

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA AGRÍCOLA



**RESIDUOS LÍQUIDOS HOSPITALARIOS Y SU IMPACTO EN LA
CALIDAD DE LAS AGUAS: EXPLORANDO ALTERNATIVAS DE
TRATAMIENTO PARA ENFRENTAR LOS ACTUALES Y FUTUROS
ESCENARIOS DE ESCASEZ HÍDRICA EN CHILE.**

PAULINA NATALIA NOVA OCAMPO

HABILITACIÓN PROFESIONAL
PRESENTADA A LA FACULTAD DE
INGENIERÍA AGRÍCOLA DE LA
UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN,
PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO AMBIENTAL.

CHILLÁN – CHILE

2022

**RESIDUOS LÍQUIDOS HOSPITALARIOS Y SU IMPACTO EN LA CALIDAD
DE LAS AGUAS: EXPLORANDO ALTERNATIVAS DE TRATAMIENTO
PARA ENFRENTAR LOS ACTUALES Y FUTUROS ESCENARIOS DE
ESCASEZ HÍDRICA EN CHILE**

Aprobado por:

Mónica Patricia Montory González
Bioquímica, Dra.
Profesor Asistente

Profesor Guía

Javier Felipe Ferrer Valenzuela
Ingeniero Civil Químico, Dr.
Profesor Asociado

Profesor Asesor

Ricardo Barra Ríos
Bioquímico, Dr.
Profesor Asociado

Profesor Asesor

Nicole Uslar Valle
Ingeniero Civil Agrícola, Ph. D.
Profesor Asistente

Director de Departamento

María Eugenia González Rodríguez
Ingeniero Agrónomo, Ph. D.
Profesor Asociado

Decana

ÍNDICE DE MATERIAS

	Página
RESUMEN	1
SUMMARY	3
1. INTRODUCCIÓN.....	5
1.1 Aguas residuales hospitalarias y su problemática hacia el medioambiente.	6
2. OBJETIVOS	12
2.1 Objetivo general	12
2.2 Objetivos específicos.....	12
3. METODOLOGÍA.....	13
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	14
4.1 Primera etapa: Determinación de variables, parámetros fisicoquímicos y caracterización de contaminantes emergentes de tipo farmacéutico en aguas residuales hospitalarias.....	14
4.1.1 Parámetros fisicoquímicos de aguas residuales hospitalarias a nivel internacional.....	15
4.1.2 Consumo de agua diario por paciente y tamaño del recinto.	24
4.1.3 Clasificación de los contaminantes emergentes de tipo farmacéutico que componen a las aguas residuales hospitalarias a nivel internacional.....	26
4.2 Segunda etapa: Análisis de sistemas de tratamiento de aguas residuales hospitalarias, aplicados a nivel internacional.	33
4.2.1 Sistemas de tratamiento aplicados a aguas residuales hospitalarias que son usados a nivel mundial.....	34
4.3 Diseño conceptual de un sistema de tratamiento de aguas residuales hospitalarias aplicable al caso de estudio: Hospital Herminda Martin de Chillán.	44
4.3.1 Parámetros de entrada de cada etapa del sistema de tratamiento presentado.	46
4.3.1.1 Calidad del agua post tratamiento con membrana de NF.....	49
4.3.1.2 Calidad del agua de NF evaluada a partir de la Normativa Chilena Actual para establecer su calificación o no calificación en los diferentes usos posibles.	56
4.3.2 Evaluación de costos de inversión y tratamiento asociados al diseño del sistema de tratamiento planteado.	61
5. CONCLUSIONES.....	65
6. LITERATURA CITADA	70
7. ANEXOS	85

ÍNDICE DE TABLAS

En el texto	Página
Tabla 1. Caracterización de parámetros fisicoquímicos básicos de aguas residuales hospitalarias a nivel norteamericano/europeo y Latinoamericano	15
Tabla 2. Relación DBO ₅ /DQO para los diferentes hospitales.....	18
Tabla 3. Comparación de valores medios entre aguas residuales hospitalarias (ARH) y aguas residuales urbanas (ARU).....	22
Tabla 4. Macro-contaminantes con sus valores típicos en ARH y ARU.....	23
Tabla 5. Consumo de agua por cama y día de distintos hospitales ...	24
Tabla 6. Caracterización de concentraciones de contaminantes emergentes de tipo farmacéutico presentes en distintos efluentes hospitalarios a nivel mundial.....	27
Tabla 7. Clasificación por familia farmacológica de los distintos medicamentos encontrados en aguas residuales hospitalarias a nivel internacional.....	28
Tabla 8. Tipos de sistemas de tratamiento clasificados según porcentaje (%) de reducción de DQO y condicionalidades de uso.....	34
Tabla 9. Ventajas y desventajas de los procesos de: Osmosis inversa y POA.....	35
Tabla 10. Pesos moleculares promedio, en Daltons, de las diferentes familias farmacológicas.....	38
Tabla 11. Principales tecnologías de POA.....	40
Tabla 12. Ventajas y desventajas presentes en las tecnologías de ozono, peróxido de hidrogeno y Ultravioleta.....	42
Tabla 13. PTAS existente en la ciudad de Chillán de la región de Ñuble.....	44
Tabla 14. Parámetros de entrada de las etapas del diseño de tratamiento a partir de literatura citada.....	46
Tabla 15. Cálculos asociados a los parámetros de entrada de las etapas del diseño.....	47
Tabla 16. Caracterización de la membrana.....	50

