

**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA**  
**UNIDAD DE INVESTIGACION DE LA FACULTAD DE**  
**INGENIERÍA QUÍMICA**



**INFORME FINAL DE INVESTIGACIÓN**

“CAVITACIÓN HIDRODINÁMICA Y PROCESOS DE MEMBRANA PARA  
LA RECUPERACIÓN DE SALMUERA DE AGUAS RESIDUALES DE  
PROCESADO DE ACEITUNA”

JUAN TAUMATURGO MEDINA COLLANA

Callao, 2021

PERÚ

A handwritten signature in blue ink, consisting of several horizontal strokes and a vertical stroke on the left.



## DEDICATORIA

El presente trabajo de investigación, lo dedico a mi esposa, por darnos la fuerza para continuar con mi labor académica y poder culminar este trabajo experimental.

Así mismo a mis hijos, Jhoel y Melissa por estar siempre presentes, acompañándonos y por el apoyo moral, que me brindan en forma permanente. Igual forma a mi sobrina Milagros por el apoyo en la culminación del trabajo de investigación.



## **AGRADECIMIENTO**

A la Universidad Nacional del Callao por el financiamiento para el desarrollo de la investigación a través del Fondo Especial de Desarrollo Universitario (FEDU).

A handwritten signature in blue ink, consisting of several horizontal strokes and a small loop, located at the bottom center of the page.

<b>INDICE</b>	01
Índice de Tablas	03
Índice de Figuras	04
Resumen	05
Abstract	06
<b>INTRODUCCIÓN</b>	07
<b>I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN</b>	09
1.1. Descripción de la realidad problemática	09
1.2. Formulación del problema	10
1.2.1. Problema general	10
1.2.2. Problemas específicos	10
1.3. Objetivos de la investigación	10
1.3.1. Objetivo general	10
1.3.2. Objetivos específicos	10
1.4. Limitantes de la investigación	11
<b>II. MARCO TEORICO</b>	12
2.1. Antecedentes	12
2.1.1. Antecedentes internacionales	12
2.1.2. Antecedentes nacionales	14
2.2. Bases teóricas	15
2.3. Conceptual	22
2.4. Definición de términos básicos	28
<b>III. HIPOTESIS Y VARIABLES</b>	29
3.1. Hipótesis	29
3.1.1. Hipótesis general	29
3.1.2. Hipótesis específicas	29
3.2. Definición conceptual de variables	29
3.2.1. Operacionalización de variables	31



<b>IV. DISEÑO METODOLÓGICO</b>	<b>32</b>
4.1. Tipo y diseño de investigación	32
4.2. Método de Investigación	32
4.3. Población y muestra	34
4.4. Lugar de estudio y periodo desarrollado	34
4.5. Técnicas e instrumentos para la recolección de la información	34
4.6. Análisis y procesamiento de datos	38
<b>V. RESULTADOS</b>	<b>39</b>
5.1. Resultados descriptivos	39
5.2. Resultados inferenciales	40
5.3. Resultados estadísticos	44
<b>VI. DISCUSION DE RESULTADOS</b>	<b>47</b>
6.1. Contrastación y demostración de la hipótesis con los resultados.	47
6.2. Contrastación de los resultados con otros estudios similares.	48
6.3. Responsabilidad ética de acuerdo a los reglamentos vigentes	48
<b>CONCLUSIONES</b>	<b>49</b>
<b>RECOMENDACIONES</b>	<b>50</b>
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS</b>	<b>51</b>
<b>ANEXOS</b>	<b>54</b>
<b>A1: Matriz de consistencia</b>	<b>54</b>
<b>A2: Muestras durante el proceso de tratamiento</b>	<b>55</b>
<b>A3: Equipo Experimental</b>	<b>55</b>
<b>A4: Figura Equipo experimental</b>	<b>56</b>
<b>A5: Figura Equipo experimental</b>	<b>56</b>



## INDICE DE TABLAS

		Pág.
Tabla 1	Características de las aguas residuales	18
Tabla 2	Potenciales de oxidación de algunas sustancias	19
Tabla 3	Clasificación del proceso de oxidación	22
Tabla 4	Especificaciones del Tubo de Venturi	25
Tabla 5	Operacionalización de las Variables independientes	30
Tabla 6	Operacionalización de las Variables dependientes	31
Tabla 7	Diseño experimental	33
Tabla 8	Matriz de experimentación	33
Tabla 9	Características del Orificio	37
Tabla 10	Características Físicoquímicas del Agua Residual	40
Tabla 11	Resultados de Degradación de DQO	40
Tabla 12	Demanda química de oxígeno en función de tiempo	41
Tabla 13	Constante de velocidad de degradación	44
Tabla 14	Análisis de Anova	45
Tabla 15	Características físicoquímicas del agua residual	46

## INDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1 Diagrama de bloques de desamargado de aceituna	15
Figura 2 Transporte de componentes de aceituna en solución cloruro de sodio	17
Figura 3 Efecto de la Presión y Velocidad sobre Posición del Fluido	23
Figura 4 Diagrama de una tubería de Venturi	24
Figura 5 Esquema de una tubería y placa de orificio	25
Figura 6 Variables independiente y dependiente en el reactor de cavitación	30
Figura 7 Esquema de un diseño experimental	33
Figura 8 Equipo Experimental	36
Figura 9 <i>Esquema de la placa de orificio</i>	37
Figura 10 Equipo Experimental	39
Figura 11 Demanda química de oxígeno en función del tiempo a 25 y 75 PSI	42
Figura 12 Evolución de $\ln(C_0/C_t)$ respecto al tiempo de degradación de DQO	43
Figura 13 Diagrama de Pareto	44
Figura 14 Diagrama de Medias	45
Figura 15 Muestras durante el tratamiento cavitación hidrodinámica y ozono	46

## RESUMEN

Las salmueras de conservación de aceitunas de mesa son efluentes hipersalinos (conductividades superiores a 70 mScm-1) con altas concentraciones de materia orgánica (DQO alrededor de 30 g·L-1), En esta investigación se aplicó un proceso integrado por ozono y cavitación hidrodinámica para su remoción de la demanda química de oxígeno. Para su tratamiento se hizo circular el agua residual a través de un dispositivo de cavitación hidrodinámica y se introdujo ozono en el lado de succión de la bomba a través de un tubo Venturi por un tiempo de tratamiento de 9 horas. Se investigó el porcentaje de la degradación de la demanda química de oxígeno respecto a la presión de operación en la placa de orificio, haciendo uso de un diseño factorial a 2 niveles, así mismo después de la degradación, la solución se sometió a un proceso de separación de la turbidez mediante ultrafiltración. Como resultado se obtuvo una remoción de la demanda química de oxígeno por encima de 60% , también se observa que un aumento de la presión se incrementa la remoción aproximadamente en un 6%., como promedio de constante de velocidad de la degradación de la demanda química de oxígeno se ha obtenido un valor de  $0,24 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ , en la corriente de permeado de ultrafiltración se ha obtenido una remoción de 98 % de remoción de la turbidez a presión de alimentación 50 psi.

Palabras Claves: Cavitation Hidrodinamica, agua residual de aceituna, ozono.



## ABSTRACT

The table olive preservation brines are hypersaline effluents (conductivities greater than 70 mScm-1) with high concentrations of organic matter (COD around 30 g · L-1). In this research, a process integrated by ozone and hydrodynamic cavitation for its removal of chemical oxygen demand. For its treatment, the residual water was circulated through a hydrodynamic cavitation device and ozone was introduced to the suction side of the pump through a Venturi tube for a treatment time of 9 hours. The percentage of degradation of the chemical oxygen demand with respect to the operating pressure in the orifice plate was investigated, making use of a 2-level factorial design, likewise after the degradation, the solution was subjected to a process of separation of turbidity by ultrafiltration. As a result, a removal of the chemical oxygen demand was obtained above 60%, it is also observed that an increase in pressure increases the removal by approximately 6%, as an average of the rate constant of the degradation of the demand. Oxygen chemistry a value of  $0.24 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$  has been obtained, in the ultrafiltration permeate stream a removal of 98% of removal of turbidity has been obtained at 50 psi feed pressure.

Keywords: Hydrodynamic cavitation, olive wastewater, ozone.



## INTRODUCCIÓN

La aceituna de mesa, es un producto alimenticio, apreciado en todo el mundo, que se produce principalmente en la zona mediterránea. Frutas recién recogidas del árbol. no se puede comer debido a la presencia del glucósido amargo oleuropeína, por lo que las aceitunas se someten a un tratamiento alcalino (lejía) con NaOH para hidrolizar esta sustancia (Brenes y De Castro, 1998).

El proceso de producción de aceituna de mesa, consiste en desamargar la aceituna fresca con una solución de NaOH al 2% hasta que la base penetra 2/3 de la pulpa; sumergir las aceitunas tratadas en agua de lavado de 1 a 3 veces para eliminar el exceso de álcali; poner las frutas en salmuera en una solución de NaCl al 9-12%, donde las aceitunas se someten a una fermentación con ácido láctico; luego el almacenamiento; y embalaje ( Aggelis , 2002 ).

Durante el proceso de elaboración de aceitunas de mesa se utilizan diferentes productos químicos, como, hidróxido de sodio, cloruro de sodio, ácido láctico, etc. y se utilizan grandes cantidades de agua limpia para los diferentes enjuagues para la eliminación del amargor y la salmuera antes del paso de envasado. Las características físico químicas y el volumen de estas aguas residuales es un gran problema ambiental.

Los efluentes líquidos generados por plantas procesadoras de aceitunas constituyen un tema de gran preocupación ambiental para todas las principales zonas productoras de aceitunas, incluidas la mayoría países mediterráneos. ( Aggelis , 2002 ).



La descarga generada contiene diferentes compuestos orgánicos como compuestos fenólicos, así como compuestos inorgánicos con riesgos ambientales que requieren métodos de remediación apropiados ( Aggelis , 2002) Las salmueras de fermentación se pueden regenerar por ultrafiltración, a través de una membrana, y por adsorción de carbón activo y microfiltración ]. Las soluciones resultantes pueden reciclarse para envasar los mismos productos finales de aceituna de mesa, sin embargo, ellos todavía no se utilizan a escala industrial debido a su inversión costos e implicaciones tecnológicas.

Los procesos de oxidación avanzados han reconocido como tratamientos de alta eficacia para la degradación de materia orgánica. No obstante, mineralización completa es generalmente caro sin remoción de sal. Los procesos biológicos son los métodos de tratamiento más compatibles con el medio ambiente y menos costosos, pero estas operaciones no siempre dan resultados satisfactorios y demandan mucho tiempo en su tratamiento. En este trabajo experimental se ha efectuado una revisión de las técnicas de tratamiento y construido y evaluado un equipo experimental para observar su comportamiento en el tratamiento del agua residual de la conservación de la aceituna.



