Turbidez (NTU).</li> </ul>
<p>Precipitación ácida</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• pH 2 y pH 4</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• % Remoción DQO (mg/L).</li> <li>• % Remoción Proteínas (mg/L).</li> <li>• % Remoción Carbohidratos (mg/L).</li> <li>• % Remoción Sales (PSU).</li> <li>• % Remoción Conductividad (uS/cm).</li> <li>• % Remoción Sólidos disueltos (ppm Tok).</li> <li>• % Remoción Turbidez (NTU).</li> </ul>
<p>Cultivo continuo de microalgas "<i>Chlorella vulgaris</i>" en un biorreactor raceway utilizando efluente previamente tratado:</p> <p>Concentración de lactosuero (10%, 20%, 30%, 50% y 100%)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Producción de biomasa microalgal (Cell/ml).</li> <li>• % Remoción DQO (mg/L).</li> <li>• % Remoción Proteínas (mg/L).</li> <li>• % Remoción Carbohidratos (mg/L).</li> <li>• % Remoción Sales (PSU).</li> <li>• % Remoción Conductividad (uS/cm).</li> <li>• % Remoción Sólidos disueltos (ppm Tok).</li> <li>• % Remoción Turbidez (NTU).</li> </ul>

## OBJETIVOS

### Objetivo General

Proponer un sistema eficiente de tratamiento de lactosuero por cavitación hidrodinámica posterior precipitación química y subsecuente uso para cultivo de microalgas “*Chlorella vulgaris*” en un biorreactor tipo raceway.

### Objetivos Específicos

- Diseñar y construir un sistema de cavitación hidrodinámica aplicando herramientas de fluidodinámica computacional (CFD).
- Evaluar el efecto del tratamiento con cavitación hidrodinámica sobre la precipitación química.
- Evaluar el potencial de remediación de las microalgas “*Chlorella vulgaris*” en un biorreactor continuo tipo raceway de efluentes de lactosuero pretratados con precipitación química.
- Evaluar la eficiencia de la membrana cerámica de 600 nm para la separación de la microalga “*Chlorella vulgaris*”.

## CAPÍTULO I

### 1. MARCO TEÓRICO

#### 1.1 Lactosuero

##### 1.1.1 Generalidades

Después de los sectores químicos y de refinería, el sector lácteo ocupa el tercer lugar en uso de agua y cantidades de descarga de efluentes<sup>7</sup>. Según la FAO<sup>1</sup> (Organización para la Agricultura y la Alimentación) el queso es uno de los principales productos agrícolas más importantes del mundo. La Unión Europea domina su producción y consumo, seguida de Estados Unidos. Independientemente del tipo de queso (parmesano, mozzarella, gouda, azul danés, brie, camembert, feta, serpa, etc.), las plantas de procesamiento generan efluentes que representan un impacto ambiental significativo<sup>2</sup>. El lactosuero es uno de los principales subproductos de la producción de queso, ya que representa entre un 85 y 95% del volumen de leche<sup>5,8</sup>. El lactosuero contiene diferentes nutrientes como la lactosa (4.5-5.0% p/v), lípidos (0.4-0.5% p/v), proteínas solubles (0.6-0.8% p/v) y sales minerales (8-19% extracto seco) como se muestra en la Tabla 2.

**Tabla 2.** Composición, pH y tamaño de partícula de aguas residuales lácteas.

Recopilado de Gopinatha Kurup et. al.<sup>9</sup> y Fátima Carvalho et. al.<sup>2</sup>

Parámetros	Concentración
DBO	1312 ± 150 mg/L
DQO	15 g/L
Turbidez	839.6 ± 51.4 FTU
Lípidos	360 mg/L
Proteína total	388.00 ± 0.01 mg/L
Carbohidratos	121.0 ± 29.0 mg/L
pH	6.6
Partículas	1.08 ± 0.24 µm

En cuanto a las propiedades orgánicas, los efluentes de queso presentan valores de demanda química y bioquímica de oxígeno (DQO y DBO) en el rango de 0.8 a 102 g/L y de 0.6 a 60 g/L, respectivamente. Estos efluentes también presentan un pH bajo (4,0–

8.7), sólidos en suspensión (0.1–22.0 g/L), nitrógeno (0.01–1.7 g/L) y fósforo total (0.006–0.5 g/L)<sup>2</sup>.

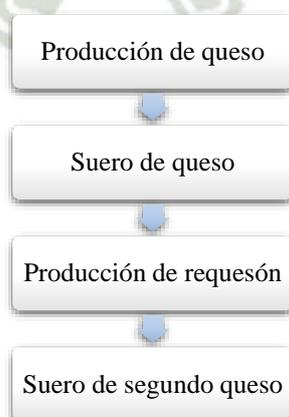
### 1.1.2 Contaminación de agua por lactosuero

Se producen aproximadamente 145 millones de toneladas de suero de leche al año por lo que resulta un gran problema tanto para el medio ambiente como para la salud debido a sus contenidos en lactosa y grasa que ocasionan valores elevados de DQO (0.8-102 g/L) y DBO (0.6-6 g/L) lo que conduce a un alto consumo de oxígeno disuelto en los cuerpos de agua; asimismo por su alta carga orgánica estos efluentes pueden generar problemas serios en sistemas de tratamiento de aguas residuales municipales locales<sup>5, 2</sup>.

En cuanto a su contenido de nitrógeno y fósforo, estos efluentes son un riesgo considerable de eutrofización, lo que genera problemas de calidad del agua, incluido el aumento de los costos de purificación, la interferencia con el valor recreativo y de conservación de los embalses, la pérdida de ganado y los posibles efectos subletales de las toxinas de las algas en animales y humanos. Además, contiene nitrógeno amónico (60 y 270 mg/L) lo que puede causar efectos tóxicos para la vida acuática<sup>10</sup>.

### 1.1.3 Procesamiento del queso

La industria quesera procesa principalmente tres principales tipos de efluentes; suero de queso (de la producción de queso), suero de queso secundario (de la producción de requesón) y el agua de lavado de tuberías, depósitos y tanques que genera un agua residual denominada agua residual de suero de queso<sup>2</sup>.



**Figura. 1.** Proceso de producción de queso. Modificado de Fátima Carvalho et al.<sup>2</sup>

## 1.2 Tratamientos de aguas residuales de lactosuero

Estos efluentes no pueden ser vertidos a plantas de tratamiento de aguas convencionales debido a su alta carga orgánica, por lo que se están realizando diferentes tratamientos, entre ellos biológicos, químicos, electroquímicos, entre otros, para lograr disminuir la carga orgánica de estos efluentes y lograr aprovechar los nutrientes<sup>2</sup>. A continuación, se detallarán los diferentes tratamientos:

### 1.2.1 Tratamientos biológicos

#### i) *Digestión anaeróbica*

La digestión anaeróbica (DA) se define como un proceso único en el que diferentes especies microbianas descomponen materiales orgánicos en ausencia de oxígeno<sup>11</sup>. Los tratamientos convencionales de efluentes de lactosuero se basan en procesos de digestión anaeróbica y aeróbica. Se han informado valores de eliminación de DQO en el intervalo 81-99% (CWW crudo) y 85-98% (CWW diluido). A pesar de la importante remoción de DQO obtenida por la digestión anaeróbica de los ACS crudos, en algunos casos, la DQO residual del efluente todavía presenta valores inaceptables<sup>2</sup>. Por ejemplo, en el estudio realizado por TJ Bolen et al.<sup>2</sup> se evaluó la codigestión anaeróbica para suero de queso (CW), los resultados de los experimentos de ensayo de potencial de biogás indicaron que la codigestión de CW con lodos primarios (PS) no mejoró la producción de biogás<sup>2</sup>. Además, en el estudio realizado por Panagiotis Charalambous et al.<sup>6</sup>, se realizó la digestión anaerobia de aguas residuales industriales lácteas y suero de queso en un biorreactor de circulación interna, obteniendo un 80% de remoción de DQO del tratamiento de aguas residuales de productos lácteos, la desventaja de este proceso es el requerimiento elevado de NaOH para el mantenimiento del pH<sup>6</sup>.

#### ii) *Digestión aeróbica*

La digestión aeróbica es un proceso microbiano que ocurre cuando el oxígeno está disponible. La materia orgánica se oxida en condiciones aeróbicas para producir productos como nitratos, fosfatos y dióxido de carbono<sup>2</sup>. Normalmente, la biodegradación aeróbica está limitada por la formación excesiva de lodos<sup>12</sup>.

En el estudio realizado por Ehsan Daneshvara et. al<sup>13</sup>, se investigaron dos ciclos de cultivo mixotrófico y un ciclo de cultivo heterótrofo de microalgas *Scenedesmus quadricauda*

(*agua dulce*) y *Tetraselmis suecica* (*agua marina*) en aguas residuales lácteas (DWW). Se encontró que los pesos secos de *S. quadricauda* y *T. suecica* fueron de 0,43 y 0,58 g/L después del primer ciclo y de 0,36 y 0,65 g/L después del segundo ciclo de cultivo mixotrófico, respectivamente. Los resultados de este estudio sugieren que al reutilizar DWW en dos ciclos consecutivos de cultivo de microalgas, se puede lograr una mayor eficiencia de eliminación de contaminantes y producción de biomasa de microalgas<sup>13</sup>.

### 1.2.2 Tratamiento fisicoquímico

#### i) Coagulación/floculación y precipitación

La precipitación química en el tratamiento de aguas residuales es el cambio de forma de los materiales disueltos en el agua a partículas sólidas<sup>14</sup>. A la precipitación química le sigue siempre una operación de separación de sólidos: coagulación y/o sedimentación o filtración.

La coagulación es un fenómeno coloidal importante que cambia la distribución del tamaño de las partículas de un gran número de partículas pequeñas a un pequeño número de partículas grandes<sup>15</sup>. La floculación es un proceso por el cual un coagulante químico agregado al agua actúa para facilitar la unión entre partículas, creando grandes aglomerados que son más fáciles de separar<sup>16</sup>. Es uno de los procesos fisicoquímicos más simples y económicos. Este tratamiento se da debido a la existencia de proteínas (principalmente caseína con un punto isoeléctrico de 4,6 y un mayor aumento del pH implican la precipitación de estas especies<sup>2</sup>.

En el estudio realizado por Ana R. Prazeres et al.<sup>5</sup>, se realizó la precipitación ácida y básica de lactosuero usando  $H_2SO_4$ ,  $HNO_3$ ,  $HCl$ ,  $Ca(OH)_2$  y  $NaOH$ . Se encontró que el  $H_2SO_4$ ,  $HNO_3$  y  $HCl$  no disminuyen la materia orgánica, sin embargo, si logran disminuir el fósforo total (hasta un 57,0 %), la turbidez (hasta un 90,3 %) y los fenoles totales (hasta un 49,9 %). En cuanto a la precipitación básica  $Ca(OH)_2$  y  $NaOH$ , logran disminuir la DQO (hasta un 43,7 %), fósforo (hasta un 95,6%), fenoles totales (hasta un 49,9 %) y la turbidez (hasta un 98,9 %).

También Rivas et al.<sup>17</sup>, comprobaron la viabilidad de un proceso de precipitación en condiciones alcalinas utilizando cal o NaOH. Casi el 50 % de la DQO se eliminó en el

proceso. De manera similar a las etapas de coagulación-floculación con sales de hierro, el sobrenadante fue altamente biodegradable. Por otro lado; Marina S. Melchors et al.<sup>18</sup>, evaluaron la eficiencia de la electrofloculación para el tratamiento de aguas residuales de la industria láctea y la recuperación de suero sólido. Logrando una remoción de materia orgánica y turbidez al emplear electrodos de hierro de 97.4% y 99.1%, respectivamente, con un pH final de 7.38.

## ii) *Procesos de oxidación*

Los Procesos de Oxidación Avanzada (POA) son tecnologías de tratamiento destinadas a degradar y mineralizar la materia orgánica recalcitrante de las aguas residuales mediante la reacción con el radical hidroxilo ( $\bullet\text{OH}$ )<sup>19</sup>. No se recomiendan los procesos de oxidación cuando se trata de aguas residuales de suero de queso (Cheese whey wastewater o CWW) sin procesar. Se sugiere que la oxidación se desempeñe mejor como proceso de postratamiento, después de la biodegradación<sup>20</sup>. Así, la oxidación Fenton, como proceso de postratamiento, conduce a una remoción significativa de DQO (DQO final 20 mg/L) usando una alta concentración de peróxido de hidrógeno, 0.5 M y 2 g/L de  $\text{Fe}^{3+}$  efluente pretratado con baja DQO, 0.5 g/L<sup>20</sup>.

Esta necesidad de alta concentración de reactivos conduce a los altos costos operativos. También se han probado la ozonización simple y la ozonización catalítica, como postratamiento, que permiten una muy buena eliminación de DQO<sup>20</sup> usando una concentración de ozono de 10 mg/L.

En el estudio realizado por Mohammad Reza Heidari Et. al.<sup>21</sup>, se evaluó el desempeño del sistema integrado de tratamiento de aguas residuales (TAR), un reactor por lotes de secuenciación (SBR) de electro-Fenton (EF), para WW de la industria láctea, se logró a una eliminación de hasta el 99 % demanda química de oxígeno, 97% de nitrógeno total y 95% de remoción de fósforo total<sup>21</sup>.

### **1.2.3 Humedales construidos**

Los humedales diseñados son una tecnología emergente que utiliza plantas y comunidades microbianas de la rizosfera para eliminar varios contaminantes químicos, orgánicos y/o inorgánicos<sup>2</sup>. En teoría, esta tecnología podría ser una buena solución

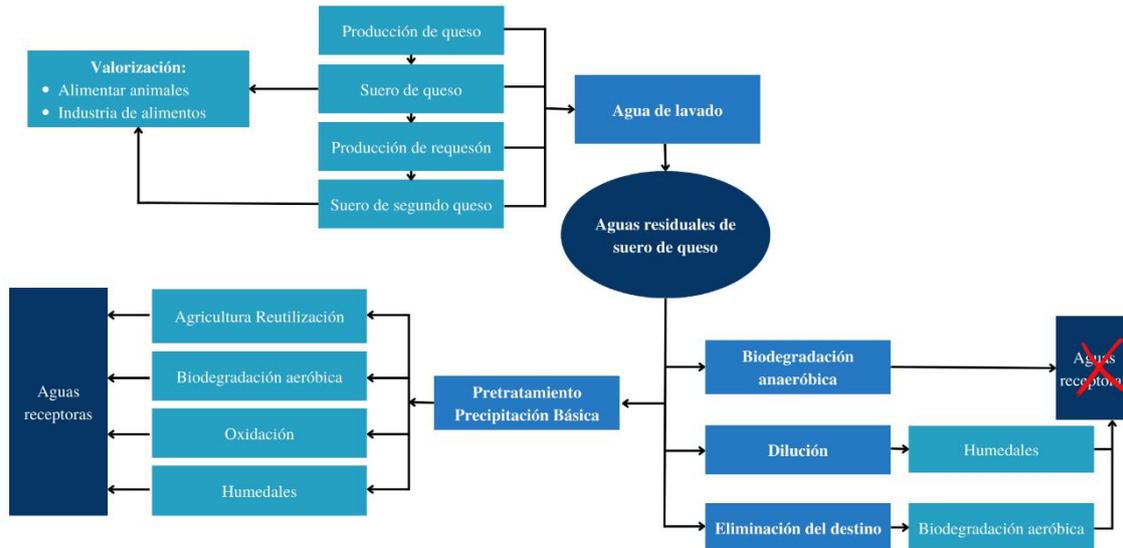
respetuosa con el medio ambiente. La tecnología no necesita una estrategia de monitoreo a tiempo completo, presenta bajos costos de construcción y operación con buena integración ecológica y paisajística. Sin embargo, debido a las características especiales de los CWW, el uso de humedales artificiales para tratar los CWW presenta algunas limitaciones. Por lo tanto, estas aguas residuales necesitan un pretratamiento para la eliminación de grasa previa<sup>22</sup> o incluso eliminación de grasa más dilución con aguas residuales domésticas<sup>23</sup>.

En el estudio realizado por Emanuel Nocetti et. al.<sup>24</sup>, se seleccionaron macrófitos y sustratos a utilizar en humedales de flujo horizontal subsuperficial para el tratamiento de aguas residuales de una quesería, encontrando que los humedales HSSF sembrados con *C. glauca* mostraron el mejor desempeño para la remoción de  $\text{NH}_4$ , además *Domingensis* y *C. glauca* mostraron una alta tolerancia a los efluentes lácteos diluidos estudiados<sup>25</sup>.

#### 1.2.4 Reutilización agrícola de CWW pretratados

Debido a su alto contenido de materia orgánica biodegradable y nutrientes, puede ser utilizado como factores de crecimiento para las plantas. La salinidad alta es un factor limitante y se deben usar plantas con tolerancia moderada a alta a la salinidad. La reutilización de estos lodos y CWW pretratados puede permitir que este sistema sea un sistema de descarga cero<sup>2</sup>.

En la Figura 2 se muestra una descripción resumida y esquemática de la producción, tratamiento y reutilización de los efluentes de la industria quesera. Los actuales sistemas de tratamiento muestran la imposibilidad de vertido a las aguas receptoras. Los pretratamientos fisicoquímicos como la precipitación química o la coagulación/floculación podrían ser una solución alternativa en el futuro de la gestión de CWW<sup>25</sup>.



**Figura 2.** Panorama general de la producción de efluentes de la industria quesera.

Principales formas de valorización. Resumen de los sistemas de tratamiento actuales y soluciones futuras. Modificado de Fátima Carvalho et al.<sup>2</sup>

Estos tratamientos son fáciles, económicos y adaptables a las fluctuaciones operativas. Los procesos fisicoquímicos hacen que un efluente sea apto para una simple biodegradación de lodos activados<sup>25</sup>. Además, en condiciones controladas, los efluentes y lodos pretratados se pueden utilizar como fertilizante, existen estudios que demuestran el aumento de las propiedades nutricionales del tomate y la lechuga observado en ensayos agrícolas en finca<sup>25</sup>.

### 1.3 Cavitación

La cavitación se puede definir como un fenómeno de nucleación, crecimiento e implosión de cavidades llenas de vapor o gas en un período corto de tiempo<sup>26,27</sup>. Este fenómeno implica la transición de una fase líquida a una fase de vapor, con una caída de la presión de saturación a una determinada temperatura<sup>27</sup>. Cuando iniciaron las investigaciones de cavitación notaron que causaba corrosión, ruido, vibración de equipos y superficies, por lo que lo consideraron un fenómeno dañino. Pero con las investigaciones realizadas vieron que estas desventajas se podrían solucionar usando materiales de aislamiento acústico, materiales resistentes a altas temperaturas y presiones, diferentes ranuras de succión, entre otras alternativas, convirtiéndose en un método viable<sup>26</sup>. Después de múltiples estudios, pudieron generar cuatro tipos de cavitación basados en el modo de generación:

### 1.3.1 Cavitación óptica (OC)

Se produce cuando la luz de un láser pulsado converge en un líquido provocando el depósito local de energía y luego se producen burbujas transitorias debido a la rotura óptica<sup>26</sup>.

### 1.3.2 Cavitación de partículas (PC)

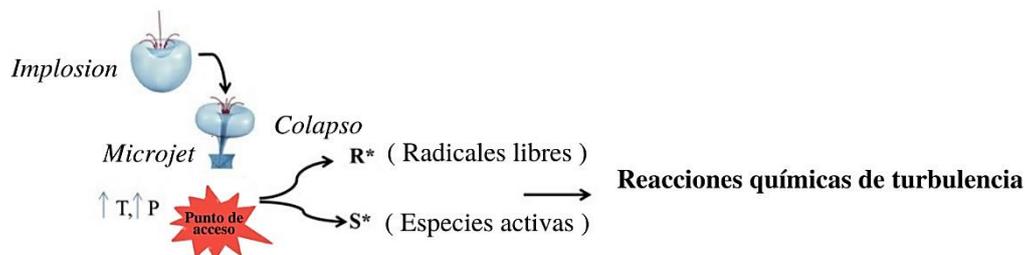
Se refiere a la cavitación producida por cualquier otro tipo de haz de partículas elementales que rompe un líquido en una cámara de burbujas<sup>26</sup>.

### 1.3.3 Cavitación acústica (CA)

Es el resultado de fluctuaciones de presión en el líquido causadas por ondas sonoras, generalmente ultrasonido (16 kHz-100 MHz), este tipo de cavitación es ampliamente usado en síntesis química, la biotecnología, el tratamiento de corrientes de desechos, la degradación de materiales poliméricos y la industria petroquímica<sup>8,26</sup>.

### 1.3.4 Cavitación hidrodinámica (HC)

La cavitación hidrodinámica se crea por el paso forzado del agua a través de un dispositivo de constricción, que generalmente son generadas por construcciones específicas (placa de orificio, boquilla convergente divergente o un tubo de riego), dispositivos basados en vórtices o rotación mecánica<sup>8,26</sup>. Genera numerosas cavidades que luego colapsan violentamente, debido a la recuperación de presión, generando microchorros de alta velocidad y ondas mecánicas<sup>8,26</sup>. En este estudio usaremos el método de cavitación hidrodinámica, ya que tiene una mejor eficiencia energética, requiere un equipo simple y se puede usar a gran escala.



**Figura. 3.** Mecanismo de degradación de contaminantes orgánicos. Referencia modificada de Mancuso et al<sup>28</sup>.

En cavitación hidrodinámica, la intensidad de la cavitación depende de la intensidad de la turbulencia y del número de cavidades generadas, a continuación, se describe la ecuación de cavitación hidrodinámica:

$$Cv = \frac{P_2 - P_V}{\frac{1}{2} * \rho * v_0^2}$$

Eq. (1)

Donde: Número de cavitación ( $Cv$ ); presión recuperada downstream ( $P_2$ ); presión de vapor líquido ( $P_V$ ); velocidad inicial del dispositivo de cavitación ( $v_0$ ); densidad del líquido ( $\rho$ ).

Durante el paso del líquido a través del dispositivo de cavitación, la generación de cavidades se obtiene en un valor específico de  $Cv$  conocido como número de inicio de cavitación ( $Cvi$ ). En condiciones ideales, las cavidades se forman en  $Cv \leq 1$ , sin embargo, debido a una cantidad considerable de gases disueltos o presencia de partículas en suspensión, las cavidades también pueden formarse en  $Cv > 1$ <sup>28</sup>.

Cuanto menor sea el valor del número de cavitación, mayor será la intensidad de cavitación que se alcance. Además, la intensidad de la cavitación se puede mejorar controlando la recuperación de presión en el lado aguas abajo de la constricción. También es importante tener en cuenta que un valor muy bajo de  $Cv$  tampoco es aconsejable, ya que la gran cantidad de cavidades generadas dan lugar a una nube de cavidades. El

fenómeno se conoce como cavitación bloqueada que produce una reducción en la intensidad de la cavitación<sup>28</sup>.

El análisis típico de las dos formas de cavitación exploradas para el tratamiento de aguas residuales revela que, aunque la intensidad de la cavitación es inmensa para la cavitación acústica en comparación con la cavitación hidrodinámica, tiene problemas significativos en el aumento de escala debido al requerimiento de mayor energía y costo, así como problemas de escalar. La cavitación hidrodinámica, por lo tanto, aparece como un enfoque eficiente en comparación con la cavitación acústica para operaciones a gran escala<sup>28</sup>.

*i) Cavitación para el tratamiento de aguas residuales industriales*

Muchas industrias liberan aguas residuales contaminadas en el entorno circundante, que son las más tóxicas para la vida acuática y la salud humana. La cavitación es uno de los fenómenos utilizados en el tratamiento de aguas residuales para la reducción de diferentes parámetros peligrosos liberados al medio ambiente<sup>25</sup>.

- *Cavitación en aguas residuales de productos lácteos*

Actualmente, se utilizan diferentes tratamientos como la coagulación, la adsorción, la separación de membranas, el tratamiento con carbón, entre otros tratamientos, debido a que es difícil eliminar la alta concentración de DBO presente en aguas residuales de productos lácteos<sup>25</sup>. En las aguas residuales de los productos lácteos no hay productos químicos tóxicos, pero sí una alta concentración de componentes orgánicos disueltos, como grasas, aceites, grasas y nutrientes. Se suelen usar diferentes productos químicos, como peróxido de hidrógeno, sulfato ferroso heptahidratado, ácido sulfúrico e Hidróxido de sodio, etc. Se utilizan diferentes rangos de potencia de sonicación para reducir la DQO de las aguas residuales de la industria láctea.

Los procesos de ultrasonificación y cavitación hidrodinámica se utilizan para aguas residuales industriales lácteas tratadas y también modifican las propiedades físicas y químicas de diferentes componentes de la leche (grasa y proteínas de la leche)<sup>25</sup>. Los procesos de irradiación de ondas ultrasónicas causan la liberación de nutrientes del estado sólido a la forma soluble. Los procesos híbridos de membrana ultrasónica se utilizan para el tratamiento de aguas residuales de productos lácteos<sup>25</sup>.

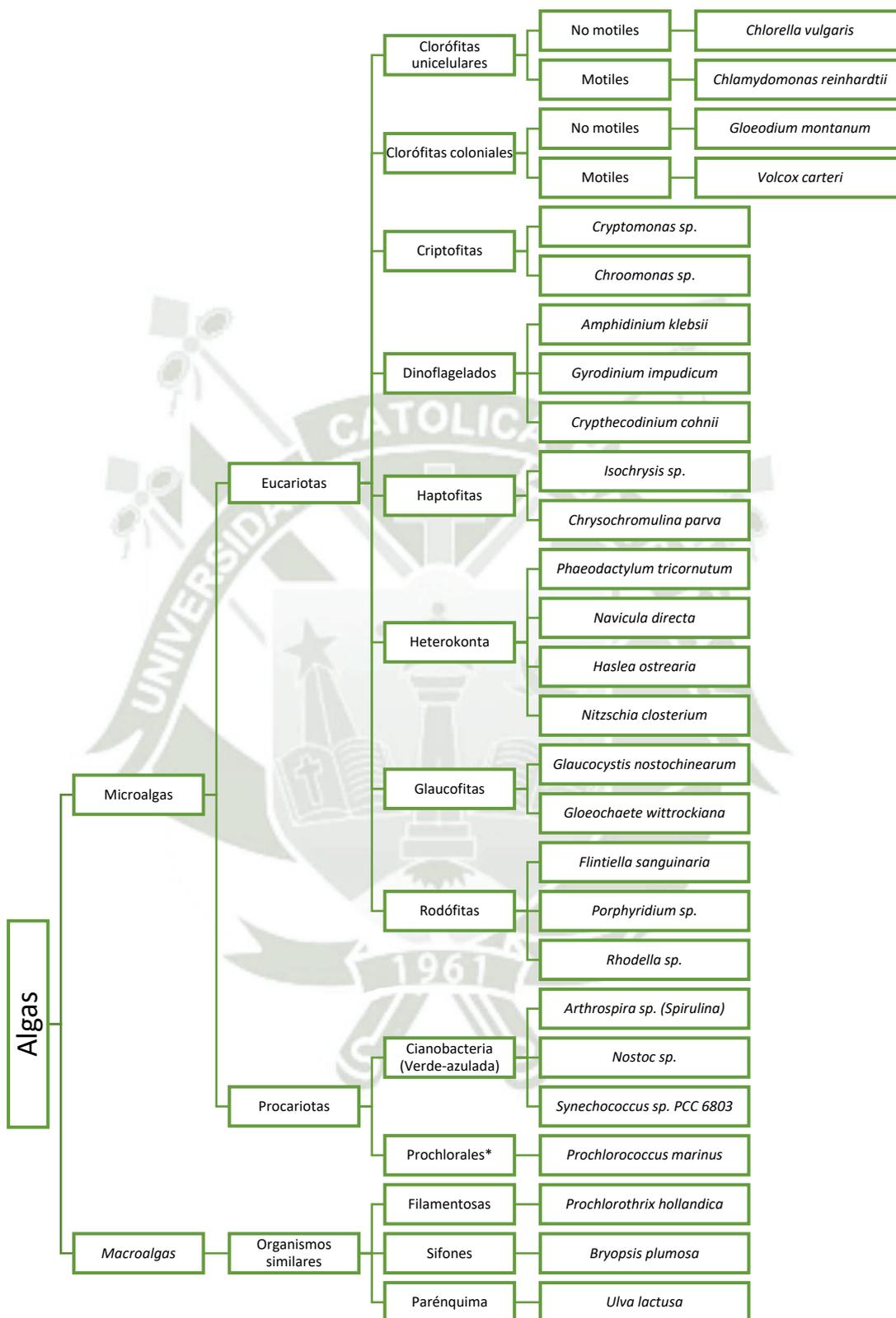
## 1.4 Microalgas

### 1.4.1 Definición y clasificación

Las microalgas son microorganismos que tiene capacidad fotosintética, producen compuestos de almacenamiento y mecanismos de defensa similares a los de las plantas. Su clasificación no es universal, pero se pueden clasificar en organismos procariotas y eucariotas. Los eucariotas se caracterizan por ser células que tienen un núcleo que alberga material genético, en cambio, las procariotas carecen de núcleo definido, por lo que su material celular se encuentra en el citoplasma<sup>28 y 29</sup>.

En cuanto a las microalgas eucariotas tenemos a las: i) Clorófitas unicelulares, que se caracterizan porque se puede diferenciar cada una de las células; ii) Clorófitas coloniales, se caracterizan por que forman colonias; iii) Criptofitas, son organismos fotosintéticos que suelen producir compuestos externos; iv) Dinoflagelados, son algas que se encuentran en las mareas, contienen sustancias tóxicas; v) Haptofitas, estas algas se caracterizan por tener un color pardo y son importantes ya que producen pigmentos de alto valor; vi) Heterokonta, se caracterizan porque tienen una pared celular rígida de sílica, son importantes por su membrana celular y porque tienen una producción alta de lípidos; vii) Glaucofitas, se caracterizan por que tienen un color más intenso; viii) Rodófitas, llamadas también algas rojas, producen sustancias de alto valor, además producen hexopolisacáridos<sup>28,29</sup>.

También tenemos a las microalgas procariotas, en dicho grupo se encuentran: i) Cianobacteria, conocidas como las algas verdes azuladas, producen fotosíntesis, pero no tienen una membrana celular; ii) Prochlorales, producen fotosíntesis, por lo que se consideran como microalgas procariontes. También existen organismos similares, los cuales son más grandes denominados macroalgas los cuales se dividen en: i) Filamentosas; ii) Sifones; iii) Parénquima. En la Figura 4 se muestra un esquema de la clasificación de las algas en donde se colocaron ejemplos representativos de cada grupo<sup>28,29</sup>.



**Figura. 4.** Esquema de Clasificación de los Diferentes Grupos de Algas.

\* En el esquema también se muestran ejemplos representativos de cada grupo.

### 1.4.2 Tipos de cultivo

*i) Autotrófico*

Es la forma más común de cultivo de microalgas, se caracterizan porque estas realizan fotosíntesis utilizando  $CO_2$  (fuente de carbono), energía (luz), medio de cultivo (nutrientes) y en algunas ocasiones se suelen usar vitaminas y hormonas vegetales<sup>29</sup>.

*ii) Heterotrófica*

En este tipo de cultivo no se requiere luz, se utiliza el carbono orgánico como fuente de carbono y energía y se utiliza el medio de cultivo como nutrientes. Además, se pueden utilizar varias fuentes de carbono y es similar a los cultivos de bacterias y levaduras<sup>29</sup>.

*iii) Mixotrófico*

Utiliza el metabolismo autótrofo y heterotrófico a la vez, por lo que utiliza  $CO_2$  (fuente de carbono), energía (luz) y carbón orgánico<sup>29</sup>.

**Tabla 3.** Ventajas y desventajas de los diferentes tipos de cultivo. Modificado de Medina E<sup>29</sup>.

	Ventajas	Desventajas
<b>Autotrófico</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• La mayoría de cepas son cultivables.</li> <li>• El riesgo a contaminación es bajo.</li> <li>• Se pueden generar múltiples productos.</li> <li>• Es una técnica sencilla.</li> <li>• Bajo costo.</li> <li>• Existe mucha información.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Crecimiento lento.</li> <li>• Se pueden generar más lotes de levaduras y bacterias en el mismo tiempo.</li> </ul>
<b>Heterotrófico</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tiempo de cultivo corto.</li> <li>• Mayor rendimiento.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Contaminación microbiana.</li> <li>• Solo algunas cepas pueden realizar.</li> <li>• Metabolismo cambia.</li> </ul>
<b>Mixotrófico</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Múltiples productos pueden generarse.</li> <li>• Normalmente, hay una mayor productividad.</li> <li>• Crecimiento más rápido.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• No todas las cepas son mixotróficas.</li> <li>• Metabolismo cambia.</li> </ul>

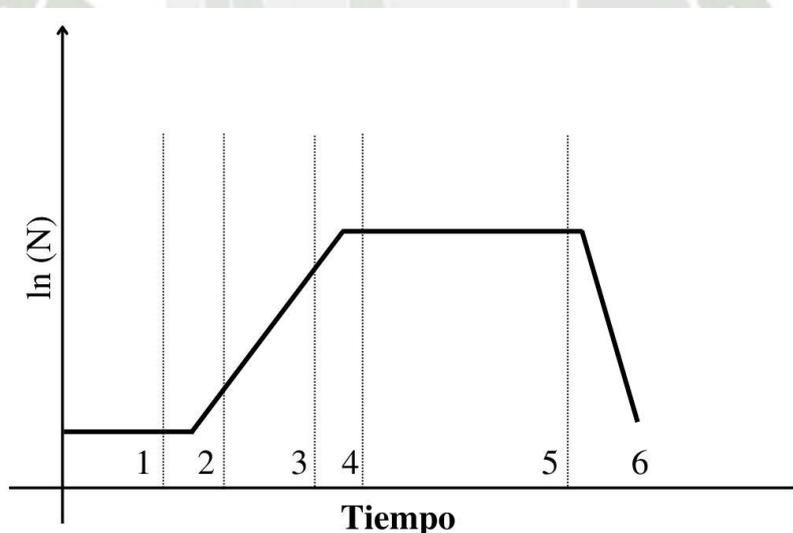
### 1.4.3 Modos de cultivo

Los sistemas de cultivo o métodos de cultivo son los modos de operar del biorreactor:

i) *Cultivo por Lotes o Batch*

Es el sistema de cultivo más utilizado por su sencillez y bajo coste. Es un sistema cerrado, de volumen limitado, en el que no hay entrada ni salida de materiales, es decir, los recursos son finitos. La densidad celular de la población de algas incrementa constantemente hasta que se agota el factor limitante, mientras que otros componentes nutrientes del medio de cultivo disminuyen con el tiempo. Los productos producidos por las células durante el crecimiento también aumentan su concentración en el medio de cultivo. Cuando las células se quedan sin recursos, los cultivos mueren a menos que se les suministre un nuevo medio<sup>29,30</sup>.