Tabla 17.	Resultados de análisis de metales pesados presentes en el permeado, correspondiente a un efluente minero, para membrana de NF.....	52
Tabla 18.	Técnica de NF en diferentes estudios para diversos elementos.....	52
Tabla 19.	Caracterización del efluente de la PTAR de España luego de ser sometido al tratamiento terciario de NF.....	53
Tabla 20.	Evolución de la concentración de algunos contaminantes emergentes (estimulantes y antibióticos) sometidos al tratamiento con NF según estudios realizados en una EDAR de España.....	55
Tabla 21.	Comparación de valores según la NCh1333.Of78 y NCh409.Of05 con respecto a lo obtenido por la NF.....	59
Tabla 22.	Estimación preliminar de costos asociados al sistema de tratamiento planteado para los procesos de PTAS y membrana (MF y NF)	62
Tabla 23.	Estimación preliminar de costos asociados al proceso de oxidación avanzada.....	62
En el anexo		
Tabla A1.	Requisitos para cumplir con la calidad de agua potable y animal.....	85
Tabla A2.	Requisito de los elementos para uso en riego.....	86
Tabla A3.	Requisitos de características para uso en recreación y estética.....	87
Tabla A4.	Requisitos de características para vida acuática.....	88

ÍNDICE DE FIGURAS

		Página
Figura 1.	Esquema tipo resumen de introducción	11
Figura 2.	Esquema conceptual del desarrollo de metodología del presente trabajo	13
Figura 3.	Relación DBO ₅ /DQO de distintos hospitales a nivel internacional según valor límite de biodegradabilidad.....	19
Figura 4.	Consumo de agua por día y por cama con respecto al tamaño del hospital	25
Figura 5.	Productos farmacéuticos más frecuentemente encontrados en el medio ambiente.....	29
Figura 6.	Diagrama de recirculación del ARH en base a la excreción conjunta con las aguas de uso urbano o domestico	32
Figura 7.	Clasificación de sistemas de tratamiento no convencionales en biológicos, físicos y químicos	33
Figura 8	Espectro de filtración para cada proceso de filtración por membrana	37
Figura 9.	Tecnologías para el tratamiento de contaminantes en agua.....	41
Figura 10.	Diagrama de flujo del diseño conceptual presentado al caso de estudio	45
Figura 11.	Evolución de ocupación de camas UCI durante el primer año de pandemia en Chile.....	61

ÍNDICE DE ECUACIONES

	Página
Ecuación 1. Volumen de la PTAS considerando un TRH de 6 horas.....	47
Ecuación 2. Área de PTAS.....	48
Ecuación 3. Flujo de salida de la NF (m ³ /h) considerando una recuperación del 80%.....	48
Ecuación 4. Flujo de rechazo considerando un porcentaje de 20%.....	48
Ecuación 5. Volumen del POA considerando un TRH de 2 horas.....	49
Ecuación 6. Costo inversión para lodos activados	63
Ecuación 7. Costo de tratamiento para lodos activados	63
Ecuación 8. Costo de inversión para membrana.....	63
Ecuación 9. Costo de tratamiento para membrana	63
Ecuación 10. Costo de capital para POA	63
Ecuación 11. Costo de operación y mantención anual para POA	63

**RESIDUOS LÍQUIDOS HOSPITALARIOS Y SU IMPACTO EN LA CALIDAD
DE LAS AGUAS: EXPLORANDO ALTERNATIVAS DE TRATAMIENTO
PARA ENFRENTAR LOS ACTUALES Y FUTUROS ESCENARIOS DE
ESCASEZ HÍDRICA EN CHILE.**

HOSPITAL LIQUID WASTE AND ITS IMPACT ON WATER QUALITY:
EXPLORING TREATMENT ALTERNATIVES TO FASE CURRENT AND
FUTURE WATER SCARCITY SCENARIOS IN CHILE.

Palabras claves: Agua residual, segregación, contaminantes emergentes, calidad, efluente.

RESUMEN

La contaminación de aguas superficiales con los denominados contaminantes emergentes (fármacos y pesticidas, entre otros) constituye uno de los grandes problemas ambientales del siglo XXI. Una de las principales fuentes de estos contaminantes son las aguas residuales hospitalarias que se tratan en conjunto con las aguas residuales urbanas llegando a las plantas de tratamiento cuyos sistemas convencionales de eliminación no son capaces por sí solos de llevar a cabo la descontaminación de estas aguas. Es por esto que su segregación y combinación con tratamientos más avanzados como los procesos de filtración por membranas de NF y de oxidación, los establecen como sistemas de tratamiento adecuados para reducir y eliminar estos contaminantes, donde su efluente debido a su alta calidad cumple con las normativas respectivas para darles un reuso importante. En el presente estudio, se propone al Hospital Herminda Martin de Chillán un sistema de tratamiento que considera una PTAS de lodos activados, un proceso de

membrana por MF y NF y un proceso de oxidación avanzada con peróxido de hidrógeno cuyas aguas efluentes cumplen con la NCh1333 Of79 y la NCh409.Of05 para los reúsos establecidos en cada una de ellas. Por lo tanto, la aplicación del sistema propuesto contribuye directamente a la disminución de la escasez hídrica que afecta a nuestro país y región, así como también a disminuir los costos asociados a la adquisición del agua para distintos usos. Sistema que también podría aplicarse al nuevo hospital regional en construcción que se emplazará en nuestra ciudad de Chillán.

**HOSPITAL LIQUID WASTE AND ITS IMPACT ON WATER QUALITY:
EXPLORING TREATMENT ALTERNATIVES TO FACE CURRENT AND
FUTURE WATER SCARCITY SCENARIOS IN CHILE.**

Keywords: Residual water, segregation, emerging contaminants, quality, effluent.

SUMMARY

The contamination of surface water with the so-called emerging pollutants (pharmaceuticals and pesticides, among others) is one of the major environmental problems of the 21st century. One of the main sources of these pollutants is hospital wastewater, which is treated together with urban wastewater, reaching treatment plants whose conventional disposal systems alone are not capable of decontaminating these waters. This is why their segregation and combination with more advanced treatments such as NF membrane filtration and oxidation processes, establish them as adequate treatment systems to reduce and eliminate these pollutants, where their effluent, due to its high quality, complies with the respective regulations to give them an important reuse. In the present study, a treatment system is proposed to the Herminda Martín Hospital in Chillán that considers an activated sludge WWTP, a membrane process by MF and NF and an advanced oxidation process with hydrogen peroxide whose effluent waters comply with NCh1333 Of79 and NCh409.Of05 for the reuses established in each one of them. Therefore, the application of the proposed system contributes directly to the reduction of the water shortage that affects our country and region, as well as

to reduce the costs associated with the acquisition of water for different uses. This system could also be applied to the new regional hospital under construction to be located in our city of Chillán.

