

# CARACTERIZACIÓN DE EFLUENTES INDUSTRIALES Y DISEÑO DE TRATAMIENTO ENFOCADO EN LA RECUPERACIÓN DE RECURSOS EN LA CIUDAD DE MANTA

## RESUMEN

Las aguas residuales presentan una diversidad de características que están intrínsecamente vinculadas con su fuente generadora. Uno de los puntales que sustenta la economía de Manta (Ecuador) es la industria del procesamiento del atún; de hecho, un grupo de las empresas más importantes a nivel país están asentadas en esta ciudad. El procesamiento del atún genera una gran cantidad de residuos líquidos que influyen directamente con el grave problema de contaminación que soporta Manta. Este trabajo de investigación analizó las descargas de cinco de las principales industrias con la finalidad de describir las características físicas, químicas y biológicas de sus descargas a fin de poder diseñar un tren de tratamiento que garantice la depuración acorde con la normativa US-EPA y, además, posibilite la recuperación de recursos para coadyuvar en la solución de otros problemas coyunturales de la ciudad. El proceso de depuración fue validado mediante un modelo matemático y demostró su eficacia alcanzando niveles de recuperación de agua superiores al 90%, además de cantidades importantes de nutrientes, como nitrógeno y fósforo.

## PALABRAS CLAVE

Biorreactor de membrana, Tratamiento de agua residual industrial, Procesamiento de pescado, Diseño de planta de tratamiento.

## ABREVIATURAS

ASP Proceso de lodos activados  
DBO Demanda bioquímica de oxígeno  
DQO Demanda química de oxígeno  
ESPOL Escuela Superior Politécnica del Litoral  
HRT Tiempo de retención hidráulica  
MBR Biorreactor de membranas  
PTAR Planta de tratamiento de agua residual  
RO Osmosis Inversa  
SRT Tiempo de retención de sólidos  
TSS Total de sólidos en suspensión  
USEPA U.S. Environmental Protection Agency  
VSS Sólidos volátiles suspendidos

## 1. INTRODUCCIÓN

La industria del atún es una de las principales fuentes de ingresos para la economía del Ecuador. Aporta, aproximadamente, el 65,48% de la generación de divisas del sector pesquero, y representó el 8,71% de las exportaciones no petroleras del país durante el período 2010 - 2016. De las 19 empresas ecuatorianas que procesan el 60% de la oferta exportable de atún, 9 se encuentran dentro de la ciudad de Manta (Ministerio de Comercio Exterior, 2017).

El agua residual proveniente de la industria de procesamiento de mariscos genera grandes cantidades de residuos sólidos y líquidos; la caracterización de estos efluentes varía debido a que presentan valores neutros de potencial de hidrógeno, alto contenido de materia orgánica,

sales y grandes cantidades de aceite y grasa; además, cada fábrica tiene un consumo de agua y pre-tratamientos diferentes antes de descargarlos al sistema de alcantarillado (Chowdhury et al., 2010). Por otro lado, las aguas residuales de origen doméstico presentan concentraciones menores de estos contaminantes (Orhon et al., 1997).

Las características generales del efluente industrial varían dependiendo de diferentes parámetros como el tipo de operación particular y de las especies de peces que son procesadas (Cristóvão et al., 2012). De acuerdo con (Weiss & Reemtsma, 2008), los efluentes de las fábricas procesadoras de mariscos presentan típicamente valores promedios de pH de 6.3, DBO de 1127 mg/L, DQO de 1923 mg/L y sólidos suspendidos en una concentración de 553 mg/L.

Los efluentes provenientes del procesamiento de mariscos son tratados por métodos físico-químicos, métodos biológicos, o una combinación de estos (Cristóvão et al., 2015). El tratamiento debe ser diseñado para cumplir los lineamientos establecidos en la parte 408 "Canned and Preserved Seafood Processing Point Source Category" de la USEPA (**Tabla 1**).

*Tabla 1. Limitaciones en los efluentes provenientes de industrias de procesamiento de atún (United States Environmental Protection Agency (US EPA), 1995).*

Características del efluente	Límites del efluente	
	Máximo por 1 día	El promedio de los valores diarios durante 30 días consecutivos no deberá exceder
<i>(kg/kkg of seafood)</i>		
<b>DBO</b>	20,0	8,1
<b>TSS</b>	7,5	3,0
<b>Aceite y grasa</b>	1,90	0.76
<b>pH</b>	6 - 9	6 - 9

Generalmente, el tratamiento de aguas residuales comprende la eliminación de sólidos en suspensión y de compuestos solubles mediante procesos físicos y biológicos respectivamente; pero con el paso del tiempo se ha evidenciado que esto no es suficiente para eliminar los compuestos orgánicos solubles, fósforo y nitrógeno (Wisniewski, 2007).

Actualmente, se emplean biorreactores de membranas (MBR) para el tratamiento de aguas residuales ya que permiten producir agua de muy buena calidad que posteriormente puede ser reusada (Barreto et al., 2017). Estos MBR son una combinación del tratamiento biológico del agua residual y la separación por membranas (Itokawa et al., 2008), y son capaces de eliminar hasta el 99,9% de sólidos en suspensión (SS), demanda química de oxígeno (DQO) y carbono orgánico total (COT); además, este sistema es capaz de remover coliformes, nitrógeno y fósforo de los efluentes (Dialynas & Diamadopoulos, 2009).

Para potenciar el grado de tratamiento de los biorreactores de membranas (MBR) es posible combinarlo con la tecnología de Osmosis inversa (RO), de esta forma se pueden remover coloides y sólidos en suspensión gracias al MBR y mediante la membrana de RO remover los sólidos disueltos y compuestos orgánicos (Tam et al., 2007). La combinación de estos tratamientos ayudan a remover entre el 95 y 99% de algunos microorganismos (Gómez et al., 2006); sin embargo, no es posible asegurar que será seguro reusar el agua hasta que esta haya sido sometida a un proceso de desinfección.

El uso de biorreactores de membranas (MBR) ha sido aplicado para el tratamiento de aguas residuales provenientes de diferentes industrias, como en: la industria vitivinícola en España donde fue posible remover más del 97% del DQO presente en los efluentes con un tratamiento de MBR sumergido (Artiga et al., 2007); la industria láctea en Uruguay donde se obtuvo una eficiencia entre un 80 y 98% de la remoción del DQO (Fraga et al., 2017); y la industria cervecera donde se obtuvo una eficiencia de eliminación de DQO del 81% empleando un bio film de membrana aireada (MABR) (Brindle et al., 2006). La tecnología MBR también se ha empleado en el tratamiento de aguas residuales municipales, según (Naghizadeh et al., 2011) con las membranas sumergidas en el tanque de aireación fue posible obtener una eficiencia de eliminación de DQO del 96%.