Los sistemas de cultivo por lotes son muy dinámicos y la población exhiben patrones de crecimiento típicos siguiendo curvas sigmoideas, ver en la Figura 5, consta de seis fases caracterizadas por cambios en las tasas de crecimiento; las seis fases se resumen en la Tabla 4<sup>29,30</sup>.



**Figura. 5.** Curva de crecimiento de una población de algas en condiciones de cultivo por lotes. Modificado de Barsanti L. et al.<sup>34</sup>.

**Tabla 4.** Descripción de las seis fases sucesivas de crecimiento de una población de algas en condiciones de cultivo discontinuo o por Lotes. Modificado de Barsanti L. et al.<sup>34</sup>.

Fase	Crecimiento	Tasa de crecimiento	Descripción
1	Lag	Cero	Adaptación fisiológica del inóculo a las condiciones cambiantes
2	Aceleración	Creciente	Trivial
3	Exponencial	Constante	El crecimiento de la población cambia el entorno de las células.
4	Retraso	Decreciente	Aparecen los efectos de las condiciones cambiantes.
5	Estacionaria	Cero	Uno o más nutrientes (o luz) se agotan hasta el nivel umbral de las células
6	Declive	Negativo	La duración de la fase estacionaria y la tasa de declive dependen en gran medida del tipo de organismos.

ii) *Cultivo por Lotes alimentado o Fed Batch*

En cuanto al cultivo Fed Batch o lote alimentado, dado que el caudal de salida es nulo, el volumen aumenta con el tiempo en función del caudal de entrada. Se añade nutrientes para mantener el cultivo en la fase estacionaria. En este tipo de reactor se busca producir metabolitos secundarios en la fase exponencial tardía y estacionaria. Así también se logra la maximización de la producción de metabolitos secundarios y biomasa<sup>29,30</sup>.

iii) *Cultivo Continuo*

En el cultivo continuo el caudal de alimentación es igual al caudal de salida, por lo que volumen no se altera. Los cultivos se mantienen en puntos seleccionados de la curva de crecimiento mediante la adición controlada de medio de cultivo fresco.

El medio fresco se añade automáticamente en proporción a la tasa de crecimiento de algas, mientras se retira un volumen igual de cultivo. Este método de cultivo de algas permite que el cultivo alcance una tasa de crecimiento muy cercana a la tasa máxima de crecimiento, ya que el cultivo nunca se queda sin nutrientes<sup>29</sup>.

Se pueden distinguir dos tipos de cultivos continuos según Barsanti L. et al.<sup>34</sup>:

- *Cultivo de turbidostato:*

El cultivo de turbidostato es en el que se administra medio fresco cuando la densidad celular del cultivo alcanza un punto predeterminado, medido por la extinción de la luz que pasa a través del cultivo. En este momento, se añade medio fresco al cultivo y se extrae un volumen igual de cultivo. El cultivo diluido aumenta la densidad celular hasta que se repite el proceso<sup>34</sup>.

- *Cultivo de quimiostato:*

El cultivo de quimiostato es en el que se introduce un flujo de medio nuevo en el cultivo a una velocidad constante y predeterminada. Este último agrega un nutriente vital limitante (por ejemplo, nitrato) a una tasa fija; de esta forma, se mantiene constante la tasa de crecimiento y no la densidad celular. En un quimiostato, la adición del medio determina en última instancia la tasa de crecimiento y la densidad celular<sup>34</sup>.

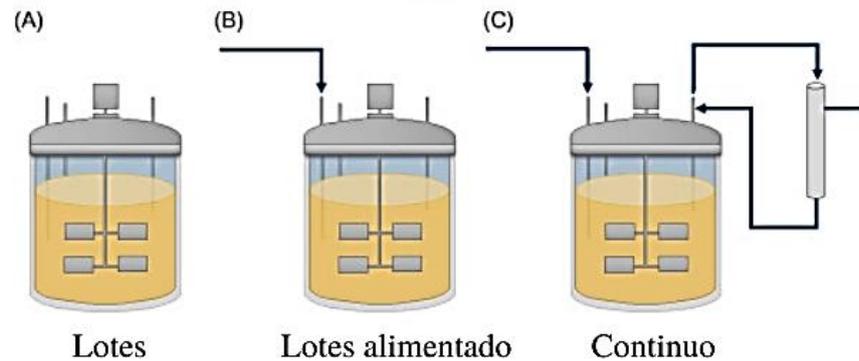
La tasa de flujo de medio en un sistema de cultivo continuo se conoce como "tasa de dilución". Si el número de células en el recipiente de cultivo se mantiene constante en el tiempo, la tasa de dilución es igual a la tasa de división celular en el cultivo, ya que las células que mueren al salir del medio son reemplazadas por un número igual de células a través de la división celular en el cultivo<sup>29</sup>.

La ventaja del cultivo continuo es que la tasa de dilución controla la tasa de crecimiento microbiano a través de la concentración del nutriente limitante del crecimiento en el medio. Cuando la tasa de dilución sea menor a la tasa de crecimiento máxima alcanzable por las especies de algas, la densidad celular aumentará hasta un punto en el que la tasa de división celular (tasa de natalidad) equilibre exactamente la tasa de muerte<sup>29</sup>.

Esta densidad celular en estado estacionario también se caracteriza por una constancia de todos los parámetros metabólicos y de crecimiento. Cuando la tasa de dilución es mayor a la tasa máxima de división celular, las células se eliminan más rápido de lo que se producen y finalmente se genera un lavado completo de toda la población celular.

Las desventajas del sistema continuo son su elevado costo y complejidad relativamente alta. Los requisitos de iluminación y temperatura constantes limitan principalmente los sistemas continuos en interiores y esto solo es viable para escalas de producción pequeñas. La ventaja de los cultivos continuos es que producen una calidad de algas más

predecible. Además, son susceptibles de control tecnológico y automatización, lo que aumenta la confiabilidad del sistema y disminuye la necesidad de mano de obra<sup>29,30</sup>.



**Figura. 6.** Representación esquemática de A) Lotes o Batch, B) Lotes alimentado o Fed Batch y C) Continuo.

#### 1.4.4 Parámetros de cultivo

Es importante definir los parámetros significativos que pueden alterar el crecimiento de la microalga para facilitar el proceso:

i) *Especie de microalga*

El tipo de especie seleccionado depende del objetivo del estudio porque cada tipo de microalgas tiene ciertos potenciales, ya sea para remediar aguas, producir productos de alto valor, entre otras aplicaciones<sup>29</sup>.

ii) *Irradiancia de la luz*

La irradiancia lumínica es uno de los parámetros de cultivo más importantes y depende del tipo de cultivo. La luz puede limitar el crecimiento de las microalgas, pero también demasiada luz puede dañar la célula<sup>29</sup>.

iii) *Temperatura*

Las microalgas normalmente no soportan temperaturas muy elevadas, existen algas que pueden soportar temperaturas altas, pero no todas<sup>29</sup>.

iv) *pH*

Puede ser un factor preponderante porque algunas microalgas se desarrollan mejor a pH altos y ayuda a que no ingresen sustancias contaminantes<sup>29</sup>.

v) *Fotoperiodo*

El fotoperíodo se define como la duración del día o 'el período de iluminación diaria recibido por un organismo' (Concise Oxford Dictionary, 1999) y permanece constante entre años en cualquier ubicación geográfica dada<sup>31</sup>.

vi) *Agitación*

La agitación es crucial para una buena mezcla y transferencia de masa en cultivos sumergidos<sup>32</sup>, es importante controlarla ya que si es muy fuerte o muy lenta las algas se pueden estresar.

#### 1.4.5 Reactores para el cultivo de microalgas

i) *Reactores abiertos*

Los reactores abiertos son los reactores más simples para construir y operar, la geometría y materiales permiten un fácil escalamiento, además no requieren equipamientos sofisticados. Pero debido a que se encuentran abiertos, son susceptibles a una contaminación microbiológica alta, la profundidad suele ser un factor limitante, la productividad es baja, sus volúmenes son alterados por la evaporación y requieren áreas grandes para su construcción<sup>29</sup>.

- *Estanque sin agitación*

Son los sistemas más simples, carecen de agitación, por lo que se forman gradientes, y tienen crecimientos bajos<sup>34</sup>.

- *Estanque circular*

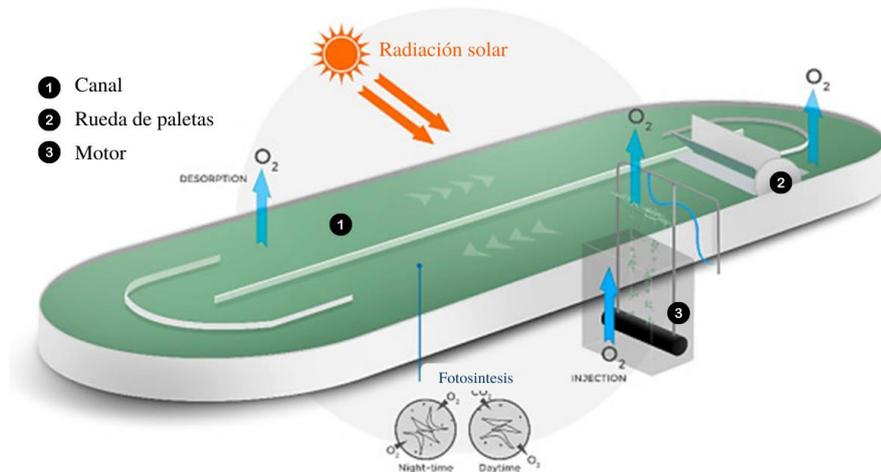
Este presenta un brazo que permite una mezcla y aireación, permite un mejor crecimiento de microalgas, pero es difícil producir de forma industrial porque la mezcla no es del todo eficiente<sup>34</sup>.

- *Raceway*

Son los reactores abiertos más conocidos y más utilizados para el cultivo de microalgas, la mezcla es potenciada por la geometría y por las paletas de agitación, además son fáciles

de escalar. Se puede obtener una mayor productividad que los anteriores reactores mencionados<sup>34</sup>.

Estos reactores tienen tres partes principales, el canal, la rueda de paletas y el motor, como se muestra en la Figura 7.



**Figura. 7.** Esquema del reactor raceway. Modificado de M.Barceló et al.<sup>33</sup>.

ii) *Reactores cerrados*

Los reactores cerrados se caracterizan porque se encuentran cerrados y separados del medio ambiente. La ventaja del uso de este reactor es debido a que permite un mejor control de los parámetros de cultivo, la contaminación microbiana es menor, los cultivos son densos y se obtiene una mayor producción de metabolitos, además existen diferentes tipos y configuraciones. Las desventajas son que la construcción es costosa, es difícil de escalar ya sea por la geometría y por los materiales, su mantenimiento y operación son costosos<sup>34</sup>.

- *Reactor tubular*

Son los reactores cerrados más usados, el sistema de inyección de aire modula la agitación y aireación, su geometría tubular facilita la transferencia de calor y masa, el escalamiento se realiza colocando más tubos y existen múltiples configuraciones<sup>34</sup>.

- *Reactores de panel plano*

También llamados reactores de capa fina ya que son rectangulares y no tienen una profundidad muy definida, son el segundo tipo de reactor cerrado más utilizado, permite

una mayor iluminación por lo que favorece el crecimiento, existen múltiples configuraciones<sup>34</sup>.

- *Reactor Air-lift*

Son reactores con tubos concéntricos, estos pueden ser ascendentes si el aire se añade al medio, o pueden ser descendentes si el medio de cultivo desciende en el sistema. Este reactor permite una buena mezcla, son más difíciles de escalar, se suelen usar para fotoperíodos cortos, pero necesitan aparatos de agitación más complejos<sup>34</sup>.

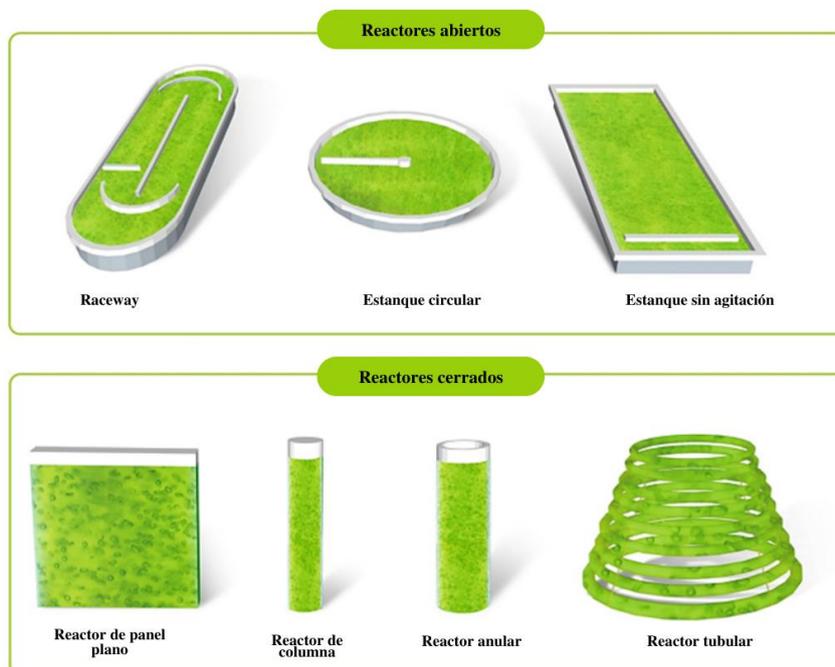
- *Tanque agitado*

Deriva de los reactores utilizados en otros microorganismos, se utilizan medios mecánicos para la mezcla y aireación, presentan un buen control de los parámetros del cultivo, suele requerir luz artificial porque es difícil a veces usar luz solar para este sistema<sup>34</sup>.

- *Otros reactores*

Son los reactores helicoidales y reactores en bolsas.

En la Figura 8 se muestran algunos ejemplos de reactores abiertos y reactores cerrados mencionados anteriormente.



**Figura. 8.** Ejemplos de diferentes tipos de reactores abiertos y cerrados para el cultivo de microalgas. Modificado de Zerrouki et al.<sup>34</sup>.

#### 1.4.6 Tratamiento de efluentes usando microalgas

Las microalgas pueden ser utilizadas para el tratamiento de efluentes por cuatro objetivos principalmente: Mitigación, Reducción, Eliminación y transformación de contaminantes<sup>29</sup>. Las microalgas se utilizan comúnmente para el tratamiento de aguas residuales que tienen metabolismo heterotrófico, por lo que usan como fuente de carbono compuestos orgánicos carbonados, compuestos nitrogenados y fosfatados de fuentes orgánicas que normalmente se encuentran en agua residual, aparte del metabolismo heterotrófico se puede usar el mixotrófico al haber incidencia de luz<sup>29</sup>.

##### i) *Producción de biomasa*

Las microalgas tienen una facilidad de acumular sustancias, por lo que resulta muy interesante su uso, ya que pueden utilizar componentes orgánicos para el crecimiento de biomasa, pero este también se limita porque al ser un buen absorbente también puede acumular sustancias tóxicas, por lo que es necesario primero saber qué tipo de contaminantes están presentes en los efluentes que se usaran para el cultivo y según ello se podrá definir el uso de las microalgas cultivadas<sup>34</sup>.

##### ii) *Eliminación de compuestos nitrogenados y fosfatos*

Los compuestos nitrogenados y fosfatados son compuestos que pueden generar efectos negativos al medio ambiente y son altamente tóxicos. Los fertilizantes y desechos industriales presentan altas cantidades de estos compuestos tóxicos, las microalgas pueden usar estos compuestos, además el nitrógeno y fósforo ayudan a la generación de una mayor cantidad de biomasa<sup>34</sup>.

##### iii) *Tipos de aguas*

Se puede utilizar diferentes tipos de efluentes como: i) Residuos agroindustriales, ii) Residuos de la industria láctea, iii) Aguas residuales municipales y iv) Drenados mineros<sup>34</sup>.

##### iv) *Características de cepas a utilizar*

Se pueden usar diferentes cepas de microalgas, pero una de las cepas más usadas por su rápido crecimiento y metabolismo heterotrófico son la *Chlorella sp.*, *Scenedesmus sp.*,

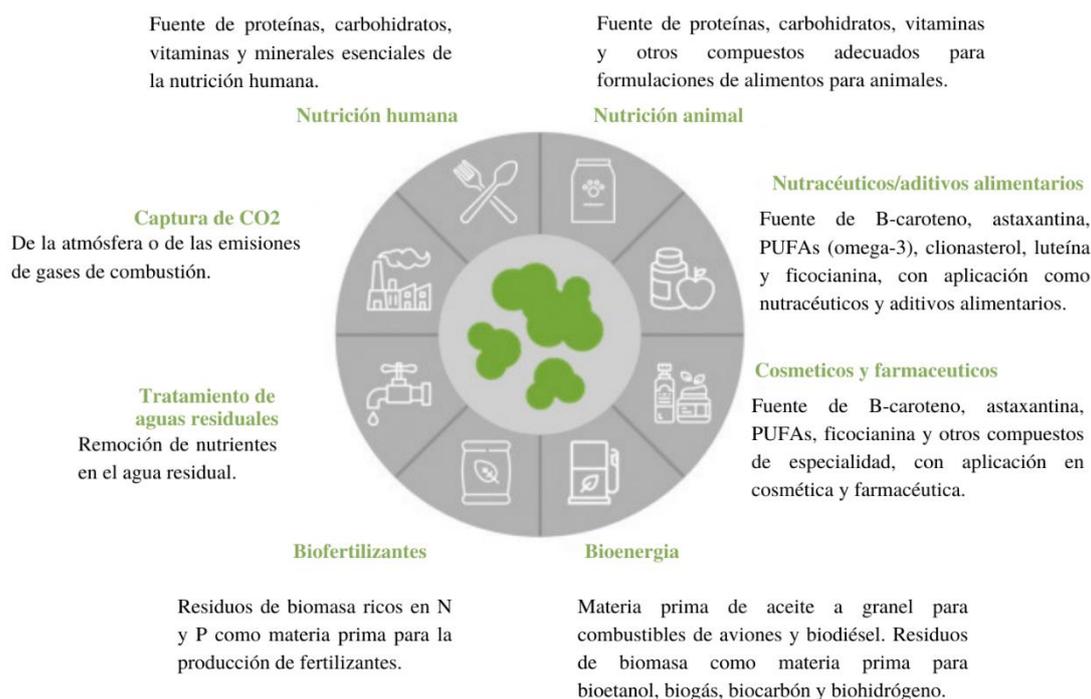
y los cultivos mixtos. También se suelen usar microalgas extremófilas, es decir microalgas que son resistentes a diferentes contaminantes y soportan diferentes parámetros. Y el tipo de cepa utilizar también depende del compuesto que se desea producir, por lo que también se utilizan cepas con alta producción de un compuesto de interés<sup>29</sup>.

v) *Interacciones con bacterias*

Existen diferentes estudios que confirman una relación simbiótica o mutualista entre las bacterias y las microalgas, es decir, ambas son beneficiadas por su crecimiento, producen compuestos que los benefician, eliminan toxinas, también forman cápsulas para poder protegerse, pero es necesario encontrar los parámetros óptimos para que ambos organismos puedan tener una buena relación simbiótica. En el estudio realizado por Wenying Qu et. al.<sup>35</sup>, se desarrolló de un sistema de simbiosis microalgas-bacterias (ABS) sinérgico para el tratamiento de aguas porcinas, logrando una simbiosis entre las microalgas y bacterias lograron casi el 100% de eliminación de nitrógeno y fósforo<sup>35</sup>.

vi) *Obtención de productos*

Se pueden obtener diferentes compuestos como: i) Biomasa, ii) Lípidos, iii) Proteínas, iv) Carbohidratos, entre otros compuestos que se pueden utilizar en diferentes industrias, como se muestra en Figura 8.



**Figura. 8.** Principales aplicaciones descritas para microalgas. Modificado de Vale et al.<sup>36</sup>

vii) *Pretratamiento de aguas residuales*

Para evitar que los efluentes tengan microorganismos se utilizan pretratamientos, de esta manera se logran eliminar contaminantes como bacterias y parásitos. En cambio, cuando no se utilizan pretratamientos se puede ahorrar, tiempo y costo, pero muchas veces al contener alta cantidad de contaminantes o microorganismos que compiten con las microalgas estos tratamientos no funcionan correctamente o se contaminen<sup>29,30</sup>.

### 1.5 Filtración por membrana

La filtración por membrana (MF) permite la separación de partículas de un fluido y, si se desea, concentrar esas partículas. Las partículas se separan en función de su tamaño y forma con el uso de presión y membranas especialmente diseñadas con diferentes tamaños de poro<sup>37</sup>. Existen diferentes métodos de MF en orden de aumentar el tamaño de los poros, es decir, ósmosis inversa, nanofiltración, microfiltración y microfiltración<sup>38,39</sup>.

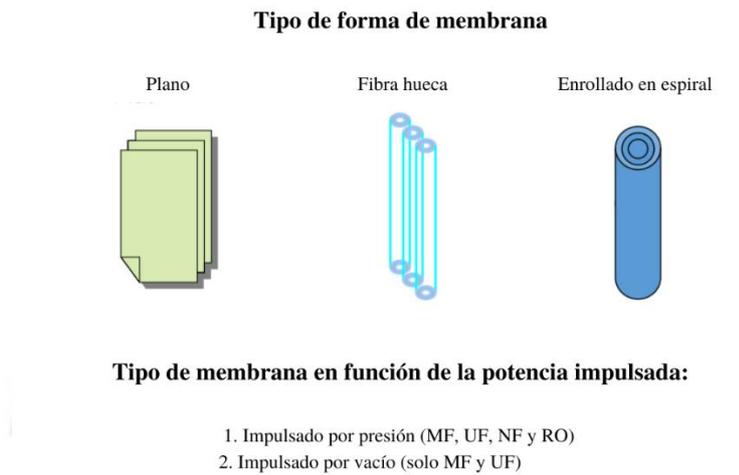
En la Figura 9 se muestran los diferentes tamaños de poros según el tipo de filtración que se utilice<sup>40</sup>.

Micrometer (μm)	0.0001 μm	0.001 μm	0.01 μm	0.1 μm	1.0 μm	10 μm	100 μm	1000 μm
Molecular weight (Approx.)	< 100	200	20,000	> 500,000				
Membrane filtration	Reverse osmosis		Ultrafiltration		Conventional filtration			
		Nanofiltration		Microfiltration				
Typical size range of constituents	← Range of ions →		← High polymers →					
	← Dissolved organics →			← Range of particles →				
				← Colloids →				
	← Protein, bacteria →							

**Figura. 9.** La selección de un proceso de filtración se basa en los tamaños o pesos moleculares de los componentes objetivo. Modificado de Chiam C, et al.<sup>40</sup>.

En la filtración, la separación se realiza mediante un mecanismo de tamizado, donde la membrana deja pasar las partículas más pequeñas y retiene las más grandes. En los procesos de ósmosis u ósmosis inversa, la membrana permea solo el solvente y retiene el soluto<sup>38</sup>. En este estudio se realizará el proceso de microfiltración (MF), la microfiltración es la membrana "más suelta" y filtra partículas en el rango de 0,1 a 10 μm, eliminando bacterias, patógenos protozoarios (ooquistes de *Cryptosporidium*, quistes de *Giardia* y algunos virus), sedimentos, coloides y precipitados. MF es un proceso de separación por membrana impulsado por presión o por vacío (tipo sumergido) que separa la materia particulada de un fluido (agua, aguas residuales o fluido de proceso industrial) mediante tensión física<sup>37</sup>.

la UF es un proceso de baja presión y el tamaño de los poros de las membranas está en el rango de 0,005 a 0,05 μm, se puede adoptar para la separación de iones de metales pesados de las aguas residuales<sup>39</sup>. Las diferencias en la forma de la membrana y el tipo de fuerzas impulsoras del proceso de la membrana se pueden clasificar en:



**Figura. 10.** Forma, tipo, configuración y fuerzas impulsadas de las membranas.

Modificado de Frenkel V. et. al.<sup>41</sup>.

i) *Tipo de forma de membrana:*

- Enrollado en espiral
- Fibra hueca
- Hoja plana.

ii) *Tipo de membrana en función de la presión impulsada:*

- Membranas de baja presión (Representadas por membranas MF y UF): Las membranas de baja presión presentando alta tolerancia y alta eficiencia en la remoción de materia orgánica y en suspensión, mientras que la materia disuelta pasa a través de las membranas<sup>42</sup>.
- Membranas de alta presión (Representadas por membranas NF y RO): Las membranas de alta presión se desarrollaron para eliminar la materia disuelta del agua, mientras que no toleran la materia suspendida y coloidal<sup>42</sup>.

En el estudio realizado por Nasim Bazrafshan et. al.<sup>42</sup>, se estudió el tratamiento de aguas residuales de suero de queso (CWW) de la industria láctea utilizando un biorreactor de membrana (MBR), encontrando que las membranas de PSf modificadas con estructuras metal-orgánicas (MOF) mejoraron el rendimiento de todo el sistema<sup>42</sup>.

A su vez, en el estudio realizado por Eman S. Mansor et. al.<sup>43</sup>, se utilizó una membrana de polietersulfona de microfiltración ajustada para el tratamiento de aguas residuales de suero de queso<sup>43</sup>.

## 1.6 Parámetros importantes en el análisis de aguas

### 1.6.1 Parámetros organolépticos

#### i) *Color*

El agua superficial puede aparecer muy coloreada debido a la presencia de la sustancia pigmentada en suspensión, cuando en realidad el agua es incolora. En el caso del lactosuero, su color amarillento se debe a las grasas y caroteno que contiene.

#### ii) *Olor*

En su forma pura, el agua no produce una sensación olfativa. El olor del agua puede usarse subjetivamente para describir cualitativamente su calidad, condición, origen o composición.

### 1.6.2 Parámetros fisicoquímicos

#### i) *pH*

El pH es un valor que determina si una sustancia es ácida, neutra o básica calculando el número de iones de hidrógeno presentes. Se mide en una escala de 0 a 14, en una escala de 7 la sustancia es neutra. Un valor de pH inferior a 7 indica una sustancia ácida, y un valor de pH superior a 7 indica que la sustancia es básica.

Las aguas residuales con concentración de iones de hidrógeno hacen que sea muy difícil de tratar mediante procesos biológicos, y las aguas residuales de salida pueden cambiar la concentración de iones de hidrógeno en el agua natural si no se cambia antes de que se descarguen las aguas residuales. Las aguas residuales de suero generalmente tienen un pH bajo, aunque también se ha informado un pH básico en el amplio rango de 3.3 a 9.0<sup>44,45</sup>.

*ii) Temperatura*

Es un indicador de la calidad del agua, que influye en el comportamiento de otros indicadores de la calidad del recurso hídrico, como el déficit de oxígeno, el pH, la conductividad eléctrica y otras variables fisicoquímicas.

*iii) Oxígeno disuelto (DO)*

DO es la cantidad de oxígeno en ambientes acuáticos que es accesible para peces, invertebrados y todos los organismos en el agua<sup>44</sup>. El bajo nivel de oxígeno disuelto en el agua es un signo de contaminación y es un factor importante para determinar la calidad del agua, el control de la contaminación y el proceso de tratamiento<sup>44 y 45</sup>.

*iv) Turbidez*

La turbidez es una medida de la transparencia del agua y es una medida de la cantidad de luz absorbida o la dispersión de la luz por la materia suspendida<sup>44,45</sup>.

*v) Demanda Química de Oxígeno (DQO)*

Se define como la cantidad de oxígeno molecular requerida para la oxidación biológica de la materia orgánica en el agua y en promedio, la demanda de oxígeno para el material de desecho orgánico que es degradable aeróbicamente<sup>44,45</sup>.

*vi) Demanda bioquímica de oxígeno (DBO)*

La demanda química de oxígeno consiste en la demanda de oxígeno causada químicamente por las sustancias orgánicas en el agua<sup>44,45</sup>.

*vii) Sólidos Suspendidos Totales*

Los sólidos suspendidos totales (TSS) se definen como los sólidos en el agua que pueden ser capturados por un filtro<sup>46</sup>.

*viii) Fosfatos*

El fosfato es un componente de los tipos de suelo y se usa ampliamente en fertilizantes para reemplazar o complementar los valores naturales en las tierras de cultivo. Hay varias

formas de fosfato, incluido el ortofosfato, el fosfato denso (pirrol, meta, polifosfato) y los compuestos de fosfato orgánico. Estos compuestos pueden ser solubles o sólidos<sup>44,45</sup>.

*ix) Nitratos*

Los compuestos de nitrógeno pueden ser oxidados y convertidos en nitrato por las bacterias del suelo. Estos compuestos también pueden penetrar los acuíferos subterráneos<sup>44,45</sup>.



## CAPÍTULO II

### 2. MATERIALES Y MÉTODOS

#### 2.1 Materiales

##### 2.1.1 Muestras y/o unidades biológicas

- El lactosuero, se obtuvo de la empresa productora de queso que se encuentra ubicada en la región Puno-Perú.
- La microalga "*Chlorella vulgaris*" se obtuvo de un banco de microalgas disponible en el Laboratorio de Bioprocesos de la Universidad Católica de Santa María (Arequipa, Perú).

##### 2.1.2 Material de laboratorio

Probetas, matraces, botellas de vidrio, picetas, tubos de ensayo, micropipetas, cubreobjetos, pinzas, pipetas, fiolas, celdas de vidrio y de cuarzo para espectrofotómetro, tips para micropipetas y pipetas, colador, embudo, tubos de vidrio, espátula, probetas, crisoles, lámparas LED, motores de aireación, tubos fálcon de 15ml y 50ml, pera de decantación, soporte universal, bureta, baldes de plástico 5L y 20L, varilla de vidrio, mangueras, Beakers de 40ml, 100ml, 500ml, 1000ml y 5000ml.

##### 2.1.3 Insumos y reactivos químicos

Ácido sulfúrico (95- 97 %), ácido orto-fosfórico, hidróxido de sodio, hidróxido de potasio, medio BBM compuesto de  $NaNO_3$  (0.25 g/L),  $MgSO_4$  (0.075 g/L)  $NaCl$  (0.025 g/L),  $CaCl_2 * H_2O$  (0.025 g/L),  $K_2HPO_4$  (0.075 g/L),  $KH_2PO_4$  (0.175 g/L),  $ZnSO_4 * 7H_4O$  (0.00882 g/L),  $MnCl_2 * 4 H_2O$  (0.00144 g/L),  $KOH$  (0.031 g/L),  $MoO_3$  (0.00071 g/L),  $CuSO_4 * 5 H_2O$  (0.00157 g/L),  $Co(NO_3)_2 * 6 H_2O$  (0.00049 g/L),  $H_3BO_3$  (0.01142 g/L), EDTA (0.05 g/L),  $FeSO_4 * 7 H_2O$  (0.00498 g/L),  $H_2SO_4$  (0.001mL/L), tartrato sodio y potasio, carbonato de sodio, sulfato de cobre pentahidratado, reactivo del fenol según Folin-Ciocalteau, reactivo DNS, dicromato potásico, sulfato de plata, sulfato mercurio, todos los reactivos utilizados fueron de la marca Merck Milipore.

### 2.1.4 Equipos e instrumentos

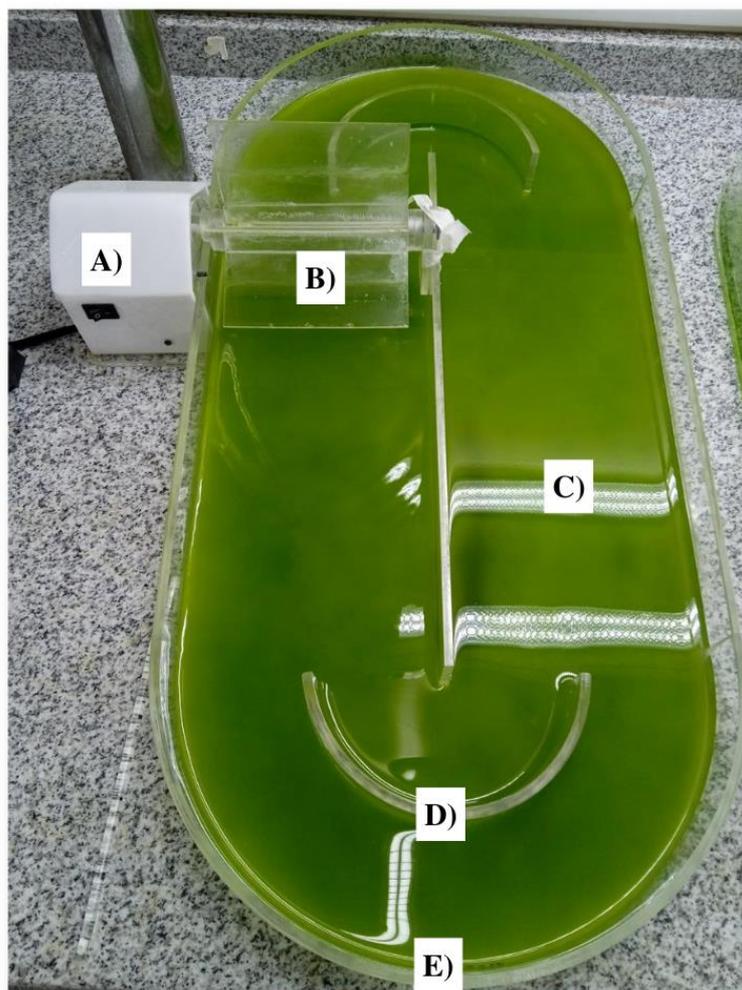
Balanza analítica Adventurer (OHAUS), baño de enfriamiento (DAIHAN), serpentín, microscopio (AmScope), vortex (VWR), pH metro PC 2700 (FISMET BIOMÉDICA), bombas peristálticas YZ1515x (Longer Pump), destilador de agua (GFL), espectrofotómetro GENESYS™ 180 UVVis (Thermo Fisher Scientific), estufa de secado y esterilización conterm analógica (J.P. SELECTA), digestor TR 320 (Spectroquant), centrifuga (PLC SERIES), membrana (Nanopore), cámara Neubauer (Marienfeld), Turbidímetro (TL2300), analizador de tamaño de partícula (Zetasizer) (DLS 3690 Malvern Analytical), Multiparámetro HI98195 (HANNA), celdas rectangulares de cuarzo espectrosil 10 mm (VWR North American), celdas de vidrio para turbidímetro 20849 (Spectrum Laboratories Inc.), celdas rectangulares de vidrio 10 mm (Spectroquant), autoclave Wisd WAC- 60 (WITEG Labortechnik).

Se utilizó un sistema de cavitación hidrodinámica construido en el desarrollo del proyecto, que se muestra en la Figura 11.



**Figura 11.** Sistema de cavitación hidrodinámica: A) Bomba de 4 HP, B) Válvula, C) Manómetro, D) Dispositivo de cavitación, E) Tuberías, F) Vessel y G) Serpentín.

Se utilizó un biorreactor tipo Raceway de una capacidad de 8 L, el cual fue construido en el desarrollo de este proyecto, que se muestra en la Figura 12.