## **I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

### **1.1. Descripción de la realidad problemática**

La industria de aceituna de mesa, produce una gran cantidad volúmenes de aguas residuales, estas aguas son muy problemáticas por sus características de alto contenido de materia orgánica, alto contenido fenólico, alta salinidad y conductividad producto de las distintas operaciones y procesos unitarios de su elaboración. Las salmueras de fermentación del procesamiento de aceitunas de mesa son efluentes hipersalinos (conductividades superiores a  $75 \text{ mS} \cdot \text{cm}^{-1}$ ) con altas concentraciones de materia orgánica (DQO alrededor de  $10 \text{ g L}^{-1}$ ), que también incluyen compuestos fenólicos (entre  $700$  y  $1500 \text{ mg /L}$ ). Varias tecnologías químicas, biológicas y combinadas han sido propuestas con poca eficacia para reducir la contaminación orgánica y la toxicidad de estos efluentes. Este trabajo de investigación se propone tratar las aguas residuales del proceso de desamargado de la aceituna mediante un sistema combinado de cavitación hidrodinámica incorporado una corriente de ozono y rayos ultravioleta para la degradación de la carga orgánica principalmente los polifenoles contenidos en el agua residual y procesos de ultrafiltración, que permitirá la recuperación de la solución de cloruro de sodio



## **1.2. Formulación del problema**

Efectuar un estudio experimental responderá a las siguientes interrogantes:

### **1.2.1. Problema general**

¿Cómo efectuar la recuperación de salmuera mediante cavitación hidrodinámica y procesos de membrana a partir de aguas residuales de procesado de aceituna?

### **1.2.2. Problemas específicos**

1. ¿Cuáles son las características fisicoquímicas del agua residual proveniente del procesado de aceituna de meza?
2. ¿Cuáles serán los factores y niveles de operación de la del reactor de cavitación hidrodinámica que permitan la remoción de la carga orgánica?
3. ¿Cuál será las características físico químicas de la salmuera obtenido después del tratamiento combinado y ultrafiltración?

## **1.3. Objetivos**

### **1.3.1. Objetivo general**

Efectuar la recuperación de salmuera mediante cavitación hidrodinámica y el módulo de membranas a partir de aguas residuales de desamargado de aceituna.

### **1.3.2. Objetivos específicos**

1. Evaluar las características fisicoquímicas del agua residual proveniente del procesado de aceituna de meza-
2. Analizar la influencia de los factores y niveles de operación del proceso de membranas respecto a la remoción de compuestos inorgánicos
3. Analizar las características físico químicas de la salmuera obtenido después del tratamiento y ultrafiltración.

## **1.4. Limitantes de la investigación**

### **1.4.1. Teórico**

No se presenta limitaciones respecto a aspectos teóricos, la investigación está sustentada mediante el uso del balance de energía usando la ecuación de Bernoulli., para la construcción del equipo experimental.

### **1.4.2. Temporal**

La investigación se desarrolló en el periodo 2020 – 2021, las pruebas experimentales dentro el mes de marzo – agosto del presente año

### **1.4.3. Espacial**

El trabajo está limitado al uso del agua residual de almacenamiento de aceituna de color negro que proviene del distrito de Yauca del departamento de Arequipa.



## II. MARCO TEÓRICO

### 2.1. Antecedentes internacionales

Pooja (2020) en el presente estudio da a conocer sobre la cavitación hidrodinámica (HC) sola y en combinación con oxidantes como ozono, en condiciones fijas de presión de entrada (4 bar) y pH (4), la reducción de la demanda química de oxígeno (DQO). La operación individual de HC resultó en un 21,6% de reducción en 120 min de tratamiento con tasa constante de  $2,1 \times 10^{-3} \text{ min}^{-1}$ . La combinación de HC + O<sub>3</sub> produjo una reducción de DQO significativamente mejorada que el tratamiento con un 52,8%. García (2017) manifiesta que las salmueras del procesamiento de la aceituna de mesa son aguas residuales muy contaminadas, son difíciles de tratar tanto a escala industrial como en instalaciones de tratamiento municipales. Tratamiento con ozono destruyó los polifenoles más característicos presentes en estas salmueras de fermentación. También se eliminó simultáneamente población microbiana de salmueras, bacterias del ácido láctico y levaduras. en paralelo, pero necesitaba niveles de ozono más altos, especialmente en condiciones ácidas. Las salmueras tratadas con ozono luego se filtraron a través de un tamaño de poro de 0,45  $\mu\text{m}$ , se diluyeron (1: 1) y se reutilizaron como salmuera de cobertura para y envasado de aceitunas deshuesadas. Después de tres meses de equilibrio, la salmuera de cobertura de las salmueras regeneradas tenía un color más ligero más pobre y un pH ligeramente más alto. Frutas envasadas con salmueras ozonizadas diluidas (1: 1) en condiciones alcalinas tuvieron mayor firmeza y características organolépticas similares a las que utilizan salmuera fresca.

Segovia (2008) manifiesta que el tratamiento con ozono es el que más descompone a los polifenoles presentes en la fermentación salmueras de aceitunas verdes. El ozono requerido para su la eliminación completa fue de 15 y 7 mg / L en soluciones ácidas (pH 4.0) y condiciones alcalinas (pH 10.0), respectivamente. La población microbiana habitual de salmueras, bacterias y levaduras del ácido láctico, se eliminaron simultáneamente en paralelo pero necesitaban niveles más altos de ozono en ácidos condiciones. A continuación, se filtraron las salmueras tratadas con ozono. a través de un tamaño de poro de 0,45 y reutilizado como salmuera de cobertura para el envasado de aceitunas.

Yu,(2020) manifiesta que dependiendo del método de generación de radical hidroxilo, todos los métodos de tratamiento de aguas residuales para la eliminación de fenol basado en procesos de oxidación avanzados se clasifican en las siguientes categorías: química (cavitación acústica e hidrodinámica, uso de oxidantes, proceso Fenton, y procesos tipo Fenton), fotoquímicos (fotólisis y fotocátalisis), electroquímicos y técnicas combinadas. Se revela la esencia de estos métodos y su principal Se revisan las ventajas y desventajas. Se muestra que la eficiencia de la combinación métodos de degradación del fenol que se basan en el uso de (cavitación hidrodinámico) depende de la magnitud de la presión en la entrada de la cavitación hidrodinámica, propiedades fisicoquímicas de los medios (temperatura y pH), concentración inicial de fenol en medio acuoso, las características de diseño de los generadores de cavitación .

Pooja y Thanekar (2018) propone la utilización de reactores de cavitación hidrodinámica (HC) para la degradación de contaminantes a gran escala ha

mostrado una promesa considerable en los últimos años, debido a una mayor eficiencia energética y bajo costo de operación basada en un menor consumo de químicos para el tratamiento. El presente trabajo resúmenes la degradación de diferentes contaminantes, como productos farmacéuticos, fenólicos y tintes, así como el tratamiento de efluentes industriales reales mediante métodos híbridos basados en HC . HC / H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, HC / Ozono, HC / Fenton, HC / Irradiaciones ultravioleta (UV) y HC junto con oxidación biológica y tecnología de membranas. Se ha demostrado que los métodos híbridos basados en HC muestran un buen sinergismo como en comparación con el enfoque de tratamiento individual

## 2.2. Antecedentes Nacionales

Pomareda (2016). En su trabajo de investigación busca reducir el consumo de agua, del proceso tradicional de aceituna verde estilo sevillano para eliminar la soda cáustica que penetró en la aceituna producto del desamarizado, utilizando CO<sub>2</sub>, para su neutralización. Se realizó tres pruebas: grupo 1 y 2: con repeticiones, tratamiento alcalino con NaOH al 2 %, 1 lavado de 14 horas para el grupo 1 eliminación del agua y puesta en salmuera tanque t<sub>1,1</sub> , t<sub>1,2</sub> y t<sub>1,3</sub> , con dos aplicaciones de CO<sub>2</sub> hasta pH 7-7.5, Grupo 2: con 2 lavados de 4 y 6 horas, 1 aplicación de CO<sub>2</sub> puesta en salmuera Tanque t<sub>2,1</sub>, t<sub>2,2</sub>, t<sub>2,3</sub>., 8° Be inicial. Se evaluó el pH, acidez libre y combinada, durante 3 meses periodo de fermentación, control microbiológico y presencia de aceitunas defectuosas. Al final se obtiene una aceituna verde estilo sevillano ahorrando 66% de agua, disminuyendo los vertidos industriales manteniendo los valores de conservación, acidez libre > a 0,7% % expresada en ácido láctico, pH < a 4,2 unidades

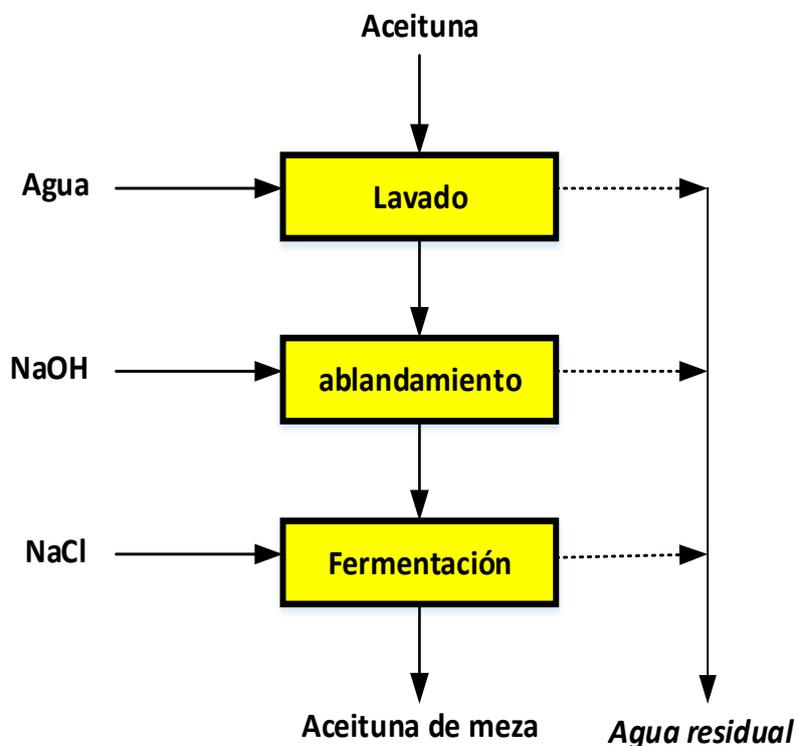
## 2.2. Bases teóricas

### 2.2.1. Proceso de desamargado de aceituna

Las etapas de procesamiento para la producción de aceitunas de mesa se muestran en la figura 1. El propósito principal es la eliminación de amargor relacionado con la oleuropeína. Varios procesos se emplean principalmente a base de hidrólisis alcalina o difusión en salmuera. para conducir a la disminución de oleuropeína. Dentro las etapas incluyen la limpieza inicial de la aceituna con agua pura, desbarbado con hidróxido de sodio (NaOH), lavado y fermentación con soluciones acuosas de cloruro (NaCl)

**Figura 1**

*Diagrama de bloques de desamargado de aceituna*



a) Limpieza de aceituna

La aceituna fresca se lavan con agua potable para eliminar partículas depositadas en la superficie del sólido.

b) Proceso de desamarrado

El amargor de la aceituna se elimina mediante soluciones acuosas de hidróxido de sodio en concentraciones que oscilan entre 1,5% y 3,0%.(w/v) (Parinos et al , 2007). aproximadamente una densidad de 2,9 grados Baume, a temperatura ambiente durante 12 h.