Las descargas de las aguas utilizadas por las industrias y las residencias sin antes recibir un tratamiento adecuado generan un impacto negativo sobre los cuerpos de agua a las que son vertidas, contaminando así los recursos y agotando las fuentes de agua aptas para el consumo humano (Quispe Pérez et al., 2020). Hoy en día, el porcentaje promedio de aguas residuales tratadas que se reutilizan en Europa es solo de alrededor del 2% (Lipińska, 2018).

Las aguas residuales municipales han sido consideradas como un desperdicio; sin embargo, desde el punto de vista de la economía circular, este es un importante recurso regenerativo de agua dulce, energía y nutrientes. (Zhang & Liu, 2022). Es por esto que las PTAR están llamadas a convertirse en sistemas tecnológicos “ecológicamente sostenibles” y en un nexo muy importante en las ciudades SMART (Neczaj & Grosser, 2018).

La ciudad de Manta cuenta con un sistema único para recolectar y transportar los residuos líquidos domiciliarios, comerciales e industriales generados dentro del área urbana. El tratamiento de las aguas residuales se realiza en una planta municipal (PTAR) mediante un proceso de depuración que se compone de filtración, lagunas anaerobias, lagunas facultativas y lagunas de maduración o pulimento (G. Velasco et al., 2019). Este efluente se descarga al río Manta, donde recorre alrededor de 3,5 kilómetros hasta desembocar en el Océano Pacífico, provocando la contaminación de las playas urbanas (González & González, 2017).

La conexión de las aguas residuales industriales contribuye negativamente al congestionamiento de la PTAR en virtud de sus altas concentraciones de contaminantes (Marín Leal et al., 2015); además, es una de las causas principales del problema sanitario local. Por lo tanto, la ciudad debe disponer de un sistema independiente para el tratamiento de los residuos industriales que parta desde el sistema diferenciado de recolección y transporte, hasta la descarga al océano en condiciones de calidad adecuadas para no afectar el ecosistema marino.

El objetivo de este trabajo es diseñar un tren de tratamiento con tecnología de membranas aplicado a las aguas residuales de la industria predominante de la ciudad de Manta que permita la recuperación de recursos y la disposición final de sus desechos bajo los lineamientos de la U.S. Environmental Protection Agency (USEPA).

## **2. MATERIALES Y MÉTODOS**

### **2.1. Zona de estudio**

Manta es un cantón de la provincia de Manabí, perteneciente a la República del Ecuador, ubicado en la región litoral del país, alrededor de 400 kilómetros al suroeste de la capital, Quito D.M. Tiene una superficie aproximada de 303 kilómetros cuadrados y una población de 226.477 habitantes, según el más reciente Censo de Población y Vivienda, realizado por el Instituto

Nacional de Estadísticas y Censos INEC, en el año 2010. Posee una posición privilegiada frente al océano Pacífico; por esta situación su economía se sustenta en las actividades relacionadas con la pesca y en la explotación turística de sus playas urbanas y rurales (Cevallos-Mero, 2019).

La industria predominante de la ciudad es del procesamiento del atún; de hecho, en Manta están ubicadas 9 de las 19 empresas que a nivel nacional registraron mayores exportaciones de este tipo de productos durante el periodo 2010 - 2016 (Ministerio de Comercio Exterior, 2017). Sin embargo, tal condición trae consigo el problema de manejo de los residuos líquidos que son provocados por esta actividad industrial. Las fábricas de procesamiento del atún generan grandes cantidades de agua residual, cuyas características principales son elevadas concentraciones de aceites y grasas, sólidos totales en suspensión, así como valores altos de DBO y DQO (Weiss & Reemtsma, 2008).

El aporte de los caudales de agua residual industrial al sistema hidrosanitario de la ciudad afecta negativamente a la eficiencia de la planta de tratamiento municipal, precisamente por las elevadas concentraciones de contaminantes (Giselle Velasco et al., 2018). Esta situación causa que desemboque en el océano un efluente sin el tratamiento adecuado y contamine las playas urbanas, convirtiéndolas en no aptas para actividades lúdicas del ser humano (González & González, 2017). De este modo se puede notar que la falta de cuidado en el manejo de los residuos líquidos de origen industrial está sistemáticamente perjudicando el otro polo de desarrollo económico de la ciudad, que es el turismo.

## 2.2. Recolección de datos

La etapa inicial de los trabajos de campo consistió en la coordinación con la empresa municipal encargada de la operación del sistema hidrosanitario de la ciudad de Manta para socializar este trabajo de investigación, obtener las autorizaciones para recabar muestras en las descargas al alcantarillado de un primer grupo de industrias y de disponer del acompañamiento del personal técnico encargado de la manipulación de los pozos de revisión. De manera adicional, fue necesario también gestionar los permisos con un segundo grupo de industrias que realizan un tratamiento privado a sus aguas residuales; es decir, que no se conectan al alcantarillado municipal.

La caracterización del efluente industrial se planificó considerando cinco de las empresas que a nivel nacional registraron mayores exportaciones de atún en conservas en el periodo comprendido entre los años 2010 y 2016. No obstante, durante las dos campañas de muestreo realizadas se tomaron datos en un total de nueve localidades, que son: las empresas de procesamiento de atún, SEAFMAN C.A., Conservas Isabel S.A., FRICOPES S.A., EUROFISH S.A., BILBOSA, INEPACA Cía. Ltda. y Conservera Tropical S.A.; la empresa de tratamiento de aguas residuales industriales IROTOP S.A.; y, en la PTAR municipal. En la **figura 1** se muestra la zona de estudio y la ubicación geográfica de los muestreos efectuados.

El proceso de muestreo y conservación de las muestras se desarrolló siguiendo las indicaciones de la norma técnica ISO 5667-3:2018 "*Water quality - Sampling - Part 3: Preservation and handling of water samples*". El propósito de esta actividad fue evitar alterar las características físicas, químicas y biológicas originales del agua residual. En el almacenamiento se utilizaron recipientes limpios de vidrio ámbar y tubos cónicos para centrifugación, tipo Falcon, debidamente identificados; luego del llenado, los recipientes se colocaron en contenedores térmicos con hielo hasta llegar al laboratorio, donde una parte de ellos se congelaron a una temperatura de -20°C. No se añadieron preservantes a las muestras recabadas.