**Figura 12.** Parte del biorreactor usado para el cultivo de microalgas “*Chlorella vulgaris*”: A) Motor, b) Rueda de paletas, c) Canal, d) Deflector y e) Profundidad del líquido.

## 2.2 Métodos

### 2.2.1 Obtención y caracterización de la muestra de lactosuero

La muestra de lactosuero fue obtenida de una empresa productora de queso ubicada en la región de Puno-Perú. Las muestras fueron obtenidas en galones PET las cuales fueron transportados y almacenados a 4°C, hasta su uso en el laboratorio. El agua residual (lactosuero) fue filtrada y analizada en los siguientes parámetros: Demanda química total de oxígeno (DQO) usando el método colorimétrico estándar (reflujo cerrado)<sup>47</sup>, azúcares reductores (DNS) usando el método DNS de Miller<sup>48</sup>, proteínas totales usando el método

colorimétrico de Lowry<sup>49</sup>, alcalinidad total, conductividad y turbidez usando el multiparámetro (HANNA modelo HI98195).

### 2.2.2 Modelamiento por fluidodinámica computacional (CFD)

Inicialmente se diseñó el sistema de cavitación hidrodinámica y luego se procedió a la respectiva simulación. Se realizó un modelado en CFD del dispositivo de cavitación utilizando el software ANSYS FLUENT (ANSYS, Inc. EE.UU.), para la simulación se estableció la presión requerida para la generación del fenómeno de cavitación, el mismo que se estimó a partir de trabajos previos reportados por Terán Hilarés et al. (2020). En base a las condiciones de contorno se dimensionó las geometrías.

Para el modelado se eligieron modelos multifásicos, energéticos y k-epsilon, y se aplicó la condición de pared sólida antideslizante. Posteriormente se eligió el modelo de Schnerr y Sauer para cavitación. Se eligió un método acoplado para su solución. Se estimaron las propiedades físicas de todo el dispositivo de cavitación mediante iteraciones sucesivas hasta la convergencia. Se calculó el número de cavitación se calculó de acuerdo con la siguiente Ecuación 2.

$$Cv = \frac{P_{min} - P_{vapor}}{\frac{1}{2}\rho v^2} \quad \text{Eq. (2)}$$

Donde: Presión mínima que se produce en las proximidades de la restricción ( $P_{min}$ ), Presión de vapor del líquido ( $P_{vapor}$ ), Densidad del líquido ( $\rho$ ), velocidad de flujo a través de la restricción ( $v$ ).

### 2.2.3 Tratamiento de cavitación hidrodinámica del lactosuero

Se evaluó dos tipos de sistemas de cavitación hidrodinámica uno basado en una placa de 12 orificios y otro sistema basado en sistema de Venturi. En ambos casos se cavitó 4 litros de lactosuero, por un tiempo de 1 h, a una presión de 4 bar y se mantuvo la temperatura por debajo de 30°C, que fue controlada usando un serpentín de enfriamiento ubicado en el tanque de cavitación por donde se recirculó agua a 9 °C proveniente de un sistema de enfriamiento. Durante el tratamiento se tomaron muestras cada 10 minutos para evaluar el tamaño de partículas, DQO usando el método colorimétrico estándar (reflujo cerrado)<sup>47</sup>, Azúcares reductores (DNS) usando el método DNS de Miller<sup>48</sup> y Proteínas

totales usando el método colorimétrico de Lowry<sup>49</sup>. Las muestras obtenidas después de 60 min se guardaron en galones PET (Polietileno Tereftalato) a una temperatura de 4 °C para posteriormente realizar los siguientes tratamientos.

#### 2.2.4 Precipitación química

Las muestras de lactosuero cavitados en ambos dispositivos (placa de orificio y Venturi) fueron sometidos a dos etapas de precipitación química. En una primera etapa, se realizó una precipitación alcalina (utilizando NaOH) y posteriormente una precipitación ácida utilizando NaOH y (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>). Para efectos de control, las muestra sin cavitatar también fueron sometidas a las mismas condiciones de precipitación química.

##### i) *Precipitación básica*

- *Lactosuero sin cavitatar*

Para efectos de comparación, primero se realizó la precipitación alcalina usando el lactosuero que no fue cavitado, para lo cual se trabajó con un volumen de 1000 mL de lactosuero en las cuales el pH se ajustó a 8, 9, 10, 11, 12 y 13, usando una solución de NaOH 2N. También se incluyó una muestra de 1000 mL de lactosuero que fue el control, por lo que no se cambió el pH (pH de 4.5). Posterior al ajuste de pH, se agitó vigorosamente cada muestra y se colocaron las soluciones en probetas en donde se evaluó la sedimentación de estas a cada 5 minutos en un periodo de 2 horas. Una vez culminado el tiempo de sedimentación de las muestras, se extrajo el sobrenadante usando una bomba peristáltica y una manguera. Finalmente, se realizaron los análisis DQO usando el método colorimétrico estándar (reflujo cerrado)<sup>47</sup>, Azúcares reductores (DNS) usando el método DNS de Miller<sup>48</sup> y Proteínas totales usando el método colorimétrico de Lowry<sup>49</sup>, conductividad, sólidos disueltos, sales y turbidez usando el multiparámetro (HANNA modelo HI98195).

- *Lactosuero cavitado con la placa de 12 orificios*

El lactosuero cavitado con el dispositivo de cavitación basado en placa de orificio de 12 agujeros fue sometido a una precipitación alcalina. Se trabajó con un volumen de 1000 mL de lactosuero en las cuales el pH se ajustó a 8, 9, 10, 11, 12 y 13, usando una solución de NaOH de 2N. También se incluyó una muestra de 1000 mL de lactosuero que fue el control, por lo que no se cambió el pH (pH de 4.5). Posterior al ajuste de pH, se agitó vigorosamente cada muestra y se colocaron las soluciones en probetas en donde se evaluó

la sedimentación de estas a cada 5 minutos en un periodo de 2 horas. Una vez culminado el tiempo de sedimentación de las muestras, se extrajo el sobrenadante usando una bomba peristáltica y una manguera. Finalmente, se realizaron los análisis de DQO usando el método colorimétrico estándar (reflujo cerrado)<sup>47</sup>, Azúcares reductores (DNS) usando el método DNS de Miller<sup>48</sup> y Proteínas totales usando el método colorimétrico de Lowry<sup>49</sup>, conductividad, sólidos disueltos, sales y turbidez usando el multiparámetro (HANNA modelo HI98195).

- *Lactosuero cavitado con el sistema Venturi*

El lactosuero cavitado con el dispositivo de cavitación basado en tubo Venturi fue sometido a una precipitación alcalina. Se trabajó con un volumen de 1000 mL de lactosuero en las cuales el pH se ajustó a 8, 9, 10, 11, 12 y 13, usando una solución de  $NaOH$  de 2N. También se incluyó una muestra de 1000 mL de lactosuero que fue el control, por lo que no se cambió el pH (pH de 4.5). Posterior al ajuste de pH, se agito vigorosamente cada muestra y se colocaron las soluciones en probetas en donde se evaluó la sedimentación de estas a cada 5 minutos en un periodo de 2 horas. Una vez culminado el tiempo de sedimentación de las muestras, se extrajo el sobrenadante usando una bomba peristáltica y una manguera. Finalmente, se realizaron los análisis DQO usando el método colorimétrico estándar (reflujo cerrado)<sup>47</sup>, Azúcares reductores (DNS) usando el método DNS de Miller<sup>48</sup> y Proteínas totales usando el método colorimétrico de Lowry<sup>49</sup>, conductividad, sólidos disueltos, sales y turbidez usando el multiparámetro (HANNA modelo HI98195).

- ii) *Precipitación ácida*

- *Lactosuero sin cavitación*

Una vez culminada la precipitación alcalina de la muestra sin cavitación, se recuperó el sobrenadante y luego esta fue sometido a precipitación ácida a pH 4, el mismo que fue ajustado usando  $H_2SO_4$  2N. Seguidamente, se agitaron vigorosamente las muestras y se colocaron las soluciones en probetas de 500 mL, en donde se evaluó la sedimentación de estas a cada 5 minutos por un periodo de 2 horas. Una vez culminado el tiempo de sedimentación de las muestras, se extrajo 50 mL del sobrenadante usando una bomba peristáltica y una manguera. Finalmente, se realizaron los análisis DQO usando el método colorimétrico estándar (reflujo cerrado)<sup>47</sup>, Azúcares reductores (DNS) usando el método DNS de Miller<sup>48</sup> y Proteínas totales usando el método colorimétrico de Lowry<sup>49</sup>,

conductividad, sólidos disueltos, sales y turbidez usando el multiparámetro (HANNA modelo HI98195).

- *Lactosuero cavitado con la placa de 12 orificios*

Una vez culminada la precipitación alcalina de la muestra cavitadas con el dispositivo de cavitación basada en placa de orificios de 12 agujeros, se recuperó el sobrenadante y luego esta fue sometido a precipitación ácida a pH 4, el mismo que fue ajustado usando  $H_2SO_4$  2N. Seguidamente, se agitaron vigorosamente las muestras y se colocaron las soluciones en probetas de 500 mL, en donde se evaluó la sedimentación de estas a cada 5 minutos por un periodo de 2 horas. Una vez culminado el tiempo de sedimentación de las muestras, se extrajo 50 mL del sobrenadante usando una bomba peristáltica y una manguera. Finalmente se realizaron los análisis DQO usando el método colorimétrico estándar (reflujo cerrado)<sup>47</sup>, Azúcares reductores (DNS) usando el método DNS de Miller<sup>48</sup> y Proteínas totales usando el método colorimétrico de Lowry<sup>49</sup>, conductividad, sólidos disueltos, sales y turbidez usando el multiparámetro (HANNA modelo HI98195).

- *Lactosuero cavitado con el sistema Venturi*

Posteriormente, se realizó la precipitación alcalina de la muestra cavitadas con el dispositivo de cavitación basada en tubo Venturi, se recuperó el sobrenadante y luego esta fue sometido a precipitación ácida a pH 4, el mismo que fue ajustado usando  $H_2SO_4$  2N. Seguidamente, se agitaron vigorosamente las muestras y se colocaron las soluciones en probetas de 500 mL, en donde se evaluó la sedimentación de estas a cada 5 minutos por un periodo de 2 horas. Acabado el tiempo de sedimentación de las muestras se extrajo 50 mL del sobrenadante usando una bomba peristáltica y una manguera. Finalmente, se realizaron los análisis DQO usando el método colorimétrico estándar (reflujo cerrado)<sup>47</sup>, Azúcares reductores (DNS) usando el método DNS de Miller<sup>48</sup> y Proteínas totales usando el método colorimétrico de Lowry<sup>49</sup>, conductividad, sólidos disueltos, sales y turbidez usando el multiparámetro (HANNA modelo HI98195).

### 2.2.5 Obtención y cultivo de la microalga "*Chlorella vulgaris*"

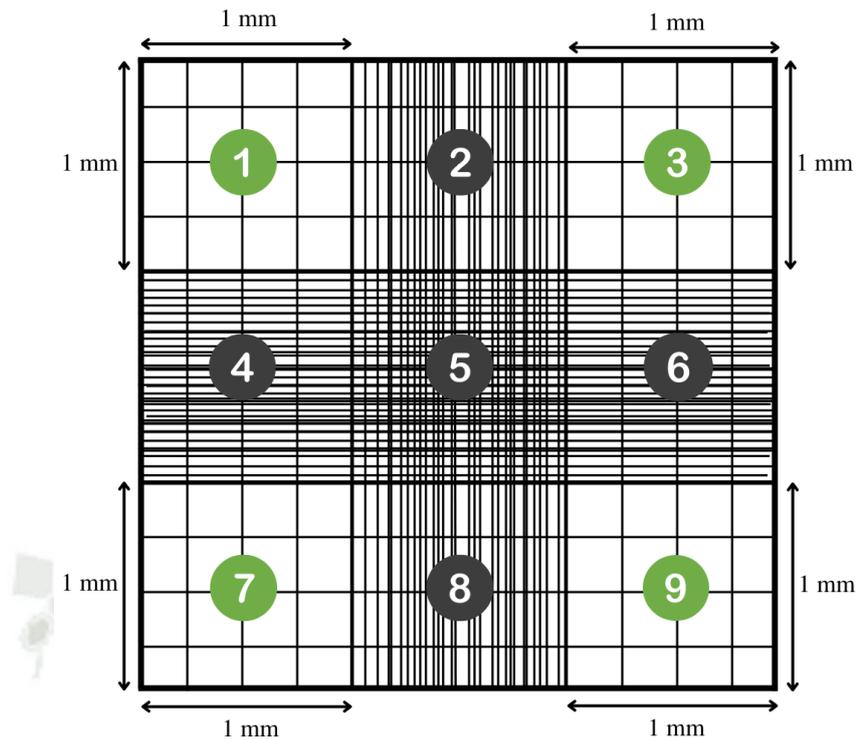
Se obtuvo la microalga "*Chlorella vulgaris*" de un banco de microalgas disponible en el Laboratorio de Bioprocesos de la Universidad Católica de Santa María (Arequipa, Perú), la cual se identificó microscópicamente por las características propias de la cepa. Estas microalgas fueron cultivadas inicialmente en 250 mL de Medio Bold's Basal (BBM) a una temperatura de 25 °C bajo una luz blanca con iluminación continua a  $440 \mu\text{mol}/(\text{m}^2\text{s})$

de densidad de flujo de fotones. Posteriormente, se fue añadiendo medio al cultivo BBM hasta obtener 1000 ml de microalgas con una concentración mayor a  $1.5 * 10^7 \text{ Cell/ml}$ .

### 2.2.6 Cultivo continuo de microalgas “*Chlorella vulgaris*” en un biorreactor tipo raceway

Primero se realizó el cultivo de microalgas “*Chlorella vulgaris*” en un biorreactor tipo raceway como se detalla en Figura 12 y se determinó la velocidad de crecimiento de las microalgas *Chlorella vulgaris*, la dilución, el tiempo de retención hidráulica (TRH), y el flujo de alimentación necesario para el crecimiento continuo de las microalgas alimentando el sistema con una solución de lactosuero pretratado en diferentes diluciones.

Se realizó el cultivo de 6 L de *Chlorella vulgaris* en un biorreactor tipo raceway, durante 96 h a 25 °C bajo iluminación continua ( $440 \mu \text{ mol m}^{-1} \text{ s}^{-1}$  densidad de flujo de fotones), para lo cual se usó un inóculo de 300 mL en 5700 mL de medio BBM y se realizó el conteo de microalgas usando una cámara Neubauer, para lo cual primero se realizaron diluciones a las muestras de “*Chlorella vulgaris*” para luego realizar el conteo de las microalgas en los cuadrantes 1, 3, 7 y 9 como se muestra en la Figura 13. Subsiguientemente, se realizaron los cálculos necesarios para determinar la cantidad de células de microalgas por mililitro, como se muestra en la Ecuación 3.



**Figura. 13.** Ejemplificación de los cuadrantes de la cámara de Neubauer.

$$\text{Área} = 1 \text{ mm} * 1 \text{ mm}^2 = 1 \text{ mm}^2$$

$$\text{Volumen} = 1 \text{ mm}^2 * 1 \text{ mm} = 0.1 \text{ mm}^3 = 1 * 10^{-4} \text{ ml}$$

Ecuación de concentración celular.

$$\text{Concentración celular (Cell/ml)} = \frac{\text{Número total de células}}{\text{Número de cuadrantes}} * 10000$$

Eq. (3)

En seguida se preparó una solución de 5L al 10% de lactosuero pretratado y diluida en agua. Para lo cual se cavitó 20 L de lactosuero usando el sistema de Venturi, por un tiempo de 1 h, a una presión de 4 bar y se mantuvo la temperatura menor a 30 °C usando un serpentín en donde circulaba agua a 9 °C que provenía de un sistema de enfriamiento. Luego se realizó una precipitación básica por 2 h a pH 13 usando NaOH 2N, A continuación, se extrajo el sobrenadante usando una bomba peristáltica, luego se realizó una precipitación ácida por 2 h a pH 4 del sobrenadante obtenido anteriormente usando  $H_2SO_4$ . Se extrajo el sobrenadante usando una bomba peristáltica y se neutralizó la

solución a un pH 7 usando NaOH, se añadió hipoclorito de sodio a la solución de sobrenadante obtenida a una concentración de 10 ppm a fin de inactivar las bacterias ácido lácticas presentes, se llevó a un burbujeo de aire por 1 h para eliminar el cloro.

Luego se guardó la solución de lactosuero pretratado y se prepararon soluciones de 5 L de dicho lactosuero a concentraciones del 10%, 20%, 30%, 50% y 100%; y se armó un sistema continuo usando el reactor raceway que contenía microalgas "*Chlorella vulgaris*" a una concentración de  $3.73 * 10^7 \text{ Cell/ml}$ , se utilizó una bomba peristáltica que tenía una línea de entrada al reactor y una línea de salida que era almacenada en un recipiente para su posterior análisis, en la Figura 11 se muestra una representación esquemática del sistema continuo.

El primer día de funcionamiento del reactor raceway se alimentó con la solución de lactosuero al 10%, por un tiempo similar al tiempo de retención hidráulica (TRH) de 20.8 h, 25°C, bajo iluminación continua ( $440 \mu \text{ mol m}^{-1} \text{ s}^{-1}$  densidad de flujo de fotones) medida en la superficie del reactor, una tasa de dilución de  $0.048 \text{ h}^{-1}$  y un flujo de alimentación de  $4 \frac{\text{ml}}{\text{min}}$ , se tomaron las muestras después de 20.8 horas y se almacenó a 4 °C el primer lote de microalgas obtenidas en el efluente.

Después de 20 horas de funcionamiento del reactor raceway se alimentó con la solución de lactosuero al 20%, por un TRH de 20.8 h, 25°C, bajo iluminación continua ( $440 \mu \text{ mol m}^{-1} \text{ s}^{-1}$  densidad de flujo de fotones), una dilución de  $0.048 \text{ h}^{-1}$  y un flujo de alimentación de  $4 \frac{\text{ml}}{\text{min}}$ , se tomaron las muestras después de 20.8 horas y se almacenó a 4 °C el segundo lote de microalgas obtenidas en el efluente.

Luego de 41 horas de funcionamiento del reactor raceway se alimentó con la solución de lactosuero al 30%, por un TRH de 20.8 h, 25°C, bajo iluminación continua ( $440 \mu \text{ mol m}^{-1} \text{ s}^{-1}$  densidad de flujo de fotones), una dilución de  $0.048 \text{ h}^{-1}$  y un flujo de alimentación de  $4 \frac{\text{ml}}{\text{min}}$ , se tomaron las muestras después de 20.8 horas y se almacenó a 4 °C el tercer lote de microalgas obtenidas en el efluente.

A las 62 h de funcionamiento del reactor raceway se alimentó con la solución de lactosuero al 50%, por un TRH de 20.8 h, 25°C, bajo iluminación continua ( $440 \mu mol m^{-1} s^{-1}$  densidad de flujo de fotones), una dilución de  $0.048 h^{-1}$  y un flujo de alimentación de  $4 \frac{ml}{min}$ , se tomaron las muestras después de 20.8 h y se almacenó a 4 °C el cuarto lote de microalgas obtenidas en el efluente.

En las muestras obtenidas después de cada proceso, se evaluó la biomasa usando el método de recuento por cámara de Neubauer<sup>50</sup>, DQO usando el método colorimétrico estándar (reflujo cerrado)<sup>47</sup>, Azúcares reductores (DNS) usando el método DNS de Miller<sup>48</sup> y Proteínas totales usando el método colorimétrico de Lowry<sup>49</sup>, conductividad, sólidos disueltos, sales y turbidez usando el multiparámetro (HANNA modelo HI98195).

### 2.2.7 Filtración por membranas

Finalmente, el líquido obtenido en la línea de salida conteniendo las microalgas, se realizó un proceso de filtración por membranas, utilizando una membrana de filtración de alúmina porosa asimétrica tubular (las dimensiones fueron de 24 cm de largo x 1 cm de diámetro) la cual tenía un tamaño de poro de 600 nm. Se usó una bomba peristáltica para suministrar y forzar el flujo a través de la membrana, alcanzando al inicio del proceso un flujo a través de la membrana de 30 mL/min o flujo por unidad de área de 0.41 mL/min.cm<sup>2</sup>.

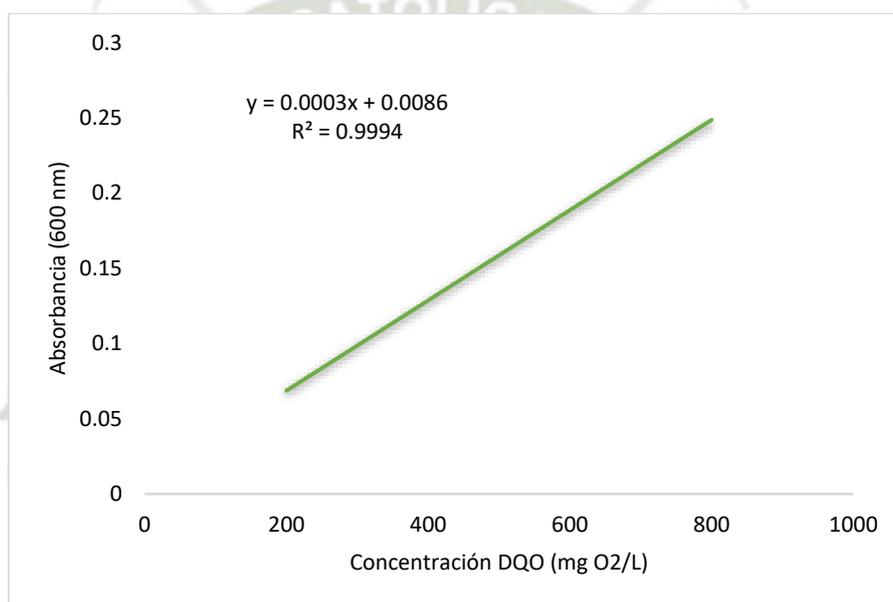
Para la microfiltración se sometieron 600 mL del primer lote obtenido en el cultivo discontinuo en un raceway suministrando un flujo de permeación de 30 ml/min, el cual fue disminuyendo gradualmente debido al ensuciamiento o fouling de la superficie de la membrana; por lo que se realizaba un lavado con agua destilada cada cuando el permeado se reducía a aproximadamente un tercio del original. Se realizó el mismo procedimiento hasta obtener 500 ml de efluente filtrado el cual se almacenó a 4 °C.

Seguidamente, se lavó la membrana usando agua destilada y se procedió a realizar el mismo procedimiento con los lotes 2, 3 y 4. Finalmente, se evaluó la biomasa usando el método de recuento por cámara de Neubauer<sup>50</sup>, DQO usando el método colorimétrico estándar (reflujo cerrado)<sup>47</sup>, Azúcares reductores (DNS) usando el método DNS de Miller<sup>48</sup> y Proteínas totales usando el método colorimétrico de Lowry<sup>49</sup>, conductividad, sólidos disueltos, sales y turbidez usando el multiparámetro (HANNA modelo HI98195).

## 2.2.8 Métodos analíticos

### i) Demanda química de oxígeno (DQO)

En el presente estudio, la DQO fue determinada por el método colorimétrico estándar (reflujo cerrado), para lo cual se utilizó una curva de calibración que se realizó previamente, la cual se observa en la Figura 14. Los valores de absorbancia obtenida a 600 nm fueron convertidos en concentración de DQO<sup>47</sup> (mg de O<sub>2</sub>/mL), empleando la ecuación 2.



**Figura 14.** Curva de calibración para el análisis de demanda química de oxígeno.

### Ecuación para el cálculo de la demanda química de oxígeno (DQO)

$$y = x * 0.0003 + 0.0086$$
$$(y - 0.0086)/0.0003 = x$$
$$x = (y - 0.0086)/0.0003$$

Ecuación de demanda química de oxígeno (DQO).

$$\text{Concentración DQO } \text{mg} \frac{\text{O}_2}{\text{L}} = \frac{\text{Absorbancia neta} - 0.0086}{0.0003}$$

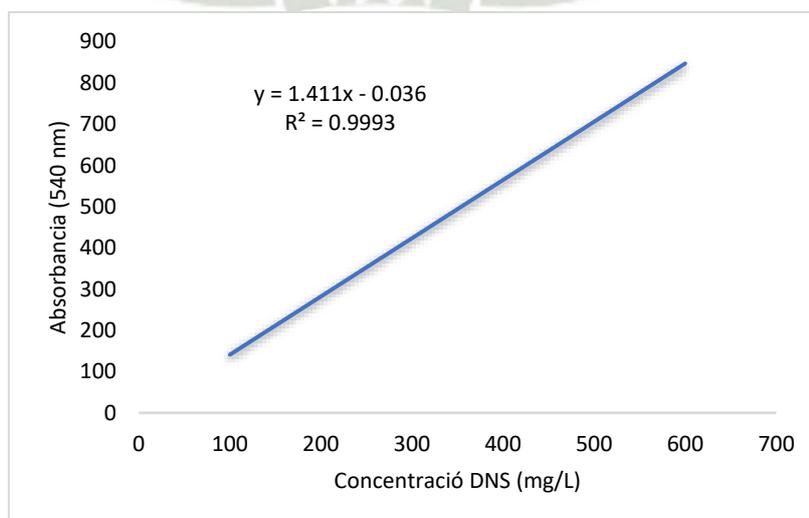
Eq. (4)

Donde: Concentración de DQO (x), Absorbancia neta (y).

Para evaluar el DQO en las muestras primero se hicieron diluciones de las muestras dependiendo de la concentración que se estimaba que presentaba la muestra. Posteriormente, se añadió 1.25 mL de la solución diluida en los tubos de digestión, después se añadió 0.75 mL de solución digestora de dicromato de potasio y se añadió lentamente 1.75 mL de  $H_2SO_4$  concentrado. Se taparon los tubos y se mezclaron lentamente y se colocaron los tubos en bloque en un digestor a 150 °C por 2 h. Posteriormente, se enfriaron los tubos a temperatura ambiente y se realizaron las lecturas en el espectrofotómetro a una absorbancia de 600 nm, finalmente se determinó la concentración utilizando la (Ecuación N°4) anteriormente mencionada. Se realizó el mismo procedimiento para todas las muestras obtenidas en esta investigación, para lo cual se trabajó por triplicado.

ii) *Azúcares reductores totales (ART)*

En el presente estudio, la determinación de azúcares reductores totales en el lactosuero fue determinada por Azúcares reductores (DNS) usando el método DNS de Miller<sup>48,54</sup> donde la absorbancia obtenida a 540 nm se convirtió a concentración utilizando la (Ecuación 5). Previamente, la curva de calibración fue desarrollada empleando como estándar glucosa.



**Figura. 15.** Curva de calibración para determinar azúcares reductores totales.

### Ecuación para el cálculo de Azúcares reductores totales (ART)

$$y = x * 1.411 - 0.036$$

$$(y + 0.036)/1.411 = x$$

$$x = (y + 0.036)/1.411$$

Ecuación de concentración de carbohidratos (DNS)

$$\text{Concentración DNS mg/L} = \frac{\text{Absorbancia neta} + 0.036}{1.411}$$

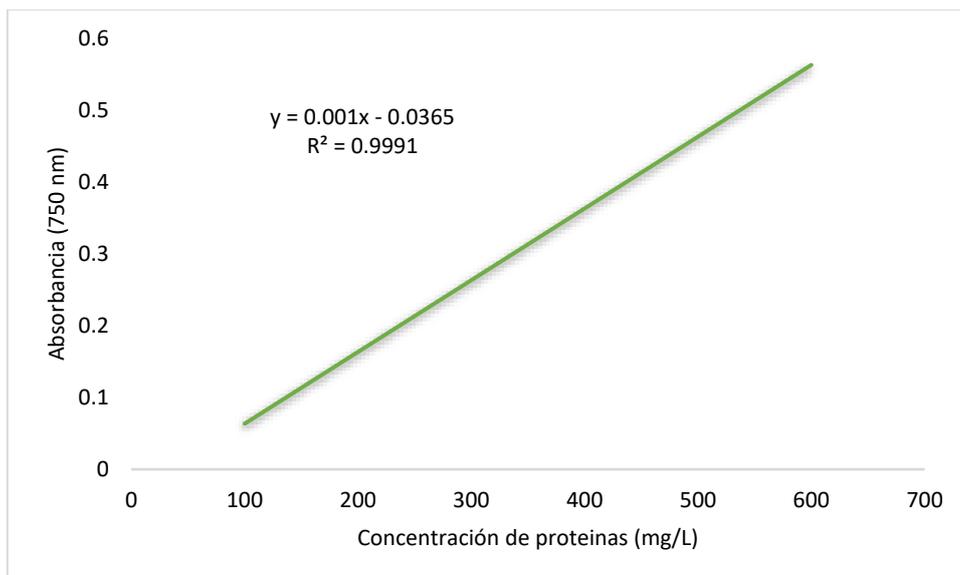
Eq. (5)

Donde: Concentración de azúcares reductores (x), Absorbancia neta (y).

Para evaluar la cantidad de azúcares en las muestras primero se hicieron diluciones de las muestras dependiendo de la concentración que se estimaba que presentaba la muestra. Posteriormente, se añadió 1 ml de a solución diluida en los tubos de digestión, después se añadió 0.5 ml de reactivo DNS, se taparon los tubos, se mezclaron usando el vortex y se colocaron los tubos en bloque en un digestor a 100 °C por 10 minutos. Posteriormente, se enfriaron los tubos a temperatura ambiente, se añadió 3.5 ml de agua ultrapura a cada tubo, se agitó usando el vortex y se realizaron las lecturas en el espectrofotómetro a una absorbancia de 540 nm, finalmente se determinó la concentración utilizando la Ecuación 2 anteriormente mencionada. Se realizó el mismo procedimiento para todas las muestras obtenidas en esta investigación, para lo cual se trabajó por triplicado.

#### iii) *Proteínas solubles totales (TSP)*

En las muestras obtenidas también se evaluó la concentración de proteínas solubles totales (PTS) por el método colorimétrico de Lowry<sup>49</sup>. La absorbancia obtenida a 750 nm fue convertida en concentración utilizando la ecuación 6, el mismo que fue construida utilizando como estándar albúmina de suero bovino (BSA).



**Figura 16.** Curva de calibración para la cuantificación de proteínas.

**Ecuación para el cálculo de proteínas soluble total (PTS)**

$$y = x * 0.001 - 0.0365$$

$$(y + 0.0365)/0.001 = x$$

$$x = (y + 0.0365)/0.001$$

Ecuación de concentración de proteínas

$$\text{Concentración proteínas mg/L} = \frac{\text{Absorbancia neta} + 0.0365}{0.001}$$

Eq. (6)

Donde: Concentración de proteínas (x), Absorbancia neta (y).

Para evaluar la cantidad de proteínas en las muestras, primero se hicieron diluciones de las muestras dependiendo de la concentración que se estimaba que presentaba la muestra. Posteriormente, se añadió 0.3 mL de una solución diluida en los tubos de digestión, después se añadió 0.3 mL de NaOH 2N, se taparon los tubos, se mezclaron usando el vortex y se colocaron los tubos en bloque en un digestor a 100 °C por 10 minutos. Se enfriaron los tubos a temperatura ambiente, se añadió 3 mL de reactivo formador de complejo

preparado previamente a cada tubo, se agitó usando el vortex y se dejó en reposo por 10 minutos, posteriormente se añadió 0.3 mL de reactivo Folin a cada tubo, se agitó usando el vortex y se dejó en reposo por 30 minutos, luego se realizaron las lecturas en el espectrofotómetro a una absorbancia de 750 nm, finalmente se determinó la concentración utilizando la ecuación 6 anteriormente mencionada. Se realizó el mismo procedimiento para todas las muestras obtenidas en esta investigación, para lo cual se trabajó por triplicado.

*iv) Turbidez*

La turbidez se determinó colocando aproximadamente 40 mL de muestra en una celda de vidrio, se secó cuidadosamente la botella con un papel toalla suave y seguidamente se hizo la lectura de la turbidez en el turbidímetro TL2300 de la marca HACH.

*v) Evaluación de salinidad, conductividad, sólidos disueltos*

La salinidad, conductividad, sólidos disueltos y pH se determinó colocando aproximadamente 40 ml de muestra en un beaker y posteriormente se colocaba el detector del Multiparámetro Hanna HI98195 calibrado previamente, seguidamente se lavó el detector con agua destilada y se secó cuidadosamente.

*vi) Distribución del tamaño de partículas*

Se midió la distribución del tamaño de partícula en las muestras utilizando un analizador de tamaño de partícula de difracción láser en un Zetasizer DLS 3690 Malvern analytical. Se determinó la turbidez de las muestras utilizando un espectrofotómetro UV-vis a 700 nm conforme a Luoheng Han<sup>51</sup>.

*vii) Índice de sedimentación*

Para determinar el índice de sedimentación se evaluó el volumen clarificado utilizando la Ecuación 7, para evaluar el volumen clarificado se restó el volumen total inicial y el volumen final turbio.

$$\text{Fase clarificada (ml)} = \text{Volumen total} - \text{Volumen final}$$

Eq. (7)

Donde: Fase clarificada, Volumen total, Volumen final.

Después se determinó el índice de sedimentación usando la Ecuación 8 en donde se multiplicó la fase clarificada por cien y se dividió con el volumen total inicial.

$$\text{Índice de sedimentación (\%)} = \frac{\text{Fase clarificada (ml)} * 100}{\text{Volumen total (ml)}}$$

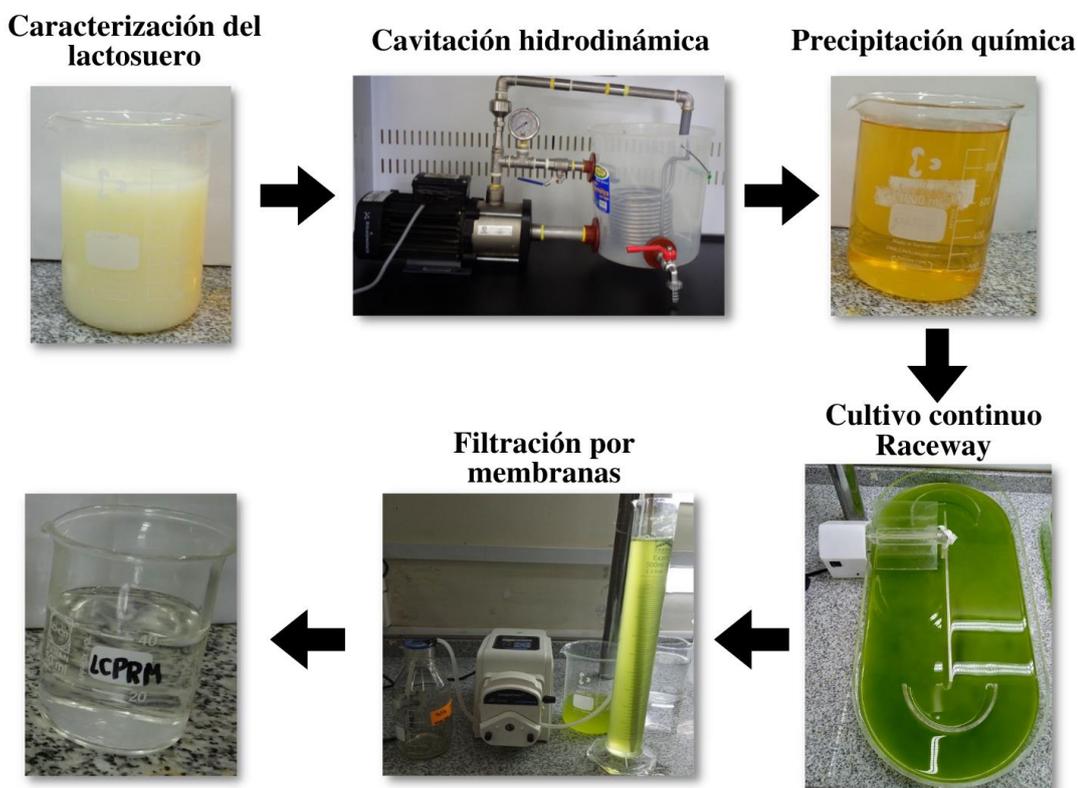
Eq. (8)

Donde: Índice de sedimentación, Fase clarificada, Volumen final.



### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Figura 17 se observa un resumen de todas las etapas que se realizaron en este estudio. Posteriormente, se detallará los resultados obtenidos en cada uno de ellos.



**Figura. 17.** Esquema del tratamiento: a) Caracterización del lactosuero, b) Cavitación hidrodinámica del lactosuero, c) Precipitación química, d) Cultivo continuo en Raceway y e) Microfiltración

#### 3.1 Propiedades fisicoquímicas del lactosuero

Los resultados de la caracterización del lactosuero se muestran en la Tabla 5. Como se observa, el valor de DQO fue de 68.58 g/L, el cual se encontraba dentro de los rangos establecidos en la literatura<sup>9</sup>. Respecto a la turbidez, se determinó valores mayores a 4000 NTU, y el análisis de azúcares reductores totales (ART) fue de 40.73 mg/L el mismo que corresponde a la presencia de lactosa, que es un azúcar reductor, finalmente el análisis de proteína total soluble (PTS) fue de 12550 mg/L. El pH del lactosuero fue dentro de los rangos normales, ya que esta solución tiene un pH ácido. Los valores encontrados son elevados respecto a los reportados, y esto se debe a que las características de los efluentes lácteos varían significativamente, dependiendo del proceso empleado en de fabricación

de productos, Tabla 5, ya que algunas fábricas utilizan el lactosuero para realizar otros procesos, por lo que sus efluentes finales son más diluidos o con menor carga orgánica<sup>2</sup>

**Tabla 5.** Características del lactosuero.

Parámetros	Concentración	Gopinatha Kurup et. al. <sup>9</sup>
		Fátima Carvalho et. al. <sup>2</sup>
DQO	68.58 g/L	15 g/L
Turbidez	> 4000 NTU	839.6 ± 51.4 FTU
Azúcares reductores (DNS)	40.73 mg/L	121.0 ± 29.0 mg/L
Proteína total	12550.00 mg/L	388.00 ± 0.01 mg/L
pH	4.11	6.69
Conductividad	6551 uS/cm	-
Sólidos Disueltos	3126 ppm Tds	1.08 ± 0.24 µm
Sales (PSU)	3.41	-

En cuanto a sus características organolépticas del lactosuero, el color era amarillento, característico ver la Figura 18, con presencia de flóculos grandes de materia suspendida, el olor fue un poco desagradable debido a su rápida descomposición anaeróbica de la materia orgánica durante el transporte.



**Figura. 18.** Muestra de lactosuero.

En cuanto a la concentración porcentual de la fracción sólida del lactosuero obtenida por proceso de atomización Tabla 6, el 8.36% corresponde a grasas, el 10.82% a proteínas y

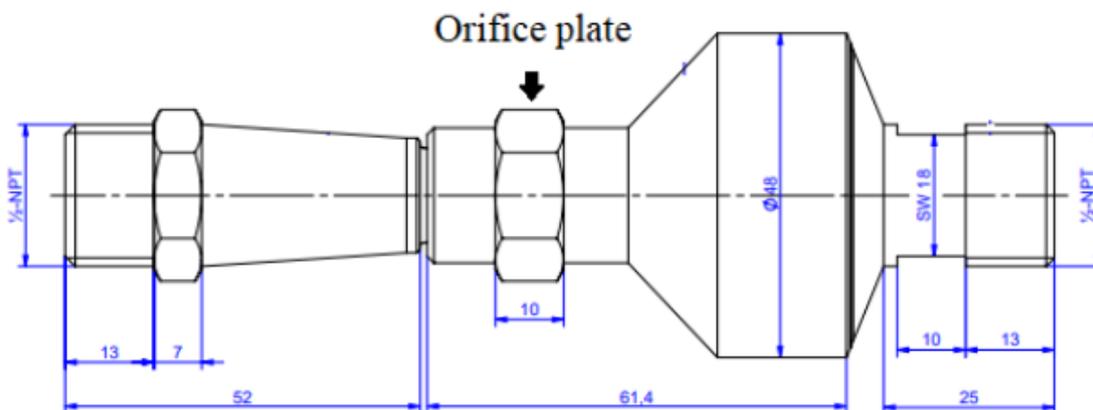
el 6.72 % corresponde a cenizas. La diferencia con relación al 100% corresponde a la fracción de carbohidrato. Los resultados del contenido de proteína son conforme a los reportados por la U.S. Dairy Export Council <sup>52</sup>, donde el lactosuero en polvo presenta una composición de proteína (11- 15%), además de lactosa (63-75%), grasa (1-1.5%) y ceniza (8.2-8.8%) como se muestra en la Tabla 6.

**Tabla 6.** Contenido de proteínas, grasas y cenizas del lactosuero.

Parámetros	Porcentaje en peso seco (%)
Grasas	8.36
Proteína total	10.82
Cenizas	6.72
Carbohidratos	74.1

### 3.2 Modelado del dispositivo de cavitación por fluidodinámica computacional (CFD)

Se realizó el modelamiento computacional del dispositivo desarrollado empleando el software ANSYS FLUENT (ANSYS, Inc. EE.UU), donde se evaluaron dos sistemas de cavitación hidrodinámica, uno que contenía una placa de 12 orificios y otro que contenía un sistema Venturi. A continuación, se muestra el diseño del dispositivo Venturi, el mismo que fue diseñado empleando el programa ANSYS – Design modeler con las dimensiones reales del dispositivo propuesto, como se observa en la Figura 19.

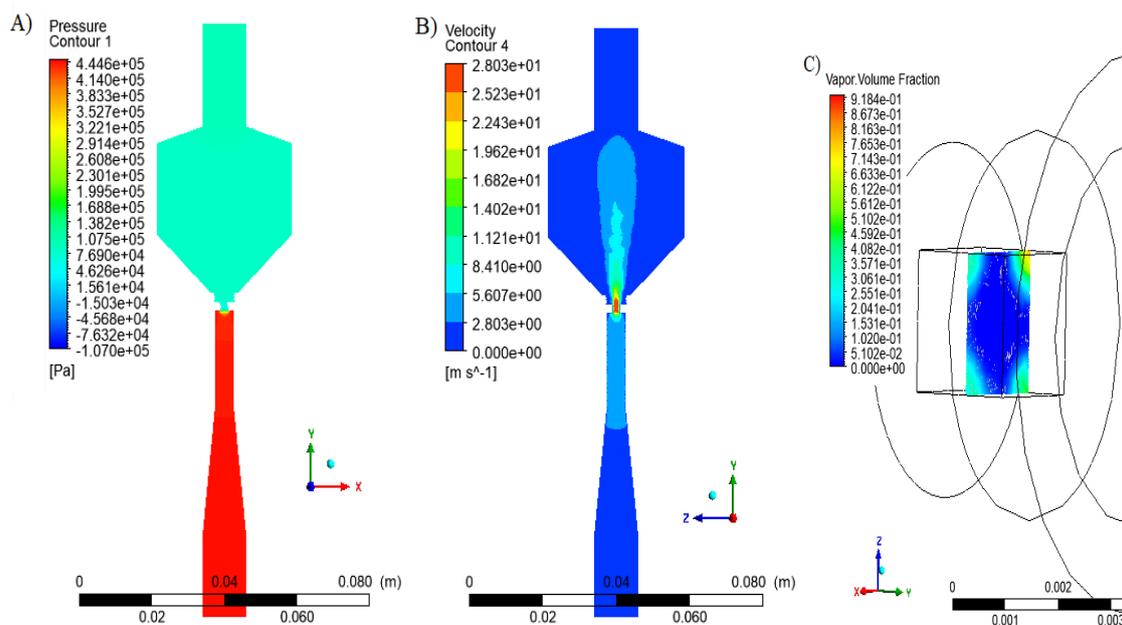


**Figura. 19.** Diseño del dispositivo de cavitación hidrodinámica en el software ANSYS 2022 R2.1

Los resultados de la simulación por fluidodinámica computacional fueron incluidos en la publicación *“Intensification of Red-G dye degradation used in the dyeing of alpaca wool*

*by advanced oxidation processes assisted by hydrodynamic cavitation*”<sup>53</sup>. En la Figura 20 se muestran los resultados obtenidos en el proceso de simulación utilizando ANSYS FLUENT. Como se observa en la Figura 20A, se encontró de la presión del fluido a partir de 450000 Pascal hasta presiones menores a 15610 Pa en algunas secciones del dispositivo, lo que generó un aumento de la velocidad del fluido como se observa en la Figura 20 B y en la Figura 20C se observa el establecimiento de zonas de baja presión que favorecen la formación de la fracción vapor de agua (cavitación). El dispositivo de cavitación hidrodinámica desarrollado logró un número de cavitación unidimensional ( $C_v$ ) de 0,11, valores entre 0,05 y 0,15 los cuales son considerados como óptimos para varias aplicaciones<sup>54</sup>.

Respecto a la placa de orificios, las simulaciones no fueron realizados debido a la complejidad de la geometría y la generación de un gran número de nodos o mallas, donde la versión estudiante (gratuita) del ANSYS no permite realizar la simulación respectiva. Sin embargo, podemos inferir en base al trabajo previamente publicado “*Hydrodynamic cavitation-assisted continuous pre-treatment of sugarcane bagasse for ethanol production: Effects of geometric parameters of the cavitation device*” por Terán Hilarés et al.<sup>55</sup>,



**Figura. 20.** A) Presión y B) Velocidad del fluido en diferentes zonas del dispositivo de cavitación. C) Volumen de fracción de vapor de agua generado en la placa de orificio.

Obtenido de Flores Alarcón et al.<sup>53</sup>.

### 3.3 Tratamiento de cavitación hidrodinámica del lactosuero

Una vez cavitado el lactosuero se guardó el lactosuero cavitado en galones PET a una temperatura de 4 °C para posteriormente realizar los siguientes tratamientos. En cuanto a la cavitación hidrodinámica, usando el sistema de Venturi, se observa que el DQO aumenta a medida que aumenta el tiempo de cavitación, así también aumenta la concentración de proteínas solubles de 9.317 mg/L a 11.750 mg/L). En cuanto a la conductividad, sólidos disueltos y sales, se observa una disminución considerable después de los 60 minutos de cavitación, como se observa en la Tabla 7.

**Tabla 7.** Parámetros fisicoquímicos del lactosuero cavitado con el sistema Venturi.

Tiempo	DQO (mg/L O <sub>2</sub> )	Carbohidratos (mg/L)	Proteínas (g/L)	Conductividad (uS/cm)	Sólidos Disueltos (ppm Tds)	Sales (PSU)
0 min	54244.44	31.63	9.317	9234	4629	5.21
15 min	54577.78	31.02	9.783	9390	4675	5.24
30 min	58577.78	31.49	9.150	4880	2440	2.63
45 min	56355.56	31.18	11.216	7589	3747	4.07
60 min	61688.89	33.55	11.750	8220	4103	4.58

En la Tabla 8, se observa que la cavitación usando la placa de 12 orificios, permite una ligera disminución en los valores de DQO que pueden ser explicados por la gran variabilidad en los resultados debido a los valores elevados. Respecto al contenido de azúcares reductores totales se observó un aumento, la cantidad de proteínas disminuyó, la conductividad aumento ligeramente.

**Tabla 8.** Parámetros fisicoquímicos del lactosuero cavitado con la placa de 12 orificios.

Tiempo	DQO (mg/L O <sub>2</sub> )	Carbohidratos (mg/L)	Proteínas (g/L)	Conductividad (uS/cm)	Sólidos Disueltos (ppm Tds)	Sales (PSU)
0 min	68022.22	30.55	8.383	9095	4503	4.99
15 min	64688.89	34.73	11.083	4761	2370	2.53
30 min	59800.00	34.07	10.750	4785	2499	2.59
45 min	62355.56	32.15	7.983	9420	4674	5.33
60 min	66800.00	32.60	8.833	4839	2417	2.60

Considerando que el sistema Venturi permitió un ligero aumento en la cantidad de proteínas solubles y la practicidad del sistema Venturi (construido en acero inoxidable), se seleccionó este dispositivo para las próximas etapas del estudio. Además, en las muestras cavitadas con Venturi se analizaron el tamaño de partícula, y los resultados se muestran en la Tabla 9. Como puede ser observado, el tamaño de partícula disminuye conforme aumenta el tiempo de tratamiento, alcanzando tamaños de partícula de 288 nm. Este comportamiento es conforme esperado, una vez que la cavitación conlleva a una disminución del tamaño de partícula conforme previamente reportado para diferentes aplicaciones, por ejemplo, en el tratamiento de pasta de tomate <sup>56</sup>, lodo activado residual <sup>57</sup>, soya <sup>58</sup>. Por lo tanto, la reducción de partícula puede ser asociado a los efectos mecánicos como ondas de choque generados durante el colapso violento de microburbujas debido a la recuperación de la presión.

**Tabla 9.** Tamaño de partículas del lactosuero sometido a cavitación hidrodinámica usando el sistema de Venturi.

Tiempo	Tamaño de partícula (nm)	Porcentaje
0 min	2820.00	60.90%
15 min	417.80	73.50%

---

30 min	369.60	91.80%
45 min	344.10	70.70%
60 min	288.40	61.81%
120 min	467.20	88.60%

---

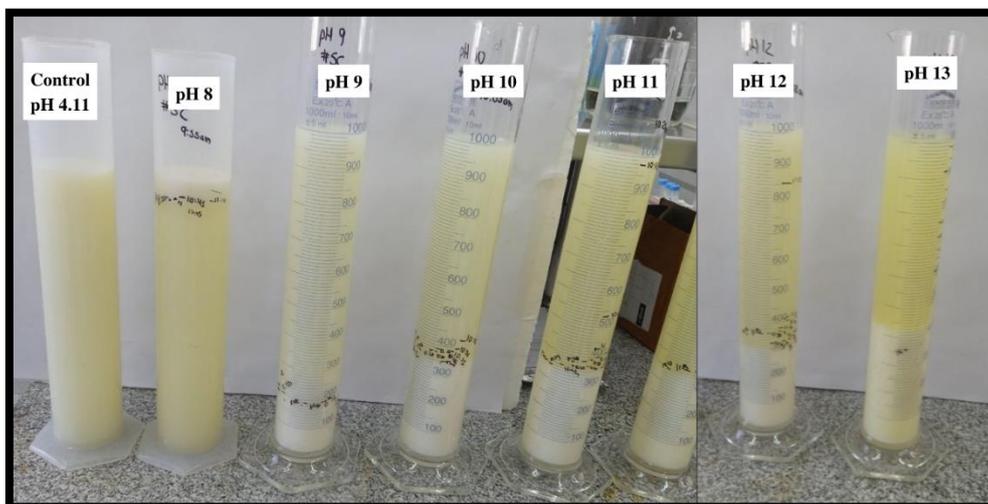
### 3.4 Precipitación química del lactosuero

Las muestras de lactosuero sin tratamiento y sometidos a procesos de cavitación hidrodinámica en sus dos variantes (placa de orificios y sistema Venturi), fueron sometidos a procesos de precipitación alcalina y posteriormente a precipitación ácida, y los resultados se muestran a continuación.

#### 3.4.1 Precipitación del lactosuero sin cavitación

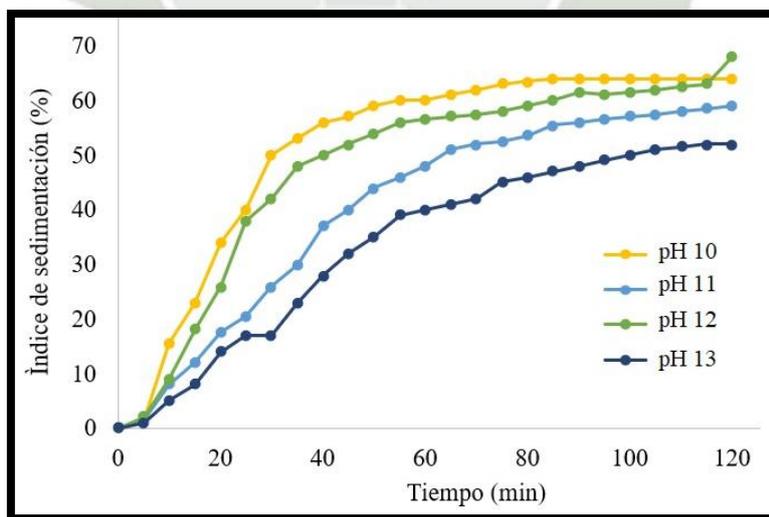
El lactosuero sin tratamiento previo fue sometido a sedimentación química, donde el pH de las muestras fue ajustado utilizando NaOH a 8, 9, 10, 11, 12 y 13, y las respectivas fotografías del ensayo se muestra en la Figura 21.

Como puede ser observado, el lactosuero a pH 4.11 no precipita, pero por efecto del cambio de pH a partir de 9 comienza a precipitar los componentes, generándose un sobrenadante con menor contenido de sólidos.



**Figura. 21.** Precipitación básica del lactosuero.

Como puede ser observado, el lactosuero a pH 4.11 no precipita, pero por efecto del cambio de pH a partir de 9 comienza a precipitar los componentes, generándose un sobrenadante con menor contenido de sólidos.



**Figura. 22.** Índice de sedimentación del lactosuero sometido a una precipitación básica.

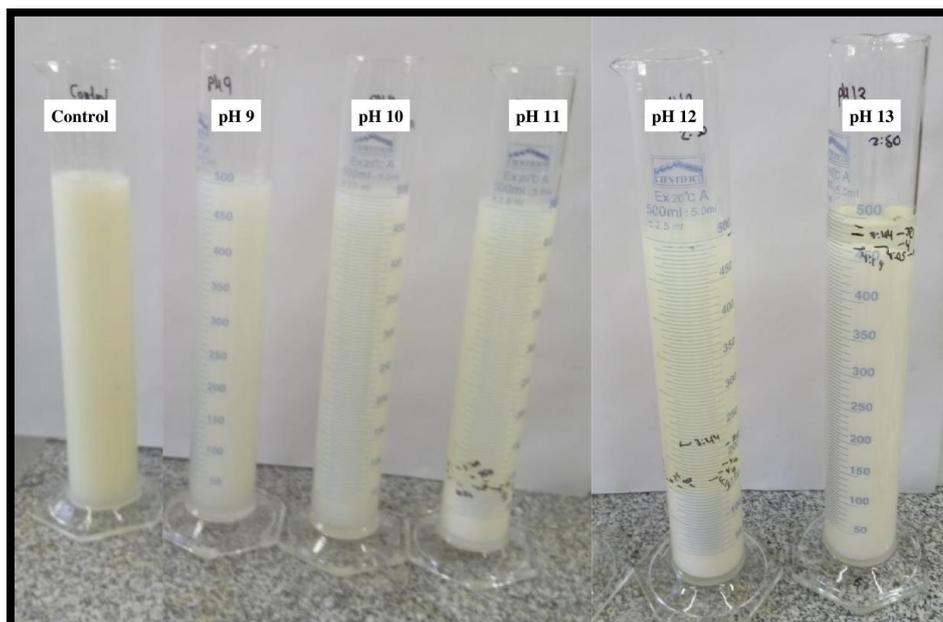
Los sobrenadantes obtenidos después del proceso de sedimentación fueron analizados en algunos parámetros conforme mostrado en la Tabla 10. Como se observa en la Tabla 10, se determinó un incremento en los valores de DQO en todas las muestras, en cuanto a los carbohidratos expresados como azúcares reductores totales se observó una ligera disminución en el tratamiento a pH 8, y en cuanto a proteínas en la muestra de tratamiento a pH 11 se encontró una mayor concentración de proteínas solubilizadas la cual fue de 10616.67 mg/L en comparación con la cantidad inicial que fue de 2416.67 mg/L, esto se debe a la solubilización de las proteínas en medio alcalino.

**Tabla 10.** Parámetros fisicoquímicos del lactosuero sometido a una precipitación básica.

pH	DQO (mg/L O <sub>2</sub> )	DNS (mg/L)	Proteínas (g/L)	pH	Turbidez (NTU)	Conductividad (uS/cm)	Sólidos Disueltos (ppm Tds)	Sales (PSU)
<b>Control</b>	54466.67	40.40	2.417	4.11	> 4000	6551	3126	3.41
<b>11</b>	76688.89	47.48	10.617	9.7	1964	8731	4457	5.01
<b>12</b>	70355.56	32.70	9.567	10.33	2116	1143	5741	6.58
<b>13</b>	69022.22	40.54	6.750	12.02	409	20420	0.00001027	12.31

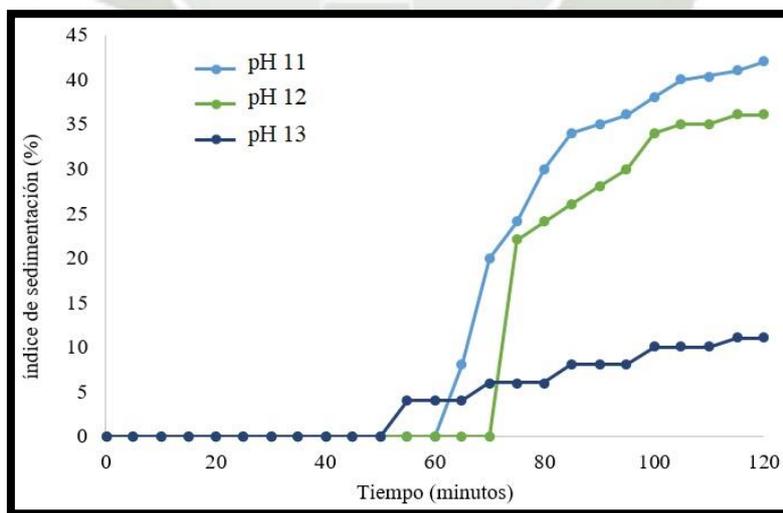
Por ejemplo, en un reciente estudio reportado por Ahlström et al.<sup>59</sup>, 52% del total de proteínas fueron solubilizados a un pH de 10.5. Respecto a la turbidez en el sobrenadante de las muestras, el sobrenadante obtenido a pH 13 fue la que presentó menor turbidez, la cual fue de 409 NTU comparando con la muestra control que presentó una turbidez mayor a 4000 NTU. Finalmente, se encontró una mayor conductividad en la muestra del tratamiento a pH 13 y una menor cantidad de sólidos en suspensión.

La precipitación ácida a pH 4 de los sobrenadantes obtenidos en la precipitación alcalina, se muestra en la Figura 23 y 24. En la Figura 23, se observa una fotografía de la fracción sedimentada a pH 4, obteniéndose mayor sedimentación ácida en los sobrenadantes obtenidos a pH de 11, 12 y 13.



**Figura. 23.** Precipitación ácida de los sobrenadantes obtenidos a partir de la precipitación alcalina.

Respecto a la velocidad de sedimentación Figura. 24, se observa que los sobrenadantes obtenidos a pH 11 presentan una mayor velocidad de sedimentación a partir de 60 min de reposo, y alcanzando un 45% de sedimentación en los 60 minutos posteriores.



**Figura. 24.** Índice de sedimentación de los sobrenadantes resultantes de la precipitación básica sometidos a una precipitación ácida.

El pH de sedimentación ácida fue determinado en base a pruebas preliminares, y este es respaldado por un reciente estudio donde se evaluó la extracción alcalina y posterior sedimentación ácida a pH 4 en el estudio de Ahlström et al.,<sup>59</sup>. En aquel estudio, se evaluaron pH de 3 hasta 6.5, obteniendo mejores resultados a pH 4; además, indican que el valor potencial zeta es 0 a pH 4.2, de esta forma alcanzaron una recuperación de 33% de las proteínas a pH 4.

**Tabla 11.** Parámetros fisicoquímicos de los sobrenadantes resultantes de la precipitación básica sometidos a una precipitación ácida.

pH	DQO (mg/L O <sub>2</sub> )	DNS (mg/L)	Proteínas (g/L)	Turbidez (NTU)	pH	Conductividad (uS/cm)	Sólidos Disueltos (ppm Tds)	Sales (PSU)
Control	55577.78	47.63	13.817	> 4000	4.19	6776	3362	3.69
11	34466.67	39.62	8.417	1901	4.18	4946	2812	2.67
12	49244.44	39.59	3.483	1308	4.34	11840	5892	6.68
13	47466.67	36.33	2.017	89.5	4.29	21580	0.000	12.18

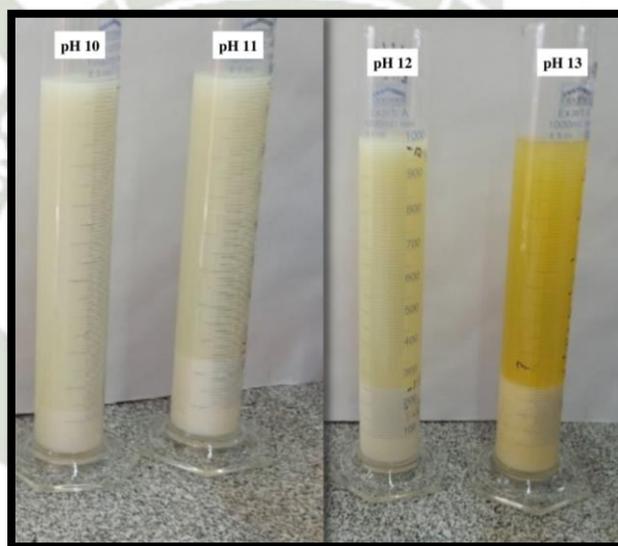
Como se observa en la Tabla 11, la concentración de proteínas en el sobrenadante a pH 4 posterior al tratamiento alcalino a pH 12 y 13 representan apenas el 36 y 30%, respectivamente. Por lo tanto, un 64 y 60% de las proteínas solubilizadas en medio alcalino fueron precipitadas a pH 4, valores ligeramente superiores al 51% de proteína precipitada a pH 4-4.5 posterior a una extracción alcalina a pH 12 (Akbari y Wu, 2015). Con relación al sobrenadante obtenido a pH 11, solo el 20% fue precipitado a pH 4, valor muy cercano al reportado por Ahlström et al.<sup>60</sup>.

El sobrenadante resultante de la precipitación ácida también fue analizado con relación al contenido de DQO, turbidez y otros parámetros conforme mostrados en la Tabla 11. Se observó una mayor disminución de DQO en la muestra acidificadas a pH 4 que resulto de la precipitación alcalina a pH 11. La menor turbidez fue de las muestras acidificada a pH 4 que previamente fue tratada a pH 13 las cuales llegaron a 29.1 NTU es decir disminuyo la turbidez en un 99.27%, en cuanto a la conductividad se observó un aumento considerable y una disminución de sólidos disueltos.

### 3.4.2 Tratamiento de lactosuero con cavitación hidrodinámica – Placa de 12 orificios

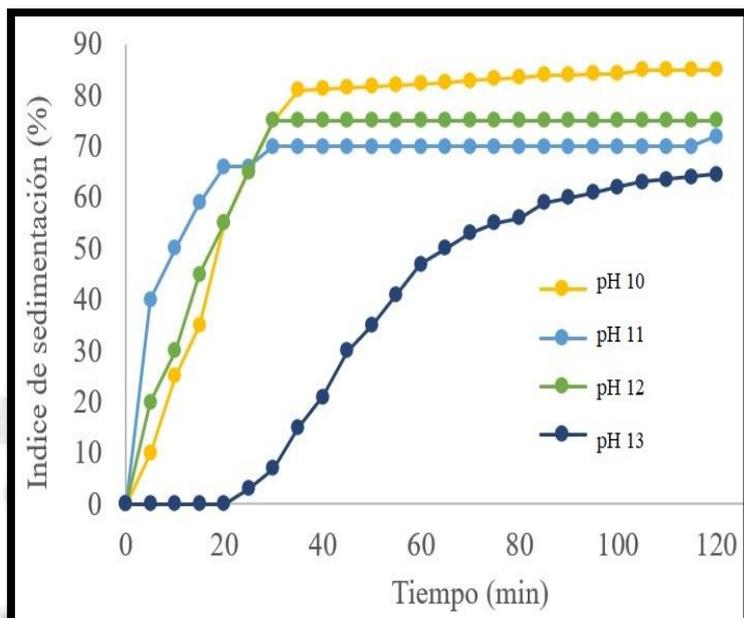
#### orificios

El lactosuero fue sometido a tratamiento con cavitación hidrodinámica, el mismo que incluye como dispositivo de cavitación una placa de 12 orificios conforme descrito en la sección de metodología y resultados mostrados en la sección 3.3. El objetivo fue básicamente evaluar el impacto sobre algunos parámetros como la DQO, tamaño de partícula y en la velocidad de sedimentación química (alcalina y ácida) en una etapa posterior. En la Figura 25, se muestra únicamente las probetas donde se observaron la formación de agregados y posterior sedimentación.



**Figura. 25.** Precipitación básica de lactosuero cavitado con la placa de 12 orificios.

Como se observa, en la muestra cavitada y ajustado a pH 13, presento un sobrenadante diferente a las otras probetas y con un color más amarillento. Sin embargo, como mostrado en la Figura 26, a pH 13 se observó una sedimentación lenta comparado a los de pH 10,11 y 12. Lo más interesante en las muestras cavitadas con relación a las muestras no cavitadas es la rapidez de sedimentación a pH 10, 11 y 12, por ejemplo, alcanzando un 80% en 40 min, que es 20% a más comparado con el observado a pH 10 en muestra sin cavitación. Este efecto puede ser debido a la reducción de tamaño de partícula en la matriz, lo que facilita la interacción de compuestos debido a una mayor área superficial, por otro lado, se observa también una mayor concentración de proteína soluble en el sobrenadante de las muestras cavitadas conforme mostrado en la Tabla 12.

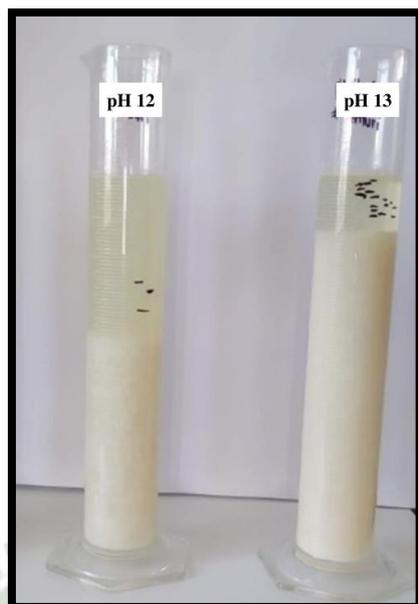


**Figura. 26.** Índice de sedimentación del lactosuero cavitado usando la placa de 12 orificios sometido a una precipitación básica.

Conforme se observa en la Tabla 12, en las muestras cavitadas la concentración de proteína soluble es bastante alto comparado al control. Además, los valores de DQO en los sobrenadantes incrementaron; sin embargo, la turbidez disminuyó hasta 266 NTU a pH 13, el cual es inferior a 409 NTU obtenido a pH 13 en la muestra sin cavitar.

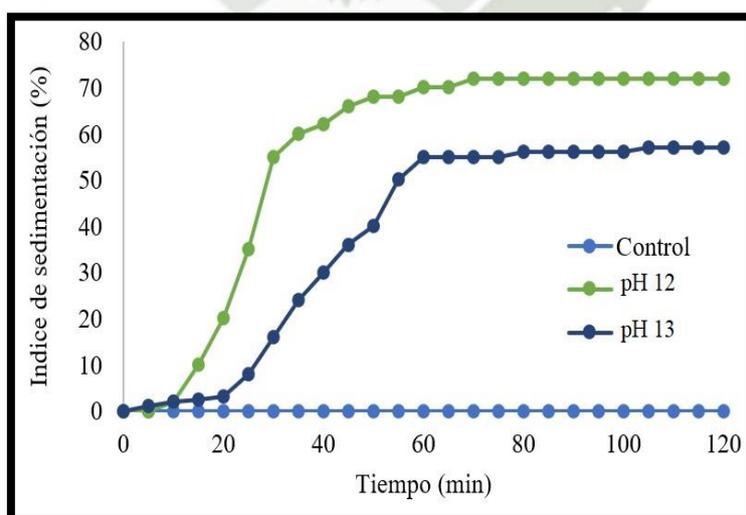
**Tabla 12.** Parámetros fisicoquímicos de los sobrenadantes resultantes del lactosuero cavitado con la placa de 12 orificios sometido a una precipitación básica.

pH	DQO (mg/L O <sub>2</sub> )	DNS (mg/L)	Proteínas (g/L)	Turbidez (NTU)	pH	Conductividad (uS/cm)	Sólidos Disueltos (ppm Tds)	Sales (PSU)
<b>Control</b>	58744.44	39.12	8.250	> 4000	4.23	3356	1671	1.77
<b>10</b>	64411.11	43.52	12.050	2594	4.56	6029	3397	3.73
<b>11</b>	66411.11	40.89	14.116	2369	6.38	7055	3536	4.04
<b>12</b>	97966.67	39.88	12.983	2299	9.62	8956	4897	5.24
<b>13</b>	59300.00	33.00	10.416	266	12.11	12560	6310	7.24



**Figura. 27.** Precipitación ácida de los sobrenadantes resultantes de la precipitación básica del lactosuero cavitado con la placa de 12 orificios.

Al igual que en las etapas anteriores, el sobrenadante obtenido fue sometido a precipitación ácida a pH 4. Como observado en la probeta en la Figura 27, el sobrenadante es más transparente, y la velocidad de sedimentación fue mayor en el sobrenadante obtenido previamente a pH 12. Sin embargo, la turbidez fue de 109 NTU en el sobrenadante obtenido a pH 4, el mismo que vienen del sobrenadante a pH 13.



**Figura. 28.** Índice de sedimentación de los sobrenadantes resultantes de la precipitación básica del lactosuero cavitado con la placa de 12 orificios sometidos a una precipitación ácida.