El aumento de la concentración de lejía y / o la temperatura, junto con la variedad y madurez acelera la premiación de hidróxido de sodio a la piel de la fruta (Maldonado et al., 2011).

El tratamiento con NaOH da como resultado complejos cambios físico químicos en las aceitunas.

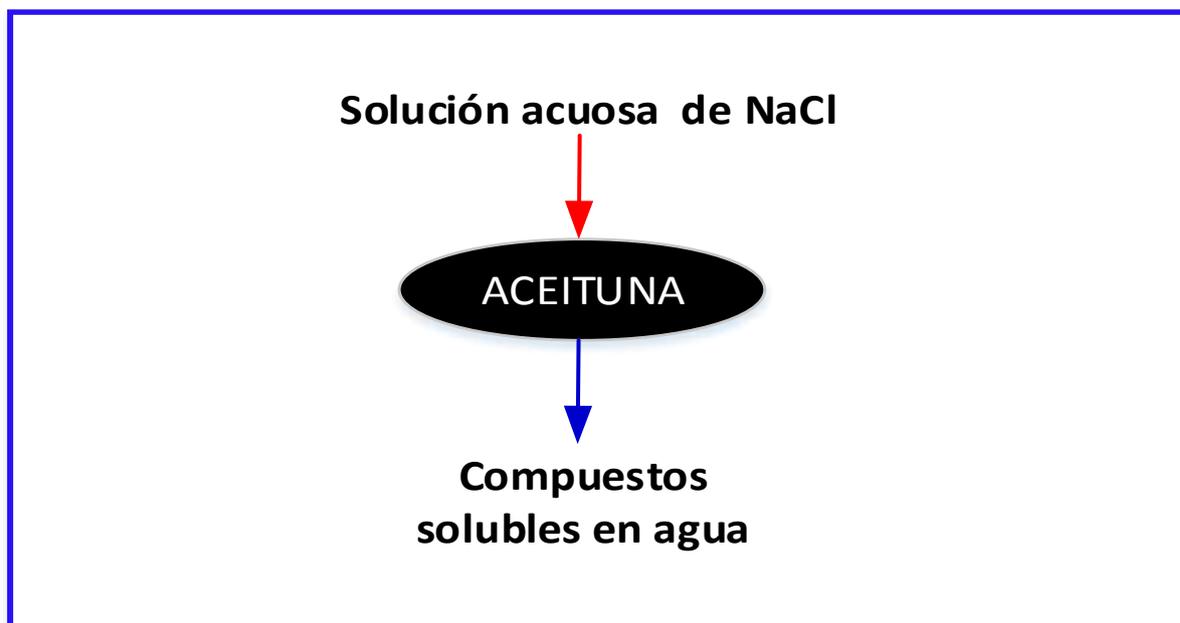
Las aceitunas se lavan de dos a tres veces con agua para la eliminación de restos de hidróxido de sodio .

c) Fermentación

Durante la fermentación de la aceituna en salmuera, se produce ácido láctico, reduciendo así el pH básico de la solución a un pH de alrededor de 4. Las aguas residuales de salmuera de fermentación también se caracterizan por una alta concentración de sal (conductividad de 80 a 95 mS · cm<sup>-1</sup> y química altamente soluble. La fermentación de azúcares está casi completa. En este proceso, parte del compuestos fenólicos de las aceitunas (principalmente oleuropeína) se solubilizan en el ácido. (Soler-Rivas et al., 2000)

**Figura 2**

*Transporte de componentes de aceituna en solución de cloruro de sodio*



### **2.2.2. Aguas residuales**

Las aguas residuales generadas en los procesos industriales del sector alimenticio presentan elevadas cargas contaminantes, las aguas residuales de la elaboración de aceitunas de mesa, destacan por su elevada salinidad y su elevada concentración de materia orgánica y de compuestos fenólicos.

Características de las aguas residuales

La fermentación en salmuera tiene el valor más alto de DQO, pero su concentración en fenoles totales es ligeramente menor., también tiene un contenido elevado en ácidos orgánicos, como en comparación con el resto de las aguas residuales del procesamiento de la aceituna (Romero Barranco et al. 2001; Parinos et al. 2007). Además, estas aguas residuales son mayores en concentración de componentes inorgánicos, que vienen del NaCl añadido. Las características aproximadas de los TOPW se indica en la Tabla 1.

**Tabla 1***Características de las aguas residuales*

Característica	Agua residual		
	Lejía	Enjuague	Fermentación
COD ( g/L)	9,3	13,6	18,9
DBO (g/L)	3,11	4,64	6.05
pH	12,99	11,52	4,3
Fenoles totales(mg/L)	80,39	117,23	76,4
Ácidos orgánicos (mg/L)	27,38	27,2	157,23
Conductividad (ms(cm <sup>2</sup> ))	10	6	60-80

Nota : (Parinos et al. 2007)

**2.2.3. Procesos de tratamiento de aguas residuales de procesado de aceitunas****a) Proceso de oxidación avanzada**

Los procesos de oxidación avanzados (POA) son una de las nuevas tecnologías desarrollada, muchos investigadores han realizado trabajos en el tratamiento de aguas residuales por POA, como la ozonización ( Wu , 2012).La ozonización es sin duda una de las tecnologías ecológicas, que requiere una baja inversión y un bajo costo de operación (Malik; 2019). La cavitación hidrodinámica (HC) con POA son procesos innovador (Innocenzi, ,2019 ). En los últimos años, en el campo de las aguas residuales, un gran número de investigaciones centrarse en la combinación de HC con O<sub>3</sub>, HC con H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, HC con UV ( Innocenzi , 2019). .En la tabla se muestra los potenciales de oxidación de algunas sustancias utilizadas en los procesos de oxidación avanzadas.

**Tabla 2***Potenciales de oxidación de algunas sustancias*

Nº	Oxidante	Formula	Potencial de oxidación (V)
1	Cloro	Cl <sub>2</sub>	1,36
2	Acido hipocloroso	HClO	1,49
3	Peróxido de hidrogeno	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	1,78
4	Ozono	O <sub>3</sub>	2,07
5	Oxigeno atómico	O	2,42
6	Radical hidroxil	<i>HO<sup>•</sup></i>	2,8

**b) Ozonación**

El ozono es un oxidante poderoso que se descompone en agua para formar radicales hidroxilo, que son más fuertes agentes oxidantes que el ozono mismo, induciendo oxidación indirecta o ataques de ciertas funciones grupos de compuestos orgánicos a través de un electrófilo mecanismo. La reacción del ozono con orgánico compuesto generalmente se producía mediante la ozonización del doble enlace (Paraskeva y Diamadopoulos 2006).

La ozonización puede ser un proceso apropiado para el tratamiento de lavado de las aguas residuales del olivo de mesa . Puede alcanzar altos valores de eliminación sustrato orgánico cuando se utiliza en condiciones específicas. (Beltrán et al, 1999) compararon los efectos del ozono, el hidrógeno peróxido y / o radiación UV sobre DQO, color y contenido aromático de las aguas residuales de la aceituna de mesa desamparadora.

Establecieron elevadas reducciones de DQO (80-90%), desaparición casi completa del contenido aromático y color con dosis de ozono entre 3 y 4g en presencia de una concentración inicial de peróxido de hidrógeno 10<sup>-3</sup> M (2,4 g) o radiación UV de 254 nm.

c) Proceso Fenton

El proceso Fenton es otro proceso prometedor de oxidación en el que una mezcla de peróxido de hidrógeno y sales de hierro (II) se agrega directamente a las aguas residuales. junto al oxidación llevada a cabo por los radicales hidroxilos generados por la descomposición catalítica del peróxido de hidrógeno, los iones de hierro (III) generados durante la etapa de oxidación promover la eliminación de otros contaminantes por coagulación y sedimentación (Canizares et al.2007)

Los principales parámetros que afectan el proceso de Fenton son la cantidad de iones ferrosos, concentración de peróxido, concentración inicial del contaminante, pH, temperatura y tiempo de reacción (Rivas et al. 2003), tanto el Fe (II) como / o Fe (III) puede actuar como catalizador del peróxido de hidrógeno. El uso de ion férrico en lugar de la forma reducida puede contribuir a la mejora de la economía de procesos, la temperatura juega un gran papel en reacción química, el pH óptimo de trabajo se sitúa en condiciones ácidas.

d) Fotocatálisis

La fotocatálisis de TiO<sub>2</sub> es una tecnología emergente de tratamiento de aguas residuales. El TiO<sub>2</sub> se utiliza principalmente debido a su no toxicidad, insolubilidad en agua, hidrofobicidad, barata disponibilidad, estabilidad y contra la foto corrosión y por su potencial de banda plana

adecuado que puede inducir las reacciones redox deseadas sin potencial sesgado. El principio de fotocatalisis se basa en la excitación de semiconductores (dióxido de titanio  $\text{TiO}_2$ ) por luz (UV o visible). Bajo la acción de los fotones, el semiconductor produce radicales libres altamente oxidantes que permiten la destrucción de compuestos adsorbidos en su superficie. Los semiconductores  $\text{TiO}_2$  convierten la energía fotónica en energía química por reacción de oxidación-reducción. Esto provoca que los sitios de activación de  $\text{TiO}_2$  y molecular degradación de los compuestos presentes. El proceso de degradación consiste entonces en una sucesión de radicales oxidaciones iniciadas por oxidantes fuertes como el  $\text{OH}^\cdot$ . El  $\text{OH}^\cdot$  son generados directamente por la fotólisis de las moléculas de agua adsorbidas en los sitios activos de  $\text{TiO}_2$  (Linsebigler et al. 1995).

e) Cavitación hidrodinámica y ozono

La ozonización ofrece un enfoque de tratamiento eficaz debido al alto potencial de oxidación de 2,08 V para la degradación de contaminantes como tintes. La combinación de HC y ozono puede ser eficaz ya que bajo el efecto de las cavitaciones, el ozono se disocia fácilmente en  $\text{O}_2$  molecular y oxígeno naciente (O) que forma radical hidroxilo debido a la reacción con el agua.

f) Clasificación de procesos de oxidación avanzados

Según Huang y colaboradores, estos procesos pueden clasificarse en homogéneos y heterogéneos, dependiendo de si ocurren en una sola

fase o hacen uso de un catalizador heterogéneo como se muestra en la Tabla 3.