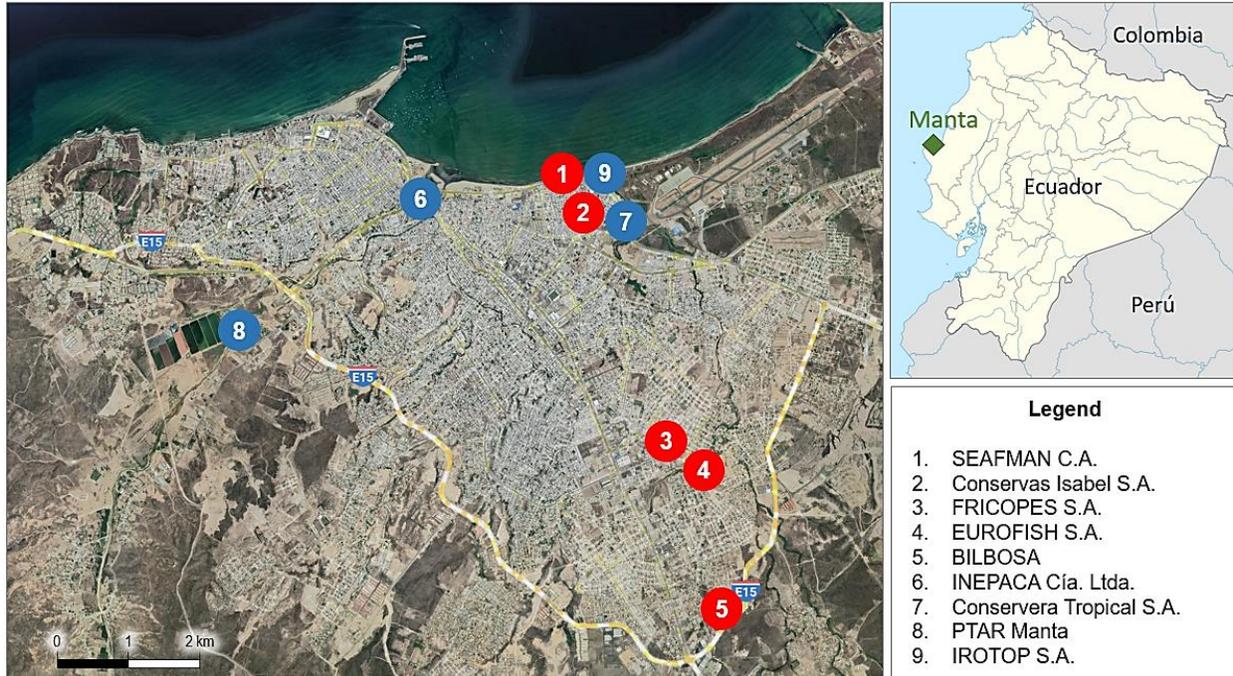


Figura 1: Zona de estudio y ubicación geográfica de muestras.

### 2.3. Ensayos en sitio

Para la realización de los ensayos en sitio se utilizaron los equipos descritos a continuación:

Equipo de medición multiparamétrico portátil, marca HACH modelo HQ40D (**Figura 2**), con accesorios para posibilitar las mediciones de los siguientes parámetros: pH (precisión  $\pm 0,002$  pH, rango de 0 a 14, resolución de 0,001 a 0,1); conductividad eléctrica (precisión  $\pm 0,5$  % a partir de  $1 \mu\text{S}/\text{cm}$  a  $200 \text{ mS}/\text{cm}$ , rango de  $0,01 \mu\text{S}/\text{cm}$  a  $200,0 \text{ mS}/\text{cm}$ ); sólidos disueltos totales TDS (rango de  $0,00 \text{ mg}/\text{L}$  a  $50,0 \text{ g}/\text{L NaCl}$ ); oxígeno disuelto OD (rango de 0,01 a  $20 \text{ mg}/\text{L}$ ); y, temperatura (resolución  $0,1^\circ$ ).

Turbidímetro portátil, marca HACH modelo 2100Q (**Figura 3**), con las siguientes características técnicas: unidades NTU; precisión  $\pm 2$  % de la lectura más luz difusa; luz difusa  $< 0,02$  NTU; medición mediante determinación turbidimétrica en ratio, entre la señal de luz dispersa nefelométrica ( $90^\circ$ ) y la señal de luz dispersa transmitida; rango de 0 a 1000 NTU; normativa según EPA 180.1; con modo de medición rápida para muestras de pronta sedimentación.

Los ensayos en sitio efectuados se detallan a continuación:

**Potencial hidrógeno.** - El pH tiene una influencia directa en el tratamiento de aguas residuales, ya sea este un tratamiento físico, químico o biológico; dentro del diseño de plantas de tratamiento de aguas es importante controlar este parámetro ya que es posible que afecte a la eficiencia y al rendimiento del tratamiento.

**Conductividad eléctrica.** - La conductividad es relacionada a la disolución de sales y compuestos inorgánicos conductores de la corriente eléctrica; su incremento está vinculado al incremento de salinidad y temperatura. Los cambios en la conductividad también están relacionados a la contaminación y al aumento de sólidos disueltos en el agua, lo que afecta a la condición del cuerpo de agua y a la biota asociada a él (United States Environmental Protection

Agency (US EPA), 2021a).

Usualmente valores de conductividad en aguas industriales sin tratamiento alguno pueden llegar a medir hasta 10.000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , mientras que el agua de origen industrial que ha recibido un tratamiento puede llegar a registrar valores de conductividad entre 872 y 1620  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (Ali et al., 2012).



Figura 2: Multiparamétrica HACH HQ40D



Figura 3: Turbidímetro HACH 2100Q

**Sólidos disueltos totales.**- El total de sólidos disueltos (TDS) es un indicador usado frecuentemente para evaluar la calidad de agua empleada como suministro de agua potable y riego; este indicador evalúa la presencia de sales inorgánicas y materia orgánica disuelta (Jamei et al., 2020).

Los niveles de TDS son de gran importancia dentro de plantas de tratamientos de aguas residuales, ya que los sólidos disueltos pueden reducir la eficiencia de estas y acarrear partículas tóxicas en el agua.

El agua puede ser clasificada debido a la cantidad de TDS que contenga, como: agua fresca menor a 1500 mg/L, agua salobre entre 1500 y 5000 mg/L, y agua salada mayor a 5000 mg/L (Summers, 2020).

**Oxígeno disuelto.** - El oxígeno disuelto es la cantidad de oxígeno presente en el agua y es una medición muy importante para la calidad del agua, es un indicador de capacidad para sustentar la vida acuática. Es un parámetro que generalmente se mide junto a la temperatura y pH. (United States Environmental Protection Agency (US EPA), 2021b). Al aumentar la temperatura, disminuye la cantidad de oxígeno disuelto en el agua.

Generalmente, el agua residual que es tratada en la primera etapa llega a registrar concentraciones de oxígeno disuelto cercanas a 0 mg/L, puede llegar a registrar concentraciones de hasta 2 mg/L en una etapa secundaria de tratamiento gracias a la mezcla y flujo del agua.

**Temperatura.** - La temperatura es un parámetro dinámico que está supeditado al clima y a factores externos; e influencia directamente a la palatabilidad, viscosidad, solubilidad, olor y reacciones químicas que se presentan en el agua (Summers, 2020). En el caso de las aguas residuales industriales se ve afectada por la utilización en diferentes procesos; es decir, si proviene de enfriamiento de motores, del lavado de calderas, por citar dos ejemplos.