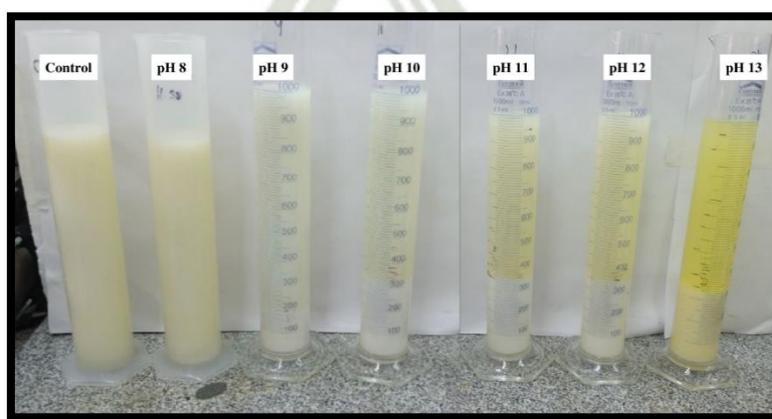
En cuanto al índice de sedimentación, que se muestra en la Figura 28, se observa un mejor índice de sedimentación en la muestra obtenida de la precipitación ácida del lactosuero pretratado a un pH 12. Conforme se observa en la Tabla 13, en las muestras cavitadas la concentración de proteína solubles es mayor en los sobrenadantes de pH11 que fueron sometidas a una precipitación ácida comparado con el control. Además, los valores de DQO en los sobrenadantes disminuyeron; sin embargo, la turbidez disminuyó hasta 109 NTU a pH 13, el cual es inferior a 409 NTU obtenido a pH 13 en la muestra sin cavitado.

**Tabla 13.** Parámetros fisicoquímicos sobrenadantes resultantes de la precipitación básica del lactosuero cavitado con la placa de 12 orificios sometidos a una precipitación ácida.

pH	DQO (mg/L O <sub>2</sub> )	DNS (mg/L)	Proteínas (g/L)	Turbidez (NTU)	pH	Conductividad (uS/cm)	Sólidos Disueltos (ppm Tds)	Sales (PSU)
Control	38966.67	43.63	8.516	> 4000	4.07	6475	3239	3.57
11	42522.22	40.40	9.783	> 4000	4.02	8052	4039	4.55
12	48855.56	39.71	7.816	1473	4.29	12390	6099	7.07
13	41966.67	40.47	2.083	109	4.31	21850	0.0000101	13.8

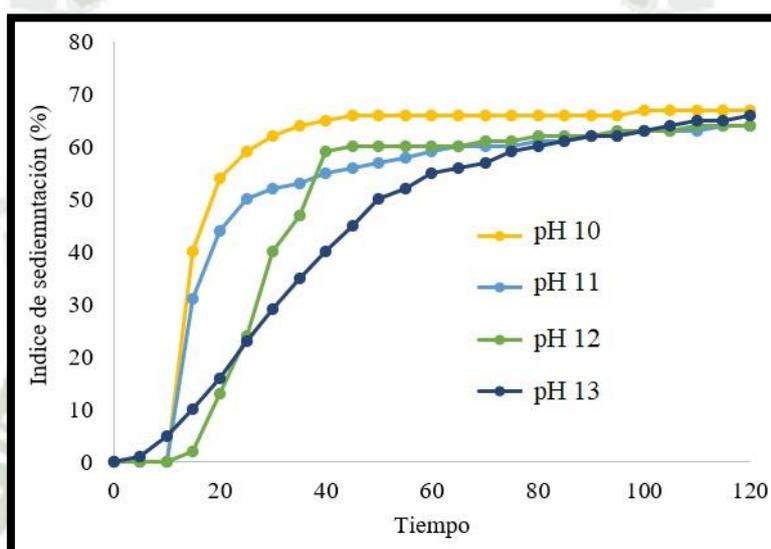
#### 4.3 Lactosuero cavitado con el sistema Venturi

En cuanto a la precipitación alcalina, se observó que las muestras a pH 10, 11, 12 y 13 tuvieron un mayor índice de sedimentación, en cambio las muestras a pH 8 y 9 no presentaron ningún cambio, como se muestra en la Figura 29.



**Figura. 29.** Precipitación básica del lactosuero cavitado con el sistema Venturi.

La muestra cavitada y ajustado a pH 13, presento un sobrenadante diferente a las otras probetas y con un color más amarillento. Sin embargo, como mostrado en la Figura 30, a pH 13 se observó una sedimentación lenta comparado con los de pH 10,11 y 12. Lo más interesante en las muestras cavitadas con relación a las muestras no cavitadas es la rapidez de sedimentación a pH 10, 11 y 12, se observa también una mayor concentración de proteína soluble en el sobrenadante de las muestras cavitadas y tratadas a pH 12 y 13 conforme lo mostrado en la Tabla 15.



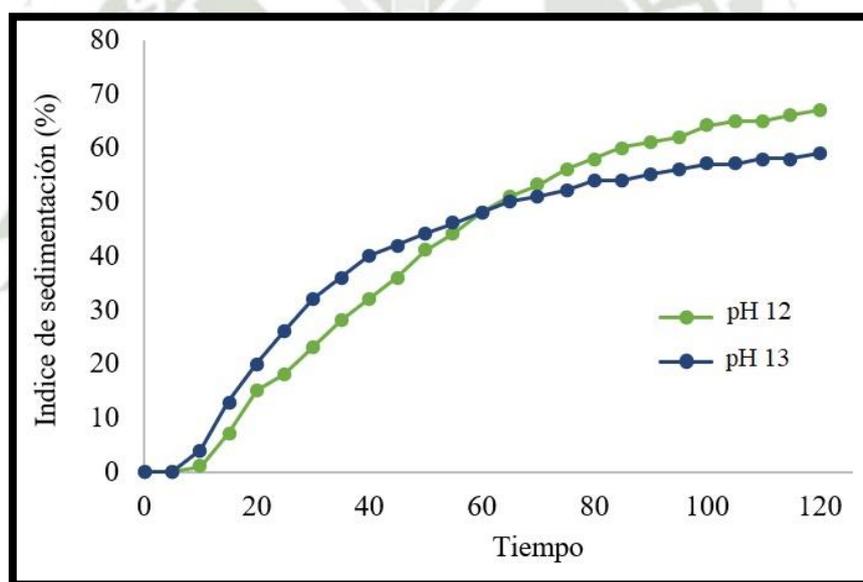
**Figura. 30.** Índice de sedimentación del lactosuero cavitado usando el sistema Venturi sometido a una precipitación básica.

En cuanto a los análisis realizados que se muestran en la Tabla 14, se encontró un ligero aumento, la turbidez en la muestra a pH 13 disminuyó en un 89.78%. La conductividad aumentó considerablemente, y las sales también, pero la cantidad de sólidos en suspensión disminuyó en un porcentaje mayor al 99.99%. Se logró una disminución del DQO en las muestras a pH 8, 10, 11, 12 y 13, y se logró una disminución de la turbidez en un 98.89%.

**Tabla 14.** Parámetros fisicoquímicos de los sobrenadantes del lactosuero cavitado usando el sistema Venturi sometido a una precipitación básica.

pH	DQO (mg/L O <sub>2</sub> )	DNS (mg/L)	Proteínas (g/L)	pH	Turbidez (NTU)	Conductividad (uS/cm)	Sólidos Disueltos (ppm Tds)	Sales (PSU)
Control	56855.56	40.40	2416.67	4.11	> 4000	6551	3126	3.41
11	80411.11	47.48	10616.67	9.7	1964	8731	4457	5.01
12	73077.78	32.70	9566.67	10.33	2116	11.43	5741	6.58
13	61300.00	40.54	6750.00	12.02	409	20420	0.00	12.31

Al igual que en las etapas anteriores, el sobrenadante obtenido fue sometido a precipitación ácida a pH 4. Como observado en la probeta en la Figura 31, el sobrenadante es más transparente, y la velocidad de sedimentación fue mayor en los sobrenadantes obtenidos previamente a pH 12 y 13.



**Figura. 31.** Índice de sedimentación de los sobrenadantes resultantes de la precipitación básica del lactosuero cavitado con el sistema Venturi sometidos a una precipitación ácida.

La turbidez fue de 29 NTU en el sobrenadante obtenido a pH 4, el mismo que viene del sobrenadante a pH 13, como se observa en la Tabla 15. Además, se logró una menor cantidad de proteínas y azúcares que los otros tratamientos.

**Tabla 15.** Parámetros fisicoquímicos de los sobrenadantes resultantes de la precipitación básica del lactosuero cavitado con el sistema Venturi sometidos a una precipitación ácida.

pH	DQO (mg/L O <sub>2</sub> )	DNS (mg/L)	Proteínas (g/L)	Turbidez (NTU)	pH	Conductividad (uS/cm)	Sólidos Disueltos (ppm Tds)	Sales (PSU)
<b>Control</b>	66855.56	47.63	13.817	> 4000	4.19	6776	3362	3.69
<b>10</b>	61855.56	44.93	10.783	3350	4.27	8771	4270	4.87
<b>11</b>	63188.89	39.62	8.417	1901	4.18	4946	2812	2.67
<b>12</b>	63300.00	39.59	3.483	1308	4.34	11840	5892	6.68
<b>13</b>	46633.33	36.33	2.017	29.1	4.29	21580	0.00001027	12.18

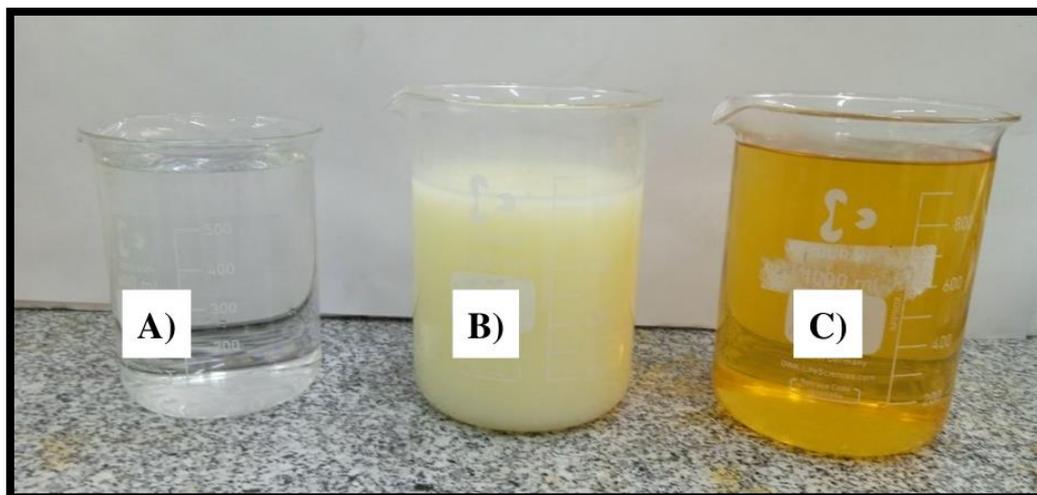
En resumen, evaluando todos los tratamientos, el tratamiento a pH 13 disminuyó en un 17.97 % el DQO, en un 98.89% la turbidez, disminuyó la cantidad de carbohidratos en 84.59%, y disminuyó en un 29.76% la cantidad de proteínas. En cuanto a la conductividad, esta disminuyó en un 99.77% en la precipitación básica, pero en la precipitación ácida aumentó significativamente, en cuanto a los sólidos disueltos disminuyeron en un 99.99% al finalizar la precipitación química, finalmente las sales aumentaron al finalizar ambos pretratamientos de precipitación química.

Se encontró que después de la precipitación alcalina el contenido de grasas y aumento a un 47.35%, pero el contenido de proteínas disminuyó a 3.56%, como se observa en la Tabla 16. En cuanto a la precipitación ácida también aumentó el contenido de grasas a un 57.37, pero el contenido de proteínas aumentó a 10.33%. Estos resultados coinciden con los de Prazeres et. al. <sup>5</sup> en donde también se reportó que a pH muy alcalinos como es el pH 13 el contenido de proteínas disminuye, pero a pH ácidos el contenido de proteínas aumenta.

**Tabla 16.** Contenido de proteínas, grasas y cenizas del lactosuero de las muestras de lactosuero crudo, lactosuero pretratado a pH 13 y lactosuero pretratado a pH 13 y pH 4.

Parámetros	Concentración		
	Lactosuero Crudo	Lactosuero pretratado a pH 13	Lactosuero pretratado a pH 13 y pH4
<b>Proteína total</b>	10.82 %	3.56 %	10.33 %
<b>Grasa</b>	8.36 %	47.35 %	57.37 %
<b>Cenizas</b>	6.72 %	24.67 %	1.76 %

Finalmente, en la Figura 32 se observa una foto del lactosuero y el sobrenadante obtenido después de la precipitación básica y ácida en donde se puede observar que el lactosuero después de los tratamientos es más transparente y tiene un color amarillento un poco más fuerte que el lactosuero sin tratar.



**Figura. 32.** Comparación de las muestras de A) Agua, B) Lactosuero sin tratar y C) Lactosuero después de la precipitación química (Precipitación química a pH 13 y precipitación acida a pH 4).

### 3.5 Obtención y cultivo de la microalga “*Chlorella vulgaris*”

Se determinó el crecimiento de la microalga "*Chlorella vulgaris*" en un periodo de 72 horas en un reactor Raceway de 6 L, los resultados se observan en la Tabla 17 y Figura 33, encontrando una velocidad de crecimiento de  $0.06 h^{-1}$ , el tiempo de duplicación fue de  $11.55 h$ . Después de las 72 h de crecimiento se observó un aumento significativo en la cantidad de biomasa con respecto al día 0 como se observa en la Figura 33.

**Tabla 17.** Crecimiento de *Chlorella vulgaris* en un reactor raceway en 72 horas.

Tiempo	Concentración
0 h	$7.38 * 10^5 \text{ Cell/ml}$
24 h	$7.25 * 10^6 \text{ Cell/ml}$
48 h	$1.05 * 10^7 \text{ Cell/ml}$
72 h	$7.09 * 10^7 \text{ Cell/ml}$

### 3.5.1 Velocidad de crecimiento

$$\mu_{max} = \frac{\ln \frac{x_2}{x_1}}{t_2 - t_1}$$

Eq. (9)

Dónde: Velocidad de crecimiento ( $\mu_{max}$ ), biomasa final ( $x_2$ ), biomasa inicial ( $x_1$ ), tiempo final ( $t_2$ ), tiempo inicial ( $t_1$ ).

$$\mu_{max} = \frac{\ln \frac{x_2}{x_1}}{t_2 - t_1} = \frac{\ln \frac{7.09 * 10^7 \text{ Cell/ml}}{7.38 * 10^5 \text{ Cell/ml}}}{72 \text{ h} - 0 \text{ h}} = \frac{4.57}{72 \text{ h}} = 0.06 \text{ h}^{-1}$$

### 3.5.2 Tiempo de duplicación

Ecuación del tiempo de duplicación.

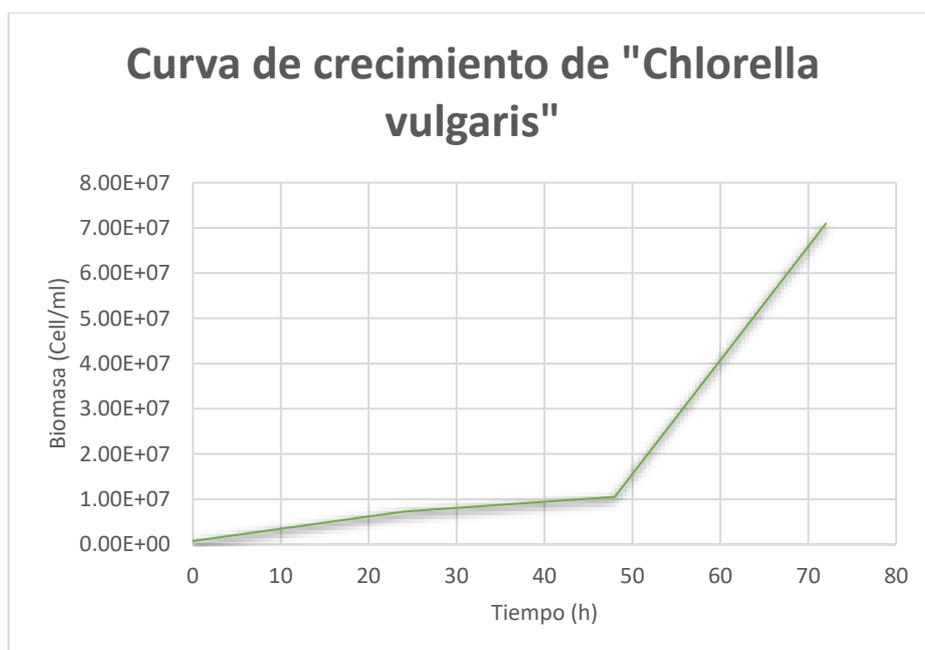
$$t_d = \frac{\ln 2}{\mu_{max}}$$

Eq. (10)

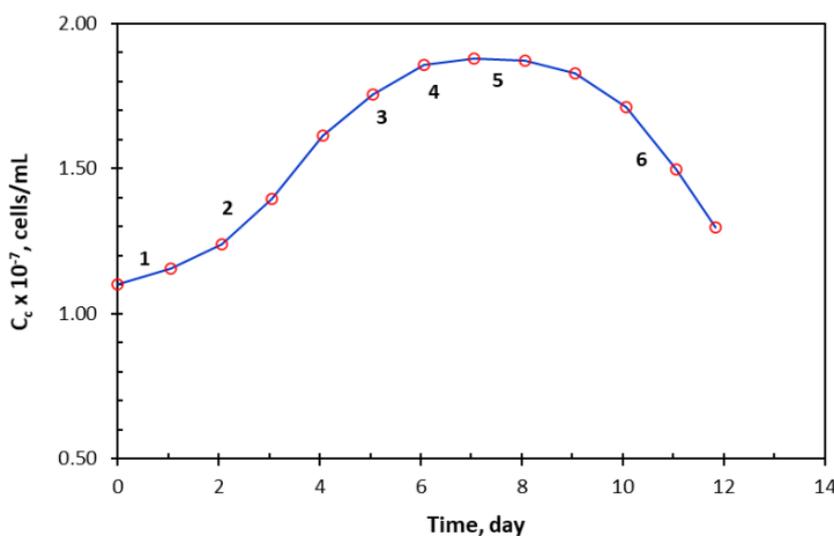
Dónde: Tiempo de duplicación ( $t_d$ ), Velocidad de crecimiento ( $\mu_{max}$ ).

$$t_d = \frac{\ln 2}{\mu_{max}} = \frac{0.69}{0.06 \text{ h}^{-1}} = 11.55 \text{ h}$$

Como se muestra en la Figura 33, la curva de crecimiento celular fue similar a la curva de crecimiento de las microalgas en general Figura 34. El crecimiento celular puede dividirse en seis fases de crecimiento, es decir, fase de latencia, fase exponencial, fase lineal, fase de crecimiento decreciente, fase estacionaria y fase de muerte, como se observa en la Figura 34.



**Figura. 33.** Curva de crecimiento de “*Chlorella vulgaris*”.



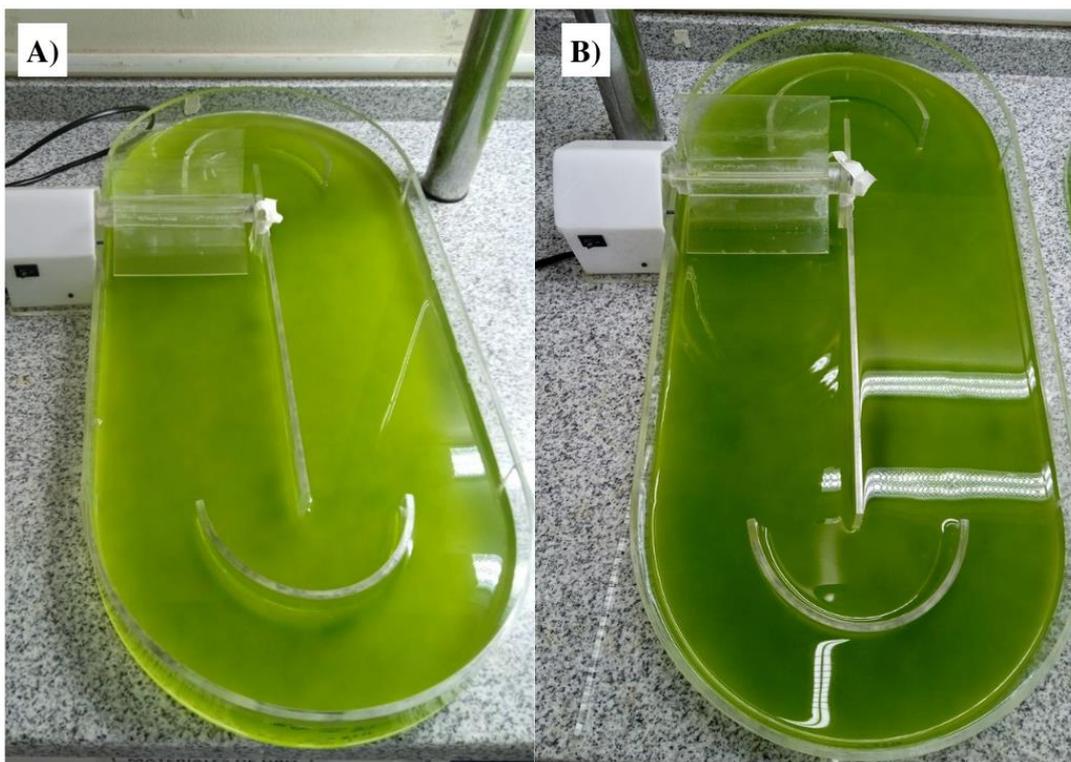
**Figura. 34.** El crecimiento celular de *C. vulgaris* durante un período de cultivo de 12 días con fases de crecimiento: (1) Fase de retraso; (2) Fase exponencial; (3) Fase lineal; (4) Fase de crecimiento decreciente; (5) Fase estacionario; y (6) Fase de muerte.

Recopilado de S Ma'mun et al.<sup>61</sup>.

En este estudio se evaluó el crecimiento en 4 días, como podemos observar en la Figura 33 las microalgas presentaron los dos primeros días un ligero crecimiento, ya que se encontraban en la fase de retraso y en los últimos días este crecimiento aumento

considerablemente ya que se encontraba en la fase exponencial. Estos resultados coinciden con los realizados por S Ma'mun et al.<sup>61</sup>, donde se realizó el cultivo de *Chlorella vulgaris* utilizando el medio artificial de agua de mar (ASWM) en una columna de burbujeo, por un periodo de 13 días, en este estudio se reportó que en el día 2 de crecimiento las microalgas se encontraban en la fase exponencial como se observó en el presente estudio.

En la Figura 35 se observa el reactor raceway en el día 0 y después de los 4 días de cultivo en donde se alcanzó una concentración de  $7.09 * 10^7 \text{ Cell/ml}$ , además se puede observar claramente el cambio de color de los reactores debido al aumento de biomasa microalgal, en cambio, en el estudio realizado por S Ma'mun et al.<sup>61</sup> se obtuvo una concentración máxima de  $1.88 * 10^7 \text{ Cell/ml}$  en el 7 día de crecimiento.



**Figura. 35.** Crecimiento de microalgas en un reactor Raceway A) Reactor raceway en el día 0, B) Reactor raceway a las 72 horas de cultivo.

### 3.6 Cultivo de microalgas “*Chlorella vulgaris*” en un biorreactor tipo raceway alimentado con lactosuero pretratado proceso continuo

Primero se realizó el cultivo de microalgas “*Chlorella vulgaris*” en un biorreactor tipo raceway obteniéndose 5L de microalgas “*Chlorella vulgaris*” a una concentración de  $4.83 * 10^7 \text{ Cell/ml}$ , posteriormente se fue alimentando el cultivo con soluciones de lactosuero al 10%, 20%, 30%, 50% y 100% como se detalló anteriormente. Los parámetros de cultivo usados se detallan en la Tabla 18.

#### 3.6.1 Dilución

$$D = 0.8 * \mu_{max}$$

Eq. (11)

Dónde: Dilución ( $D$ ), Velocidad de crecimiento ( $\mu_{max}$ ).

$$D = 0.8 * 0.06 \text{ h}^{-1}$$

$$D = 0.048 \text{ h}^{-1}$$

#### 3.6.2 Tiempo de retención hidráulica

$$TRH = \frac{1}{D}$$

Eq. (12)

Dónde: Tiempo de retención hidráulica ( $TRH$ ), Dilución ( $D$ ).

$$TRH = \frac{1}{0.048 \text{ h}^{-1}}$$

$$TRH = 20.83 \text{ h} * \frac{60 \text{ min}}{1 \text{ h}}$$

$$TRH = 1250 \text{ min}$$

### 3.6.3 Flujo de alimentación

$$Q = \frac{VT}{TRH}$$

Eq. (13)

$$Q = \frac{5000 \text{ ml}}{1250 \text{ min}} = 4 \frac{\text{ml}}{\text{min}}$$

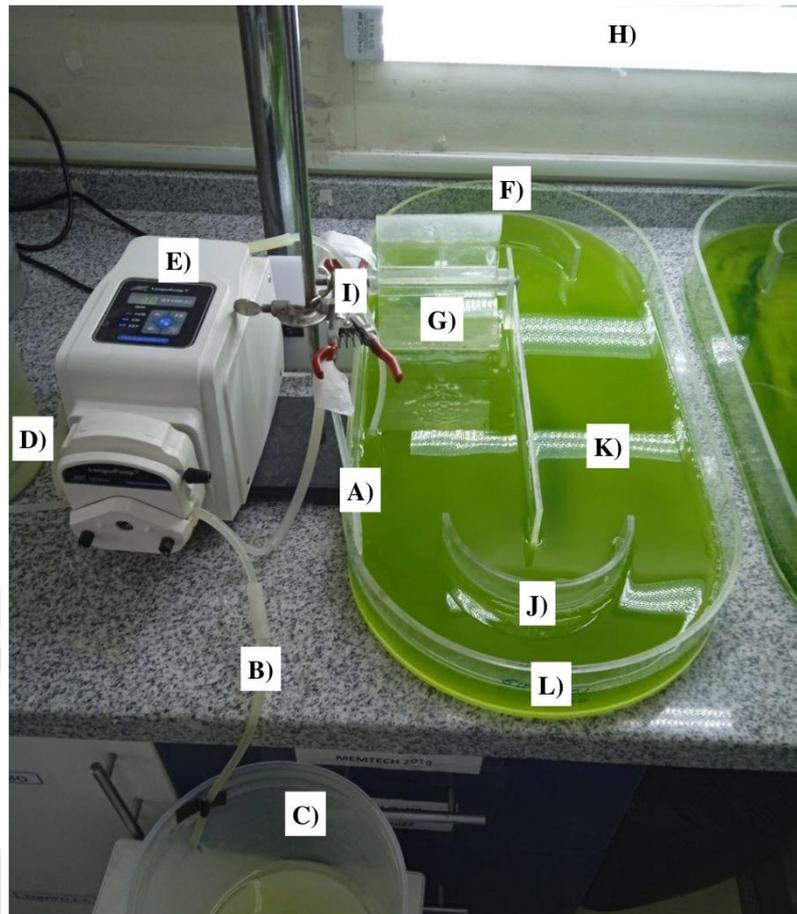
Dónde: Flujo de alimentación (4 ml/min), Volumen total (5L), Tiempo de retención hidráulica (TRH).

Se evaluó la velocidad de crecimiento de la cepa utilizada *Chlorella vulgaris* para poder determinar los parámetros de funcionamiento del reactor continuo tipo raceway. Concluyendo que el tiempo de retención hidráulica fue de 20.80 h, la dilución 0.048 h, y el flujo de alimentación fue de 4 ml/min como se observa en la Tabla 18.

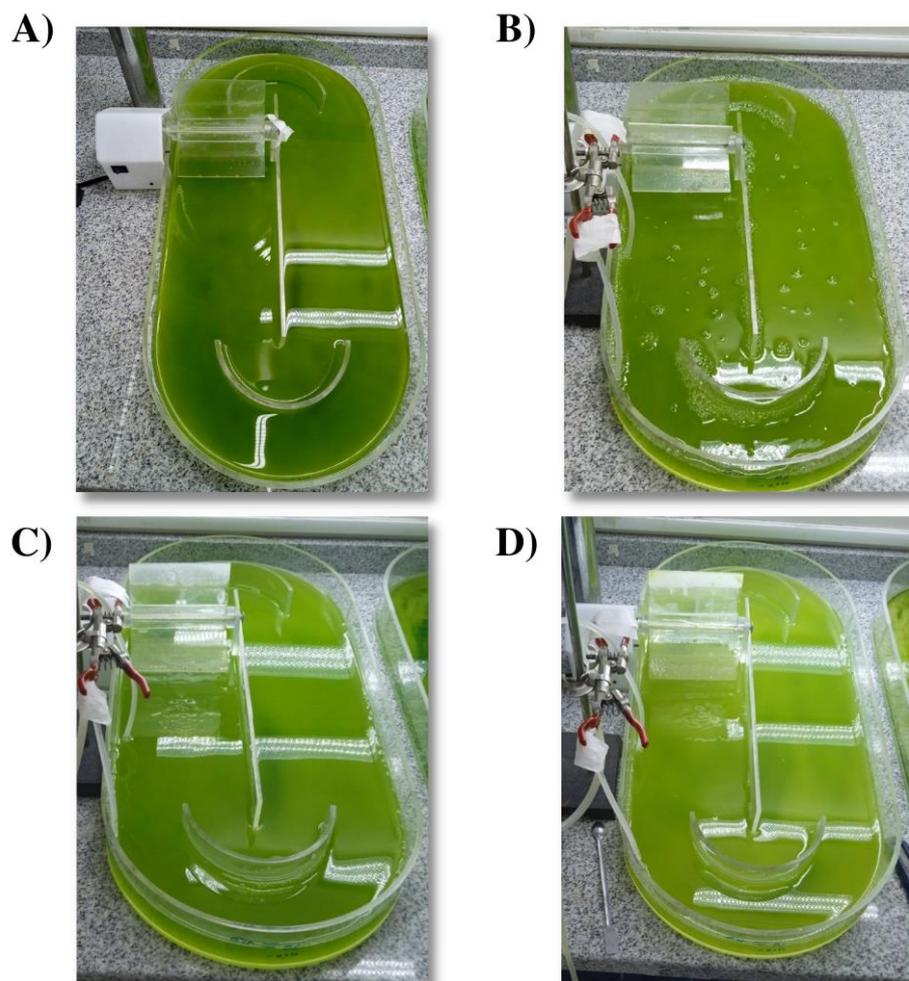
**Tabla 18.** Parámetros de cultivo continuo de *Chlorella vulgaris* alimentada con lactosuero pretratado.

Parámetros	Unidades
Tiempo de retención hidráulica (THR)	20.8 h
Temperatura	25°C
Iluminación	440 $\mu$ mol /m <sup>2</sup>
Dilución	0.048 h
Flujo de alimentación	4 ml/min

Se desarrolló un sistema continuo para el cultivo de *Chlorella vulgaris*, el cual aparte del reactor raceway tenía un flujo de entrada y salida el cual funciono con una bomba peristáltica, el sistema continuo se muestra en la Figura 36.



**Figura. 36.** Fotografía del sistema continuo usado en el cultivo de “*Chlorella vulgaris*” con cultivo de lactosuero: A) Línea de entrada, B) Línea de salida, C) Depósito del medio, D) Depósito de salida, E) Bomba peristáltica, F) Reactor raceway, G) Rueda de paletas, H) Iluminación, I) Motor, J) Deflector, K) Canal, L) Profundidad del líquido.



**Figura. 37.** Cultivo de microalgas “*Chlorella vulgaris*” en un biorreactor tipo raceway alimentado con lactosuero pretratado proceso continuo: a) Reactor en un tiempo 0, b) Reactor después de 20 horas, c) Reactor después de 40 h, d) Reactor después de 60 horas.

**Tabla 19.** Crecimiento de *Chlorella vulgaris* en un reactor raceway alimentado con soluciones de lactosuero pretratado

TRH	Dilución de lactosuero pretratado	Concentración
0 h	Inicial	$4.83 * 10^7 \text{ Cell/ml}$
20.8 h	10 %	$3.73 * 10^7 \text{ Cell/ml}$
41.6 h	20 %	$3.53 * 10^7 \text{ Cell/ml}$
62.4 h	30 %	$2.58 * 10^7 \text{ Cell/ml}$
83.2 h	50 %	$2.25 * 10^7 \text{ Cell/ml}$

**Tabla 20.** Parámetros fisicoquímicos del Cultivo de microalgas “*Chlorella vulgaris*” en un biorreactor tipo raceway alimentado con lactosuero pretratado proceso continuo

Dilución del lactosuero pretratado	DQO (mg/L O <sub>2</sub> )	DNS (mg/L)	Proteínas (g/L)	pH	Conductividad (uS/cm)	Sólidos Disueltos (ppm Tds)	Sales (PSU)
10%	418.00	0.027	0.047	6.51	1852.00	926	0.94
20%	454.00	0.034	0.178	5.34	3969.00	20010	2.13
30%	2644.00	0.042	0.314	4.55	7296.00	3636	4.00
50%	3069.00	0.057	0.588	5.82	15090.00	7530	8.78

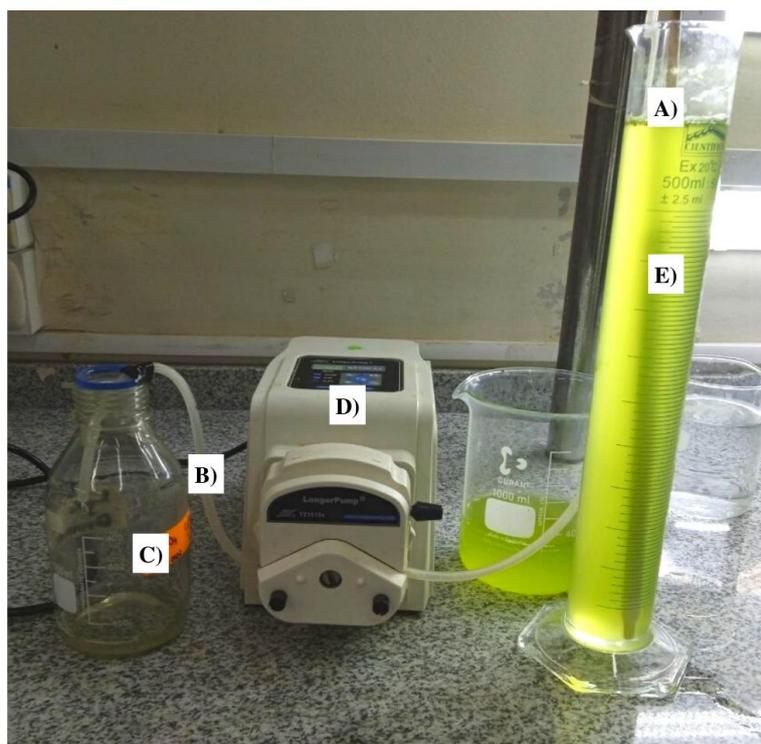
En cuanto al cultivo continuo de las microalgas en sistema continuo, se encontró que a una concentración de lactosuero pretratado del 10% se logró una disminución del 99.23% de DQO, 99.93% de carbohidratos, 99.72% de proteínas, 71.73% de conductividad y en un 72.43% las sales disueltas, además se logró una producción de biomasa de  $3.73 * 10^7 \text{ Cell/ml}$ , cómo se observa en la Tabla 20.