**Tabla 3**

*Clasificación del proceso de oxidación*

N°	Proceso	Notación
1	Radiación ultravioleta	UV
2	Radiación ultravioleta y ozono	UV/O3
3	Radiación ultravioleta y peróxido de hidrogeno	UV/H2O2
4	Radiación ultravioleta, ozono y peróxido de hidrogeno	UV/O3/H2O2
5	Radiación ultravioleta, ion ferroso, ozono y peróxido	UV/Fe <sup>2+</sup> /O3/H2O2
6	Ultrasonido y ozono	US/O3
7	Ultrasonido y peróxido	US/O3
8	Cavitación hidrodinámica con ozono	CH/O3
9	Cavitación hidrodinámica con UV	CH/UV
10	Cavitación hidrodinámica con ozono y UV	CH/O3/UV

## 2.3. Conceptual

### 2.3.1. Cavitación Hidrodinámica

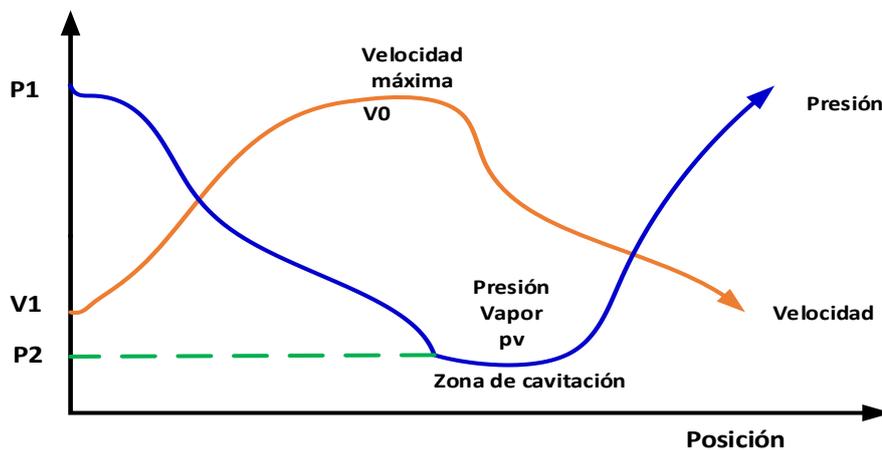
La cavitación es la formación de micro burbujas debido a una caída repentina de la presión dentro del agua y la enorme liberación de energía debido al colapso violento de estas burbujas cuando la presión vuelve a la normalidad (Taşdemir, 2020). La cavitación es un fenómeno que produce fluctuaciones de presión y velocidad en el fluido como se indica en la figura 2. Cuando el fluido experimenta una presión, más baja que el vapor, comienza la formación de



cavidades y el tamaño máximo de las cavidades se alcanzan bajo expansión isotérmica. Cuando se recupera la presión, las burbujas sufren un colapso adiabático. Tal colapso conduce a la formación de ondas de presión y microchorros. Que liberan instantáneamente una gran cantidad de energía mientras generan una intensa tensión normales y de cizallamiento además, los picos de alta temperatura promueven reacciones químicas, como la disociación de las moléculas de agua en en radicales OH.

**Figura 3**

*Efecto de la Presión y Velocidad sobre Posición del Fluido*



Generalmente, esta baja presión es la consecuencia de un aumento en la velocidad del flujo, como lo muestra la ecuación de Bernoulli quien, según su expresión más simple, supone un fluido perfecto, flujo estacionario, y en ausencia de transferencia de calor, se escribe mediante la ecuación.

$$\frac{v^2}{2g} + z + \frac{P}{\rho g} = \text{constante}$$

$\frac{v^2}{2g}$  : Energía cinética

$z$  : Energía potencial



$\frac{P}{\rho g}$  : Energía interna

Los dispositivos más comunes que generan estos fenómenos de cavitación son los tubos de Venturi y placa de orificio.

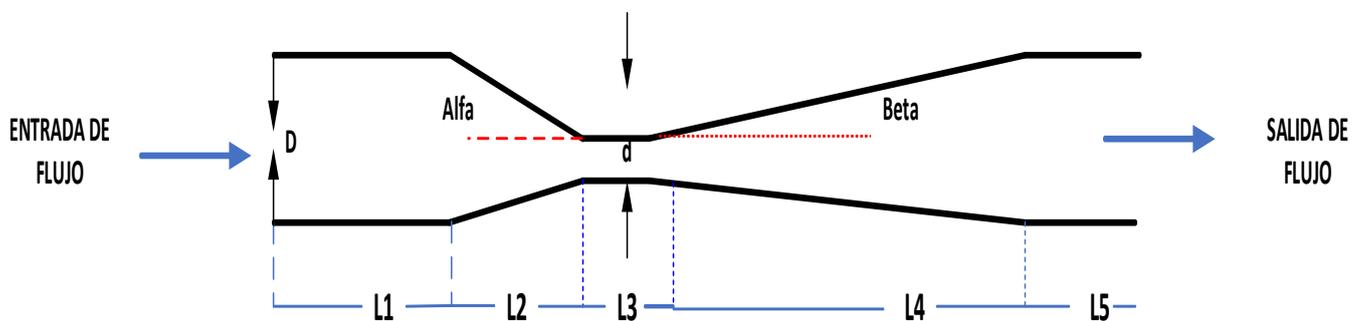
### 1. Tubo de Venturi

El tubo Venturi es un dispositivo que origina una pérdida de presión al pasar por una restricción de tubería. Consiste de dos secciones cónicas denominadas como convergente y otra en la vena contracta, o garganta.

En la figura se muestra un tubo de Venturi, donde se produce estos fenómenos de cavitación

**Figura 4**

*Diagrama de una tubería de Venturi*



En la tabla se indica algunas características del tubo de Venturi

**Tabla 4**

*Especificaciones del tubo de Venturi*

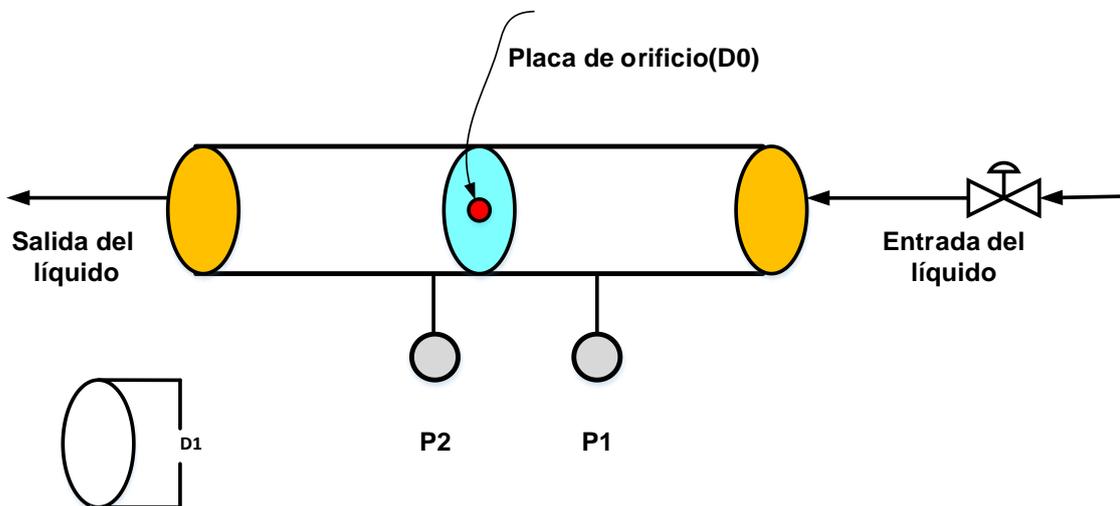
D (mm)	d(mm)	L1(mm)	L2(mm)	L3(mm)	L4(mm)	L5 (mm)	$\alpha$ (°)	$\beta$ (°)
12,7	3,8	6	14	20	54	6	19	5
4	1,5	10	18		67	10	11,7	5,2

### 2.3.2. Placa de orificio

Consiste en una placa plana con una perforación generalmente concéntrica a la tubería. La placa se instala en forma perpendicular a la dirección del flujo. La toma de presión de la placa deberá estar próxima a la vena contracta para asegurar una diferencia máxima de caída de presión.

**Figura 5**

*Esquema de una tubería y placa de orificio*



### 2.3.3. Numero de cavitación

La intensidad de la cavitación está representada por el número de cavitación adimensional ( $C_v$ ). este número, que varía de 0 a 1, cuando se reduce, aumenta la intensidad de la cavitación. normalidad (Taşdemir 2020).

Representa la intensidad de la cavitación está definido mediante la ecuación

$$C_v = \sigma_0 = \frac{(P_2 - P_v)}{(0,5\rho v_0^2)}$$

Donde  $C_v$  es el número de cavitación;  $P_2$  es la presión de corriente de salida del líquido (Pa) ;  $P_v$  es la presión de vapor del agua (Pa) ;  $\rho$  es la densidad de agua ( $\text{kg/m}^3$ ),  $V_0$  es la velocidad del líquido a través del orificio. La eficiencia de la cavitación hidrodinámica está influenciada por varios factores como el diseño del dispositivo de cavitación, condiciones de proceso y características del fluido. La intensidad de la cavitación es dependiente con el número de cavitación y está altamente influenciado por la configuración del dispositivo de cavitación como número, diámetro de agujeros, geometría y presión aguas arriba (Balasundaram y Harrison, 2006; Pawar, 2017; Simpson y Ranade, 2018)

#### **2.3.4. Número de recirculaciones a través del dispositivo de cavitación (NC)**

Es el número de pasadas de la muestra líquida a través de la unidad de cavitación, y es determinado mediante la relación siguiente.

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

donde,  $Q$  es el caudal volumétrico (L /min),  $t$  es el tiempo de funcionamiento (min), y  $V$  es el volumen de la muestra líquida (L).

#### **2.3.5 . Procesos de Membrana**

Los procesos de separación de membranas adquirieron con el tiempo un interés significativo para la separación y recuperación de compuestos valiosos de los residuos de alimentos que mostraban ventajas importantes en comparación con las tecnologías convencionales, que típicamente comprenden diferentes etapas de recuperación, tales como destilación, cristalización, extracción con disolventes (Galanakis, 2012).



Las ventajas de los procesos de membranas incluyen una baja necesidad de energía, sin incorporación de aditivos, condiciones de operación estables eficiencia de separación y fácil escalado, entre otros. Los procesos de microfiltración (MF), UF, NF y OI, se han utilizado con éxito para la recuperación, purificación y concentración de polifenoles de aguas residuales provenientes del procesado de aceitunas y/o derivados (Galanakis, 2012). Por ejemplo, combinando dos o más procesos de UF seguido de un paso final NF, para lograr altos niveles de purificación de estas aguas .

A modo general una membrana semipermeable es una barrera selectiva que separa dos fases, permitiendo el paso de ciertas sustancias y restringiendo el paso de otras de un modo selectivo, lo que permite realizar operaciones de fraccionamiento de diferentes compuestos. La diferencia entre un filtro y una membrana es que esta última trabaja generalmente a flujo de filtración tangencial, permitiendo evitar la acumulación de materia (torta en la superficie de la membrana) y logrando que se trabaje con medios filtrantes de un menor diámetro de poro. Estas membranas poseen determinados diámetros de poro, que permiten el paso de pequeñas moléculas dependiendo de su tamaño.