1. INTRODUCCIÓN

“Del total de agua existente en el planeta, sólo el 1% de ella está disponible para los ecosistemas y el consumo humano y animal.” (Castro, 2010). Considerando lo anterior, a medida que crece la población mundial se genera una necesidad creciente de conciliar la competencia entre las demandas comerciales de los recursos hídricos para que las comunidades tengan la suficiente agua de calidad con el fin de satisfacer sus necesidades (Naciones Unidas, 2019). Con el aumento de la población, y el hecho de darle solución a sus necesidades, es que se va potenciando la disminución de recursos hídricos. Esto lleva a una problemática que afecta a muchos países en el mundo, la escasez hídrica, cuyas principales causas son: la sequía, la contaminación y el uso descontrolado del agua (ACNUR, 2019).

Con el paso del tiempo, en el mundo se ha ido agravando la degradación de la calidad del agua disponible para ecosistemas, consumo humano y animal, que contribuye a la escasez de este recurso, además, la incidencia humana sobre la calidad de las aguas se ejerce fundamentalmente a través del vertido a sistemas naturales de efluentes residuales haciéndose necesario establecer los criterios de calidad que han de reunir las aguas residuales antes de ser evacuadas en un sistema receptor (Ortiz, 2014). También cabe mencionar que “la generación constante de nuevos productos químicos y su uso intensivo en las actividades antrópicas están conduciendo a una mayor degradación de los recursos hídricos en todo el planeta por la adición de materia orgánica, sales solubles, metales pesados y diversas sustancias con efectos tóxicos a la

biota". (Bravo, 2018). Bajo este contexto, existe un creciente interés por los contaminantes emergentes (CEs), ya que son compuestos de distinto origen y naturaleza química, cuya presencia en el medioambiente, o las posibles consecuencias de esta, han pasado en gran medida inadvertidas, causando problemas ambientales y de riesgo para la salud, como lo concluyeron Barceló y López (2007). Se han encontrado también estos CEs en fuentes de agua potable, subterráneas y de abastecimiento. Se ha establecido que estos compuestos entran en el ambiente a través de algunas fuentes y vías, destacándose los efluentes hospitalarios debido al gran uso de compuestos químicos que se utilizan en estos recintos de salud. Estos residuos, generalmente, sobretodo en Latinoamérica son enviados a plantas de tratamiento, donde debido a que estas no cuentan con las tecnologías ni condiciones para poder eliminar estos contaminantes, es que son liberados al ambiente provocando los daños mencionados anteriormente. Por lo tanto, resulta de gran interés poder estudiar las aguas residuales hospitalarias.

1.1 Aguas residuales hospitalarias y su problemática hacia el medioambiente.

Los hospitales consumen una gran cantidad de agua ($400 - 1200 \text{ L día}^{-1}$ cama⁻¹) y, en consecuencia, generan elevados volúmenes de aguas residuales, las cuales contienen microorganismos patógenos y sustancias de diversa toxicidad como fármacos, productos de higiene personal y desinfectantes, por lo que su vertido sin un tratamiento adecuado constituye

un importante problema medioambiental (Muñoz et al., 2016). Se incluye, en particular, en el contexto de la pandemia de la enfermedad por Coronavirus 2019 (COVID-19), el aumento de aguas residuales hospitalarias debido a esta reciente emergencia de salud pública mundial (Wang et al., 2020), tales vertidos a sistemas naturales de efluentes traen consigo múltiples consecuencias, no solo para la salud de las personas, sino que también generan impactos medioambientales alarmantes. Además, se estima que “a nivel mundial se vierten anualmente a las aguas superficiales cerca de 300 millones de toneladas de compuestos sintéticos, entre los que se encuentran productos farmacéuticos” (Kummerer, 2011), cuyas concentraciones que se han detectado en efluentes de plantas de tratamiento varían de 0.0016 a 373 µg/L, dependiendo de la población, ubicación y proceso de tratamiento a que son sometidas las aguas residuales (Verlicchi et al., 2012). Cabe apuntar, además, que es cada vez mayor la preocupación acerca del impacto, en los ecosistemas acuáticos, de los productos farmacéuticos como las píldoras anticonceptivas, analgésicos y antibióticos (Naciones Unidas, 2014). Además, recientemente se ha prestado una atención creciente a la aparición de (i) bacterias resistentes a los antibióticos (ARB) y genes resistentes a los antibióticos (ARG) presentes en los efluentes hospitalarios crudos y tratados, (ii) patógenos y (iii) virus (Ibrahim et al., 2019). En este contexto, resulta imprescindible el desarrollo de procesos de tratamiento eficaces que permitan resolver la problemática de las aguas residuales hospitalarias. Diferentes tratamientos fisicoquímicos como la coagulación (Gautam et al., 2007) o la

combinación de coagulación-floculación y flotación (Suarez et al., 2009) han sido evaluados para tal fin.

Sin embargo, a pesar de que los efluentes hospitalarios deben ser tratados (en una planta específica o junto con las aguas residuales urbanas), en algunos países, que pertenecen a Latinoamérica, se siguen vertiendo directamente a los ríos o al mar sin ningún tipo de tratamiento. Este es el caso de Colombia (Azizi et al., 2016), donde estudios arrojan que las concentraciones más elevadas (hasta 50 µg/L) encontradas corresponden al paracetamol, pero varios antibióticos, como la azitromicina, la ciprofloxacina y la norfloxacina, y los antihipertensivos, como el losartán y el valsartán, estaban comúnmente presentes en las aguas residuales afluentes a niveles superiores a 1 µg/L. “Además, el tratamiento aplicado en las Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) parecía no eliminar eficazmente aquellos compuestos, ya que la mayoría de los fármacos estaban también presentes en las aguas residuales efluentes en concentraciones cercanas a las de las afluentes” (Botero-Coy et al., 2018).