En cuanto a la concentración del 20% del lactosuero pretratado, se logró una disminución del 99.23% de DQO, 99.91% de Carbohidratos, 98.92% de proteínas, 39.41% de conductividad y en un 37.54% las sales disueltas, además se logró una producción de biomasa de  $3.53 * 10^7 \text{ Cell/ml}$ , cómo se observa en la Tabla 19.

En cuanto a la concentración del 30% del lactosuero pretratado se logró una disminución del 95.15% de DQO, 99.90% de Carbohidratos, 98.10% de proteínas, además se logró una producción de biomasa de  $2.58 * 10^7 \text{ Cell/ml}$ . En cuanto a la concentración del 50% del lactosuero pretratado, se logró una disminución del 94.37% de DQO, 99.86% de Carbohidratos, 96.44% de proteínas, además se logró una producción de biomasa de  $2.25 * 10^7 \text{ Cell/ml}$ .

### 3.6.4 Filtración por membranas

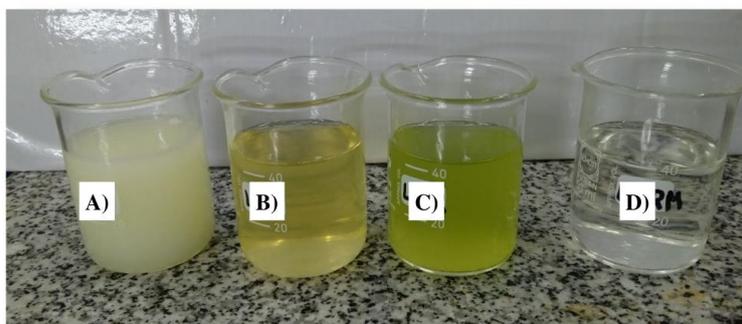
Las microalgas después del proceso fueron filtradas utilizando una membrana de filtración de alúmina porosa asimétrica tubular con un tamaño de poro de 600 nm a fin de establecer condiciones preliminares para su posterior ampliación al equipo INOMINI disponible en el laboratorio de bioprocesos de la UCSM. En la Figura 38, se observa la configuración del proceso de filtración por membranas en donde se detalla cada parte del sistema, seguidamente Se evaluó la biomasa usando el método de recuento por cámara de Neubauer<sup>50</sup>, DQO usando el método colorimétrico estándar (reflujo cerrado)<sup>47</sup>, Azúcares reductores (DNS) usando el método DNS de Miller<sup>48</sup> y Proteínas totales usando el método colorimétrico de Lowry<sup>49</sup>, conductividad, sólidos disueltos, sales y turbidez usando el multiparámetro (HANNA modelo HI98195) los cuales se observan en la Tabla. 22.



**Figura. 38.** Fotografía del sistema de microfiltración implementado: a) Membrana tubular de 600nm, b) Flujo de salida, c) Deposito de efluente tratado, d) Bomba peristáltica, e) Deposito de efluente de microalgas del raceway continuo.

**Tabla 21.** Parámetros fisicoquímicos del Cultivo de microalgas “*Chlorella vulgaris*” en un biorreactor tipo raceway alimentado con lactosuero pretratado proceso continuo y microfiltración.

Dilución del lactosuero pretratado	DQO	DNS	Proteínas	pH	Conductividad (uS/cm)	Sólidos Disueltos (ppm Tds)	Sales (PSU)
10%	261.33	0.0281	22.83	6.51	1622	812	0.082
20%	804.00	0.0321	70.83	5.34	2817	1389	1.44
30%	1774.00	0.0319	120.83	4.55	4912	2457	2.63
50%	2724.00	0.0428	393.83	5.82	7912	4125	4.13



**Figura. 39.** a) Muestra de lactosuero cavitado, b) Muestra de lactosuero pretratado por precipitación química, c) Muestra del cultivo de *Chlorella vulgaris* en el reactor raceway con lactosuero y d) Muestra de lactosuero del cultivo en raceway después de la microfiltración.

Finalmente, se puede evidenciar que el tratamiento continuo en un raceway a la concentración del 10% fue el más efectivo, ya que se pudo disminuir en un 99.52 % la cantidad de DQO, en un 99.93% los carbohidratos, en un 99.86% las proteínas, en un 75.24% la conductividad, 74.02% los sólidos disueltos y en un 97.60% las sales. La disminución de DQO es mucho mayor que la encontrada por otros estudios que utilizaron únicamente la precipitación, como es el estudio realizado por Ana R. Prazeres et al.<sup>5</sup>, en donde lograron una disminución del 43.7% de DQO. En cuanto a la turbidez, se logró una disminución de la turbidez en un 95% después de la precipitación química, lo que coincide con el valor encontrado por Ana R. Prazeres et al.<sup>5</sup>, en donde logro una disminución del 98.90% de la turbidez usando una precipitación química. También se

logró una mayor disminución de DQO que el estudio realizado por Rivas et al.<sup>17</sup> en donde se utilizó NaOH o cal en donde obtuvieron una disminución aproximada del 50%.

En el estudio realizado por Marina S. Melchors et al.<sup>18</sup> utilizaron electrofloculación para tratar lactosuero, logrando una remoción de materia orgánica y turbidez al emplear electrodos de hierro de 97.4% y 99.1%, respectivamente. Este estudio obtuvo resultados similares al presente estudio, pero la electrocoagulación resulta ser una tecnología que consume mucha energía eléctrica, por lo que es más cara que otros tratamientos. Además, se pudo observar un cambio significativo en las muestras iniciales de lactosuero y las muestras finales que prácticamente son transparentes y tienen un contenido bajo de DQO, carbohidratos, proteínas, sales, sólidos en suspensión y otros parámetros, como se observa en la Figura 39, por lo que resultaría una alternativa de tratamiento para efluentes de industrias productoras de queso o de productos lácteos.

Además de ello el agua resultante de este proceso se podría usar para el riego de cultivos, ya que según estudios que realizaron este tipo de tratamientos fisicoquímicos mencionan que, al lograr un efluente incoloro, inodoro, con menor contenido de grasas y alto contenido de nutrientes como nitrógeno o fósforo son óptimos para el cultivo<sup>2</sup>. Pero es necesario evaluar siempre la salinidad, ya que este es un factor limitante en la agricultura y no todas las plantas son resistentes a una alta salinidad, en cuanto al estudio se logró una baja salinidad por lo que resultaría óptimo para diversos cultivos<sup>2</sup>.

Se reportaron estudios que utilizan lactosuero pretratado en diversas diluciones para la fertiirrigación de tomate, logrando cultivar un tomate dulce, enriquecido con potasio, proteínas, antioxidantes como el licopeno, con propiedades organolépticas y nutricionales mejoradas, beneficiando así el cultivo de tomate<sup>2</sup>. Por lo que puede ser utilizado como fertilizante en fertiirrigación, luego de la correcta adición con agua de riego, de acuerdo a la tolerancia del cultivo y necesidades de nutrientes<sup>2,17</sup>.

Las microalgas resultantes del cultivo podrían usarse como biofertilizantes, ya que estos residuos son ricos en nitrógeno y fósforo, puede ser usado como materia prima de aceite para biocombustibles y biodiésel, biogás, entre otros<sup>36</sup>. También puede ser utilizado para la nutrición animal, ya que es una fuente de proteínas, carbohidratos, vitaminas entre otros compuestos adecuados para formulaciones de alimentos para ganado<sup>36</sup>. Existen otras

aplicaciones de las microalgas como nutrición humana, cosméticos, nutraceúticos, aditivos alimentarios, pero en este caso por el procesamiento y el efluente que se utilizó se tendría que realizar otros tratamientos previos y evaluar la calidad de las microalgas<sup>36</sup>.

#### 4. CONCLUSIONES

El Sistema de tratamiento secuencial de lactosuero por cavitación hidrodinámica como un método innovador para acelerar la precipitación química de lactosuero, subsecuente uso para el cultivo de microalgas "*Chlorella vulgaris*" en un biorreactor tipo raceway y filtración por membranas resultó ser un método eficiente permitiendo la remoción de compuestos orgánicos y la obtención de biomasa microalgal. Dicho proceso logra cerrar el círculo de consumo, ya que con los nutrientes de este efluente se logró cultivar microalgas las cuales pueden ser utilizadas para múltiples aplicaciones, y el agua obtenida al finalizar el proceso puede ser reutilizada para regadío, puesto que el agua obtenida ya cumple con los límites permisibles para su uso según el Decreto Supremo N° 003-2010-MINAM<sup>62</sup>, por el cual se aprueban los Límites Máximos Permisibles (LMP) para los efluentes de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas o Municipales (PTAR), para el sector Vivienda.

Se logró diseñar dos sistemas de cavitación hidrodinámica uno con una placa de 12 orificios y otro con un sistema de Venturi, resultando el sistema de Venturi, además este no presentó problemas en el proceso de filtración por lo que fue el sistema seleccionado para realizar este estudio.

En la evaluación del efecto de la cavitación hidrodinámica y la precipitación química, se concluyó que el lactosuero cavitado con el sistema Venturi presentó una mayor eficiencia, así también en cuanto a la precipitación básica el pH 13 y la precipitación subsecuente a pH 4 fue el que presentó una mayor remoción de las sustancias orgánicas y fue más efectivo para la precipitación ácida logrando disminuir el contenido de carbohidratos a 6.12 mg/L (84.85%), las proteínas en 12883.33 mg/L (22.00%), turbidez en 200 NTU (95.00%), conductividad 14.59 uS/cm (99.78%), sólidos disueltos en 7310.00 ppm Tds y sales 8.53 aumentaron en comparación a las muestras iniciales.

El potencial de remediación de las microalgas *Chlorella vulgaris* en un biorreactor continuo de 5L tipo raceway de efluentes de lactosuero pretratados mostró que la concentración del 10% de lactosuero pretratado fue la más eficiente, utilizando un TRH de 20.80 h, logrando una mayor producción de biomasa  $3.73 * 10^7 \text{ Cell/ml}$ , DQO 418 mg/L (99.23%), carbohidratos 0.03 mg/L (99.93%), proteínas 46.83 mg/L (99.72%), conductividad 1852 uS/cm (71.73%), sólidos disueltos de 926 ppm Tds (70.38%) y sales 0.94 PSU (72.43%).

La membrana cerámica de 600 nm para la separación de la microalga "*Chlorella vulgaris*", logró ser eficiente para la recuperación de microalgas.

## 5. RECOMENDACIONES

- Se recomienda realizar el escalamiento del sistema para poder evaluar su eficiencia con volúmenes industriales.
- Así también se recomienda realizar el análisis económico y ambiental y también optimizar los parámetros de funcionamiento del reactor para lograr una mayor eficiencia de este.
- También se recomienda utilizar tal vez alguna microalga que tenga una mayor producción de aceites como la *Scenedesmus* para poder reaprovechar aún más los nutrientes del efluente y producir biodiesel con la biomasa obtenida.
- Finalmente, se podía reaprovechar los sedimentos obtenidos en la precipitación química en procesos de obtención de proteínas o en tratamientos anaeróbicos, humedales u otras tecnologías.

## 6. REFERENCIA

1. Food and Agriculture Organization (FAO). Statistical yearbook World food and agriculture 2020. Available from:  
<https://www.fao.org/3/cb1329en/CB1329EN.pdf>.
2. Carvalho F, Prazeres AR, Rivas J. Cheese whey wastewater: Characterization and treatment. Science of The Total Environment. 2013 Feb 15;445–446:385–96.

3. Lee H, Song M, Yu Y, Hwang S. Production of *Ganoderma lucidum* mycelium using cheese whey as an alternative substrate: response surface analysis and biokinetics. *Biochem Eng J*. 2003 Aug 1;15(2):93–9.
4. Kotoupas A, Rigas F, Chalaris M. Computer-aided process design, economic evaluation and environmental impact assessment for treatment of cheese whey wastewater. *Desalination*. 2007 Jul 15;213(1–3):238–52.
5. Prazeres AR, Luz S, Fernandes F, Jerónimo E. Cheese wastewater treatment by acid and basic precipitation: Application of H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, HNO<sub>3</sub>, HCl, Ca(OH)<sub>2</sub> and NaOH. *J Environ Chem Eng*. 2020 Apr 1;8(2):103556.
6. Charalambous P, Shin J, Shin SG, Vyrides I. Anaerobic digestion of industrial dairy wastewater and cheese whey: Performance of internal circulation bioreactor and laboratory batch test at pH 5–6. *Renew Energy*. 2020 Mar 1;147:1–10.
7. Brião VB, Tavares CRG. Effluent generation by the dairy industry: preventive attitudes and opportunities. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*. 2007;24(4):487–97. Available from: <http://www.scielo.br/j/bjce/a/3hH6vBHj7rMGYrfpyMTsHjP/abstract/?lang=en>.
8. Gałog M, Przyjazny A, Boczkaj G. Effective method of treatment of industrial effluents under basic pH conditions using acoustic cavitation – A comprehensive comparison with hydrodynamic cavitation processes. *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*. 2018 Jun 1;128:103–13.
9. Gopinatha Kurup G, Adhikari B, Zisu B. Recovery of proteins and lipids from dairy wastewater using food grade sodium lignosulphonate. *Water Resour Ind*. 2019 Dec 1;22:100114.
10. Farizoglu B, Keskinler B, Yildiz E, Nuhoglu A. Simultaneous removal of C, N, P from cheese whey by jet loop membrane bioreactor (JLMBR). *J Hazard Mater*. 2007 Jul 19;146(1–2):399–407.
11. Achinas S, Achinas V, Euverink GJW. Microbiology and biochemistry of anaerobic digesters: an overview. *Bioreactors: Sustainable Design and Industrial Applications in Mitigation of GHG Emissions*. 2020 Jan 1;17–26.
12. Gutiérrez JLR, Encina PAG, Fdz-Polanco F. Anaerobic treatment of cheese-production wastewater using a UASB reactor. *Bioresour Technol*. 1991 Jan 1;37(3):271–6.
13. Daneshvar E, Zarrinmehr MJ, Koutra E, Kornaros M, Farhadian O, Bhatnagar A. Sequential cultivation of microalgae in raw and recycled dairy wastewater:

- Microalgal growth, wastewater treatment and biochemical composition. *Bioresour Technol.* 2019 Feb 1;273:556–64.
14. Zueva SB. Current legislation and methods of treatment of wastewater coming from waste electrical and electronic equipment processing. *Waste Electrical and Electronic Equipment Recycling: Aqueous Recovery Methods.* 2018 Jan 1;213–40.
  15. Chang Q. Electrical Properties. *Colloid and Interface Chemistry for Water Quality Control.* 2016;79–136. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780128093153000074>.
  16. Bridle H, Jacobsson K, Schultz AC. Sample Processing. *Waterborne Pathogens: Detection Methods and Applications.* 2014 Jan 1;67–114.
  17. Rivas J, Prazeres AR, Carvalho F. Aerobic biodegradation of precoagulated cheese whey wastewater. *J Agric Food Chem.* 2011 Mar 23;59(6):2511–7. Available from: <https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/jf104252w>.
  18. Melchior MS, Piovesan M, Becegato VR, Becegato VA, Tambourgi EB, Paulino AT. Treatment of wastewater from the dairy industry using electroflocculation and solid whey recovery. *J Environ Manage.* 2016 Nov 1;182:574–80.
  19. Moreno-Benito M, Yamal-Turbay E, Espuña A, Pérez-Moya M, Graells M. Optimal recipe design for Paracetamol degradation by advanced oxidation processes (AOPs) in a pilot plant. *Computer Aided Chemical Engineering.* 2013 Jan 1;32:943–8.
  20. Martins RC, Quinta-Ferreira RM. Final remediation of post-biological treated milk whey wastewater by ozone. *International Journal of Chemical Reactor Engineering.* 2010;8(1). Available from: <https://www.degruyter.com/document/doi/10.2202/1542-6580.2310/html>
  21. Heidari MR, Malakootian M, Boczkaj G, Sun X, Tao Y, Sonawane SH, et al. Evaluation and start-up of an electro-Fenton-sequencing batch reactor for dairy wastewater treatment. *Water Resour Ind.* 2021 Jun 1;25:100149.
  22. Comino E, Riggio V, Rosso M. Mountain cheese factory wastewater treatment with the use of a hybrid constructed wetland. *Ecol Eng.* 2011 Nov 1;37(11):1673–80.

23. Farnet AM, Prudent P, Cigna M, Gros R. Soil microbial activities in a constructed soil reed-bed under cheese-dairy farm effluents. *Bioresour Technol.* 2008 Sep 1;99(14):6198–206.
24. Nocetti E, Maine MA, Hadad HR, Mufarrege M de las M, di Luca GA, Sánchez GC. Selection of macrophytes and substrates to be used in horizontal subsurface flow wetlands for the treatment of a cheese factory wastewater. *Science of The Total Environment.* 2020 Nov 25;745:141100.
25. Dehankar SS, Pd P. Cavitation: A tool for treatment of industrial waste water. *Journal of Industrial and Environmental Chemistry.* 2021; Available from: <https://www.alliedacademies.org/journal-industrial-environmental-chemistry/>.
26. Wang B, Su H, Zhang B. Hydrodynamic cavitation as a promising route for wastewater treatment – A review. *Chemical Engineering Journal.* 2021 May 15;412:128685.
27. Gogate PR, Pandit AB. A review of imperative technologies for wastewater treatment I: oxidation technologies at ambient conditions. *Advances in Environmental Research.* 2004 Mar 1;8(3–4):501–51.
28. Mancuso G, Langone M, Andreottola G. A critical review of the current technologies in wastewater treatment plants by using hydrodynamic cavitation process: principles and applications. *Journal of Environmental Health Science and Engineering* 2020;18(1):311–33. Available from: <https://link.springer.com/article/10.1007/s40201-020-00444-5>.
29. Medina E. *Curso de Biotecnología de las Microalgas.* Cognita Conecta; 2021. Available from: <https://cognitaconecta.com/curso/microalgas/>.
30. Barsanti L. GP. *Algae: Anatomy, Biochemistry, and Biotechnology, Second Edi.* CRC Press; 2006. 361 p.
31. Bloor ISM, Attrill MJ, Jackson EL. A Review of the Factors Influencing Spawning, Early Life Stage Survival and Recruitment Variability in the Common Cuttlefish (*Sepia officinalis*). *Adv Mar Biol.* 2013 Jan 1;65:1–65.
32. Shu CH. *Fungal Fermentation for Medicinal Products. Bioprocessing for Value-Added Products from Renewable Resources: New Technologies and Applications.* 2007 Jan 1;447–63.
33. Barceló-Villalobos M, Guzmán Sánchez JL, Martín Cara I, Sánchez Molina JA, Acién Fernández FG. Analysis of mass transfer capacity in raceway reactors. *Algal Res.* 2018 Nov 1;35:91–7.

34. Zerrouki D, Henni A. Outdoor Microalgae Cultivation for Wastewater Treatment. *Application of Microalgae in Wastewater Treatment*. 2019;81–99. Available from: [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-13913-1\\_5](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-13913-1_5).
35. Qu W, Zhang C, Chen X, Ho SH. New concept in swine wastewater treatment: development of a self-sustaining synergetic microalgae-bacteria symbiosis (ABS) system to achieve environmental sustainability. *J Hazard Mater*. 2021 Sep 15;418:126264.
36. Vale MA, Ferreira A, Pires JCM, Gonçalves GAL. CO<sub>2</sub> capture using microalgae. *Advances in Carbon Capture: Methods, Technologies and Applications*. 2020 Jan 1;381–405.
37. Todd ECD. Foodborne Diseases: Overview of Emerging Food Technologies. *Encyclopedia of Food Safety*. 2014 Jan 1;1:253–61.
38. El-Dessouky HT, Ettouney HM. Reverse Osmosis. *Fundamentals of Salt Water Desalination*. 2002 Jan 1;409–37. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780444508102500099>.
39. Frenkel VS. Planning and design of membrane systems for water treatment. *Advances in Membrane Technologies for Water Treatment: Materials, Processes and Applications*. 2015 Jan 1;329–47.
40. Chiam CK, Sarbatly R. Purification of Aquacultural Water: Conventional and New Membrane-based Techniques. <http://dx.doi.org/10.1080/154221192010549766>. 2011 Apr;40(2):126–60. Available from: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/15422119.2010.549766>.
41. Frenkel VS. Planning and design of membrane systems for water treatment. *Advances in Membrane Technologies for Water Treatment: Materials, Processes and Applications*. 2015 Jan 1;329–47.
42. Bazrafshan N, Dadashi Firouzjarei M, Elliott M, Moradkhani A, Rahimpour A. Preparation and modification of low-fouling ultrafiltration membranes for cheese whey treatment by membrane bioreactor. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*. 2021 Dec 1;4:100137.
43. Mansor ES, Ali EA, Shaban AM. Tight ultrafiltration polyethersulfone membrane for cheese whey wastewater treatment. *Chemical Engineering Journal*. 2021 Mar 1;407:127175.

44. Bozorg-Haddad O, Delpasand M, Loáiciga HA. Water quality, hygiene, and health. *Economical, Political, and Social Issues in Water Resources*. 2021 Jan 1;217–57.
45. Julio César Marín L. ; Gilberto Colina A. Manual de prácticas de análisis de aguas y de residuos líquidos. 2013. 123–131 p.
46. Ismail AF, Khulbe KC, Matsuura T. RO Membrane Fouling. *Reverse Osmosis*. 2019 Jan 1;189–220.
47. Eaton AD, & FMAH. Standard methods for the examination of water and wastewater. American Public Health Association. 2005;20:4–80.
48. Miller GL. Use of Dinitrosalicylic Acid Reagent for Determination of Reducing Sugar. *Anal Chem*. 1959 Mar 1;31(3):426–8.
49. Classics Lowry, O., Rosebrough, N., Farr, A., & Randall, R. Protein measurement with the Folin phenol reagent. *J Biol Chem*. 1951;193–256.
50. EMS. Neubauer Haemocytometry. 2022 . Available from: <https://www.emsdiasum.com/docs/technical/datasheet/68052-14>.
51. Han L. Spectrometry of turbidity in surface water. *International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*. 1996;2:1395–7.
52. Home | ThinkUSAdairy by the U.S. Dairy Export Council. 2022 . Available from: <https://www.thinkusadairy.org/>
53. Flores Alarcón MAD, Arenas Jarro RY, Ahmed MA, García Bustos KA, Pacheco Tanaka DA, Terán Hilares R. Intensification of Red-G dye degradation used in the dyeing of alpaca wool by advanced oxidation processes assisted by hydrodynamic cavitation. *Ultrason Sonochem*. 2022 Sep 1;89:106144.
54. Bhat AP, Gogate PR. Cavitation-based pre-treatment of wastewater and waste sludge for improvement in the performance of biological processes: A review. *J Environ Chem Eng*. 2021 Apr 1;9(2):104743.
55. Terán Hilares R, Dionízio RM, Sánchez Muñoz S, Prado CA, de Sousa Júnior R, da Silva SS, et al. Hydrodynamic cavitation-assisted continuous pre-treatment of sugarcane bagasse for ethanol production: Effects of geometric parameters of the cavitation device. *Ultrason Sonochem*. 2020 May 1;63:104931.
56. Terán Hilares R, dos Santos JG, Shiguematsu NB, Ahmed MA, da Silva SS, Santos JC. Low-pressure homogenization of tomato juice using hydrodynamic cavitation technology: Effects on physical properties and stability of bioactive compounds. *Ultrason Sonochem*. 2019 Jun 1;54:192–7.

57. Repinc SK, Bizjan B, Budhiraja V, Dular M, Gostiša J, Brajer Humar B, et al. Integral analysis of hydrodynamic cavitation effects on waste activated sludge characteristics, potentially toxic metals, microorganisms and identification of microplastics. *Science of The Total Environment*. 2022 Feb 1;806:151414.
58. Preece KE, Hooshyar N, Krijgsman AJ, Fryer PJ, Zuidam NJ. Intensification of protein extraction from soybean processing materials using hydrodynamic cavitation. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*. 2017 Jun 1;41:47–55.
59. Ahlström C, Thuvander J, Rayner M, Matos M, Gutiérrez G, Östbring K. The Effect of Precipitation pH on Protein Recovery Yield and Emulsifying Properties in the Extraction of Protein from Cold-Pressed Rapeseed Press Cake. *Molecules*. 2022 May 1 ;27(9):2957. Available from: <https://www.mdpi.com/1420-3049/27/9/2957/htm>.
60. Akbari A, Wu J. An integrated method of isolating napin and cruciferin from defatted canola meal. *LWT - Food Science and Technology*. 2015 Nov 1;64(1):308–15.
61. Ma'mun S, Wahyudi A, Raghdanesa AS. Growth rate measurements of *Chlorella vulgaris* in a photobioreactor by Neubauer-improved counting chamber and densitometer. *IOP Conf Ser Earth Environ Sci*. 2022 Jan 1;963(1):012015. Available from: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/963/1/012015>.
62. Ministerio del Ambiente - MINAM. Límites Máximos Permisibles (LMP) para los efluentes de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas o Municipales (PTAR), para el sector Vivienda. | SINIA | Sistema Nacional de Información Ambiental. 2010. Available from: <https://sinia.minam.gob.pe/normas/limites-maximos-permisibles-lmp-efluentes-plantas-tratamiento-aguas>.

## 7. ANEXOS

Se logró publicar un artículo científico usando el sistema Venturi diseñado en este estudio en una revista indexada Q1.



ELSEVIER

Contents lists available at ScienceDirect

Ultrasonics Sonochemistry

journal homepage: [www.elsevier.com/locate/ultson](http://www.elsevier.com/locate/ultson)



## Intensification of Red-G dye degradation used in the dyeing of alpaca wool by advanced oxidation processes assisted by hydrodynamic cavitation

Miguel A.D. Flores Alarcón<sup>a</sup>, Rafaela Y. Arenas Jarro<sup>a</sup>, Muhammad Ajaz Ahmed<sup>b</sup>,  
Kiara A. García Bustos<sup>a</sup>, David A. Pacheco Tanaka<sup>a</sup>, Ruly Terán Hilares<sup>a,\*</sup>

<sup>a</sup> Laboratorio de Bioprocesos, Facultad de Ciencias Farmacéuticas, Bioquímicas y Biotecnológicas, Universidad Católica de Santa María—UCSM, Urb. San José s/n—Umacollo, Arequipa 04000, Peru

<sup>b</sup> Albarkat Girls College, Adda Kekar Stop Main Faisalabad Road, Pakistan

### ARTICLE INFO

#### Keywords:

Red-G dye  
Alpaca wool  
Hydrodynamic cavitation  
Advanced oxidation processes

### ABSTRACT

Red-G dye is one of the main dyes used in the textile industry to dye alpaca wool. Therefore, considering the large volume of processed wool in Perú, the development of efficient technologies for its removal is a present scientific issue. In this study, an integrated system based on hydrodynamic cavitation (HC) and photo-Fenton process was evaluated to remove the Red-G dye. Using a hybrid cavitation device (venturi + orifice plate), the effect of pH was evaluated, achieving 21 % of removal at pH 2 which was more than 80 % higher compared to pH 4 and 6. The effect of temperature was also evaluated in HC-system at pH 2, where percentage of dye degradation increased at lower temperatures (around 20 °C). Then, 50.7 % of dye was removed under optimized condition of HC-assisted Fenton process (FeSO<sub>4</sub>:H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> of 1:30), that value was improved strongly by UV-light incorporation in the HC-system, increasing to 99 % removal efficiency with respect to HC-assisted Fenton process and reducing the time to 15 min. Finally, the developed cavitation device in combination with photo-Fenton process removed efficiently the dye and thus could be considered an interesting option for application to real wastewater.

### 1. Introduction

Textile sector is one of the heaviest consumers of water and chemicals. Consequently, it discharges an immoderate polluted effluent [1]. There is a significant challenge in effluent treatment from textile industry since, it has a complex composition of chemicals and dyes used in the diverse stages of textile process, producing effluents with elevated load of contaminants which are difficult to remove [1,2]. Textile wastewaters are mostly toxic, they could contain carcinogenic and mutagenic compounds and have low biodegradability rate, therefore, it is imperative to remove contaminants from these effluents before release them. In addition, the dissolved solids present in the wastewater cause an increase in the concentration of soluble salts, therefore, the water cannot be recycled industrially and much less reused as water for irrigation or domestic use. Additionally, textile wastewater also contains heavy metals that are toxic for aquatic biodiversity and for humans as well [2]. The physicochemical characteristics and composition of the textile wastewater depend on different factors such as the stage of the process from which it was released, the country, the machinery used for

its management, and the season due to demands of the market for certain types of clothing for each period of the year [3].

In the world, there are more than 100 thousand commercial dyes and approximately 15 % of the dye annual production is discharged into body waters without an appropriated treatment harming the environment and society health. It is understood that textile industry is still an important economic support for some developing countries, where supply of fresh water is an important issue; therefore, it is imperative to treat textile wastewater in order to preserve unpolluted water resources which are priceless for economic and social development [4].

In Perú, the population of alpacas is 3 million 590 thousand according to the CENAGRO statistics in 2012, they are produced in places of high altitude where agriculture production is very difficult and the level of poverty is high. Due to its incredible features such as softness and luxurious, the demand for clothing of high-quality alpaca wool has been increasing which is beneficial for those poor regions [5].

Several treatment methods have been reported for removing pollutants from effluents, such as advanced oxidation processes (AOPs), which correspond to the physical and chemical mechanisms where free

\* Corresponding author.

E-mail address: [rteran@ucsm.edu.pe](mailto:rteran@ucsm.edu.pe) (R. Terán Hilares).

<https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2022.106144>

Received 2 July 2022; Received in revised form 17 August 2022; Accepted 25 August 2022

Available online 29 August 2022

1350-4177/© 2022 The Authors. Published by Elsevier B.V. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

M.A.D. Flores Alarcón et al.

Ultrasonics Sonochemistry 89 (2022) 106144

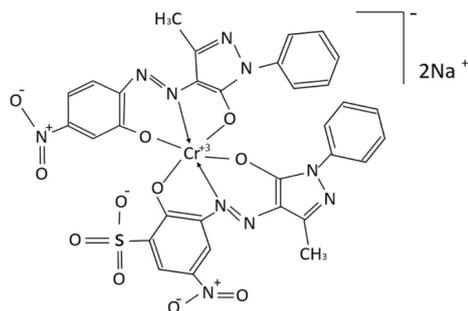


Fig. 1. Chemical structure of Red-G dye according to IUPAC.

radicals with high oxidative capacity are produced; for that reason, they are an attractive alternative to treat industrial effluents loaded with organic contaminants [6]. AOPs include processes such as Fenton oxidation, hydrogen peroxide ( $H_2O_2$ ), ozonation ( $O_3$ ), photocatalysis, ultraviolet (UV), and cavitation [7,8].

Other AOPs like  $O_3$  has a strong oxidation potential because it is broken in oxygen atoms before it is dissolved in the wastewater behaving as an oxidant agent, thus it is better to introduce the  $O_3$  flux in

the system cavitation where occurs the high rate of mass transference or turbulence [9]. Utilization of  $O_3$  mixed with an HC system can act synergically, promoting intensification of pollutants degradation requiring less  $O_3$  which is reflected in reduction of operation and energy costs. It is important to mention that if elevated quantities of  $O_3$  is used, it could damage the environment and the human health [10].

Hydrodynamic cavitation (CH) corresponds to the formation, growth and violent collapse of micro-nano bubbles generated by devices such as an orifice plate and venturi tubes. The violent collapse of cavities results in the release of large amounts of energy, hot spots (temperature = 1000–15,000 K; pressures = 500–5000 bar), intense turbulence along with liquid circulation currents, and oxidant radicals, which synergically can degrade recalcitrant contaminants or break the organic matter of any type of effluent [10]. The production of the cavitation phenomenon is generated in a reactor, operating with different devices such as plates with one or more holes, also, a venturi tube can be used while its convergent and divergent section making the pressure drop in the fluid, as well, as advanced rotational HC reactors with different configurations, and vortex diode-based cavitation devices of diverse designs. Likewise, ultrasonic devices can be employed [6].

In the present study, a cavitation device composed by an orifice plate with quadratic configuration and a venturi-type section is designed to apply it into a cavitation system for removing Red-G dye used in alpaca wool dyeing, enhancing other AOPs such as Fenton and UV.

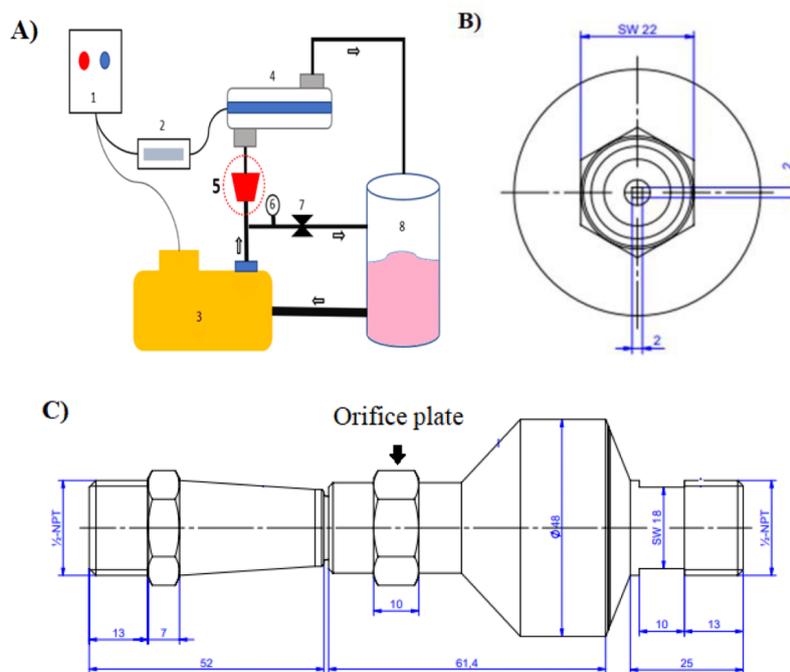


Fig. 2. Hydrodynamic cavitation system. A) schematic representation of HC-system composed by electric panel (1), UV-light generator (2), pump (3), UV-light chamber AQUA system (4), Cavitation device (5), manometer (6), valve (7), recirculation tank (8); B) orifice plate with quadratic hole; C) cavitation device, dimensions are in millimeter.

M.A.D. Flores Alarcón et al.