**Turbidez.** - La turbidez es el criterio más visual para determinar la calidad del agua basándose en las partículas químicas y biológicas suspendidas en el agua; es un parámetro que indica como se ve afectada físicamente la calidad del agua.

Es importante contar con un tratamiento previo, debido a que una turbidez muy alta demanda costos operacionales elevados y fallos en los sistemas de tratamiento (World Health Organization, 2017).

#### 2.4. Ensayos de laboratorio

**Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO).**- La demanda bioquímica de oxígeno representa el potencial de agotamiento de oxígeno causado por la proliferación de microorganismos debido al vertido de contaminantes del agua (Bai et al., 2018). Este es un parámetro muy importante para la caracterización de aguas residuales, permite conocer la cantidad de materia orgánica que los microorganismos son capaces de degradar (Menéndez & Dueñas, 2018). Mientras más alto sea el DBO, mayor es la contaminación del agua residual. El ensayo se desarrolló bajo el protocolo “5220 Chemical Oxygen Demand (COD)”, según (American Public Health Association, American Water Works Association, 2018a).

**Demanda Química de Oxígeno (DQO).**- La demanda química de oxígeno representa la cantidad de contaminantes orgánicos oxidables y es considerado un parámetro clave para la calidad del agua en tratamientos (Khurshid et al., 2021). El ensayo se desarrolló bajo el protocolo “5210 Biochemical Oxygen Demand (BOD)”, según (American Public Health Association, American Water Works Association, 2018b).

**Cromatografía de Iones.**- Los cationes ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ) y aniones ( $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{PO}_4^{3-}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ) fueron analizados mediante cromatografía iónica (IC). Las muestras se filtraron a través de PVDF de 0,20  $\mu\text{m}$  filtros (Chromafil Xtra), diluido 1:2 con agua desionizada (Milli-Q), y almacenado a 4°C hasta más análisis por parte del personal técnico. Para los cationes, un cromatógrafo IC 761 (Metrohm) se utilizó, con un LOQ de 0,2  $\text{mg L}^{-1}$  para todos los cationes, incluido el factor de dilución. Para los aniones, se trataba de un Compact IC Flex 930 (Metrohm) con un LOQ de 0,1  $\text{mg L}^{-1}$ .

**Sólidos totales disueltos (TSS) y sólidos volátiles disueltos (VSS).**- Las mediciones de TSS y VSS se realizaron de acuerdo con los métodos estándar 2540D y E, filtrando una muestra de 10 ml sobre un filtro de fibra de vidrio y pesando la diferencia de masa del filtro después de secarlo durante 2 horas a 105°C para TSS e incineración durante 1,5 horas a 550°C para VSS [APHA, 2017]. Dado que las escalas en las que se las mediciones realizadas mostraron fluctuación, se determinó un límite de cuantificación (LOQ) pesando 10 muestras en blanco antes y después del procedimiento completo del método. Se determinó que la diferencia de masa promedio era de 0,06 mg, con una desviación estándar de 0,25 mg. El límite de detección del método se definió como el promedio con 10 desviaciones estándar sumadas, que es de 3 mg. Por lo tanto, al filtrar muestras de 10 ml, la cantidad mínima cuantificable de TSS o VSS es 0,3  $\text{g L}^{-1}$ .

**Nitrógeno y fósforo Total.**- El nitrógeno total se determinó utilizando pruebas de tubo de nanocolor (Macherey-Nagel). TN se midió utilizando los kits de prueba TNb 220 y TNb 22, dependiendo de qué tan elevada sea su concentración. Las pruebas en los tubos se digirieron utilizando un digestor HC 6040 (WPA) o nanocolor vario 4 (Macherey-Nagel) y determinado usando un espectrofotómetro nanocolor 500 D (Macherey-Nagel). Las muestras de fósforo total fueron procesadas siguiendo el protocolo standard de persulfato en ambiente ácido. El fósforo

fue cuantificado por el método de ácido ascórbico. Para estimar la precisión del método, experimentos con estándares y replicas fueron conducidos, ambos a bajas, medianas, y altas concentraciones.

**Metales Pesados.**- Los metales fueron analizados por inductively coupled plasma (ICP), utilizando las siguientes longitudes de onda libres de interferencia, pero no las más sensibles: Al 237.312 nm, Al 396.152 nm, Co 228.615 nm, Co 230.786 nm, Co 238.892 nm, Cr 267.716 nm, Cu 327.395 nm, Fe 234.350 nm, Fe 238.204 nm, Fe 259.940 nm, Mn 257.610 nm, Ni 216.555 nm, y Zn 213.857 nm. Para los análisis, se añadieron 20 mg de Rh por litro como patrón interno. Se compararon los resultados con los valores de referencia de [10, 11].

## 2.5. Diseño del tren de tratamiento

La tecnología de MBR viene surgiendo como un método de tratamiento de aguas residuales por sobre el proceso de lodos activados (ASP), que había sido la tecnología convencional para depuración de aguas residuales municipales e industriales durante el último siglo. MBR es, de hecho, una de las innovaciones más importantes en el tratamiento de aguas residuales, ya que supera los inconvenientes del ASP convencional, incluido el requisito de grandes espacios para clarificadores secundarios, lo que está seriamente limitado en zonas urbanizadas como en Manta; además, problemas de separación de líquidos-sólidos, producción de exceso de lodos y limitaciones con la remoción de compuestos recalcitrantes. Los MBR se están utilizando exitosamente en el mundo para el tratamiento y la recuperación de aguas residuales tanto municipales como industriales. La tecnología MBR proporciona las siguientes ventajas sobre la PTAR de Manta: Efluente de alta calidad, tasas de carga volumétrica más altas, tiempos de retención hidráulica (HRT) más cortos, tiempos de retención de sólidos (SRT) más prolongados, menos producción de lodos y potencial para la nitrificación/desnitrificación simultánea en SRT largos. Estos parámetros serán investigados en el presente estudio. La inclusión de membranas en el sistema elimina la necesidad de clarificadores secundarios. La eliminación de clarificadores secundarios y la operación de MBR a un HRT más corto da como resultado requisitos de área de planta significativamente reducidos.

El proceso del diseño de la PTAR y la elección del tipo de tratamiento que se someterá al afluente depende de las características del agua residual, la topografía y las características geográficas de la ciudad. Para el dimensionamiento de la capacidad de la planta depende del volumen de agua residual proveniente de las empresas procesadoras de pescado.

Para el tratamiento del agua residual se eligió un sistema de membranas debido a que es un proceso muy eficaz y permite eliminar etapas de tratamiento de fangos, disminuyendo así costos de tratamiento. Este sistema cuenta con una alta eficiencia de separación, y combina tanto un proceso de filtración mediante membranas como un proceso de biodegradación de microorganismos que se encuentran frecuentemente en aguas provenientes de las industrias del procesamiento del pescado (Zhao et al., 2022).