Otro país perteneciente a Latinoamérica que presenta contaminación de tipo bacteriológica en aguas residuales es Ecuador cuyos estudios basados en la realización de tres muestreos compuestos de aguas residuales con tres réplicas cada uno antes del tratamiento convencional de la PTAR y después de su descarga al sistema de alcantarillado, utilizando medios de cultivo para el crecimiento de las bacterias: *Escherichia Coli*, *Salmonella spp*, *Staphylococcus aureus* son: Brilliant Green Bile y BBL Eosin, Agar SS,

(BBL)TM Mannitol Salt Agar, arrojaron que la PTAR del Hospital Puyo presenta una contaminación excesiva de patógenos en aguas, determinando que el tratamiento brindando a estos efluentes no es adecuado ya que prevalece la presencia del patógeno *Escherichia coli* que arroja un valor de crecimiento bacteriano de $4,9 \times 10^5$ UFC, de *Salmonella* spp, presenta un crecimiento de $8,4 \times 10^5$ UFC y de *Staphylococcus aureus* de $4,9 \times 10^5$ UFC contrastándose con el crecimiento relativo de bacterias patógenas causantes de una toxicidad extremadamente alta en los seres humanos como: *Escherichia coli*, (50%), *Klebsiella pneumoniae*, (10%) *Enterobacter cloacae* (0,1%) *Shigella dysenteriae*, (10%) *Salmonella* spp. (30%) evidencias que aseguran el grado de contaminación y la resistencia que presenta estas bacterias patógenas a tratamientos convencionales aplicados a estos efluentes generados por la unidad de salud ubicada en Ecuador. (Beltrán et al., 2019)

Sin ir más lejos, en Chile, país perteneciente a la OCDE donde los estándares ambientales son más altos que otros países latinoamericanos y que, además, según la literatura hídrica de Chile se proyecta una escasez de agua de hasta un 50% en la mayoría de las regiones del país en el futuro, no existe un enfoque directo a los problemas asociados a contaminantes emergentes presentes en aguas residuales y su origen, sin embargo, se han encontrado estudios que demuestran la presencia y concentración de 16 contaminantes emergentes de variados grupos químicos (fármacos, productos de cuidado personal, droga psicoestimulante y disruptor endocrino) en plantas de

tratamiento de aguas residuales, visibilizando la ocurrencia de contaminantes de interés emergente siendo las concentraciones más altas la de los fármacos gemfibrozil (29.783 ng L⁻¹), ibuprofeno (3.800 ng L⁻¹), atenolol (2.590 ng L⁻¹), diclofenaco (1.945 ng L⁻¹), el desinfectante triclosán (1.856,7 ng L⁻¹), cafeína (1.395 ng L⁻¹) y e-carbamazepina (1.345 ng L⁻¹), en el efluente de planta de tratamiento de la ciudad de Los Ángeles, durante el año 2013 (Saavedra, 2015). Otro caso es lo ocurrido en la región metropolitana, donde estudios revelan la presencia de ácido acetil salicílico, ibuprofeno, naproxeno, ketoprofeno, ácido mefenámico, diclofenaco, ácido cloribrico, gemfibrozilo, parabenos, hormonas, nonifenol y triclosán en concentraciones de hasta 20 µg/L encontrados en aguas residuales de la región, además de la existencia de hasta 8 µg/L en aguas ya procesadas en las plantas de tratamiento (Manzo et al., 2019). Por lo tanto, se demuestra que en Chile existe la presencia de contaminantes emergentes, cuyo origen probable sean, en parte, las aguas residuales provenientes de los hospitales o efluentes hospitalarios que si bien, no existe información más a detalle, es un problema latente.

Por consiguiente, los hospitales que se encuentran en las capitales regionales son aquellos que generan una mayor cantidad de aguas residuales debido al alto número de personas que asisten a estos centros de salud. Es por esto, que se propone como caso de estudio, lo que ocurre en Ñuble ya que existe un solo hospital que atiende a una zona amplia que cuenta con 21 comunas y un total de habitantes de 480.609, de esta cantidad y según el censo realizado en 2017, 30.6% corresponde a población del tipo rural (INE, 2017), lo que

facilita el presente estudio, ya que implica la alta concurrencia de pacientes al centro de salud ubicado en la capital de la región de Ñuble, el Hospital Herminda Martín de Chillán.