### **2.3.6. Ultrafiltración**

Permite separar macromoléculas y utiliza el peso molecular como índice de rechazo. Las membranas de ultrafiltración pueden retener moléculas de peso molecular entre 1 a 300 kDa y el tamaño de poro abarca desde los 5 a los 100 nm. En este caso, la presión de operación varía de 1 a 5 bar. Las aplicaciones de la UF se centran en la concentración y purificación de corrientes asociadas a diversas industrias (lácteas, alimentos, textiles, metalúrgica, automóviles, etc.).

## 2.4. Definición de términos básicos

**Tubo de Venturi:** dispositivo que origina una pérdida de presión al pasar por una restricción de tubería. Consiste de dos secciones cónicas denominado como convergente y otra en la vena contracta. o garganta.

**Placa de orificio:** placa plana con una perforación generalmente concéntrica a la tubería. Se instala en forma perpendicular a la dirección del flujo.

**Filtración:** Consiste en la separación de un sólido de un fluido por acción de un medio filtrante y un gradiente de presión..

**Filtración tangencial:** Flujo cruzado, el flujo se dirige a través del medio filtrante, En este régimen, se forma una torta de filtración.

**Diseño experimentos:** Es una técnica que consiste en realizar experimentos en los que se inducen cambios en las variables de un proceso, de manera que es posible observar las causas de los cambios en la respuesta de salida.



### III. HIPOTESIS Y VARIABLES

#### 3.1. Hipótesis

##### 3.1.1. Hipótesis general

Con la evaluación de los factores de operación de cavitación hidrodinámica y membranas de ultrafiltración, obtendremos una solución concentrada de cloruro de sodio dentro los rangos de (40 – 60 g/L).

##### 3.1.2. Hipótesis específica

1. Las características fisicoquímicas del agua residual proveniente del procesado de aceituna de meza tienen elevados niveles de demanda química de oxígeno, conductividad y color.
2. Al seleccionar en forma adecuada los parámetros de operación del reactor de cavitación hidrodinámica (presión y concentración de del agua residual se logrará alcanzar altos valores de porcentaje de remoción de carga orgánica del agua residual de la conservación de la aceituna.
3. Al caracterizar los parámetros físico químicos de las corrientes de salida del reactor de cavitación hidrodinámico y ultrafiltración se logrará conocer la conductividad de la salmuera

#### 3.2. Definición conceptual de variables

1. Variables independientes del reactor de cavitación
  - Presión de salida en la placa de orificio :  $X_1$
  - Concentración del agua residual (DQO) :  $X_2$

## 2. Variable dependiente del reactor de cavitación

- Porcentaje de remoción de DQO : y1
- Conductividad de la solución : y2
- Turbidez :y3

**Figura 6**

*Variables independiente y dependiente en el reactor de cavitación*



### 3.2.1. Operacionalización de las variables

**Tabla 5**

*Operacionalización de las Variables independientes*

Variable independiente	Dimensiones	indicadores	Método
Parámetros de operación	X1: Presión de salida en la placa de orificio	PSI	Lectura de un manómetro
	X2: Concentración inicial de DQO	g/L	Espectrómetro

**Tabla 6**

*Operacionalización de las Variables dependientes*

Variable dependiente	Dimensiones	Indicador	Método
Porcentaje de remoción y parámetros físicos	y1: DQO	g/L	Instrumento
	y2: Porcentaje de remoción de DQO	%	Ecuación
	y3: Turbidez	NTU	Turbidímetro
	y4: Concentración de NaCl	g/L	Titulación

## **IV. DISEÑO METODOLOGICO**

### **4.1. Tipo y diseño de la investigación**

#### **4.1.1. Tipo de investigación**

De acuerdo al propósito y objetivos formulados, es una investigación experimental de causa efecto, se evalúa la influencia de los factores sobre la degradación de la demanda química de oxígeno y remoción del color del agua residual del procesado de aceituna

#### **4.1.2. Diseño de la investigación**

El diseño de la presente investigación ha considerado tres etapas:

- La primera etapa consiste en la construcción del equipo experimental e instalación hidráulica y eléctrica y las pruebas preliminares.
- La segunda etapa de experimentación consiste en efectuar las pruebas de la caracterización físico química del agua residual y las pruebas de acuerdo de la matriz de experimentación.

### **4.2. Método de investigación**

Se investiga la influencia de dos factores de operación del reactor de cavitación, presión de operación, y concentración de alimentación del agua residual con respecto al grado de remoción de color y demanda química de oxígeno

X1. Presión de salida de la placa de orificio (psi)

X2: concentración de alimentación(g/L)

Y: % de remoción de color y % remoción de DQO

## Figura 7

Esquema de un diseño experimental



- Con los resultados obtenidos, se efectúa el análisis estadístico mediante un software minitab y Excel.

### 4.2.1. Diseño factorial

En la tabla 7 se muestra el diseño factorial propuesto, se indica los factores y niveles de experimentación. En la tabla 8 se indica la matriz de experimentos.

En este estudio, se realizaron 6 experimentos

**Tabla 7**

*Diseño experimental*

N°	Factores	Unidades	Notación	Niveles	
				Bajo	alto
1	DQO	g/L	X1	20,5	27,2
2	Presión	Psi	X2	25	75

**Tabla 8**

*Matriz de experimentación*

N°	X1	X2	Color (y1)	DQO(y2)
1	20,5	25	y11	y21
2	27,2	25	y12	y22
3	20.5	75	y13	y23
4	27,2	75	y14	y24

#### **4.3. Población y muestra**

##### **4.3.1. Población**

Se ha recolectado 20 Litros de solución procedente de almacenamiento de aceituna de color negra de un centro comercial en diferentes periodos.

##### **4.3.2. Muestra**

La muestra utilizada para cada experiencia fue de 1litro, el volumen de experimentación está en función de la capacidad del reactor de cavitación hidrodinámico construido.

#### **4.4. Lugar de estudio y periodo desarrollado**

La construcción del equipo y desarrollo de la prueba experimental se realizaron en un ambiente adecuado de propiedad del autor, las pruebas se efectuaron entre los meses de marzo a junio del presente año.

#### **4.5. Técnicas e instrumentos de recolección de datos**

##### **4.5.1. Técnicas**

Las técnicas que se utilizaron fueron mediante análisis fisicoquímicos

Para determinar la demanda química de oxígeno (DQO)

La DQO se determinó mediante el método de dicromato. Se introdujo una cantidad adecuada de muestra en una solución de digestión disponible comercialmente que contenía dicromato de potasio, ácido sulfúrico y sulfato de mercurio y luego la mezcla se incubó durante 20 min a 160 ° C en un reactor de DQO. La concentración de DQO se midió colorimétricamente usando un Espectrofotómetro.

La eficiencia de remoción de la DQO, se determinó mediante la ecuación

$$DQO (\%) = \left( \frac{DQO_0 - DQO_t}{DQO_0} \right) \times 100\%$$

DQO y DQO<sub>t</sub> son la demanda química de oxígeno (DQO)

Instrumentos

- Medición de la conductividad mediante el equipo ADWA AD 330 cuyo rango es de ( 0-200mS/cm).
- Medición de la turbidez mediante el equipo, TUB-430 Turbidity meter
- Medida de la demanda química de oxígeno (DQO) Reactor de digestión y multiparametro HACH DR900

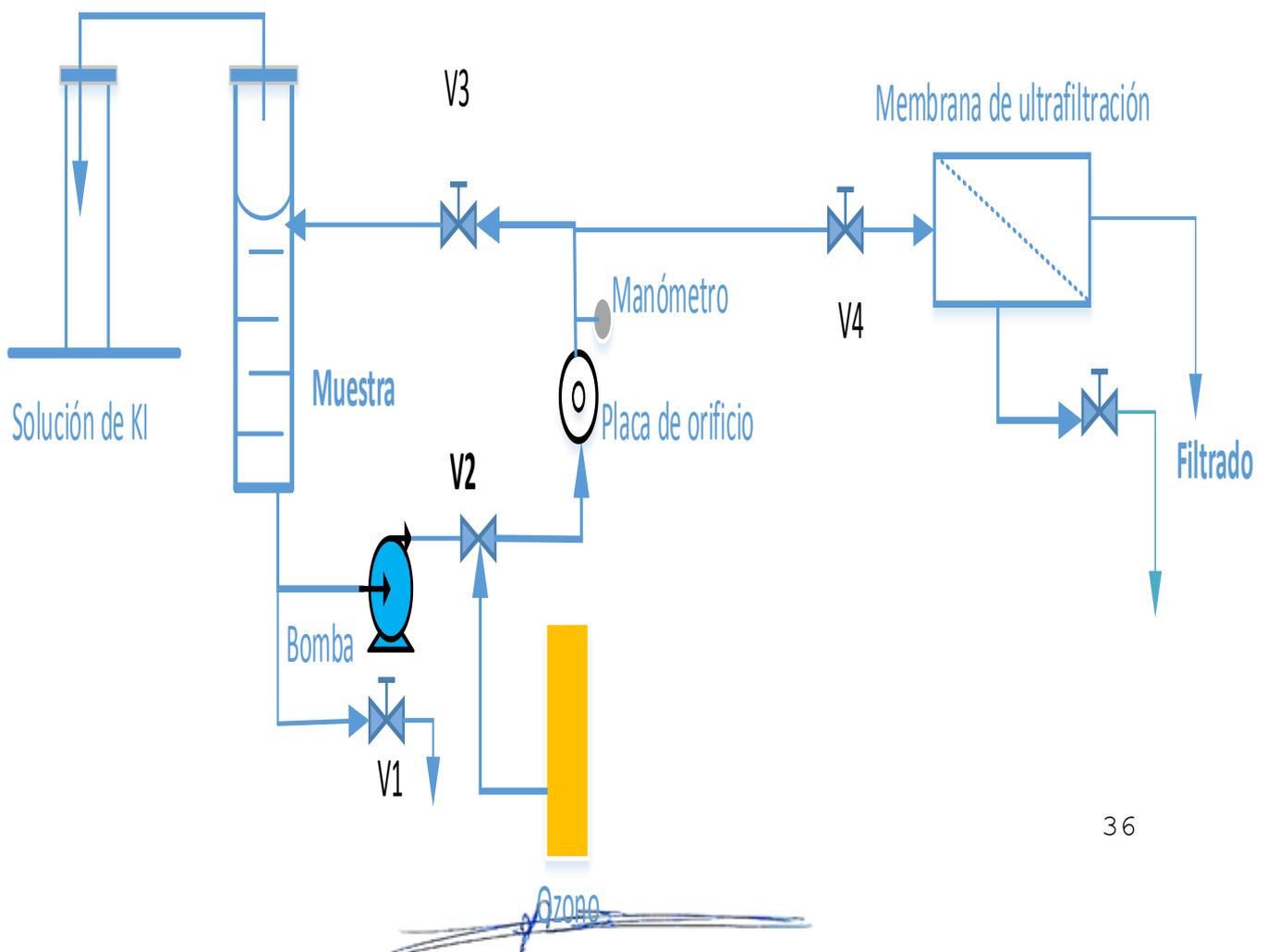
#### 4.5.2. Equipo Experimental

Para tratar el agua residual se ha construido un reactor con cavitación hidrodinámica integrado una corriente de ozono (HC -O<sub>3</sub>) y membranas de ultrafiltración se muestra en la figura 8. El proceso consta de un depósito de material de acrílico de capacidad de 1,5 L, cuyas dimensiones son de diámetro 5cm y altura 40 cm. Una bomba centrífuga (potencia nominal: 0,75 kW) con un caudal máximo de 25 L / minutos que permite la circulación del fluido del circuito cerrado, a una presión de descarga máxima de 100 PSI. válvulas de

control de flujo (V1, V2, V3), bridas para la instalación de la placa de orificio. Las soluciones de alimentación se introdujeron en la bomba centrífuga desde el fondo del depósito luego se dirigieron al tubo Venturi donde ingresa una corriente de gas ozono, la corriente ingresa a la placa de orificio, la presión de operación en la placa de orificio es controlada mediante la válvula V3. La válvula V1 es usada para la descarga de la solución y limpieza del recipiente y línea del proceso. Una placa de orificio de material de acero inoxidable con un diámetro de orificio de 1,3 mm cuyas características se observan en la Tabla 1. Dos manómetros digitales de rango (0 a 100 psi), que permite la medición. Un tubo Venturi de material de plástico con entrada y salida de 0,5 pulgadas de diámetro que permite la alimentación del ozono.