## 2.6. Descripción del proceso de diseño conceptual

Para el desarrollo de este trabajo de investigación, se seleccionó el sistema de tratamiento de aguas residuales por biorreactor de membrana (MBR) en donde se han considerado fases de pretratamiento, tratamiento primario y secundario.

El diseño de esta PTAR se realizó en base a las características específicas de las aguas residuales que forman el afluente (**Tabla 2**), especificaciones operativas, factores de seguridad

y de acuerdo con la calidad de los efluentes según la normativa ambiental seleccionada.

El diseño tanto de la etapa de pretratamiento y tratamiento primario se hicieron en base al caudal del afluente. Es importante recalcar que en el diseño y la simulación no fue considerado el lodo proveniente del procesamiento.

Tabla 2. Caracterización del agua residual proveniente del procesamiento de pescados

Nro.	Parámetro	Unidad	Valor medido
1	pH		7.51
2	Temperatura	°C	30.58
3	Turbidez	NTU	967.43
4	TDS	mg/L	1,760.14
5	TSS	mg/L	387.90
6	VSS	mg/L	302.14
7	Conductividad eléctrica	µS/cm	3,327.33
8	Oxígeno disuelto [OD]	mg/L	2.27
9	Demanda biológica de oxígeno [DBO]	mg/L	3,019.52
10	Demanda química de oxígeno [DQO]	mg/L	6,776.81
11	Nitrógeno total	mg/L	255.29
12	Fósforo total	mg/L	44.09
13	Elevación sobre el nivel del mar	m	6.00

### 2.6.1. Etapa de pretratamiento

En esta etapa preliminar se incluyeron dos unidades: criba de gruesos y una criba de arena/finos/desarenador, para este diseño se procedió de la siguiente manera:

#### 2.6.1.1. Cribado

Esta unidad fue usada dentro de la primera fase de la PTAR para prevenir el ingreso de partículas de gran tamaño que puedan entrar al sistema y ocasionar daños. Sus características son descritas a continuación (**Tabla 3**).

Tabla 3. Parámetros de diseño del cribado

Parámetro y criterio de diseño	Und.	Valor	Parámetro de diseño	Und.	Valor calculado	Valor de diseño
Flujo de diseño [ $Q_{max}$ ]	m <sup>3</sup> /día	1,260.00				
Velocidad de aproximación en el canal [ $V_h$ ]	m/s	0.600	Área de la pantalla [ $A_s$ ]	m <sup>2</sup>	0.02	1.00
Relación de profundidad a ancho		1: 1,5				
No. de pantalla en unidad (mínimo)		2.00				
Separación clara entre barras [S]	mm	30.00	Número de barras en la pantalla [W]		24.25	25.00
Espesor de la barra [ $t_{bar}$ ]	mm	10.00				
Coefficiente de descarga para pantalla limpia [C]		0.700				
Velocidad a través de la pantalla nars [ $V_{th}$ ]	m/s	0.615	Pérdida de carga	mm	1.33	1.40

#### 2.6.1.2. Desarenador

Esta unidad fue diseñada para remover los finos provenientes de arena, grava, cenizas o cualquier material sólido que pueda tener una gravedad específica mayor a las de las partículas orgánicas provenientes del agua residual. Las características de diseño de esta criba se detallan en la **tabla 4**.

Tabla 4. *Parámetros de diseño del desarenador*

Parámetro y criterio de diseño	Und.	Valor	Criterio de diseño	Und.	Valor calculado
Flujo de diseño [ $Q_{peak}$ ]	m <sup>3</sup> /día	1,575.00	Volumen de cada tanque	m <sup>3</sup>	1.64
No. de desarenador en la unidad		2.00			
Detention time [DT]	min	3.00	Ancho	m	2.40
Profundidad:Ancho		1 : 1,2	Longitud	m	0.42
Profundidad	m	2.00			
Requisito de suministro de aire	m <sup>3</sup> /min/m	0.30	Requerimiento total de aire	m <sup>3</sup> /min	0.60
Cantidad de arena a eliminar	m <sup>3</sup> /10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> a $Q_{ave}$	0.015	Volumen total de arena	m <sup>3</sup> /día	0.02

### 2.6.2. Tratamiento primario

En esta etapa de tratamiento el agua residual aún presentaba en su composición sólidos suspendidos con características sedimentables y de origen orgánico, estos fueron removidos con unidades de sedimentación. En esta fase se empleó un clarificador primario.

Para el diseño del clarificador primario se emplearon los parámetros y criterios de diseños descritos en la **tabla 5**.

Tabla 5. *Parámetros de diseño del clarificador primario*

Parámetro y criterio de diseño	Und.	Valor	Criterio de diseño	Und.	Valor calculado
Flujo de diseño [ $Q_{ave}$ ]	m <sup>3</sup> /día	1,050.00	Área	m <sup>2</sup>	26.25
Tasa de carga superficial [SLR]	m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> * día	40.00	Diámetro	m	4.11
No. de tanque de sedimentación primaria		2.00	Tasa de carga del vertedero [WLR]	m <sup>3</sup> /m* día	37.14
Profundidad	m	2.00			

### 2.6.3. Tratamiento biológico

Proceso de eliminación de material carbonáceo o carbonoso, nitrificación y desnitrificación con membrana sumergida

El sistema se diseñó de tal forma que se remuevan/eliminen las sustancias carbonosas como nitrogenadas por microorganismos en el tanque anóxico. En la **tabla 6**, se puede observar el proceso de diseño de esta.