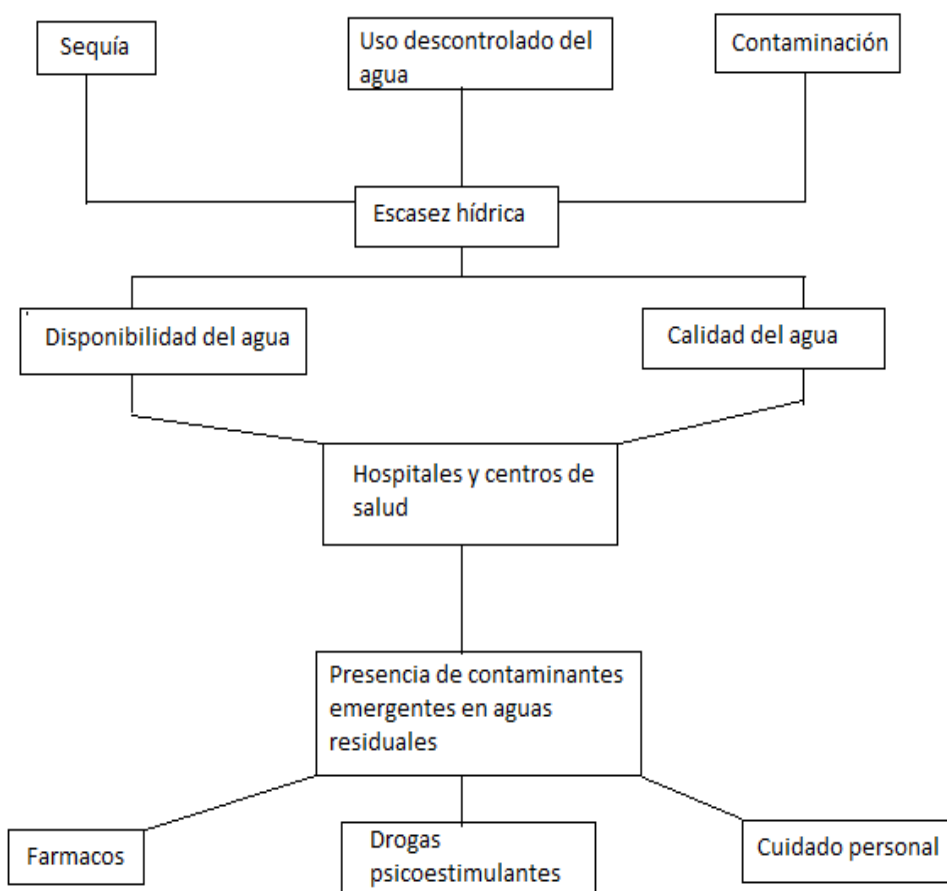


Figura 1. Esquema tipo resumen de introducción.
Fuente: Elaboración propia.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo general

Evaluar alternativas de tratamiento avanzado para el efluente del centro de salud pública de la Región de Ñuble, Hospital Herminda Martin de Chillán.

2.2 Objetivos específicos

- Determinar las variables de los residuos líquidos hospitalarios.
- Analizar sistemas de tratamientos a nivel internacional de residuos hospitalarios.
- Diseñar conceptualmente un sistema de tratamiento aplicable en el Hospital Herminda Martin.

3. METODOLOGÍA

Para comprender la investigación realizada, se presenta en la siguiente figura, las líneas teóricas y método de trabajo que guían el presente estudio. Para ello se aborda en primera instancia las herramientas que se utilizaron para recabar la información necesaria para la resolución de cada objetivo. Posteriormente se presentan las fases que comprendieron la investigación y finalmente se presentan los mecanismos para el cumplimiento de objetivos.

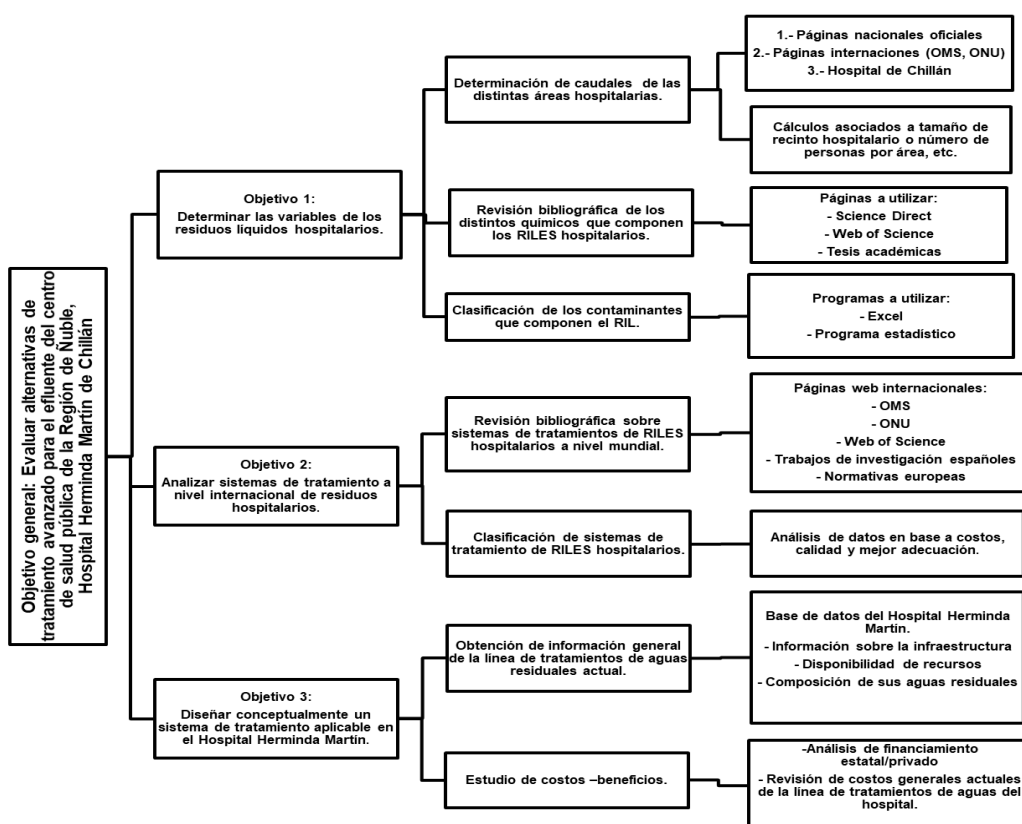


Figura 2. Esquema conceptual del desarrollo de metodología del presente trabajo.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Primera etapa: Determinación de variables, parámetros fisicoquímicos y caracterización de contaminantes emergentes de tipo farmacéutico en aguas residuales hospitalarias.

A nivel mundial, los parámetros fisicoquímicos más utilizados para caracterizar aguas residuales de hospitales son: demanda biológica de oxígeno (DBO₅), pH, demanda química de oxígeno (DQO) y sólidos suspendidos totales (SST). Estos parámetros varían según el país y la cantidad de camas, la cual está relacionado con el tamaño del recinto hospitalario, como se ve en la tabla 1.

Dentro de esta primera etapa también se caracteriza la concentración y familia farmacológica de diversos contaminantes emergentes de tipo farmacéuticos que están presentes en aguas residuales hospitalarias a nivel mundial como lo muestra la tabla 6.

4.1.1 Parámetros fisicoquímicos de aguas residuales hospitalarias a nivel internacional.

En la siguiente tabla se presentan las características fisicoquímicas básicas más estudiadas de las aguas residuales de distintos establecimientos de salud a nivel mundial, tales como: DQO – DBO₅ - pH– SST. Además, para independizar el análisis de tamaño del hospital, se estandarizó por el número de camas de los hospitales estudiados.