**Figura 8**

*Equipo Experimental*

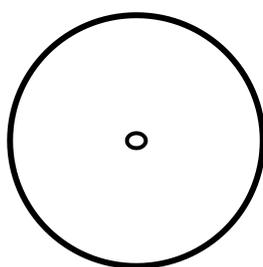


#### 4.5.3. Placa de orificio

Placa de orificio de acero inoxidable de diámetro 1,3 mm, la disposición del agujero en la placa se muestra en la Figura 9 y las características en la tabla 9.

**Figura 9**

*Esquema de la placa de orificio*



**Tabla 9**

*Características del Orificio*

Nº de orificios	Forma	Diámetro orificio	Área
1	Circular	1,3 mm	1,327mm <sup>2</sup>

#### 4.5.4. Metodología

En esta investigación, un litro de agua residual procedente de la conservación de aceituna negra, se carga al tanque de reacción, se instala el generador de ozono al equipo experimental mediante una manguera de material silicona a través del tubo de Venturi.

Se prende la bomba para efectuar la recirculación del agua residual por un tiempo de 9h. Se toman muestras cada 150 minutos para efectuar análisis de demanda química de oxígeno.

Una firma manuscrita en tinta azul, que parece consistir en un nombre y un apellido, con una línea horizontal que atraviesa la firma.

El flujo del gas de ozono se mantuvo constante en todas las experiencias, a 3g/h según especificaciones técnicas del equipo.

El flujo de recirculación del agua residual, durante toda la experiencia se ha mantenido a 3,2 L/min. Para fijar la presión de salida de la placa de orificio se presuriza mediante una válvula en la descarga al tanque que contiene la solución. La temperatura promedio durante la experimentación se evaluado en 28 °C

#### **4.6. Análisis y procedimientos de datos**

Para el procesamiento de los resultados de las pruebas experimentales, se utilizó el software Minitab 18 y Excel



## V. RESULTADOS

### 2.1. Resultados descriptivos

En la figura 10 se muestra el equipo construido a nivel de laboratorio que se ha utilizado en el desarrollo experimental, contiene una placa de placa de orificio y una corriente de ozono para su degradación de la demanda química de oxígeno

**Figura 10**

*Equipo Experimental*



## 2.2. Resultados inferenciales

Las principales características fisicoquímicas del agua residual procedentes de la conservación de la aceituna se muestran en la tabla 10

**Tabla 10**

Características Fisicoquímicas del Agua Residual

N°	Parámetros	Unidad	Muestra		
			1	2	3
1	Conductividad	mS/cm	56,2	61,6	58
2	Turbidez	NTU	341	556	600
3	pH	....	4,2	3,4	3,8
4	Demanda química de oxígeno	g/L	25	30	28
5	Cloruro de sodio	g/L	48	52	51

Nota. En la tabla se indica las características de tres tipos e muestras analizadas

En la tabla 11 se presenta los resultados obtenidos de acuerdo al diseño experimental propuesto.

**Tabla 11**

*Resultados de degradación de DQO*

N°	X1	X2	%DQO()
1	20,5	25	69,2
2	27,2	25	60,2
3	20,5	75	70,1
4	27,2	75	62,1

En la tabla 12 se muestra los resultados de la demanda química de oxígeno de acuerdo al diseño factorial propuesto, presión, concentración inicial de la demanda química de oxígeno en función del tiempo.

**Tabla 12**

Demanda química de oxígeno en función de tiempo

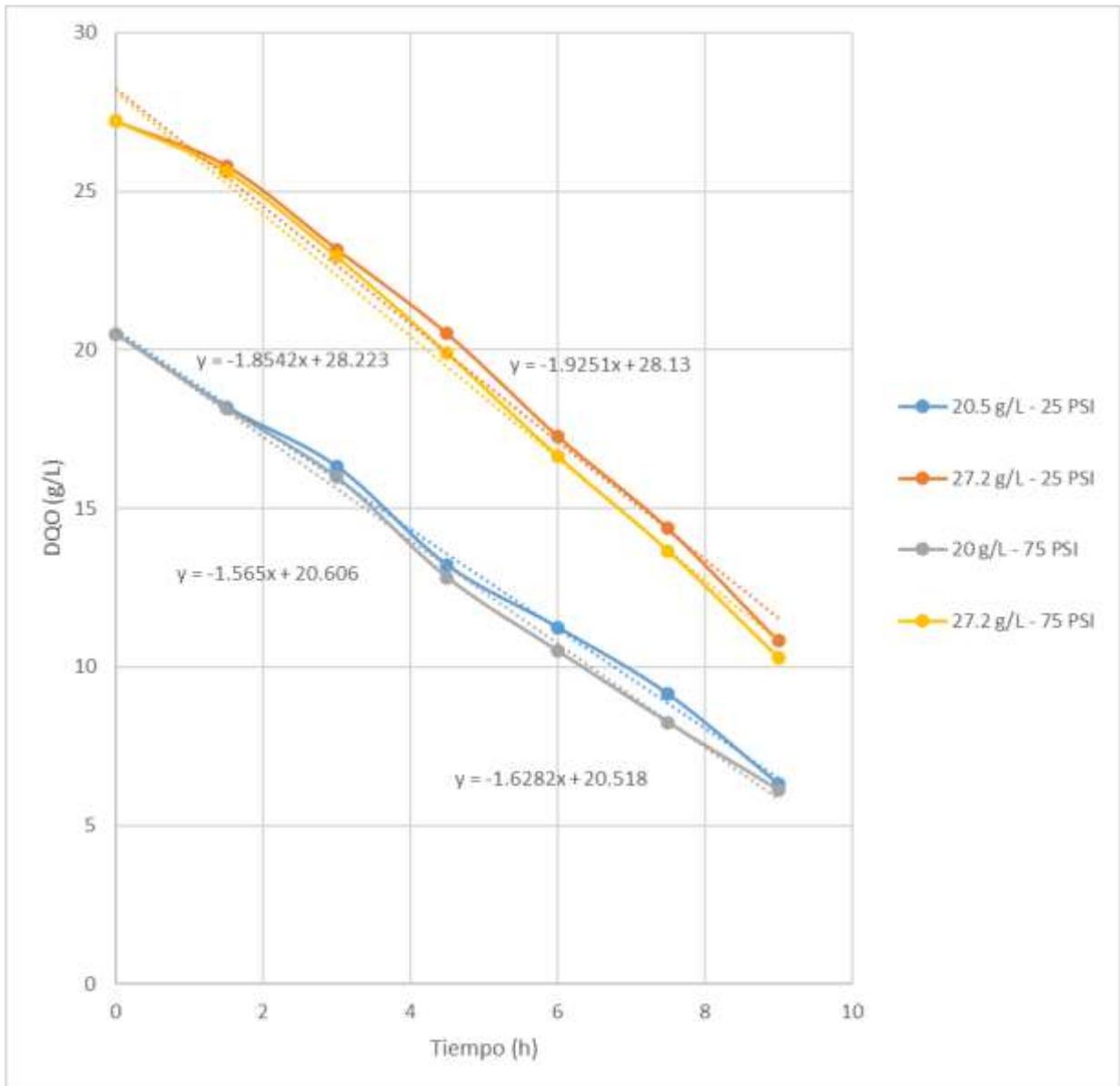
Tiempo (h)	Presión de salida en la placa de orificio (PSI)			
	25	25	75	75
0	20,5	27,2	20,5	27,2
1.5	18,2	25,8	18,15	25,62
3	16,32	23,17	15,98	22,92
4.5	13,21	20,51	12,82	19,2
6	11,25	17,28	10,51	16,65
7.5	9,148	14,37	8,25	13,76
9	6,314	10,82	6,129	10,308

Nota. Resultados de la medida de la DQO en función del tiempo

En la figura 11 se muestra las cuatro experiencias efectuadas a concentraciones iniciales de demanda química de oxígeno de 20,5 y 27,2 g/L a las presiones de 25 Y 75 PSI en un tiempo de 9h de experimentación.