Ultrasonics Sonochemistry 89 (2022) 106144

## 2. Material and methods

### 2.1. Chemicals

The Red G dye ( $C_{32}H_{21}CrN_{10}O_{11}S \cdot 2Na$ , CAS N<sup>o</sup>: 70209-87-9) was supplied by a local textile company in Arequipa Perú. Hydrogen peroxide at 35 %, Iron (II) sulfate, Sulfuric acid at 95–97 % and Sodium hydroxide were obtained from Merck & Co., Inc and used without further treatment. The aqueous solutions were prepared using distilled water. In the Fig. 1 is observed the chemical structure of Red-G dye.

### 2.2. Hydrodynamic cavitation (HC) system

The hydrodynamic cavitation system for Red-G dye removal was constructed in stainless steel (Fig. 2). As observed in Fig. 2A, the system has a centrifugal pump (1.4 CV) to force the passage of solution through the orifice plate, generating cavitation. The cavitation device is composed of an orifice plate with quadratic configuration (Fig. 2B) and a venturi-type section (Fig. 2C). The selection of the dimension of the device, mainly the orifice plate, was selected by computational fluid dynamics (CFD) analysis, which resulted in the highest fraction of steam generated at 4 bar of inlet pressure in the cavitation device (data not shown).

### 2.3. Red-G dye removal under different pH and temperatures

The Red-G dye removal by hydrodynamic cavitation was evaluated. Firstly, the effect of pH (2, 4, 6, 8) was evaluated, using 5 L of solution containing 30 ppm of dye, the pH of the solutions was adjusted using sulfuric acid and sodium hydroxide, both 2 M. Experiments were performed at 4 bar of inlet pressure and 30 °C for 30 min. In the second step, the effect of temperature on the Red-G removal was evaluated at 20, 30, 40 and 50 °C, in same condition of dye concentration, pressure and time described in the first step. During the process, samples were obtained for respective analysis by spectrophotometry at 494 nm, and the respective value was converted to concentration using a standard curve.

### 2.4. Optimization of Red-G dye removal using experimental design

Experiments were carried out using a Box-Behnken experimental design in order to evaluate the effects of variables such as concentration of hydrogen peroxide (100–240 ppm), Iron (II) sulfate (2.5–7.5 ppm) and dye (20–50 ppm) in the hydrodynamic cavitation process, considering as response variable the Red-G dye removal (%). The studied variables were selected based on the previously evaluated condition for other types of dyes [8,9]. All experiments were carried out using 5 L of solution at pH 2, the inlet pressure in the cavitation device was 4.5 bar and the temperature  $25 \pm 3$  °C which was controlled by recirculating cold water through a stainless-steel coil. The process was performed for 30 min, and samples were collected periodically to analyze the dye concentration by spectrophotometry.

Design-Expert software 12.0 (stat-Ease, Inc., USA) was used to compose and evaluate an empirical model to describe the response variable (Red-G dye removal) as a function of  $H_2O_2$ ,  $FeSO_4$  and Red-G dye concentrations. Process optimization was carried out using the numerical optimization feature of the software, based on desirability function. The maximization of Red-G dye removal (%) was considered as a goal for optimization process.

### 2.5. Red-G dye removal under UV-light

The effect of UV-light incidence on the Red-G dye degradation was evaluated aiming to improve the degradation of Red-G dye in HC-assisted Fenton process. An AQUA system was used as UV-light generator (0.70 A max. operating S410RL-HO 45 W, lamp at 100 V), coupled to an HC-system as shown in Fig. 2. The experiment was performed

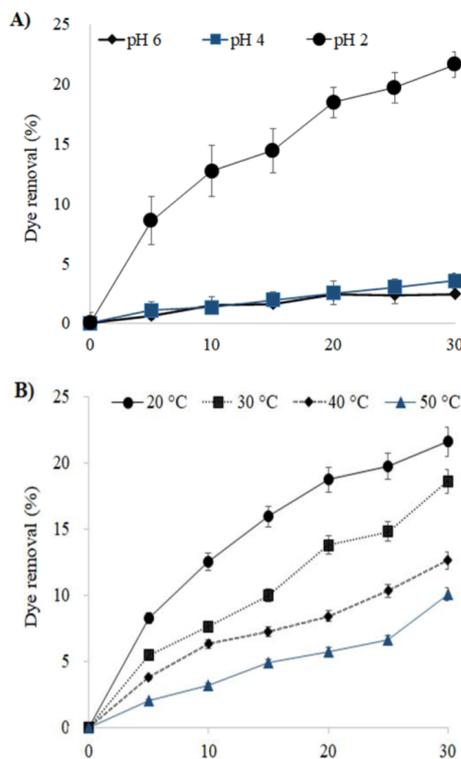


Fig. 3. Influence of pH (A) and temperature (B) on Red-G dye removal in HC-system.

during 15 min at inlet pressure of 4.5 bar, 25 °C of temperature, and Fenton process condition previously optimized. Samples were obtained periodically for respective dye analysis.

Finally, the effect of concentration of dye was evaluated at 20, 35 and 50 ppm under established HC-assisted Fenton + UV method. The obtained results were fit to first order kinetic aiming to evaluate the degradation velocity at 25 °C. Besides, spectrophotometer analysis of dyes, HPLC was used aiming to monitoring the degraded compounds produced in the process. A RP18 (124x4 mm, 5  $\mu$ m) column at wavelength of 494 nm and 30 °C oven temperature was used. The mobile phase was methanol: water (phosphoric acid 0.1 M/ sodium hexasulphonate 0.05 M 30/70) at 1.5 mL/min, and 30  $\mu$ L of sample was injected.

## 3. Results and discussion

### 3.1. Effect of pH and temperature on Red-G dye degradation in HC-process

The effect of pH on Red-G dye removal was evaluated and results are shown in Fig. 3. As observed in Fig. 3A, percentage of dye degradation at pH 4 and 6 are similar, however, at pH 2, is 84 % higher; moreover, after 30 min, 22 % of degradation was achieved respect to initial concentration. Therefore, hydrodynamic cavitation in acidic conditions favors

3

**Table 1**  
Red-G dye removal in hydrodynamic cavitation-assisted Fenton process after 30 min of treatment.

Run	Concentration (ppm)			Dye removal (%)
	Hydrogen peroxide	Iron (II) sulfate	Red-G dye	
1	240	7.5	35	43
2	170	2.5	20	25
3	170	5.0	35	30
4	170	7.5	20	47
5	100	5.0	20	28
6	170	2.5	50	41
7	100	5.0	50	34
8	240	5.0	20	43
9	170	7.5	50	31
10	170	5.0	35	32
11	240	5.0	50	41
12	240	2.5	35	32
13	100	7.5	35	32
14	100	2.5	35	28
15	170	5.0	35	30

the generation of  $\bullet\text{OH}$  radical also offering higher oxidation potential and the lower rate of recombination of  $\bullet\text{OH}$  radicals, with a significant degradation of Red-G dye, which can be associated to the oxidation of the dye by the hydroxyl radical and shockwaves generated during the violent collapse of microbubbles [11,12]. The cavitation device developed achieved unidimensional cavitation number (Cv) of 0.11, value between 0.05 and 0.15 considered as optimum for several applications [13]. Moreover, the acid condition stimulates a molecular state of dye increasing the hydrophobicity, thus, they tend to stay at the liquid-gas interface where the hydroxyl radicals are present in much higher concentrations so as to facilitate direct attack and bring out the necessary changes [14]. The effect of acid condition on dyes degradation under HC-process was previously reported, indeed, for other dyes, e.g., dye-methylene blue (MB) at pH 2 under HC combined with  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_8$  or  $\text{O}_3$  [15].

The effect of temperature was also evaluated in HC-system at pH 2. As shown in Fig. 3B, percentage of dye degradation increased at lower temperatures. For Red-G dye, rise in temperature affects solution properties like increment in the vapor pressure, resulting in more cavitation bubbles which accelerate dye degradation; however, further increase in temperature reduces pressure loss caused by wall friction since higher temperatures reduce solution viscosity, which means lower intensity of collapsing cavities causing a decrease in degradation percentage [16]. Therefore, probably the activity is higher when the dye is more insoluble. For that reason, in anionic dyes, the activity is higher at pH 2 where the compound is in the zwitterionic form. In this way, increasing the temperature, the solubility of Red G increase, decreasing thus the degradation. Finally, low temperatures (around 20 °C) were also reported as efficient for degradation of methyl orange (MO) [17] and brilliant cresyl blue [18]. Therefore, aiming to develop the process near to ambient conditions, 25 °C was selected for subsequent steps.

### 3.2. Hydrodynamic cavitation treatment and optimization

The influence of important variables on Red-G dye degradation using hydrodynamic cavitation-assisted Fenton process was evaluated and the results are presented in Table 1. As expected, the higher dye removal was observed at high concentration of Fe (II) and  $\text{H}_2\text{O}_2$  with low dye concentration, in that condition 47 % of dye was removed (run 4). Fenton reagent is extensively used for degradation of various compounds like dyes, pharmaceutical compounds and wastewater, due to effective generation of hydroxyl radicals ( $\bullet\text{OH}$ ) which is dissociated from  $\text{H}_2\text{O}_2$  molecules by reaction with ferrous ions ( $\text{Fe}^{2+}$ ) [19]. Moreover, in HC  $\bullet\text{OH}$  and  $\bullet\text{H}$  radicals are generated from water; in addition, they can react with oxygen dissolved in water to produce  $\bullet\text{O}_2^-$ , which can also contribute to Red-G dye degradation. The lowest dye

**Table 2**  
ANOVA for quadratic model composed for Red-G dye removal using HC-assisted Fenton process.

Source	Sum of squares	df	Mean square	F-value	p-value
<b>Model</b>	629.49	7	89.93	24.03	0.0002*
A- $\text{H}_2\text{O}_2$	183.27	1	183.27	48.98	0.0002*
B- $\text{FeSO}_4$	87.52	1	87.52	23.39	0.0019*
C- Red-G	1.34	1	1.34	0.3572	0.5689
AB	12.96	1	12.96	3.46	0.105
AC	21.86	1	21.86	5.84	0.0463*
BC	267.65	1	267.65	71.53	< 0.0001*
$\text{C}^2$	54.9	1	54.9	14.67	0.0065*
<b>Residual</b>	26.19	7	3.74		
Lack of Fit	24.87	5	4.97	7.49	0.1219
Pure Error	1.33	2	0.6637		
<b>Cor Total</b>	655.68	14			

\*Significant at 95% of confidential level.

degradation achieved could be associated to low concentration of Fenton reagents used, since higher concentrations were used in other studies, e.g., for real industrial wastewater (pH of effluent: 2;  $\text{H}_2\text{O}_2$ : 4.8 g/L;  $\text{H}_2\text{O}_2/\text{Fe}^{2+}$ : 3) [20].

A quadratic empirical model (Eq. (1)) was composed and an ANOVA test was performed, with the results presented in Table 2. As shown in the table, the model (Eq. (1)) has quite high R-squared value of 0.96 and was significant at 95 % of confidence level. It was also confirmed by p-value of the model (<0.05), F-value (24.03) and non-significant lack of Fit test (p-value > 0.05) at confidence level of 95 %. The most influential variables for Red-G dye removal in a hydrodynamic cavitation-assisted Fenton process correspond to  $\text{H}_2\text{O}_2$  and  $\text{FeSO}_4$ .

The equation models the behavior of the experimental design factors predicting Red-G removal percentage for given levels. As observed,  $\text{H}_2\text{O}_2$  and  $\text{FeSO}_4$  concentrations are the independent variables which have more impact by comparing their coefficients.

$$Y(\%) = 32.4 + 4.8X_1 + 3.3X_2 + 0.4X_3 + 1.8X_1X_2 - 2.3X_1X_3 - 8.2X_2X_3 + 3.8X_3^2 \quad (1)$$

Where: Y is the response variable "Red-G dye removal". Moreover,  $X_1$ ,  $X_2$  and  $X_3$  correspond to actual values of  $\text{H}_2\text{O}_2$ ,  $\text{FeSO}_4$  and Red-G dye concentration, respectively.

The interaction of two variables is shown in contour plots (Fig. 4A, B, C). As observed in Fig. 4A, dye removal is more than 40 % as  $\text{H}_2\text{O}_2$  and  $\text{FeSO}_4$  concentrations are increased, driving to enhance dye removal when dye concentration is reduced, and  $\text{H}_2\text{O}_2$  concentration is high (Fig. 4B). The same phenomenon is observed in Fig. 4C where  $\text{H}_2\text{O}_2$  concentration is increased while dye concentration is low improving the dye removal rate to more than 45 % in 30 min.

The variables were optimized aiming to maximize the Red-G dye removal. A validation experiment was also performed at the optimized conditions, which were  $\text{H}_2\text{O}_2$  (227.2 ppm),  $\text{FeSO}_4$  (6.9 ppm), dye concentration (20.1 ppm). In this case, dye removal  $50.73 \pm 4.36$  % (average  $\pm$  95 % confidence level interval) was predicted by the quadratic model, which was confirmed experimentally, with a value of  $51.21 \pm 4.85$  % (average  $\pm$  standard deviation). In the optimized condition, additional experiment aiming to evaluate the time for complete degradation of Red-G dye was carried out, achieving 77, 93 and 99 % in 60, 90 and 115 min, respectively. The removal was higher than 30 % of discoloration reported in HC-process at 5 bar in 120 min or higher than 90 % achieved in HC +  $\text{H}_2\text{O}_2$  (244 ppm) [21]. Similar result was also reported for acid violet 7 dye, achieving more than 90 % of dye in 120 min under optimized HC-assisted Fenton process (pH of 3, Inlet pressure of 4 bar, initial dye concentration of 20 ppm, 10 ppm loading of  $\text{Fe}^{2+}$  and 50 ppm of  $\text{H}_2\text{O}_2$  loading) [22].

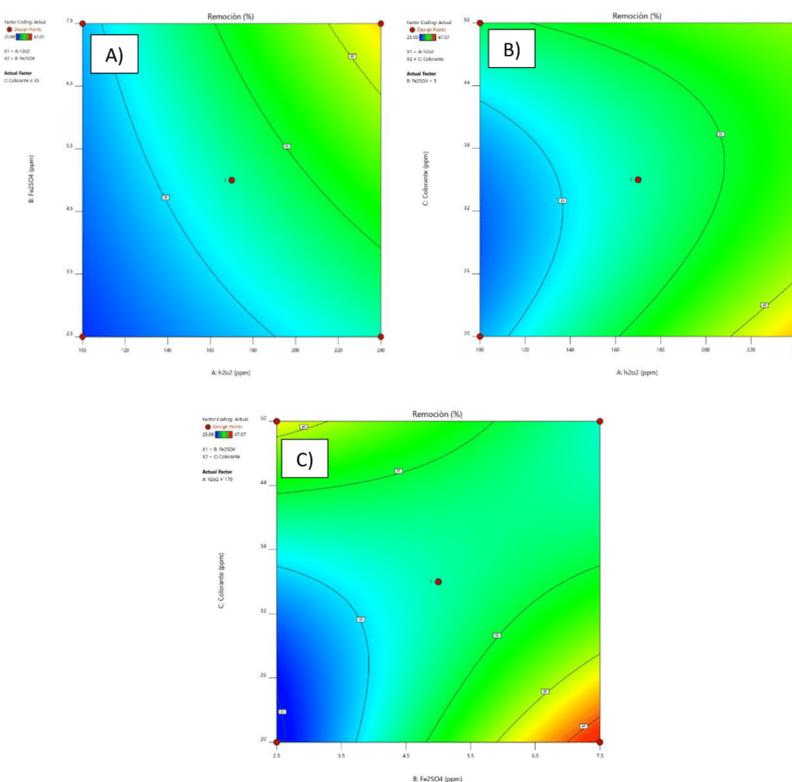


Fig. 4. Contour plots (A, C, E) for Red-G dye removal in Fenton process-assisted by hydrodynamic cavitation. A) Interaction of variables A and B. B) Interaction of variables A and C. C) Interaction of variables: B and C. In each case, the third variable was kept at its center point value.

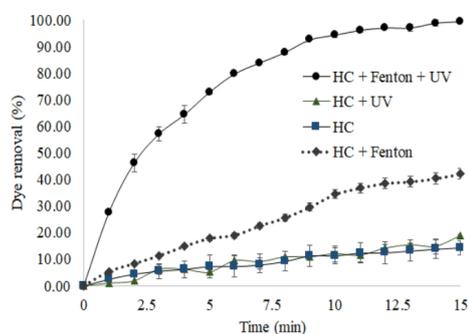


Fig. 5. Comparison of Red-G dye removal percentage by different hydrodynamic cavitation-assisted advanced oxidation processes.

### 3.3. Effect of UV-light under Photo-Fenton process-assisted by HC

The effect of UV-light incidence on degradation of Red-G dye under optimized HC-assisted Photo-Fenton were evaluated and results are shown in Fig. 5. As observed, the incorporation of UV-light in the process improves greatly the dye removal in short time, achieving 58, 81 and 86 % more than HC+ Fenton process, HC + UV and HC alone, respectively. The enhanced degradation of dye in this study can be attributed to the increase in the generation of  $\bullet\text{OH}$  radicals through photolysis of  $\text{H}_2\text{O}_2$  and reduction of  $\text{Fe}^{3+}$  ions under UV light [23]. Moreover, the amount required of  $\text{H}_2\text{O}_2$  in photo-Fenton is the half that in Fenton alone, once the light irradiation produce the reduction of Fe (III) to Fe (II), in the normal Fenton, this process is carried out using one mol of  $\text{H}_2\text{O}_2$ . The obtained result is in agreement with previously reported for mixed dye (Methylene blue, Methyl orange and Rhodamine-B) removal, achieving 98 % of decolorization in 20 min using HC+photo-Fenton (1:30 M ratio of  $\text{FeSO}_4:\text{H}_2\text{O}_2$ ) [24]. In addition, the synergy effect of HC with photolytic process was previously reported for mixed dye [24] and diclofenac sodium [25].

Finally, the developed process has the potential to application at large scale for dyes and textile wastewater treatment once the cavitation technology has been evaluated by other authors at pilot-scale, e.g., for decolorization of industrial inks and printing ink wastewater [26],

M.A.D. Flores Alarcón et al.

Ultrasonics Sonochemistry 89 (2022) 106144

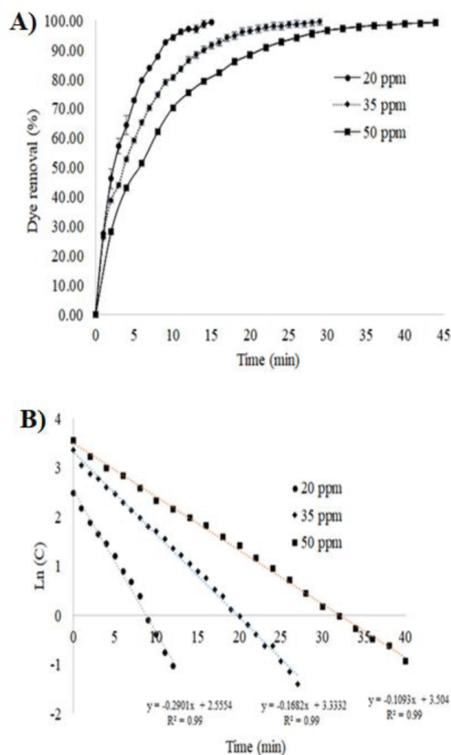


Fig. 6. A) Comparison of Red-G dye removal percentage and B) Kinetics of Red-G dye degradation considering three different dye concentrations.

bisphenols and other contaminants of emerging concern [27]. Moreover, Cavimax (<https://www.cavimax.co.uk/>), E-PIC S.R.L (<https://www.epic-srl.com/>), Arisdyne system® (<https://www.arisdyne.com/>) and others companies around the world are developing cavitation system for several applications at pilot and industrial scale, maybe one of the most relevant characteristics is the energy efficiency, simplicity to construction and the low cost.

### 3.4. Effect of Red-G dye concentration on the kinetic of the reaction

The effect of Red-G dye concentration under HC-assisted photo-Fenton process on dye degradation was evaluated and the results are presented in Fig. 6A. It has been observed that the extent of degradation of Red-G dye is inversely proportional to initial concentration; thus, increasing the concentration from 20 to 35 and 50 ppm around 10 % and 20 % was decreased, respectively. At high concentration of dye, the consumption of  $\bullet\text{OH}$  radicals will be more, hence the degradation would be also high but in terms of percentage may be low due to higher loading of concentration. Same trend was reported increasing the concentration of compounds, e.g., rhodamine-6G [28], acid Red-18 [29], imidacloprid [30] and methyl parathion [31].

The first-order kinetic was considered for the correlation and a rate constant was calculated for each of initial Red-G dye concentration, the Eq. (2) is used for this kinetic. The plotted graph confirmed that the degradation of Red-G dye in HC-process is first-order kinetics (Fig. 6B). Increasing the initial concentration from 20 to 35 and 50 ppm rate constant were decreased from  $2.9 \times 10^{-1}$  to  $1.6 \times 10^{-1}$  and  $1.1 \times 10^{-1} \text{ min}^{-1}$ , respectively.

$$\frac{dC}{dt} = -k^*C \quad (2)$$

Finally, HPLC analysis was performed aiming to evaluate the degradation of Red-G dye in other small compounds (Fig. 7). Reduction in peak height was detected; moreover, HPLC elution profile of pure Red-G dye showed retention time at 28 min. As observed in the Figure, the peak is observed only in sample obtained at 5 min of the process; at 10 and 15 min that peak is not observed, which could be due to low concentration. The oxidation produces shorter hydrophilic compounds which are attributed to the peaks at shorter times. Finally, to find out the exact identity of the broken-down compounds is necessary to carried out GC-MS analysis.

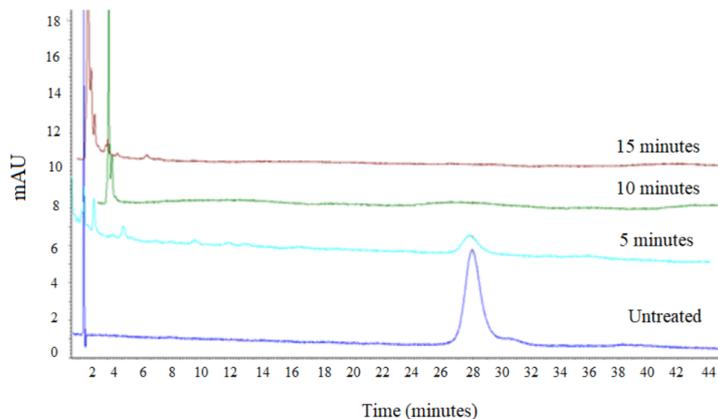


Fig. 7. HPLC analysis of Red-G dye at different times of HC-assisted photo-Fenton process.

#### 4. Conclusion

Hydrodynamic cavitation-based process has been evaluated for dye removal. The designed device was successfully used for degradation of Red-G, which was strongly improved in combination with photo-Fenton process, reducing significantly the time to 15 min. Therefore, the developed process could be considered as potential method for real wastewater generated in alpaca wool processing industry. But, aiming to determinate the degradation products will be necessary HPLC-MS, once that using only HPLC was not possible to identify.

#### CRedit authorship contribution statement

**Miguel A.D. Flores Alarcón:** Visualization, Investigation, Data curation. **Rafaela Y. Arenas Jarro:** Visualization, Investigation. **Muhammad Ajaz Ahmed:** Data curation, Writing – original draft. **Kiara A. García Bustos:** Investigation, Validation. **David A. Pacheco Tanaka:** Methodology, Writing – review & editing. **Ruly Terán Hilarés:** Conceptualization, Methodology, Software, Writing – review & editing, Supervision.

#### Declaration of Competing Interest

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

#### Data availability

Data will be made available on request.

#### Acknowledgments

This research was funded by the Universidad Católica de Santa María (UCSM)—Grant N° 28048-R-2021.

#### References

- O. Sahu, N. Singh, Significance of bioadsorption process on textile industry wastewater, in: *The Impact and Prospects of Green Chemistry for Textile Technology*, Woodhead Publishing, 2019, pp. 367–416, <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102491-1.00013-7>.
- P. Senthil Kumar, A. Saravanan, Sustainable wastewater treatments in textile sector, in: *Sustainable Fibres and Textiles*, Woodhead Publishing, 2017, pp. 323–346, <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102041-8.00011-1>.
- D.A. Yaseen, M. Scholz, Textile dye wastewater characteristics and constituents of synthetic effluents: a critical review, *Int. J. Environ. Sci. Technol.* 16 (2) (2019) 1193–1226.
- J. Qin, H. Sun, S. Zhang, L. Yi, Y. Ruan, S. Wang, Z. Zhang, J. Wang, D. Fang, Investigation on the by-pass line orifice plate assisted hydrodynamic cavitation (B-FLOPA HC) degradation of basic fuchsin (BF) in wastewater, *Sep. Purif. Technol.* 287 (2022), 120501, <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2022.120501>.
- V.M. Machaca, F.C. Pizarro, V.P. Ocsa, V.A. Bustiza Choque, J.E. Quispe Coaquira, R.M. Machaca, V.R. Cano Fuentes, K.D. Arias Huamani, Technological properties of the fibre of white Huacaya alpacas (Vicugna pacos) in the Community of Chapinmarca, Apurimac - Peru, *Revista de Investigaciones Veterinarias Del Peru*. 32 (2021), <https://doi.org/10.15381/RIVEP.V32I4.20928>.
- C. Agarkoti, P.D. Thanekar, P.R. Gogate, Cavitation based treatment of industrial wastewater: a critical review focusing on mechanisms, design aspects, operating conditions and application to real effluents, *J. Environ. Manage.* 300 (2021), 113786, <https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2021.113786>.
- D. Dixit, P. Thanekar, V.M. Bhandari, Degradation of API pollutants using hydrodynamic cavitation and process intensification, *Chem. Eng. Process. - Process Intensification* 172 (2022) 108799.
- B. Bethi, S.H. Sonawane, B.A. Bhanvase, S.S. Sonawane, Textile industry wastewater treatment by cavitation combined with fenton and ceramic nanofiltration membrane, *Chem. Eng. Process. - Process Intensification* 168 (2021), 108540, <https://doi.org/10.1016/J.CEP.2021.108540>.
- J. Wang, J. Wang, R. Yuan, J. Liu, Z. Yin, T. He, M. Wang, F. Ma, B. Zhou, H. Chen, Degradation of acid red 73 wastewater by hydrodynamic cavitation combined with ozone and its mechanism, *Environ. Res.* 210 (2022), 112954, <https://doi.org/10.1016/J.ENVRRES.2022.112954>.
- B. Wang, H. Su, B. Zhang, Hydrodynamic cavitation as a promising route for wastewater treatment – A review, *Chem. Eng. J.* 412 (2021), 128685, <https://doi.org/10.1016/J.CEJ.2021.128685>.
- M. Dular, T. Griessler-Bulc, I. Gutierrez-Aguirre, E. Heath, T. Kosjek, A. Krivograd Klemenčić, M. Oder, M. Petkovsek, N. Rački, M. Ravnikar, A. Šarc, B. Širok, M. Zupanc, M. Žitnik, B. Kompore, Use of hydrodynamic cavitation in (waste)water treatment, *Ultrason. Sonochem.* 29 (2016) 577–588, <https://doi.org/10.1016/J.ULTSONCH.2015.10.010>.
- P. Thanekar, P. Gogate, Application of hydrodynamic cavitation reactors for treatment of wastewater containing organic pollutants: intensification using hybrid approaches, *Fluids* 3 (2018) 98, <https://doi.org/10.3390/FLUIDS3040098>.
- A.P. Bhat, P.R. Gogate, Cavitation-based pre-treatment of wastewater and waste sludge for improvement in the performance of biological processes: a review, *J. Environ. Chem. Eng.* 9 (2021), 104743, <https://doi.org/10.1016/J.JECE.2020.104743>.
- S. Das, A.P. Bhat, P.R. Gogate, Degradation of dyes using hydrodynamic cavitation: process overview and cost estimation, *J. Water Process Eng.* 42 (2021), 102126, <https://doi.org/10.1016/J.JWPE.2021.102126>.
- B. Wang, T. Wang, H. Su, A dye-methylene blue (MB)-degraded by hydrodynamic cavitation (HC) and combined with other oxidants, *J. Environ. Chem. Eng.* 10 (2022), 107877, <https://doi.org/10.1016/J.JECE.2022.107877>.
- L.V. Malade, U.B. Deshannavar, Decolorisation of reactive red 120 by hydrodynamic cavitation, *Mater. Today: Proc.* 5 (9) (2018) 18400–18409.
- V. Innocenzi, M. Prisciandaro, M. Centofanti, F. Vegliò, Comparison of performances of hydrodynamic cavitation in combined treatments based on hybrid induced advanced Fenton process for degradation of azo-dyes, *J. Environ. Chem. Eng.* 7 (2019), 103171, <https://doi.org/10.1016/J.JECE.2019.103171>.
- E. Cako, K.D. Gunasekaran, R.D. Cheshmeh Soltani, G. Boczkaj, Ultrafast degradation of brilliant cresyl blue under hydrodynamic cavitation based advanced oxidation processes (AOPs), *Water Resour. Ind.* 24 (2020), 100134, <https://doi.org/10.1016/J.WRI.2020.100134>.
- J. Qin, Y. Ruan, L. Yi, H. Sun, Q. Qi, L. Zhao, Y. Xiong, J. Wang, D. Fang, Tetracycline (TC) degradation via hydrodynamic cavitation (HC) combined Fenton's reagent: optimizing geometric and operation parameters, *Chem. Eng. Process. - Process Intensification* 172 (2022), 108801, <https://doi.org/10.1016/J.CEP.2022.108801>.
- S.K. Gujar, P.R. Gogate, P. Kanthale, R. Pandey, S. Thakre, M. Agrawal, Combined oxidation processes based on ultrasound, hydrodynamic cavitation and chemical oxidants for treatment of real industrial wastewater from cellulosic fiber manufacturing sector, *Sep. Purif. Technol.* 257 (2021), 117888, <https://doi.org/10.1016/J.SEPPUR.2020.117888>.
- P.R. Gogate, G.S. Bhosale, Comparison of effectiveness of acoustic and hydrodynamic cavitation in combined treatment schemes for degradation of dye wastewaters, *Chem. Eng. Process.: Process Intensification* 71 (2013) 59–69, <https://doi.org/10.1016/J.CEP.2013.03.001>.
- L. N.J., P.R. Gogate, A.B. Pandit, Treatment of acid violet 7 dye containing effluent using the hybrid approach based on hydrodynamic cavitation, *Process Safety Environ. Protection* 153 (2021) 178–191.
- I.T. Petermel, N. Koprivanac, A.M.L. Božić, H.M. Kusić, Comparative study of UV/ $\text{TiO}_2$ , UV/ $\text{ZnO}$  and photo-Fenton processes for the organic reactive dye degradation in aqueous solution, *J. Hazard. Mater.* 148 (2007) 477–484, <https://doi.org/10.1016/J.JHAZMAT.2007.02.072>.
- M.S. Kumar, S.H. Sonawane, B.A. Bhanvase, B. Bethi, Treatment of ternary dye wastewater by hydrodynamic cavitation combined with other advanced oxidation processes (AOPs), *J. Water Process Eng.* 23 (2018) 250–256, <https://doi.org/10.1016/J.JWPE.2018.04.004>.
- M. Salehi, H. Hashemipour, M. Mirzaee, Experimental study of influencing factors and kinetics in catalytic removal of methylene blue with  $\text{TiO}_2$  nanopowder, *Am. J. Environ. Eng.* 2 (2012) 1–7, <https://doi.org/10.5923/JAJEE.20120201.01>.
- C. Zampeta, K. Bertaki, I.E. Triantaphyllidou, Z. Frontistsis, P.G. Koutsoukos, D. V. Vayenas, Pilot-scale hybrid system combining hydrodynamic cavitation and sedimentation for the decolorization of industrial inks and printing ink wastewater, *J. Environ. Manage.* 302 (2022), 114108, <https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2021.114108>.
- A. Kovacic, D. Škuřica, M. Zupanc, J. Gostiša, B. Bizjan, N. Kristofec, M.S. Dolenc, E. Heath, The removal of bisphenols and other contaminants of emerging concern by hydrodynamic cavitation: From lab-scale to pilot-scale, *Sci. Total Environ.* 743 (2020), 140724, <https://doi.org/10.1016/J.SCTOTENV.2020.140724>.
- S. Rajiroya, S. Bargole, V.K. Saharan, Degradation of a cationic dye (Rhodamine 6G) using hydrodynamic cavitation coupled with other oxidative agents: reaction mechanism and pathway, *Ultrason. Sonochem.* 34 (2017) 183–194, <https://doi.org/10.1016/J.ULTSONCH.2016.05.028>.
- P.B. Dhanke, S.M. Wagh, Intensification of the degradation of Acid RED-18 using hydrodynamic cavitation, *Emerg. Contaminants* 6 (2020) 20–32, <https://doi.org/10.1016/J.JEMCON.2019.12.001>.
- P.N. Patil, S.D. Bote, P.R. Gogate, Degradation of imidacloprid using combined advanced oxidation processes based on hydrodynamic cavitation, *Ultrason. Sonochem.* 21 (2014) 1770–1777, <https://doi.org/10.1016/J.ULTSONCH.2014.02.024>.
- P.N. Patil, P.R. Gogate, Degradation of methyl parathion using hydrodynamic cavitation: effect of operating parameters and intensification using additives, *Sep. Purif. Technol.* 95 (2012) 172–179, <https://doi.org/10.1016/J.SEPPUR.2012.04.019>.

También se presentó un poster en el 2do Encuentro Iberoamericano sobre tratamiento de agua mediante tecnologías Innovadoras y Sustentables Red CYTED – AMARU



## Tratamiento de lactosuero por cavitación hidrodinámica, precipitación química y subsecuente cultivo continuo de microalgas en un biorreactor tipo raceway

Rafaela Arenas Jarro, Ruly Terán Hilarés  
74528030@ucsm.edu.pe; rteran@ucsm.edu.pe



---

### INTRODUCTION

El lactosuero es uno de los principales subproductos de la producción de queso, ya que representa entre un 85 y 95% del volumen de leche. El cual contiene diferentes nutrientes como son la lactosa (4.5-5.0% p/v), proteínas solubles (0.6-0.8% p/v), lípidos (0.4-0.5% p/v), y sales minerales (8-19% extracto seco). Al año se producen alrededor de 145 millones de toneladas de lactosuero por lo que resulta un gran problema tanto para el medio ambiente como para la salud debido a su alta carga orgánica. A esto le añadimos que estos efluentes no pueden ser vertidos a plantas de tratamiento de aguas convencionales debido a su alta carga orgánica, por lo que se están realizando diferentes tratamientos entre ellos biológicos, químicos, electroquímicos, entre otros, para lograr disminuir la carga orgánica de estos efluentes y lograr aprovechar los nutrientes.