Tabla 6. *Parámetros de diseño del tanque anóxico*

Parámetro y criterio de diseño	Und.	Valor	Criterio de diseño	Und.	Valor calculado
Tiempo de retención de sólidos [SRT]	dia	20.00	DQO efluente [S]	mg COD/L	0.73
Edad del lodo [ $\theta_c$ ]	dia	10.00			
Coeficiente de semisaturación [ $K_s$ ]	mg/L	20.00	Producción de sólidos [ $P_{x, bio}$ ]	kg/d	64.37
Tasa máxima de crecimiento específico [ $\mu$ ]	dia <sup>-1</sup>	4.28			
Coeficiente de respiración endógena [ $K_d$ ]	dia <sup>-1</sup> a 15°C	0.10	Sólidos totales [ $P_{x, T}$ ]	kg/d	2,466.08
Flujo de diseño [ $Q_{ave}$ ]	m <sup>3</sup> /dia	1,050.00			
Biodegradable DQO [bCOD]	mg/L	340.00	Volumen	m <sup>3</sup>	6,165.00
Concentración de amoníaco oxidable [ $NO_x$ ]	mg/L	49.30			
Coeficiente de rendimiento [Y]		0.50	Volumen anóxico [ $V_{anox}$ ]	m <sup>3</sup>	87.50
Tasa de crecimiento de bacterias nitrificantes [ $y_n$ ]		0.12			
Tasa de decrecimiento de bacterias nitrificantes [ $K_{dn}$ ]	dia <sup>-1</sup> a 15°C	0.065	$X_{anox}$	mg/L	78.08
Fracción de biomasa acumulada durante la descomposición [fd]		0.15			
Materia inerte en el afluente de agua residual [ $X_{o,i}$ ]	mg/L	21.50	$F/M_{anox} = (Q \cdot S_0) / (V_{anox} \cdot X_{anox})$	dia <sup>-1</sup>	41.77
MLVSS concentration	mg/L	8,000.00			
H.D.T	h	2.00	NOx Feed	kg/d	26.28
Concentración de nitrato efluente [ $NO_e$ ]	mg/L	25.00	NOx reduce	kg/d	2.13
Nitrato reciclado [NO <sub>r</sub> ] = NO <sub>x</sub> -NO <sub>e</sub>	mg/L	24.30			
IR (NO <sub>x</sub> / NO <sub>r</sub> -1)		1.03	Capacity ratio		0.08
SDNR	g/g.d a 15°C	0.31			
Proporción de retorno de lodo ( $Q_r / Q$ )		0.80	Tasa de residuo de lodo [ $Q_w$ ]	m <sup>3</sup> /dia	4.50
Concentración de lodo reciclado [ $X_r$ ]	mg/L	10,000.00			

## 2.6.4. Tratamiento secundario

A continuación, se puede apreciar el criterio de diseño empleado para el sistema de membranas (**Tabla 7**).

Tabla 7. *Parámetros de diseño del sistema MBR*

Parámetro y criterio de diseño	Und.	Valor	Criterio de diseño	Und.	Valor calculado
Flujo de diseño [ $Q_{ave}$ ]	m <sup>3</sup> /dia	1,050.00			
Flujo máximo de operación	L/m <sup>2</sup> *h	40.00	Flujo de diseño	L/m <sup>2</sup> *h	13.91
Relación de filtración		0.968			
Relación de operación		0.988	Número de módulos		98.89
Factor de pico		2.75			
Área de membrana por módulo	m <sup>2</sup> /módulo	31.60	Aireación de burbujas gruesas [ $Q_{A,m}$ ]	m <sup>3</sup> /h	46,667.29

Parámetro y criterio de diseño	Und.	Valor	Criterio de diseño	Und.	Valor calculado
Área de membrana	m <sup>2</sup>	89,301.60	V <sub>m</sub>	m <sup>3</sup>	1,984.48
SAD <sub>m</sub>	m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> *h	0.54			
Filtración	s	900.00			
Retrolavado	s	30.00			
Densidad de empaquetamiento de la membrana	m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup>	45.00			

## 2.7. Diseño del modelo matemático

El desempeño del diseño conceptual fue evaluado mediante un modelo matemático empleando el software GPS-X, versión 7.0.1, desarrollado por Hydromantis Inc. El propósito fundamental de la simulación del diseño conceptual fue comprobar si con el tren de tratamiento propuesto era posible que el efluente cumpla con la normativa ambiental seleccionada, es decir la US-EPA. Esta modelación permitió además optimizar el modelo conceptual y verificar que el proceso de depuración tuviera el comportamiento deseado en términos de eficiencia en el tratamiento del agua residual como de los costos de operación y mantenimiento.

La simulación se realizó con la caracterización del agua residual de las industrias de procesamiento de pescado muestreadas. Los criterios empleados fueron los mismos para operaciones y procesos unitarios; así como para el proceso biológico efectuado en un tanque anóxico. Con estas consideraciones el tren de tratamiento diseñado se muestra en la **figura 4**.

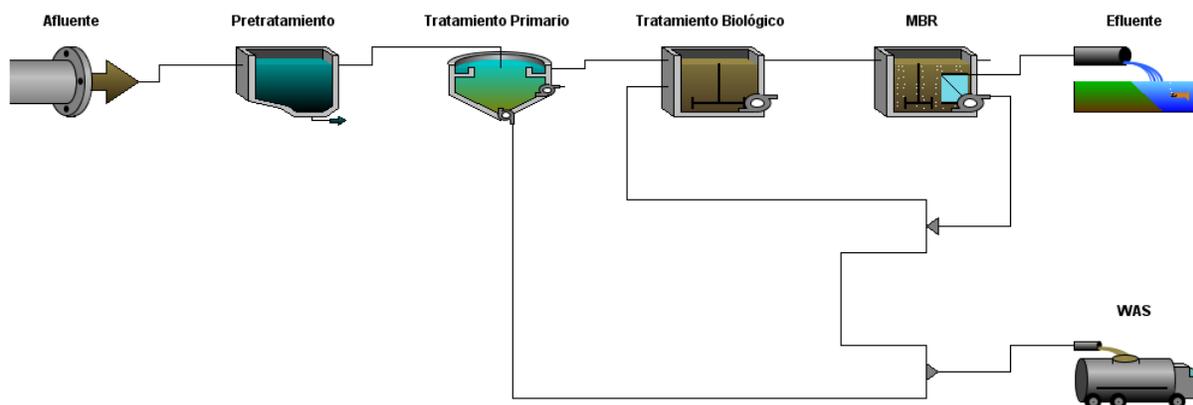


Figura 4. Tren de tratamiento diseñado

## 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La **tabla 8** muestra los resultados de los ensayos in situ realizados y de los ensayos de laboratorio de DBO y DQO. Los valores de pH muestran valores cercanos al neutral, lo cual es consistente con (Chowdhury et al., 2010); salvo una muestra que pudo tener alguna causa particular para no estar dentro del rango. La literatura consultada mostró que la industria de procesamiento del pescado genera aguas residuales con altas concentraciones de DBO y DQO;

de hecho, el nivel de sustancias orgánicas contaminantes es elevado (Mendez et al., 1991). Normalmente el DBO presenta valores más bajos que el DQO en el orden del 40%-60% (Carawan, 1979). El aporte mayor de DBO proviene del proceso de limpieza; no obstante, las características de cada efluente industrial dependen de las materias primas y productos empleados en el procesamiento, afectándose también al ser diluidas durante la mezcla con aguas con menor contaminación (Omil & Lema, 1996). Esto último puede justificar que las muestras analizadas no presenten un comportamiento homogéneo, sino que se observen diferencias en ciertos parámetros analizados.

Los ensayos de metales pesados no presentaron niveles mayores de los permitidos internacionalmente. Con respecto a los análisis de iones, conductividad, y TDS, es recomendable completar el proceso de depuración con una nanofiltración (NF) o con una ósmosis inversa (RO) para disminuir las sales.