Tabla 1. Caracterización de parámetros fisicoquímicos básicos de aguas residuales hospitalarias a nivel internacional.

Unidad	Hospitales y país									
	NORTEAMERICA/EUROPA					LATINOAMÉRICA				
	Hospital en Canadá	Hospital en Turquía	Hospital en España	Hospital en Francia	Hospital en Ecuador	Hospital en Argentina	Hospital en México	Hospital en Colombia	Hospital en Perú	Hospital en Bolivia
N.º de camas	265	390	238	144	125	400	2240	397	33	400
Parámetros										
pH	7,47	6,60	8,03	7,85	8,60	6,00	10,40	7	6,70	8,90
DBO ₅	187	221	302	603	240	38	153,33	48	209,50	S/I
DQO	441	785	449	1223	365	240	360,67	286	504	720
SST	S/I	S/I	332,30	225	138	458	152	30	105	1000

Fuente: elaboración propia con información de los autores Paz et al., 2004; Santos et al., 2007

*Hospital en Ecuador: Hospital General Puyó *Hospital en Argentina: Clínica José de San Martín *Hospital en México: Hospital Gral. de Accidentes del Instituto Guatemalteco de Seguridad Social *Hospital en Colombia: Hospital Militar Central *Hospital en Perú: Hospital Regional Cajamarca *Hospital en Bolivia: Hospital de Clínicas de la Paz

En la tabla 1, los 3 efluentes hospitalarios con una mayor concentración de DBO_5 son los ubicados en Francia, Madrid y Ecuador con valores de 603, 302 y 240 mg/L respectivamente, lo que indica que los efluentes hospitalarios procedentes de Francia presentan un nivel muy contaminado de sus aguas residuales hospitalarias, mientras que Madrid y Ecuador se encuentran en un nivel mediano de contaminación. Esto según lo indicado por la literatura encontrada (Induanálisis, 2019) para establecer sistemas de tratamientos de agua eficaces:

- Pura: entre 2 y 20 mg/L
- Poco contaminada entre 20 y 100 mg/L
- Medianamente contaminada entre 100 y 500 mg/L
- Muy contaminada entre 500 y 3.000 mg/L
- Extremadamente contaminada entre 3.000 y 15.000 mg/L

Por otra parte, según la literatura encontrada sobre la relación DBO_5/DQO , esta muestra la biodegradabilidad que tienen las aguas residuales y que puede aplicarse a los efluentes hospitalarios para determinar qué tipo de tratamiento es mejor según el siguiente análisis (Aguilar, 2018):

- $\text{DBO}_5/\text{DQO} < 0,20$
 - Vertido tipo inorgánico
 - Aguas residuales industriales
 - Tipos de tratamiento fisicoquímicos

- $DBO_5/DQO > 0,20$
 - Vertido tipo orgánico
 - Aguas residuales urbanas, restos de ganado o industria alimenticia
 - Tipos de tratamiento biológicos

Por lo tanto, en la tabla 2 se muestran los valores obtenidos del cálculo de relación entre las DBO_5 y DQO de cada hospital presente en la tabla 1 obteniendo el tipo de tratamiento más adecuado para las aguas residuales en estudio.

Tabla 2. Relación DBO₅/DQO para los diferentes hospitales.

Establecimiento de salud	Relación DBO ₅ /DQO	Tratamiento aplicado sugerido
Hospital General Puyo - Ecuador	0,67	Biológico
Clínica José de San Martín – Argentina	0,15	Químico
Hospital General de Accidentes del Instituto Guatemalteco de Seguridad Social - México	0,43	Biológico
Hospital Militar Central - Colombia	0,17	Químico
Hospital en Canadá	0,42	Biológico
Hospital en Madrid	0,67	Biológico
Hospital en Turquía	0,28	Biológico
Hospital al Sureste de Francia	0,50	Biológico
Hospital Regional Cajamarca - Perú	0,42	Biológico
Hospital de Clínicas de la Paz - Bolivia	Sin información suficiente	S/I

Fuente: elaboración propia

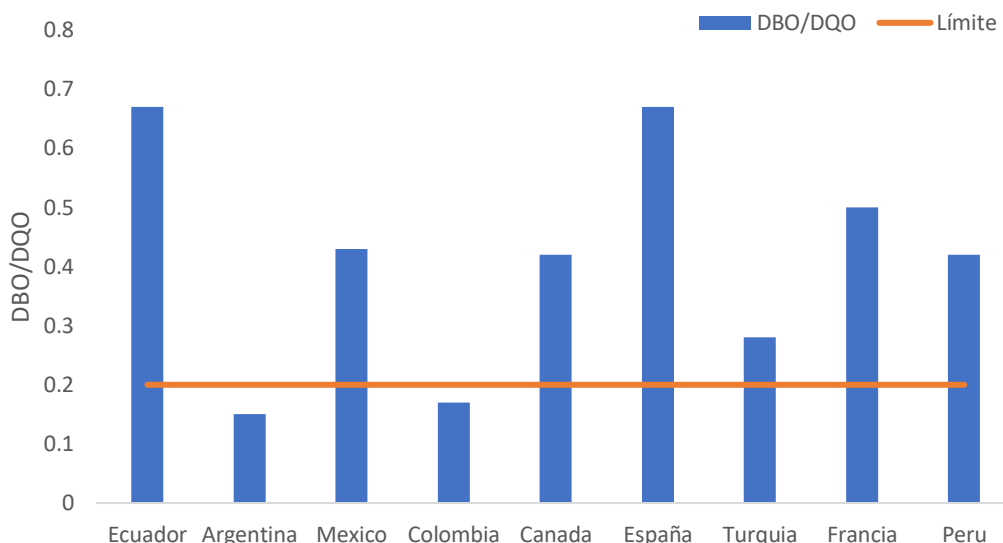


Figura 3. Relación DBO_5/DQO de distintos hospitales a nivel internacional según valor límite de biodegradabilidad.