### MATERIALS AND METHODS

1 Caracterización del efluente



2 Cavitación hidrodinámica



3 Precipitación química

Precipitación básica



Precipitación ácida



4 Cultivo continuo Raceway



### RESULTS

En este estudio se logró disminuir el DQO en el tratamiento básico y ácido en un 8.31% y 30.25% respectivamente a un pH 13 y 4 respectivamente, en cuanto a azúcares se disminuyó en un 79.55% y 75.92% a un pH 11 y pH 13 respectivamente, así también se logró cultivar las microalgas de una manera eficiente a una concentración de 10 y 20%.




Fig 1. Precipitación química: a) Comparación de la precipitación básica en pH 8, 9, 10, 11, 12 y 13, b) Precipitación ácida.

### Table 1. Parametros del efluente cavitado y sin cavitado en el pretratamiento químico.

Muestra	Turbidez	pH	Conductividad (uS/cm)	Sólidos Disueltos (ppm Td)	Sales (PSU)	DQO (mg/l O2)	DMS (mg/l)	Proteínas (mg/l)
Lactosuero sin cavitado	409	5.3	20420	10.27	12.31	6002.22	40.54	6750.00
Lactosuero cavitado Venturi	200	1.3	14580	11.1	8.53	6086.67	6.12	12700.00
	54.1	4	27000	13.84	16.83	46800.00	16.82	5950.00

#### Velocidad de crecimiento de *Chlorella vulgaris*





Parámetros	Valor
pH	1.57 día-1
Tiempo de Aplicación	0.48 día
Tiempo	20.83 h
Volumen total	5 L

Fig 2. Velocidad de crecimiento y parametros usados en el cultivo continuo de microalgas *Chlorella vulgaris* en un biorreactor tipo Raceway.

### Tabla 2. Parametros del efluentes obtenido en el cultivo continuo de microalgas en un biorreactor de 5L tipo raceway y despues de la filtracion por membranas de 600nm.

Tratamiento	pH	Conductividad (uS/cm)	Sólidos Disueltos (ppm Td)	Sales (PSU)	DQO (mg/l O2)	DMS (mg/l)	Proteínas (mg/l)	
Raceway	10%	6.36	1852	928	0.94	418.00	0.0287	46.83
	20%	5.34	3969	2010	2.13	456.00	0.0345	178.17
	30%	4.62	7296	3636	4	2644.00	0.0418	314.17
	50%	5.8	15090	7330	8.78	3065.00	0.0574	587.83
	100%	6.55	1622	812	0.082	261.93	0.0291	22.83
Membranas	20%	5.34	2817	1389	1.44	805.00	0.0321	70.83
	30%	4.55	4912	2457	2.63	1774.00	0.0319	120.83
	50%	5.82	7912	4125	4.13	2724.00	0.0428	393.83

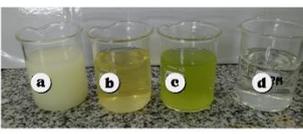


Fig 3. Comparación de efluentes: a) Lactosuero cavitado, b) Lactosuero pretratado, c) Lactosuero en cultivo de microalgas, d) Lactosuero despues de membranas de filtración.

### CONCLUSIONS

Se logró tratar el lactosuero por cavitación hidrodinámica, precipitación química y subsecuente cultivo continuo de microalgas en un biorreactor tipo raceway. El presente trabajo demostró el potencial de la cavitación hidrodinámica para desestabilizar y acelerar la precipitación química (alcalino y ácido) de los componentes del lactosuero. Se requiere mas estudios a fin de optimizar y facilitar su escalabilidad.

### REFERENCES

- Prazeres, A.R., Fernandes, F., Madeira, L., Luz, S., Albuquerque, A., Simões, R., Beltrán, F., Jerónimo, E., Rivas, J., 2019. Treatment of slaughterhouse wastewater by acid precipitation (H2SO4, HCl and HNO3) and oxidation (Ca(ClO)2, H2O2 and CaO2). J. Environmental Management, 250, 109558.
- Terán Hilarés, R., García Bustos, K., Sánchez Vera, F., Colina Andrade, G., Pacheco Tanaka, D., 2021. Acid precipitation followed by microalgae (*Chlorella vulgaris*) cultivation as a new approach for poultry slaughterhouse wastewater treatment. Bioresource Technology, 335, 125284

## ACKNOWLEDGMENT






**Tabla 22.** Equipos e instrumentos usados.

Equipo	Marca	Foto
<p>Balanza analítica Adventurer</p>	<p>OHAUS</p>	
<p>Baño de enfriamiento</p>	<p>DAIHAN</p>	
<p>Serpentín</p>	<p>-</p>	

<p>Microscopio</p>	<p>AmScope</p>	
<p>Vortex</p>	<p>VWR</p>	
<p>pH metro PC 2700</p>	<p>FISMET BIOMÉDICA</p>	

<p>Bombas peristálticas YZ1515x</p>	<p>Longer Pump</p>	
<p>Destilador de agua</p>	<p>GFL</p>	
<p>Espectrofotómetro GENESYS™ 180 UVVis</p>	<p>Thermo Fisher Scientific</p>	
<p>Estufa de secado y esterilización Conterm, analógica</p>	<p>J.P. SELECTA</p>	

<p>Digestor TR 320</p>	<p>Spectroquant</p>	 <p>Digestor 24 tubos</p> <p>TR 420 0 1.85</p>
<p>Centrifuga</p>	<p>PLC SERIES</p>	 <p>CAUTION DO NOT OPEN LID UNTIL MOTOR IS COMPLETELY STOPPED</p> <p>TIME</p> <p>CENTRIFUGE, PLC SERIES</p>
<p>Membrana</p>	<p>Nanopore</p>	
<p>Cámara Neubauer</p>	<p>Marienfeld</p>	 <p>Tiefe - Depth Profondeur 0,100 mm</p> <p>0.0025 mm<sup>2</sup></p> <p>Neubauer improved bright-line</p> <p>MARIENFELD</p>

<p>Turbidímetro</p>	<p>TL2300</p>	
<p>Analizador de tamaño de partícula (Zetasizer)</p>	<p>DLS 3690 Malvern analytical</p>	
<p>Multiparámetro HI98195</p>	<p>HANNA</p>	
<p>Celdas rectangulares de cuarzo Spectrosil 10 mm</p>	<p>VWR North American</p>	

<p>Celdas de vidrio para turbidímetro 20849</p>	<p>Spectrum Laboratories Inc.</p>	
<p>Celdas rectangulares de vidrio 10 mm</p>	<p>Spectroquant</p>	
<p>Autoclave Wisd WAC- 60</p>	<p>WITEG Labortechnik</p>	

Stocks	Reactivos	Cantidad	Volumen	total	2 litros de BBM del Stock
1	NaNO <sub>3</sub>	12.5 g	250 ml		10 ml
2	MgSO <sub>4</sub> .7H <sub>2</sub> O	3.75 g	100 ml		4 ml
3	NaCl	1.25 g	100 ml		4 ml
	CaCl <sub>2</sub> .7H <sub>2</sub> O	1.25 g			
4	K <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub>	3.75 g	100 ml		4 ml
	KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>	8.75 g			
5	ZnSO <sub>4</sub> .7H <sub>2</sub> O	0.88 g	100 ml		2 ml
	MnCl <sub>2</sub> .4H <sub>2</sub> O	0.144 g			
	MoO <sub>3</sub>	0.07 g			
6	CuSO <sub>4</sub> .5H <sub>2</sub> O	0.157 g	100 ml		2 ml
	Co(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> .6H <sub>2</sub> O	0.049 g			
7	H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>	1.142 g	100 ml		2 ml
8	EDTA	5 g	100 ml		2 ml
	KOH	3.1 g			
9	FeSO <sub>4</sub> .7H <sub>2</sub> O	0.48 g	100 ml		2 ml
	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> Concentrado	100 ul			

# TRATAMIENTO DE LACTOSUERO POR CAVITACIÓN HIDRODINÁMICA POSTERIOR PRECIPITACIÓN QUÍMICA Y SUBSECUENTE USO PARA CULTIVO DE MICROALGAS (*Chlorella vulgaris*) EN UN BIORREACTOR TIPO RACEWAY

## INFORME DE ORIGINALIDAD

19%

INDICE DE SIMILITUD

17%

FUENTES DE INTERNET

13%

PUBLICACIONES

8%

TRABAJOS DEL  
ESTUDIANTE

## FUENTES PRIMARIAS

1	<a href="http://pirhua.udep.edu.pe">pirhua.udep.edu.pe</a> Fuente de Internet	1%
2	Jacales Rojas Dafne Lorena. "Elaboración de una bebida a base de lactosuero dulce, deslactosado bovino y caprino adicionada con pulpa de fruta", TESIUNAM, 2015 Publicación	1%
3	<a href="http://1library.co">1library.co</a> Fuente de Internet	<1%
4	<a href="http://dina.concytec.gob.pe">dina.concytec.gob.pe</a> Fuente de Internet	<1%
5	<a href="http://repositorio.uncp.edu.pe">repositorio.uncp.edu.pe</a> Fuente de Internet	<1%
6	Xun Sun, Shuai Liu, Sivakumar Manickam, Yang Tao, Joon Yong Yoon, Xiaoxu Xuan. "Intensification of biodiesel production by hydrodynamic cavitation: A critical review",	<1%

# Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2023

Publicación

---

7	<a href="http://wjgnet.com">wjgnet.com</a> Fuente de Internet	<1 %
8	Cano Paredes Aidali Lucero. "Perfil sensorial de bebidas a base de lactosuero", TESIUNAM, 2016 Publicación	<1 %
9	<a href="http://repositorio.ipbeja.pt">repositorio.ipbeja.pt</a> Fuente de Internet	<1 %
10	<a href="http://repositorio.unam.edu.pe">repositorio.unam.edu.pe</a> Fuente de Internet	<1 %
11	Jesús Alfredo Rodríguez-Hernández, Rafael G. Araújo, Itzel Y. López-Pacheco, Laura Isabel Rodas-Zuluaga et al. "Environmental persistence, detection, and mitigation of endocrine disrupting contaminants in wastewater treatment plants – A review with a focus on tertiary treatment technologies", Environmental Science: Advances, 2022 Publicación	<1 %
12	<a href="http://www.frontiersin.org">www.frontiersin.org</a> Fuente de Internet	<1 %
13	<a href="http://repositorio.unac.edu.pe">repositorio.unac.edu.pe</a> Fuente de Internet	<1 %

---

14	<a href="https://es.scribd.com">es.scribd.com</a> Fuente de Internet	<1 %
15	<a href="http://www.digesa.minsa.gob.pe">www.digesa.minsa.gob.pe</a> Fuente de Internet	<1 %
16	<a href="http://core.ac.uk">core.ac.uk</a> Fuente de Internet	<1 %
17	<a href="http://masam.cuautitlan.unam.mx">masam.cuautitlan.unam.mx</a> Fuente de Internet	<1 %
18	<a href="http://repositorio.continental.edu.pe">repositorio.continental.edu.pe</a> Fuente de Internet	<1 %
19	<a href="http://repositorio.unh.edu.pe">repositorio.unh.edu.pe</a> Fuente de Internet	<1 %
20	<a href="http://sedici.unlp.edu.ar">sedici.unlp.edu.ar</a> Fuente de Internet	<1 %
21	Ruly Terán Hilaes, Diego F. Atoche-Garay, Daniel A. Pinto Pagaza, Muhammad Ajaz Ahmed et al. "Promising physicochemical technologies for poultry slaughterhouse wastewater treatment: A critical review", Journal of Environmental Chemical Engineering, 2021 Publicación	<1 %
22	<a href="http://hrcak.srce.hr">hrcak.srce.hr</a> Fuente de Internet	<1 %
23	<a href="http://lpnu.ua">lpnu.ua</a>	

Fuente de Internet

<1 %

24

[patents.google.com](https://patents.google.com)

Fuente de Internet

<1 %

25

[coek.info](https://coek.info)

Fuente de Internet

<1 %

26

[nemertes.library.upatras.gr](https://nemertes.library.upatras.gr)

Fuente de Internet

<1 %

27

[www2.mdpi.com](https://www2.mdpi.com)

Fuente de Internet

<1 %

28

Submitted to Crown College

Trabajo del estudiante

<1 %

29

[www.wjgnet.com](https://www.wjgnet.com)

Fuente de Internet

<1 %

30

[www.biorxiv.org](https://www.biorxiv.org)

Fuente de Internet

<1 %

31

[www.rssb.co.uk](https://www.rssb.co.uk)

Fuente de Internet

<1 %

32

[dspace.espol.edu.ec](https://dspace.espol.edu.ec)

Fuente de Internet

<1 %

33

Submitted to University of Plymouth

Trabajo del estudiante

<1 %

34

[www.degruyter.com](https://www.degruyter.com)

Fuente de Internet

<1 %

35	futur.upc.edu Fuente de Internet	<1 %
36	www.coursehero.com Fuente de Internet	<1 %
37	cdigital.uv.mx Fuente de Internet	<1 %
38	llamas.yolasite.com Fuente de Internet	<1 %
39	research.birmingham.ac.uk Fuente de Internet	<1 %
40	Adnan Khan, Sumeet Malik, Nisar Ali, Mohsin Khurshid, Muhammad Zubair, Xiaoyan Gao, Lingli Ni, Muhammad Bilal. "Polymers-based nanocomposites for decontamination of water matrices", Elsevier BV, 2023 Publicación	<1 %
41	Rajan Subramanian, Sathish Sundararaman, Ainash Baidullayeva, Balaji Venkateswaran et al. "Evaluation of SBRP and BRP at various process conditions for the removal of pollutants from dairy effluent: optimization and kinetic studies", Biomass Conversion and Biorefinery, 2022 Publicación	<1 %
42	Submitted to University of Exeter Trabajo del estudiante	<1 %

43	<a href="http://www.ijrasb.com">www.ijrasb.com</a> Fuente de Internet	<1 %
44	Soto Vega Elena. "Influencia de los alelos HLA clase I, clase II y el polimorfismo del promotor del TNF- [alfa] en la longevidad de mestizos mexicanos", TESIUNAM, 2006 Publicación	<1 %
45	<a href="http://digibuo.uniovi.es">digibuo.uniovi.es</a> Fuente de Internet	<1 %
46	<a href="http://eprints.whiterose.ac.uk">eprints.whiterose.ac.uk</a> Fuente de Internet	<1 %
47	<a href="http://repositorio.unap.edu.pe">repositorio.unap.edu.pe</a> Fuente de Internet	<1 %
48	<a href="http://solofaq.com">solofaq.com</a> Fuente de Internet	<1 %
49	Francesca Marazzi, Micol Bellucci, Tania Fantasia, Elena Ficara, Valeria Mezzanotte. "Interactions between Microalgae and Bacteria in the Treatment of Wastewater from Milk Whey Processing", Water, 2020 Publicación	<1 %
50	<a href="http://semaphore.uqar.ca">semaphore.uqar.ca</a> Fuente de Internet	<1 %
51	JULIO FRANCISCO SANZ CARBONELL. "TRATAMIENTO DE AGUAS TEXTILES INDUSTRIALES MEDIANTE FOTOCATÁLISIS	<1 %

# SOLAR Y REUTILIZACIÓN EN NUEVAS TINTURAS", 'Universitat Politecnica de Valencia', 2016

Fuente de Internet

52

[documents.mx](https://documents.mx)

Fuente de Internet

<1 %

53

[repositorio.unsm.edu.pe](https://repositorio.unsm.edu.pe)

Fuente de Internet

<1 %

54

[www.scribd.com](https://www.scribd.com)

Fuente de Internet

<1 %

55

Submitted to Escuela Politecnica Nacional

Trabajo del estudiante

<1 %

56

Isais López Nimbe Mayte. "Diversidad de especies del género Chlamydomonas de la cantera oriente y evaluación de su crecimiento bajo diferentes condiciones de cultivo", TESIUNAM, 2019

Publicación

<1 %

57

[oa.upm.es](https://oa.upm.es)

Fuente de Internet

<1 %

58

[repository.udsm.ac.tz:8080](https://repository.udsm.ac.tz:8080)

Fuente de Internet

<1 %

59

Norhayati Yusuf, Nur Maisarah Athirah, Suhaila A. "Antioxidative Responses of Chlorella vulgaris Under Different Growth Phases", Squalen Bulletin of Marine and

<1 %

# Fisheries Postharvest and Biotechnology, 2022

Publicación

60

Submitted to University of Hong Kong

Trabajo del estudiante

<1 %

61

repositorio.ucsg.edu.ec

Fuente de Internet

<1 %

62

www.proligno.ro

Fuente de Internet

<1 %

63

Ravena Casemiro Oliveira, Laiza Brito Ribeiro, Ticiane Cavalcante de Souza, Lucas Almeida de Freitas et al. "Carbohydrate-active enzymes in the production of lactose-derived tagatose", Elsevier BV, 2023

Publicación

<1 %

64

Submitted to Universidad de Cádiz

Trabajo del estudiante

<1 %

65

Submitted to Universidad Nacional del Centro del Peru

Trabajo del estudiante

<1 %

66

Submitted to University of Iowa

Trabajo del estudiante

<1 %

67

dspace.ups.edu.ec

Fuente de Internet

<1 %

68

es.differbetween.com

Fuente de Internet

<1 %

69	repository.javeriana.edu.co Fuente de Internet	<1 %
70	journals.plos.org Fuente de Internet	<1 %
71	oamjms.eu Fuente de Internet	<1 %
72	www.scholarexpress.net Fuente de Internet	<1 %
73	www.ajbls.com Fuente de Internet	<1 %
74	Geethu Gopinatha Kurup, Benu Adhikari, Bogdan Zisu. "Recovery of proteins and lipids from dairy wastewater using food grade sodium lignosulphonate", Water Resources and Industry, 2019 Publicación	<1 %
75	López Juárez Alfonso. "Aportación al estudio de los mecanismos de biolixiviación de concentrados de cobre, calcopirita (CuFeS <sub>2</sub> ), en presencia de agentes catalíticos", TESIUNAM, 2008 Publicación	<1 %
76	Peña García Ariana. "Especiación de algunos metales presentes en el efluente líquido de la operación unitaria de flotación de una mina	<1 %

# en un reactor anaerobio de lecho de lodos de flujo ascendente (RALLFA)", TESIUNAM, 2022

Publicación

77

[bibliotecas.unsa.edu.pe](http://bibliotecas.unsa.edu.pe)

Fuente de Internet

<1 %

78

[worldwidescience.org](http://worldwidescience.org)

Fuente de Internet

<1 %

79

[www.us.es](http://www.us.es)

Fuente de Internet

<1 %

80

[pdfslide.net](http://pdfslide.net)

Fuente de Internet

<1 %

81

[uvidok.rcub.bg.ac.rs](http://uvidok.rcub.bg.ac.rs)

Fuente de Internet

<1 %

82

Cisneros Lira José Guadalupe. "Efecto de la exposicion cronica a humo de tabaco sobre la lesion fibrosante pulmonar inducida con bleomicina", TESIUNAM, 2004

Publicación

<1 %

83

Reyes Ruiz Carlos. "Estudio microestructural y mecánico de una aleación de aluminio 6061-t6 sometida a un proceso de extrusión angular en canal de sección constante (ECAP)", TESIUNAM, 2016

Publicación

<1 %

84

[es.slideshare.net](http://es.slideshare.net)

Fuente de Internet

<1 %

85	<a href="http://cienciadigital.org">cienciadigital.org</a> Fuente de Internet	<1 %
86	<a href="http://frasesdeexito.blogspot.com">frasesdeexito.blogspot.com</a> Fuente de Internet	<1 %
87	<a href="http://tesis.ipn.mx">tesis.ipn.mx</a> Fuente de Internet	<1 %
88	Hernández González Ingrid Concepción. "Aprovechamiento de residuos de productos cárnicos para el cultivo de bacterias lácticas con actividad antimicrobiana", TESIUNAM, 2016 Publicación	<1 %
89	Morales Toledo Laura. "Obtención de derivados fenólicos mediante reacciones de acoplamiento oxidativo promovido por peroxidasas de diferentes fuentes vegetales", TESIUNAM, 2013 Publicación	<1 %
90	Márquez Araque Alis Teresa. "Evaluación de las enzimas fibrolíticas producidas por los hongos <i>Trametes sp.</i> , <i>Pleurotus ostreatus</i> y <i>Aspergillus niger</i> ", TESIUNAM, 2008 Publicación	<1 %
91	Submitted to Wageningen University Trabajo del estudiante	<1 %
92	<a href="http://dokumen.pub">dokumen.pub</a> Fuente de Internet	

<1 %

93

[scholars.ncu.edu.tw](http://scholars.ncu.edu.tw)

Fuente de Internet

<1 %

94

Arcila Henao Juan Sebastián. "Generación de gránulos y aglomerados microalga - bacteria para el tratamiento de aguas residuales municipales y producción de metano", TESIUNAM, 2017

Publicación

<1 %

95

Chacon Romero Mariana. "Estudio de la variabilidad fenotipica de Leuconostoc mesenteroides NRRL B-512 F", TESIUNAM, 2004

Publicación

<1 %

96

Submitted to Pontificia Universidad Catolica del Peru

Trabajo del estudiante

<1 %

97

[acikerisim.nku.edu.tr:8080](http://acikerisim.nku.edu.tr:8080)

Fuente de Internet

<1 %

98

[www.fedo.unina.it](http://www.fedo.unina.it)

Fuente de Internet

<1 %

99

[www.tsijournals.com](http://www.tsijournals.com)

Fuente de Internet

<1 %

100

Atilano Alvarado Arturo Huitzilihuitl. "Enmiendas orgánicas e inorgánicas y

<1 %

maguey mezcalero: agave angustifolia haw, en el intemperismo de tepetate fragmentado en condiciones de invernadero", TESIUNAM, 2014

Publicación

---

101 Carrillo Ortiz Blanca Adela. "Estrategia de operación automática para la producción de hidrógeno a partir de suero de leche", TESIUNAM, 2021 <1 %  
Publicación

---

102 Submitted to Roma Mitchell Secondary College <1 %  
Trabajo del estudiante

---

103 Submitted to Universidad Andina Nestor Caceres Velasquez <1 %  
Trabajo del estudiante

---

104 docplayer.com.br <1 %  
Fuente de Internet

---

105 vav.griffel.net <1 %  
Fuente de Internet

---

106 Amábilis Sosa Leonel Ernesto. "Análisis del patrón de flujo en humedales artificiales de flujo horizontal subsuperficial", TESIUNAM, 2010 <1 %  
Publicación

---

107 Cárdenas Monroy Christian Adrián. "Expresión y función de la oxidasa alterna <1 %

(AOX1) de Ustilago maydis, ante la inhibición de la vía citocrómica", TESIUNAM, 2017

Publicación

---

108

Fthenakis, Vasilis, Adam A. Atia, Olivier Morin, Raed Bkayrat, and Parikhit Sinha. "New prospects for PV powered water desalination plants: case studies in Saudi Arabia : New prospects for PV powered water desalination plants", Progress in Photovoltaics Research and Applications, 2015.

Publicación

---

<1 %

109

Thais Bascuas, Martina Kropp, Nina Harmening, Brittany M. Wong, Sandra Johnen, Zsuzsanna Izsvák, Gabriele Thumann. "Isolation, Culture, and Genetic Engineering of Mammalian Primary Pigment Epithelial Cells for Non-Viral Gene Therapy", Journal of Visualized Experiments, 2021

Publicación

---

<1 %

110

Submitted to Universidad Nacional de Colombia

Trabajo del estudiante

---

<1 %

111

Yao Cui, Ziqi Lv, Weidong Wang, Kanghui Zhang, Wujin Li, Xuan Zhao, Zhiqiang Xu. "A real-time analysis system for filtrate state in plate-and-frame filter press process based on the machine vision", Measurement, 2022

Publicación

---

<1 %

112	<a href="http://nauka.bsmu.edu.ua">nauka.bsmu.edu.ua</a> Fuente de Internet	<1 %
113	<a href="http://ouci.dntb.gov.ua">ouci.dntb.gov.ua</a> Fuente de Internet	<1 %
114	<a href="http://repositorio.unapiquitos.edu.pe">repositorio.unapiquitos.edu.pe</a> Fuente de Internet	<1 %
115	<a href="http://repositorio.usp.br">repositorio.usp.br</a> Fuente de Internet	<1 %
116	<a href="http://zaguan.unizar.es">zaguan.unizar.es</a> Fuente de Internet	<1 %
117	González Ruiz Diego Gonzalo. "Aislamiento y caracterización de proteínas de lactosuero para la elaboración de una bebida carbonatada con contenido proteico", TESIUNAM, 2017 Publicación	<1 %
118	Orozco Damián Fátima. "Efecto de las temperaturas intercríticas en la resistencia a la fatiga en un acero de alto contenido de carbono", TESIUNAM, 2022 Publicación	<1 %
119	Prato García Dorian. "Tratamiento de colorantes azo mediante un sistema híbrido químico biológico", TESIUNAM, 2010 Publicación	<1 %

120	Valente Ramírez Luis Ángel. "Tratamiento y disposición de lodos generados de procesos fisicoquímicos de agua congénita", TESIUNAM, 2020 Publicación	<1 %
121	cloud.google.com Fuente de Internet	<1 %
122	dspace.esoch.edu.ec Fuente de Internet	<1 %
123	fisicarecreativa.com Fuente de Internet	<1 %
124	go.gale.com Fuente de Internet	<1 %
125	mdpi.com Fuente de Internet	<1 %
126	plata.uda.cl Fuente de Internet	<1 %
127	register.consilium.eu.int Fuente de Internet	<1 %
128	repositoriobibliotecas.uv.cl Fuente de Internet	<1 %
129	vdocuments.site Fuente de Internet	<1 %
130	wiki2.org Fuente de Internet	<1 %

---

131	<a href="http://www.bonatura.com">www.bonatura.com</a> Fuente de Internet	<1 %
132	<a href="http://www.dykinson.com">www.dykinson.com</a> Fuente de Internet	<1 %
133	<a href="http://www.lajar.cl">www.lajar.cl</a> Fuente de Internet	<1 %
134	Angélica Andrea Mendez-Revollo, Yuly Vannesa Torres-Arevalo, Adela Tatiana Rodríguez-Chaparro. "Effect of Organic Loading Rate in Hydrogen Production with Different Support Materials in Anaerobic Fixed-Bed Reactors", Ingeniería, investigación y tecnología, 2017 Publicación	<1 %
135	Qing Chang. "Electrical Properties", Elsevier BV, 2016 Publicación	<1 %
136	SERV GEOGRAFICOS Y MEDIO AMBIENTE SAC. "EIA-D del Proyecto Desarrollo e Instalaciones de Producción del Lote 131-IGA0001086", R.D. N° 108-2017-SENACE/DCA, 2021 Publicación	<1 %
137	<a href="http://burjcdigital.urjc.es">burjcdigital.urjc.es</a> Fuente de Internet	<1 %
138	<a href="http://doku.pub">doku.pub</a> Fuente de Internet	<1 %

---

139	<a href="http://ediciones.inca.edu.cu">ediciones.inca.edu.cu</a> Fuente de Internet	<1 %
140	<a href="http://fccid.io">fccid.io</a> Fuente de Internet	<1 %
141	<a href="http://issuu.com">issuu.com</a> Fuente de Internet	<1 %
142	<a href="http://repositorio.ufscar.br">repositorio.ufscar.br</a> Fuente de Internet	<1 %
143	<a href="http://scl.es">scl.es</a> Fuente de Internet	<1 %
144	<a href="http://search.bvsalud.org">search.bvsalud.org</a> Fuente de Internet	<1 %
145	<a href="http://www.juntadeandalucia.es">www.juntadeandalucia.es</a> Fuente de Internet	<1 %
146	<a href="http://www.malvernpanalytical.com">www.malvernpanalytical.com</a> Fuente de Internet	<1 %
147	Domínguez Fabela Luis Tetzin. "Tratamiento de aguas residuales municipales en un filtro biológico aerobio utilizando tezontle con dos diferentes tamaños de partícula", TESIUNAM, 2012 Publicación	<1 %
148	Macías Acosta Néstor Daniel. "Tratamiento de aguas residuales de la industria cosmética"	<1 %

mediante biodegradación aerobia seguida por oxidación electro-química", TESIUNAM, 2021

Publicación

---

149

Nayeli Gutiérrez-Casiano, Eduardo Hernández-Aguilar, Alejandro Alvarado-Lassman, Juan M. Méndez-Contreras. "Removal of carbon and nitrogen in wastewater from a poultry processing plant in a photobioreactor cultivated with the microalga ", Journal of Environmental Science and Health, Part A, 2022

Publicación

---

<1 %

150

SERV GEOGRAFICOS Y MEDIO AMBIENTE SAC. "Plan de Cese Temporal de Actividades del Pozo Sheshea 1X en el Lote 126-IGA0000983", R.D. N° 143-2013-MEM/AAE, 2022

Publicación

---

<1 %

151

Zaragoza Sánchez Paloma Isabel. "Degradación de contaminantes emergentes mediante un proceso fotocatalítico empleando nanotubos de TiO<sub>2</sub>", TESIUNAM, 2018

Publicación

---

<1 %

152

[cenca.imta.mx](http://cenca.imta.mx)

Fuente de Internet

---

<1 %

153

[de.slideshare.net](https://de.slideshare.net)

Fuente de Internet

---

<1 %

154	<a href="https://dspace.uevora.pt">dspace.uevora.pt</a> Fuente de Internet	<1 %
155	<a href="https://pesquisa.bvsalud.org">pesquisa.bvsalud.org</a> Fuente de Internet	<1 %
156	<a href="https://repositorio.uns.edu.pe">repositorio.uns.edu.pe</a> Fuente de Internet	<1 %
157	<a href="https://repositorio.uptc.edu.co">repositorio.uptc.edu.co</a> Fuente de Internet	<1 %
158	<a href="https://repositorio.ute.edu.ec">repositorio.ute.edu.ec</a> Fuente de Internet	<1 %
159	<a href="https://repositoriodspace.unipamplona.edu.co">repositoriodspace.unipamplona.edu.co</a> Fuente de Internet	<1 %
160	<a href="https://scielo.sld.cu">scielo.sld.cu</a> Fuente de Internet	<1 %
161	<a href="https://upcommons.upc.edu">upcommons.upc.edu</a> Fuente de Internet	<1 %
162	<a href="https://www.cphi.com">www.cphi.com</a> Fuente de Internet	<1 %
163	<a href="https://www.ia.csic.es">www.ia.csic.es</a> Fuente de Internet	<1 %
164	<a href="https://www.portalbesana.es">www.portalbesana.es</a> Fuente de Internet	<1 %
165	<a href="https://www.scielo.org.mx">www.scielo.org.mx</a> Fuente de Internet	<1 %

166

www1.ej-gv.net

Fuente de Internet

<1 %

---

167

"Predicting the particle size distribution of eroded sediment using artificial neural networks.", Pontificia Universidad Catolica de Chile, 2019

Publicación

<1 %

---

168

Bricaire Peláez Nadia Montserrat. "Desarrollo y estudio de la estabilidad de gomitas a partir de lactosuero dulce deslactosado adicionadas de concentrado de proteína de suero de leche e inulina", TESIUNAM, 2018

Publicación

<1 %

---

169

Edgardo Angulo M, Grey Castellar O, Ma Mercedes Cely B, Lilia Ibáñez S, Lidys Prasca M. "Decoloración de aguas residuales de una industria de pinturas por la microalga *Chlorella sp*", Revista MVZ Córdoba, 2017

Publicación

<1 %

---

170

Olvera García Gustavo. "Los linfocitos T CD4+ de memoria central de pacientes VIH+ tienen una firma de expresión génica que revela un aumento en la entrada a ciclo, arresto en G2/M pero disminución en apoptosis", TESIUNAM, 2020

Publicación

<1 %

---

171	Santiago Cruz Sonia Gloria. "Efecto de picos de concentración de compuestos fenólicos sobre biomasa granular aerobia", TESIUNAM, 2013 Publicación	<1 %
172	Santis Espinosa Luis Fernando. "Evaluación del potencial de desechos agroindustriales para la producción de bioetanol a partir del mango y plátano", TESIUNAM, 2016 Publicación	<1 %
173	digital.csic.es Fuente de Internet	<1 %
174	distancia.udh.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
175	edoc.tips Fuente de Internet	<1 %
176	gredos.usal.es Fuente de Internet	<1 %
177	hupanam.com Fuente de Internet	<1 %
178	ingenieriamecanica.cujae.edu.cu Fuente de Internet	<1 %
179	polipapers.upv.es Fuente de Internet	<1 %
180	pubmed.ncbi.nlm.nih.gov Fuente de Internet	<1 %

181	<a href="http://repositorio.lamolina.edu.pe">repositorio.lamolina.edu.pe</a> Fuente de Internet	<1 %
182	<a href="http://repositorio.uaaan.mx:8080">repositorio.uaaan.mx:8080</a> Fuente de Internet	<1 %
183	<a href="http://repositorio.uancv.edu.pe">repositorio.uancv.edu.pe</a> Fuente de Internet	<1 %
184	<a href="http://repositorio.upagu.edu.pe">repositorio.upagu.edu.pe</a> Fuente de Internet	<1 %
185	<a href="http://repository.unad.edu.co">repository.unad.edu.co</a> Fuente de Internet	<1 %
186	<a href="http://repository.unilasallista.edu.co">repository.unilasallista.edu.co</a> Fuente de Internet	<1 %
187	<a href="http://sigaa.ufrn.br">sigaa.ufrn.br</a> Fuente de Internet	<1 %
188	<a href="http://www.clubensayos.com">www.clubensayos.com</a> Fuente de Internet	<1 %
189	<a href="http://www.construnario.com">www.construnario.com</a> Fuente de Internet	<1 %
190	<a href="http://www.crq.gov.co">www.crq.gov.co</a> Fuente de Internet	<1 %
191	<a href="http://www.dspace.uce.edu.ec">www.dspace.uce.edu.ec</a> Fuente de Internet	<1 %
192	<a href="http://www.przetargi.info">www.przetargi.info</a> Fuente de Internet	<1 %

193

[www.sbr.org.ar](http://www.sbr.org.ar)

Fuente de Internet

<1 %

---

194

Echaniz Rojas Rene Rafael. "Sistema experto para tratamiento de aguas residuales", TESIUNAM, 1996

Publicación

<1 %

---

195

Oscar Betancur H, Antonio Betancourt E, Julián Estrada A, Francisco Henao U. "Persistence of pathogens in liquid pig manure processed in manure tanks and biodigesters", Revista MVZ Córdoba, 2016

Publicación

<1 %

---

196

Alvarado Suárez Luis Ángel. "Determinación de capsaicina y dihidrocapsaicina en chiles por extracción asistida con ultrasonido seguida de cromatografía de gases-espectrometría de masas", TESIUNAM, 2010

Publicación

<1 %

---

197

E. G. Arenas, M. C. Rodriguez Palacio, A. U. Juantorena, S. E. L. Fernando, P. J. Sebastian. "Microalgae as a potential source for biodiesel production: techniques, methods, and other challenges", International Journal of Energy Research, 2017

Publicación

<1 %

---

Excluir citas      Apagado  
Excluir bibliografía      Apagado

Excluir coincidencias      Apagado