*Tabla 8. Resultados de ensayos en sitio y de laboratorio*

Nro.	Nombre comercial	pH	Temperatura (°C)	Turbidez (NTU)	TDS [mg/L]	Conductividad eléctrica (µS/cm)	Oxígeno disuelto OD (mg/L)	DBO (mg/L)	DQO (mg/L)
1	SEAFMAN	9,11	33,50	1.712	1.729	3.340	0,12	5.680	10.810
2	Conservas Isabel	6,45	32,50	1.166	2.400	4.520	2,27	3.520	9.190
3	FRICOPES	7,17	28,30	116	1.540	2.560	3,39	1.390	1.351
4	EUROFISH	7,66	25,90	525	739	1.507	6,70	1.820	4.780
5	BILBOSA	7,52	27,60	549	1.355	2.710	1,90	640	2.580

Las concentraciones de nitrógeno (N) y fósforo (P) son elevadas en ciertas muestras, lo que constituye una justificación para plantear la recuperación de estos nutrientes para su utilización en otros fines en el marco de la economía circular. La relación VSS/TSS de todas las muestras están arriba de 0,60; lo que se traduce en la abundancia de carbón degradable para el proceso biológico.

#### 4. CONCLUSIONES

La industria predominante en la ciudad de Manta (Ecuador) es la del procesamiento de pescado. Las aguas residuales generadas por esta actividad se caracterizan por presentar altos niveles de contaminantes orgánicos: DBO (600-5.500 mg/L) y DQO (1.300-10.800 mg/L); sólidos disueltos (730-2.400 mg/L) y sólidos en suspensión (250-490 mg/L). La presencia de cantidades importantes de nitrógeno (40-380 mg/L) y fósforo (11-76 mg/L) la viabilizan como fuente para la recuperación de estos nutrientes en el marco de la economía circular, que pueden aprovecharse para la fertilización de las zonas agrícola ubicadas en los sectores rurales de la urbe. La relación VSS/TSS de las muestras analizadas están por encima del 0.67, lo que indica que más del 67% de sólidos suspendidos presentes en el agua residual son de naturaleza orgánica, es decir, existen grandes cantidades de carbono degradable. La concentración de los metales pesados analizados en todas las muestras está dentro de los límites permitidos en la US-EPA, en la normativa ambiental y en normativas internacionales; siendo esto un hallazgo muy importante y a favor de la gestión que realizan las empresas.

El tren de tratamiento para la depuración de las aguas residuales analizadas se realizó mediante un diseño preliminar y se validó con una simulación a través de un modelo matemático. El proceso de depuración se compone de las siguientes etapas: tratamiento preliminar (cribado y desarenador), tratamiento primario (clarificador), tratamiento biológico (lodos activados) y filtración en un biorreactor de membranas MBR. Para prolongar la vida útil del sistema MBR y como medida de protección contra el ensuciamiento (fouling) se empleó un biorreactor con aireación y membranas internas, lo que favorece a la operación y mantenimiento. Este tren de tratamiento alcanza una recuperación de agua superior al 90%, cuyo efluente cumple con la normativa US-EPA para el uso no potable. No obstante, si se quiere aprovechar en aplicaciones donde se necesita una mejor calidad de agua se debería complementar el tratamiento con una nanofiltración (NF) o con una ósmosis inversa (RO) para disminuir las sales. La aplicación de la tecnología de MBR es adecuada para Manta porque requiere de poco espacio físico y ofrece un efluente de mejor calidad, situaciones que se ajustan a las necesidades de la ciudad.

## 5. REFERENCIAS

- Ali, N. S., Mo, K., & Kim, M. (2012). A case study on the relationship between conductivity and dissolved solids to evaluate the potential for reuse of reclaimed industrial wastewater. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 16(5), 708–713. <https://doi.org/10.1007/s12205-012-1581-x>
- American Public Health Association, American Water Works Association, W. E. F. (2018a). 5210 BIOCHEMICAL OXYGEN DEMAND (BOD). In *Standard Methods For the Examination of Water and Wastewater*. American Public Health Association. <https://doi.org/doi:10.2105/SMWW.2882.102>
- American Public Health Association, American Water Works Association, W. E. F. (2018b). 5220 CHEMICAL OXYGEN DEMAND (COD). In *Standard Methods For the Examination of Water and Wastewater*. American Public Health Association. <https://doi.org/doi:10.2105/SMWW.2882.103>
- Artiga, P., Carballa, M., Garrido, J. M., & Méndez, R. (2007). Treatment of winery wastewaters in a membrane submerged bioreactor. *Water Science and Technology*, 56(2), 63–69. <https://doi.org/10.2166/wst.2007.473>
- Bai, S., Wang, X., Zhao, X., & Ren, N. (2018). Characterizing water pollution potential in life cycle impact assessment based on bacterial growth and water quality models. *Water (Switzerland)*, 10(11). <https://doi.org/10.3390/w10111621>
- Barreto, C. M., Garcia, H. A., Hooijmans, C. M., Herrera, A., & Brdjanovic, D. (2017). Assessing the performance of an MBR operated at high biomass concentrations. *International Biodeterioration and Biodegradation*, 119, 528–537. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2016.10.006>
- Brindle, K., Stephenson, T., & Semmens, M. J. (2006). Pilot-Plant Treatment of a High-Strength Brewery Wastewater Using a Membrane-Aeration Bioreactor. *Water Environment Research*, 71(6), 1197–1216. <https://doi.org/10.2175/106143096x122492>
- Carawan, R. (1979). *Water and Wastewater Management in food processing*.
- Cevallos-Mero, J. H. (2019). *Universidad Nacional Mayor de San Marcos Facultad de Ciencias Administrativas La responsabilidad social corporativa de la industria atunera y su influencia en el desarrollo socioeconómico sostenible de la Ciudad Manta-Ecuador TESIS Para optar el Grado Aca.* 261. <http://cybertesis.unmsm.edu.pe/handle/cybertesis/10498>
- Chowdhury, P., Viraraghavan, T., & Srinivasan, A. (2010). Biological treatment processes for fish processing wastewater - A review. *Bioresource Technology*, 101(2), 439–449. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.08.065>
- Cristóvão, R., Botelho, C., Martins, R., & Boaventura, R. (2012). Pollution prevention and