Según la figura 3, se observa que los países Argentina y Colombia están por bajo el valor límite de biodegradabilidad que corresponde a 0,2 y considerando lo indicado en la literatura, sus aguas residuales hospitalarias debiesen tener un tratamiento de tipo fisicoquímico. Por otra parte, se tienen al resto de países (figura 3) cuyos valores de relación se encuentran por sobre el límite establecido, lo que indica que sus aguas residuales debiesen recibir un tratamiento de tipo biológico. Sin embargo, debido a la alta concentración de contaminantes que presentan estas aguas residuales, existen estudios que han demostrado que estos componentes no son fácilmente removidos por medio de procesos de tratamiento convencionales como las plantas de tratamiento que emplean procesos biológicos (Grisales et al., 2011).

La alta contaminación indicada por los parámetros de DBO_5 y DQO en países como Francia y España se contradice con la literatura actual que, según indica el Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (2019), los hospitales emplean sistemas de decaimiento, en los que las excretas radiactivas de los pacientes hospitalizados se retienen hasta que su actividad haya disminuido y, posteriormente, se realiza el vertido a la red. Sin embargo, el sistema de decaimiento solo se aplica a excretas radiactivas, pero los demás desechos líquidos son vertidos directamente a la red de alcantarillado, lo que explicaría la alta concentración de parámetros de DBO_5 y DQO.

En cuanto a México, cuyo valor se encuentra sobre el límite de biodegradabilidad, del total de las descargas de aguas residuales, el 62% corresponden al sector servicios, donde como subsector se encuentran los hospitales, con 117 establecimientos, 224 descargas de aguas residuales y con consumo de agua potable mayor a 6 mil metros cúbicos anuales, estos altos valores se avalan con el hecho de que México elimina las aguas residuales de hospitales al alcantarillado.

Ecuador presenta el valor más alto de relación DBO_5/DQO (figura 3) ya que, al igual que el resto de los países presentados como Perú, Francia, México, etc., vierte sus efluentes hospitalarios a la red de alcantarillado público sin un tratamiento previo. La diferencia entre los valores encontrados puede estar dado por la consideración de distintas fuentes de emisión como: cocina del hospital, lavandería y prácticamente el resto de las aguas residuales

generadas en el centro, por ejemplo: mantenimiento, laboratorio clínico, etc. (García, 2019)

Considerando lo anterior, y a pesar del nivel de contaminación existente en las aguas residuales de estos hospitales, ubicados tanto en Norteamérica/Europa como Latinoamérica, estas aguas generalmente llegan a los sistemas de recolección de aguas negras de las ciudades y municipios sin tratamiento previo, el cual deben realizar las plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR), junto con los efluentes de origen urbano (Verlicchi et al., 2012), ya que a pesar de su naturaleza específica, a menudo se considera que las aguas residuales hospitalarias (ARH) tienen la misma carga contaminante que las aguas residuales urbanas (ARU) y se vierten en las redes de alcantarillado público, se recogen en una estación depuradora de aguas residuales (EDAR) y se tratan conjuntamente con las ARU como lo indica Espigares y Pérez (2003). “Esta asimilación de las ARH a ARU se basa en que habría similaridad en su composición” (Verlicchi et al., 2010). Sin embargo, las ARH tienen una composición fisicoquímica que difiere a los efluentes urbanos, como lo indica la tabla 3.

La diferencia en los órdenes de magnitud entre las ARH y ARU estaría dado preferentemente por el hecho de que cada paciente aporta por día cargas de DBO_5 , DQO y SST, las cuales varían desde 160 g DBO_5 , 260–300 g DQO y 120–150 g de SST (Verlicchi et al., 2010), lo que representa entre 2 y 3 veces más de la carga de las aguas residuales urbanas. Esto acrecienta aún más la amenaza para el medio ambiente y las personas.

Tabla 3. Comparación de valores medios entre aguas residuales hospitalarias (ARH) y aguas residuales urbanas (ARU)

Parámetro	ARH	ARU	Relación
DBO ₅ mg/L	200	90	2,2
DQO mg/L	500	170	3,0
SS mg/L	160	60	2,7

Fuente: Verlicchi et al., 2010

El vertimiento de aguas residuales que realizan los países mencionados en la tabla 1 presenta graves consecuencias debido a que los desechos hospitalarios son peligrosos para el equilibrio ecológico y la salud pública, y un tratamiento ineficiente puede conducir a contaminación del agua, contaminación radiactiva y también brotes de enfermedades, donde el vertido de ARH, especialmente las que no reciben un tratamiento adecuado, expondría al público al peligro de infección, en particular, en el contexto de la pandemia de COVID-19 en China (Wang et al., 2020).

Es por esto que, según la literatura obtenida, se considera que la práctica habitual de tratamiento conjunto de las ARH y ARU en una EDAR municipal no es una solución adecuada, ya que se basa en la dilución de los distintos vertidos y no proporciona una segregación/separación de los contaminantes y las sustancias tóxicas de la fase líquida, que luego se vierte al medio ambiente. Como se indica en la tabla 4, los valores de los distintos parámetros para ARH son casi siempre mayores que para las ARU, destacando el potencial redox y los cloruros, los cuales llegan a más de 2 órdenes de magnitud.

Tomando en consideración que el cloro es ampliamente usado como desinfectante y según lo indica la Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades (ATSDR, 2016), debido a su alta inestabilidad, este reacciona con el agua y con una variedad de sustancias químicas cuando es liberado al medio ambiente, posteriormente se evapora y con rapidez forma una nube verde-amarillenta que puede ser movilizada por el viento lejos de la fuente original.

Tabla 4. Macro-contaminantes con sus valores típicos en ARH y ARU.