**Figura11**

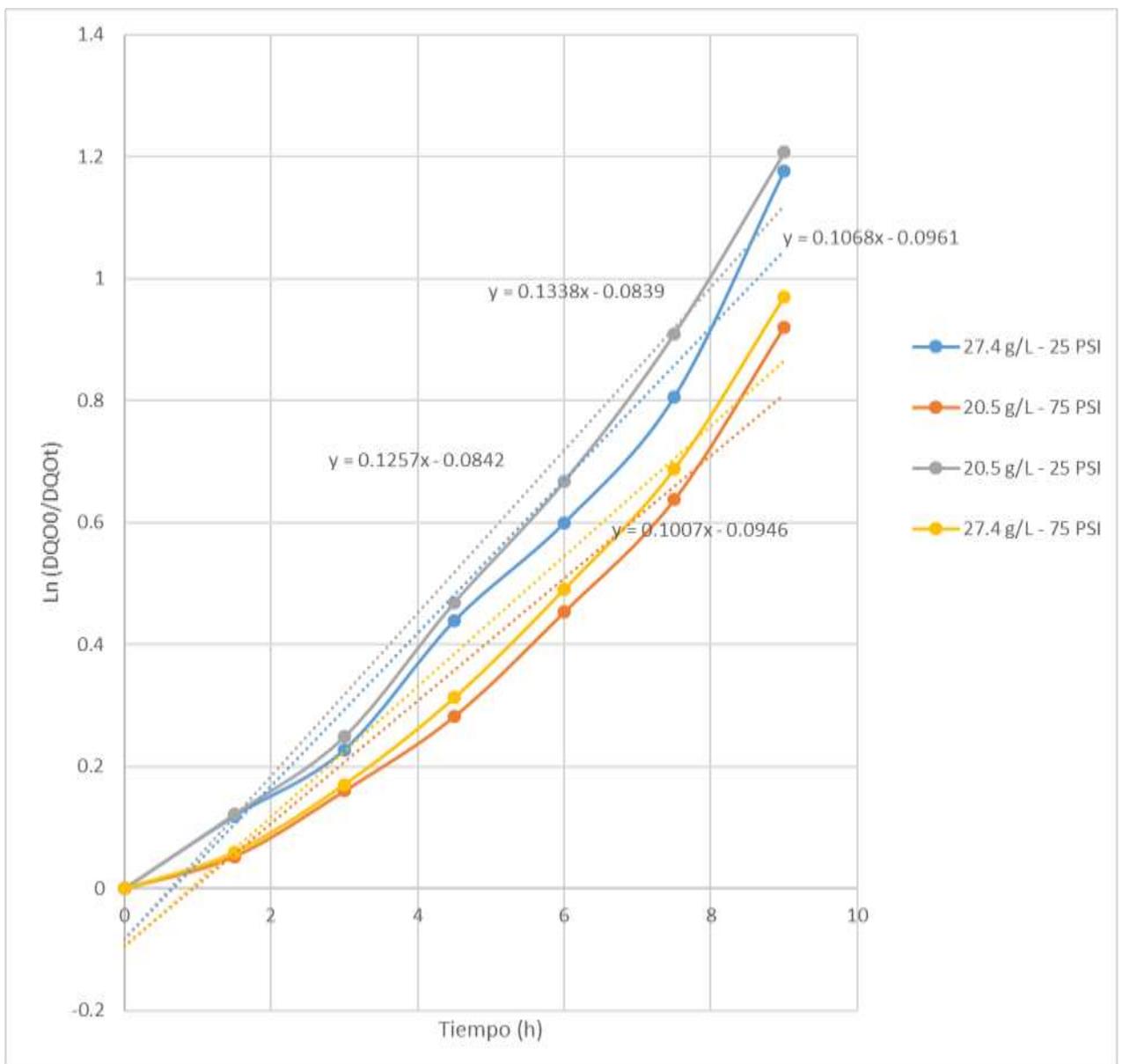
*Demanda química de oxígeno en función del tiempo a 25 y 75 PSI*



En la Figura 12 se muestra la gráfica de  $\ln(DQO_0/DQO_t)$  respecto al tiempo de la degradación del agua residual a dos niveles de experimentación de los factores de operación de la demanda química de oxígeno y presión en la placa de orificio

**Figura 12**

Evolución de  $\ln(C_0/C_t)$  respecto al tiempo de la degradación de DQO



### 2.3. Resultados estadísticos

Las constantes de velocidad de la degradación de la demanda química de oxígeno fue evaluada mediante una cinética de primer orden y los valores se muestran en la tabla 13

**Tabla 13**

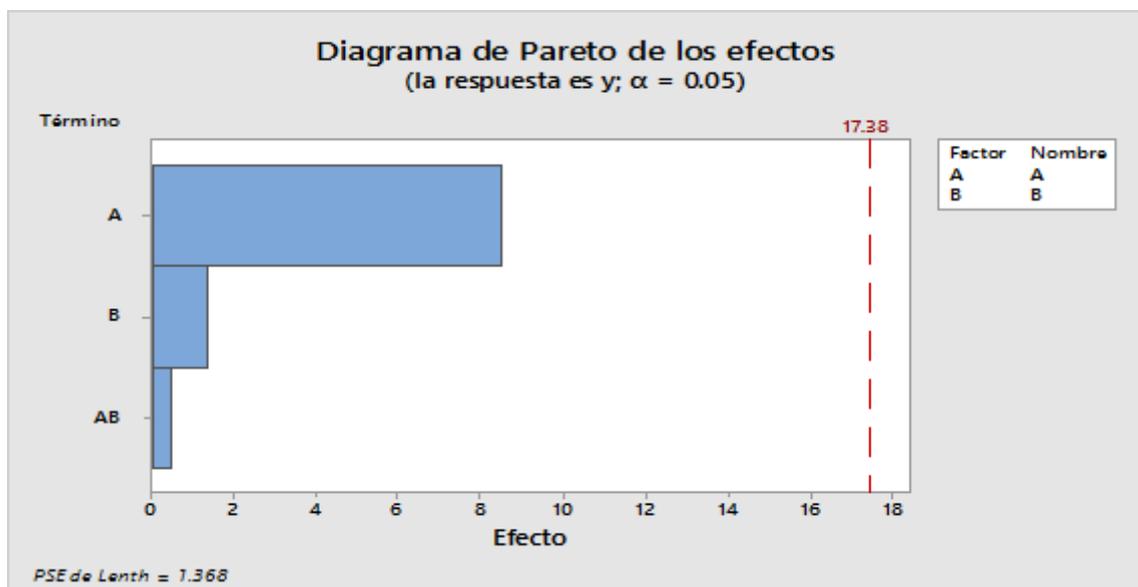
Constante de velocidad de degradación

N°	Constante de velocidad ( h <sup>-1</sup> )	Constante de velocidad ( s <sup>-1</sup> )
1	0,1068	2,96x10 <sup>-5</sup>
2	0.1007	2,79x10 <sup>-5</sup>
3	0,1257	3,49x10 <sup>-5</sup>
4	0,1338	3,71x10 <sup>-5</sup>
Promedio	0,11675	3,24x10 <sup>-5</sup>

En la figura 13 se muestra diagrama de Pareto, efectos de los parámetros principales y la interacción de los factores con respecto a la variable respuesta

**Figura 13**

*Diagrama de Pareto*



**Tabla 14**

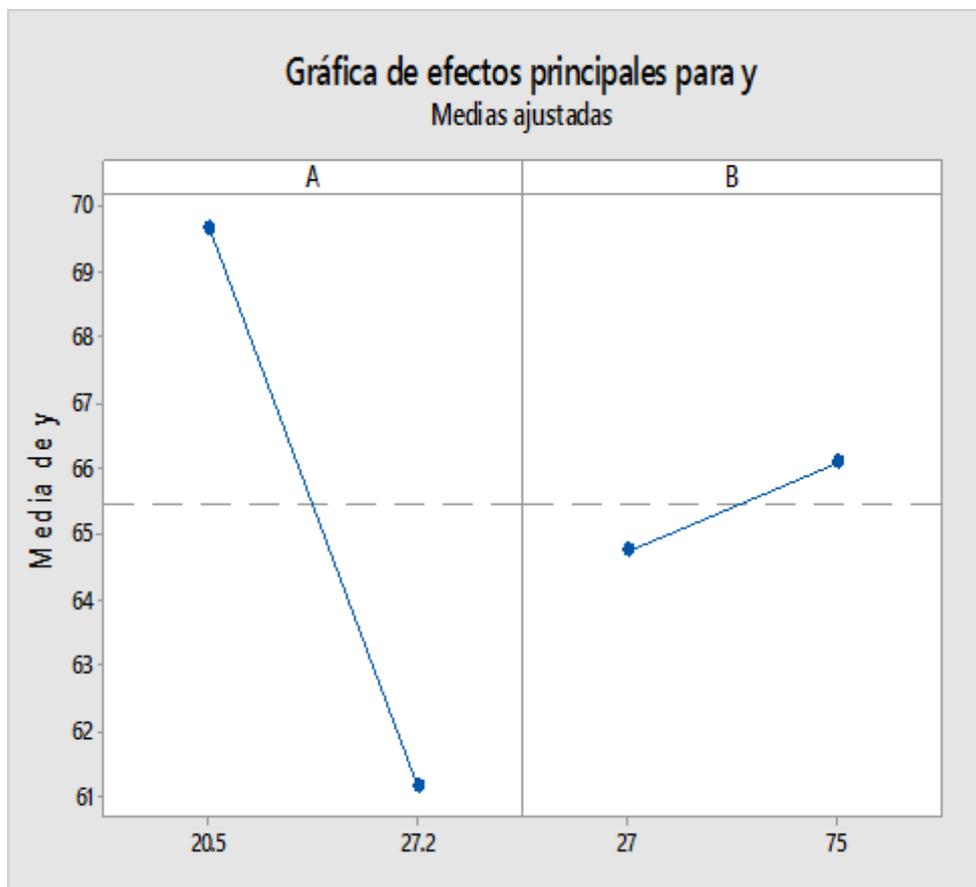
*Análisis de Anova*

Fuente	GL	SC	MC	% de contribución
Modelo lineal	3	74.46	24.82	
X1	1	72.25	72.25	97,03
X2	1	1.96	1.96	2,63
Interacción x1x2	1	0.25	0.25	0,33
Error total	3	74.46		

Nota. En la tabla se indica el porcentaje de contribución de los factores con respecto al grado de remoción de la DQO.

**Figura 14**

*Diagrama de Medias*



Las características físico químicas del agua residual de la conservación de la aceituna después de tratamiento y filtración con membrana de ultrafiltración

Las principales características fisicoquímicas del agua residual procedentes de la conservación de la aceituna después del tratamiento mediante cavitación hidrodinámica, ozono y filtración mediante membrana de nana filtración se muestran en la tabla 16

**Tabla 15**

*Características fisicoquímicas del agua residual*

N°	Parámetros	Unidad	Muestra			
			1	2	3	4
1	Conductividad	mS/cm	56,2	58,5	58	60
2	Turbidez	NTU	4	3	2	2
3	pH	....	4,5	4,6	4,62	4,7
4	Demanda química de oxígeno	g/L	6,3	10,8	6,1	10,3
5	Cloruro de sodio	g/L	48	50	49,8	51,3

En la figura 15 se presentan las muestras en diferentes tiempos de tratamiento

**Figura 15**

*Muestras durante el tratamiento con cavitación hidrodinámica y ozono*



## **VI. DISCUSION DE RESULTADOS**

### **6.1. Contratación y demostración de la hipótesis con los resultados**

#### **6.1.1. Contratación de las hipótesis con la construcción del reactor de cavitación hidrodinámica en combinación de ozono**

Para la degradación de la demanda química de oxígeno se ha construido un equipo experimental que contiene un recipiente de capacidad de 1,5 L, placa de orificio e incorporado una corriente de ozono, efectuando las pruebas experimentales se comprueba la hipótesis que posible la degradación de la demanda química de oxígeno y color en función del tiempo usando el equipo experimental.

#### **6.1.2. Contratación de la hipótesis con los parámetros**

De la figura 14 se observa, la concentración inicial (DQO) es un parámetro que más influye en el proceso, se alcanza un porcentaje de remoción 69% cuando la concentración inicial es de 20,5 g/L. En los niveles de estudio de la presión no se observa una diferencia significancia en el porcentaje de remoción de la demanda química de oxígeno, alcanzando en ambas presiones como media entre (66- 69%). De la figura 11 se observa que la demanda química de oxígeno disminuye linealmente con el tiempo de operación independientemente de la concentración inicial de la carga orgánica y la presión de salida en la placa de orificio.

En la tabla 13 se muestra la constante de velocidad cuyo valor promedio es de  $3,24 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$

#### **6.1.3. Contratación de la hipótesis con las características físico químicas**

De la tabla 10 se e observa los resultados, la conductividad del agua residual sin tratamiento se encuentra en el rango de (56- 70 mS/cm ) y la concentración de cloruro de sodio en (50-55 g/L) y la demanda química de oxígeno en el rango de (20-35g/L).