- wastewater treatment in fish canning industries of Northern Portugal. *International Proceedings of Chemical, Biological and Environmental Engineering*, 32(1), 12–16. <https://doi.org/10.7763/IPCBE>
- Cristóvão, R. O., Botelho, C. M., Martins, R. J. E., Loureiro, J. M., & Boaventura, R. A. R. (2015). Fish canning industry wastewater treatment for water reuse - A case Study. *Journal of Cleaner Production*, 87(1), 603–612. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.10.076>
- Dialynas, E., & Diamadopoulos, E. (2009). Integration of a membrane bioreactor coupled with reverse osmosis for advanced treatment of municipal wastewater. *Desalination*, 238(1–3), 302–311. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2008.01.046>
- Fraga, F. A., García, H. A., Hooijmans, C. M., Míguez, D., & Brdjanovic, D. (2017). Evaluation of a membrane bioreactor on dairy wastewater treatment and reuse in Uruguay. *International Biodeterioration and Biodegradation*, 119, 552–564. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2016.11.025>
- Gómez, M., de la Rua, A., Garralón, G., Plaza, F., Hontoria, E., & Gómez, M. A. (2006). Urban wastewater disinfection by filtration technologies. *Desalination*, 190(1–3), 16–28. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2005.07.014>
- González, C. E., & González, H. Y. (2017). Evaluación química y microbiológica de la playa de “Los Esteros” en la ciudad de Manta. *La Granja*, 23(1), 52–59. <https://doi.org/10.17163/lgr.n23.2016.05>
- Itokawa, H., Thiemig, C., & Pinnekamp, J. (2008). Design and operating experiences of municipal MBRs in Europe. *Water Science and Technology*, 58(12), 2319–2327. <https://doi.org/10.2166/wst.2008.581>
- Jamei, M., Ahmadianfar, I., Chu, X., & Yaseen, Z. M. (2020). Prediction of surface water total dissolved solids using hybridized wavelet-multigene genetic programming: New approach. *Journal of Hydrology*, 589, 125335. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125335>
- Khurshid, H., Mustafa, M. R. U., Rashid, U., Isa, M. H., Ho, Y. C., & Shah, M. M. (2021). Adsorptive removal of COD from produced water using tea waste biochar. *Environmental Technology and Innovation*, 23, 101563. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.101563>
- Marín Leal, J. C., Chinga Panta, C. A., Velásquez Ferrín, A. I., González Cabo, P. A., & Zambrano Rodríguez, L. M. (2015). Tratamiento de aguas residuales de una industria procesadora de pescado en reactores anaeróbicos discontinuos. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 25(1), 27. <https://doi.org/10.18359/rcin.431>
- Mendez, R., Lema, J. M., & Soto, M. (1991). *Treatment of seafood-processing wastewaters in mesophilic and thermophilic anaerobic filters*.
- Menéndez, C., & Dueñas, J. (2018). Los procesos biológicos de tratamiento de aguas residuales desde una visión no convencional. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, XXXIX(3), 97–107.
- Ministerio de Comercio Exterior. (2017). Informe sobre el sector atunero ecuatoriano. In *Assistive Technology Research Series*. Ministerio de Comercio Exterior. <https://doi.org/10.3233/978-1-61499-304-9-1272>
- Naghizadeh, A., Mahvi, A. H., Mesdaghinia, A. R., & Alimohammadi, M. (2011). Application of MBR technology in municipal wastewater treatment. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 36(1), 3–10. <https://doi.org/10.1007/s13369-010-0007-7>
- Neczaj, E., & Grosser, A. (2018). Circular Economy in Wastewater Treatment Plant—Challenges and Barriers. *Proceedings*, 2(11), 614. <https://doi.org/10.3390/proceedings2110614>
- Omil, F., & Lema, J. M. (1996). ANAEROBIC TREATMENT OF SALINE WASTEWATERS UNDER HIGH SULPHIDE AND AMMONIA CONTENT. 8524(95), 269–278.
- Orhon, D., Ateş, E., Sözen, S., & Çokgör, E. U. (1997). Characterization and COD fractionation of domestic wastewaters. *Environmental Pollution*, 95(2), 191–204. [https://doi.org/10.1016/S0269-7491\(96\)00111-X](https://doi.org/10.1016/S0269-7491(96)00111-X)

- Quispe Pérez, M., Piñas Rivera, L., Del Valle González, J., & Aguirre Chávez, F. (2020). *Aplicaciones tecnológicas del tratamiento de aguas residuales* (I). Nóstrica Ediciones.
- Summers, N. H. O. E.-K. (2020). *Water Quality Parameters* (p. Ch. 1). IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.89657>
- Tam, L. S., Tang, T. W., Lau, G. N., Sharma, K. R., & Chen, G. H. (2007). A pilot study for wastewater reclamation and reuse with MBR/RO and MF/RO systems. *Desalination*, 202(1–3), 106–113. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2005.12.045>
- United States Environmental Protection Agency (US EPA). (1995). *Effluent Guidelines*. <https://www.epa.gov/eg/seafood-processing-effluent-guidelines>
- United States Environmental Protection Agency (US EPA). (2021a). *Indicators: Conductivity*. [www.epa.gov/national-aquatic-resource-surveys/indicators-conductivity](http://www.epa.gov/national-aquatic-resource-surveys/indicators-conductivity)
- United States Environmental Protection Agency (US EPA). (2021b). *Indicators: Dissolved Oxygen*. <https://www.epa.gov/national-aquatic-resource-surveys/indicators-dissolved-oxygen>
- Velasco, G., Moncayo, J., & Chuquer, D. (2019). Diagnosis of waste water treatment system of Manta. *InfoANALÍTICA*, 7(1), 13. <https://doi.org/10.26807/ia.v7i1.9>
- Velasco, Giselle, Moncayo, J., & Chuquer, D. (2018). Diagnóstico Del Sistema De Tratamiento De Aguas Residuales De Manta Diagnosis of Wastewater Treatment System of Manta. *Revista Infoanalítica*, 7, 27–39. <https://doi.org/10.26807/ia.v7i1.90>
- Weiss, S., & Reemtsma, T. (2008). Membrane bioreactors for municipal wastewater treatment - A viable option to reduce the amount of polar pollutants discharged into surface waters? In *Water Research* (Vol. 42, Issue 14, pp. 3837–3847). <https://doi.org/10.1016/j.watres.2008.05.019>
- Wisniewski, C. (2007). Membrane bioreactor for water reuse. *Desalination*, 203(1–3), 15–19. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2006.05.002>
- World Health Organization. (2017). WATER QUALITY AND HEALTH - REVIEW OF TURBIDITY: Information for regulators and water suppliers. *Who/Fwc/Wsh/17.01*, 10. [https://www.who.int/water\\_sanitation\\_health/publications/turbidity-information-200217.pdf%0Ahttp://www.who.int/water\\_sanitation\\_health/publications/turbidity-information-200217.pdf](https://www.who.int/water_sanitation_health/publications/turbidity-information-200217.pdf%0Ahttp://www.who.int/water_sanitation_health/publications/turbidity-information-200217.pdf)
- Zhang, X., & Liu, Y. (2022). Circular economy is game-changing municipal wastewater treatment technology towards energy and carbon neutrality. *Chemical Engineering Journal*, 429(August 2021), 132114. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.132114>
- Zhao, S., Yun, H., Khan, A., Salama, E. S., Redina, M. M., Liu, P., & Li, X. (2022). Two-stage microbial fuel cell (MFC) and membrane bioreactor (MBR) system for enhancing wastewater treatment and resource recovery based on MFC as a biosensor. *Environmental Research*, 204, 112089. <https://doi.org/10.1016/J.ENVRES.2021.112089>