En la tabla 15 se observa los resultados que la conductividad y concentración del cloruro de sodio no presenta variación significativa después del tratamiento, sin embargo, se observa la disminución de la DQO y color como se muestra en la figura 15.

## **6.2. Contrastación de los resultados con otros estudios similares**

Ferrer, E. et al (2017) En el trabajo de investigación cuyo título. Brine recovery from hypersaline wastewaters from table olive processing by combination of biological treatment and membrane technologies. El proceso integrado consistió en un tratamiento biológico seguido de un sistema de membranas, que incluyó ultrafiltración (UF) más nanofiltración (NF). El tratamiento biológico se llevó a cabo mediante un reactor discontinuo de laboratorio (SBR) de 6 L. Se realizaron UF y NF a nivel de laboratorio. Se evaluó cada corriente generada durante el tratamiento (efluente de SBR y permeados de UF y NF). El SBR eliminó alrededor del 80% de la DQO . En el permeado de NF final, la concentración de DQO fue inferior a 125 mg/L

## **6.3. Responsabilidad ética**

El presente trabajo de investigación realizado cumple con lo estipulado en el código de ética de investigación de la Universidad Nacional del Callao, según Resolución N° 210-2017-CU.

## CONCLUSIONES

1. Las características físico química del agua residual, presenta una elevada conductividad entre los rangos de ( 50 -70 mS/cm) , demanda química de oxígeno dentro el rango de ( 25-35 g/L), concentración de cloruro de sodio ( 40-60 g/L), el pH se encuentra en el rango de( 3,5-4,2).
2. Para verificar la viabilidad del reactor de cavitación acoplado con ozono se efectuó un diseño factorial de dos factores a dos niveles y se obtuvo una disminución de la DQO de rango de 60% en un tiempo de 9h. se observa que a baja concentración inicial del DQO influye favorablemente en el porcentaje de remoción, igual forma el incremento de la presión de salida en la placa de orificio influye ligeramente en la remoción.  
  
La degradación del color es un proceso muy lento que demanda tiempos entre ( 8-10h) dependiente la concentración inicial de la demanda química de oxígeno.
3. La característica físico químicas del agua residual después del tratamiento se observa que la conductibilidad y la concentración del cloruro de sodio se mantiene constante en el rango de (40-50 g/L).La filtración mediante membrana de ultrafiltración permite reducir la turbidez hasta un 98 %, obteniéndose un tipo de agua clarificada con bajo contenido de carga orgánica con alta concentración de cloruro de sodio ( 50 g/L).

## RECOMENDACIONES

1. Se recomienda efectuar el estudio de la influencia de otras variables operativas como flujo de recirculación del agua residual, Ph inicial del agua residual, concentración del ozono, así como variables de diseño el numero orificios para ver la influencia en la degradación en la demanda química de oxígeno y color.
2. Evaluar el grado de remoción del color del agua residual en función del tiempo
3. Incorporar al sistema agentes catalíticos como dióxido titanio ( $TiO_2$ ) y lámpara de radiación ultravioleta para disminuir el tiempo de degradación.
4. Combinar esta tecnología con sistemas de filtración como nanofiltracion y osmosis inversa.
5. Se recomienda efectuar un pretratamiento del agua residual usando un lecho de carbón activado.
6. Aplicar esta tecnología a otras aguas residuales con alta carga orgánica y color.



## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ambra A, Natella F , Bello C, Lucchetti S, Forte V, and. Pastore G (2017) “Phenolics fate in table olives (*Olea europaea* L. cv. Nocellara del Belice) debittered using the Spanish and Castelvetro methods,” *Food Research International*, vol. 100, pp. 369–376.
- Aggelis G, Ehaliotis C, Nerud F, Stoychev I Lyberatos G, Zervakis I (2002 )Evaluation of white-rot fungi for detoxification and decolorization of effluents from the green olive debittering process *Appl Microbiol Biotechnol* 59:353–360
- Brenes M and Castro A (1998) “Transformation of oleuropein and its hydrolysis products during Spanish-style green olive processing,” *Journal of the Science of Food and Agriculture*, vol. 77, no. 3, pp. 353–358.
- Carbonell-Alcaina. (2017).Recuperación de compuestos fenólicos contenidos en la salmuera residual del proceso de fermentación de las aceitunas de mesa mediante procesos de membrana: tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Valencia.
- Canizares P, Lobato J, Paz R, Rodrigo MA, Sae’z C (2007) Advanced oxidation processes for the treatment of olive-oil mills wastewater. *Chemosphere* 67:832–838.
- Ferrer-Polonio, E., Carbonell-Alcaina, C., Mendoza-Roca, J. A., Iborra-Clar, A., Álvarez-Blanco, S., Bes-Piá, A., & Pastor-Alcañiz, L. (2017). Brine recovery from hypersaline wastewaters from table olive processing by combination of biological treatment and membrane technologies. *Journal of Cleaner Production*, 142, 1377-1386.

- Galanakis Charis ( 2012 ) Recovery of high added-value components from food wastes: Conventional, emerging technologies and commercialized applications Trends in Food Science & Technology Volume 26, August , Pages 68-87
- Garcia P, Garrido A , Segovia K , Arroyo N . López A ( 2007 ) A, Ozonation process for the regeneration and recycling of spanish green table olive fermentation brines , IOA Conference and Exhibition Valencia, Spain - October 29 – 31, 2007.
- Linsebigler AL, Lu G, Yates JT (1995) Photocatalysis on TiO<sub>2</sub> surfaces: principles, mechanisms, and selected results. Chem Rev 95:735–758.
- Maldonado M.B, Zuritz C , and Assof M.V (2008) , “Diffusion of glucose and sodium chloride in green olives during curing as affected by lye treatment,” Journal of Food Engineering, vol. 84, no. 2, pp. 224–230.
- Parinos C. S , Stalikas C.D , Giannopoulos T.S , and Pilidis G, ( 2007) “Chemical and physicochemical profile of wastewaters produced from the different stages of Spanish-style green olives processing,” Journal of Hazardous Materials, vol. 145, no. 1-2, pp. 339–343
- Paraskeva P, Diamadopoulos E (2006) Technologies for olive mill wastewater (OMW) treatment: a review. J Chem Technol Biotechnol 81:1475–1485.
- Rivas JF, Beltran FJ, Gimeno O, Alvarez P (2003) Optimisation of Fenton’s reagent usage as a pre-treatment for fermentation brines. J Hazard Mater 96:277–290.
- Romero Barranco C, Brenes Balbuena M, Garcia-Garcia P, Garrido Fernandez A (2001) Management of spent brines or osmotic solutions. J Food Eng 49:237–246.



- Sabatini N and Marsilio V ( 2008) "Volatile compounds in table olives (*Olea europaea* L., Nocellara del Belice cultivar)," Food Chemistry, vol. 107, no. 4, pp. 1522–1528
- Segovia K, Garcia P, Arroyo F, -Lopez A Garrido A ( 2008) Ozonation process for the regeneration and recycling of Spanish green table olive fermentation brines Eur Food Res Technol 227:463–472.
- Thanekar P and Gogate P ( 2018 ) Application of Hydrodynamic Cavitation Reactors for Treatment of Wastewater Containing Organic Pollutants: Intensification Using Hybrid Approaches.
- Zaviska F, Drogui P, Mercier G, Blais JF (2009) Procédés d'oxydation avancée dans le traitement des eaux et des effluents industriels: application à la dégradation des polluants réfractaires. Rev Sci Eau 22(4):535–564.
- Yu.v. Sukhatskiy, z.o. Znak, o.i. Zin ( 2020 ) cavitation and its combinations with other advanced oxidation processes in phenol wastewater treatment voprosy khimii i khimicheskoi tekhnologii, N°. 4, pp. 16-30



Anexo:

A1: Matriz de consistencia

**“cavitación hidrodinámica y procesos de membrana para la recuperación de salmuera de aguas residuales de procesado de aceituna”**

<p>¿Cómo efectuar la recuperación de salmuera mediante cavitación hidrodinámica y procesos de membrana a partir de aguas residuales de procesado de aceituna?</p> <p><b>Problemas específicos</b></p> <p>1. ¿Cuáles son las características fisicoquímicas del agua residual proveniente del procesado de aceituna de meza?</p> <p>¿Cuáles serán los factores y niveles de operación de la del reactor de cavitación hidrodinámica que permitan la remoción de la carga orgánica?</p> <p>¿Cuál será las características físico químicas de la salmuera obtenido después del tratamiento combinado y ultrafiltración ?</p>	<p>Efectuar la recuperación de salmuera mediante cavitación hidrodinámica y el módulo de membranas a partir de aguas residuales de desamargado de aceituna</p> <p><b>Objetivos Específicos</b></p> <p>Evaluar las características fisicoquímicas del agua residual proveniente del procesado de aceituna de meza.</p> <p>Analizar la influencia de los factores y niveles de operación del proceso respecto a la remoción de DQO</p> <p>Analizar las características físico químicas de la salmuera obtenida después del tratamiento y ultrafiltración.</p>	<p>Con la evaluación de los factores de operación de cavitación hidrodinámica y membranas de ultrafiltración, obtendremos una solución concentrada de cloruro de sodio dentro los rangos de (40 – 60 g/L).</p> <p><b>Hipótesis Específicas</b></p> <p>Las características fisicoquímicas del agua residual proveniente del procesado de aceituna de meza tienen elevados niveles de demanda química de oxígeno, conductividad y color.</p> <p>Al seleccionar en forma adecuada los parámetros de operación del reactor de cavitación hidrodinámica (presión y concentración de del agua residual se logrará alcanzar altos valores de porcentaje de remoción de carga orgánica del agua residual de la conservación de la aceituna.</p> <p>Al caracterizar los parámetros físico químicos de las corrientes de salida del reactor de cavitación hidrodinámico y ultrafiltración se logrará conocer la conductividad de la salmuera</p>	<p><i>X = Variable Independiente</i>          Presión de entrada (X<sub>1</sub>)          Concentración de agua residual (X<sub>2</sub>)</p> <p><i>Y=Variable dependiente</i>          Porcentaje de degradación de carga orgánica (y<sub>1</sub>).</p> <p><i>Grado de remoción de la turbidez(y<sub>2</sub>)</i></p> <p><i>Concentración de NaCL</i></p>	<p><b>Independientes</b></p> <p>Presión de salida en la placa de orificio</p> <p>Lectura mediante un manómetro</p> <p>Concentración inicial de la carga orgánica disuelta (DQO)          Analizado mediante técnica instrumental</p> <p><b>Dependientes</b></p> <p>Porcentaje de remoción de la carga orgánica          Analizado mediante técnicas analíticas</p>
---	---	--	---	--

A2: Muestras durante el proceso de tratamiento



A3: Equipo Experimental



*[Handwritten signature]*

A4: Figura Equipo experimental



*[Handwritten signature]*

A5: Figura Equipo Experimental



*[Handwritten signature]*