Parámetro	ARH		ARU	
	Rangos	Promedio	Rangos	Promedio
pH	7,7 - 8,1	8	7,5 - 8,5	7,5
Potencial redox, mV	850 - 920	890		100
TKN, mg/L	5,0 - 80,0	33	20 - 70	45
P total, mg/L	0,2 - 13	4	4,0 - 10,0	7
Grasas y aceites, mg/L	5,0 - 60,0	25	50 - 100	75
Cloruros, mg/L	65 - 360	200	30 - 90	50
Surfactantes totales, mg/L	3,0 - 7,2	4,5	4,0 - 8,0	5
E. coli, NMP/100 MI	$10^3 - 10^6$	10^4	$10^6 - 10^7$	10^5
Coliformes fecales, NMP/100mL	$10^3 - 10^7$	10^5	$10^6 - 10^8$	10^7
Coliformes totales, NMP/100mL	$10^5 - 10^8$	10^6	$10^7 - 10^{10}$	10^8

Fuente: Verlicchi et al., 2010

4.1.2 Consumo de agua diario por paciente y tamaño del recinto.

Al relacionar la cantidad de agua consumida por el hospital con el tamaño de este (tabla 5) se aprecia que no existe una correlación clara entre los consumos específicos de los hospitales (expresados en L cama⁻¹ d⁻¹) y el tamaño del hospital (es decir, el número de camas), como muestra la figura 4, que se refieren a hospitales de diferentes países del mundo.

Tabla 5. Consumo de agua por cama y día de distintos hospitales.

Hospital	Consumo lt/cama*día	Camas totales	Consumo lt/día	Consumo m ³ /cama*día	Consumo m ³ /día	Área hospital m ²
Hospital León Becerra - Ecuador	710	141	100110	0,71	100,11	S/I
Hospital Sótero del Río - Chile	1885,70	779	1468960	1,88	1468,96	160000
Hospital Universitario La Paz - Madrid - España	552,15	1308	722212,22	0,55	722,21	320500
Hospital Pablo Tobón - Colombia	1213	371	450.023	1,21	450023	55240
Hospital el Tunal - Bogotá - Colombia	508	84	42672	0,51	42672	16328,8
Hospital Militar Central - Bogotá - Colombia	2080	700	1456000	2,08	1456	5447
Clínica José de San Martín - Argentina	1400	400	560000	1,40	560	130000
Hospital Clínicas de Porto Alegre - Brasil	100	725	72.00	0,10	72,50	223704,4
Colegio Médico Christian - India	1200	2000	2400000	1,20	2400	76890,3

Fuente: elaboración propia

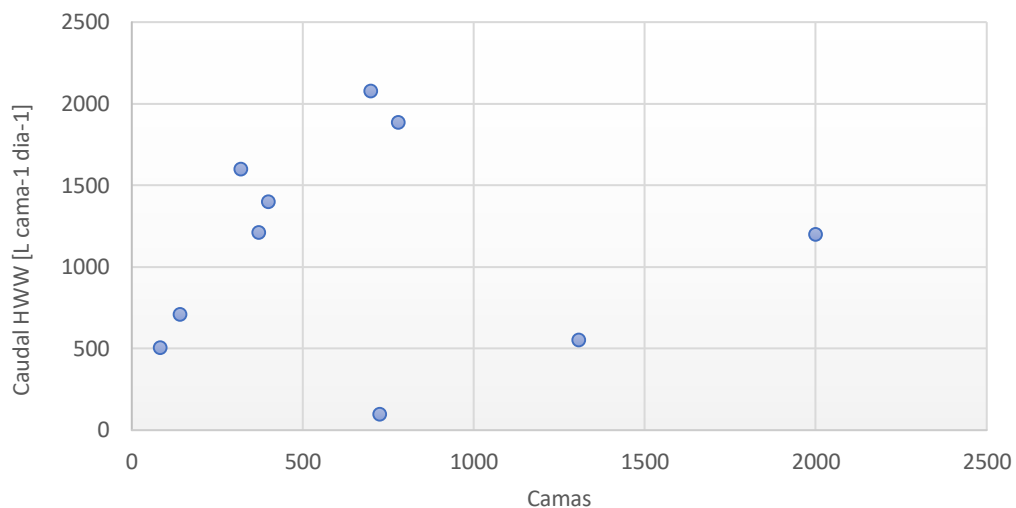


Figura 4. Consumo de agua por día y por cama con respecto al tamaño del hospital.

En este gráfico, los datos se extienden entre 100 y 2080 L cama⁻¹ d⁻¹ con los valores más altos procedentes de los países industrializados y los más bajos de los países en desarrollo, donde el consumo se mantiene en torno a 0,10 - 2,08 m³ por cama y día.

Por lo tanto, existe una relación entre el gasto generado por cama y cantidad de ARH. Por ende, a mayor gasto por cama, tendremos mayor cantidad de agua residual y si esto no se relaciona con el n^o de pacientes o tamaño de hospital, indica una mala gestión del agua utilizada.

4.1.3 Clasificación de los contaminantes emergentes de tipo farmacéutico que componen a las aguas residuales hospitalarias a nivel internacional.

Las ARH contienen una variedad de sustancias tóxicas y persistentes tales como productos farmacéuticos, radionucleidos, disolventes y desinfectantes para uso médico en un amplio intervalo de concentraciones debido a actividades de laboratorio e investigación (Verlicchi et al., 2012). Debido a la naturaleza recalcitrante de los compuestos presentes en las aguas residuales hospitalarias, los procesos convencionales usados en las plantas de tratamiento de las ciudades y municipios no son capaces de remover la contaminación que aporta este tipo de efluentes (Verlicchi et al., 2010), la cual queda en el agua y posteriormente queda a libre disposición para su ingesta. Aparte de los contaminantes indicados anteriormente, estos tipos de aguas residuales provenientes de hospitales presentan concentraciones altas de fármacos y otros tipos de contaminantes recalcitrantes (Al Qarni et al., 2016). En la tabla 6 se destaca la presencia de antibióticos, antiinflamatorios y hormonas que provocan alteraciones ambientales y en la salud humana según lo indica Herrera y Corpas (2013). No todos los productos farmacéuticos son removidos lo suficiente con los sistemas actuales de tratamiento por lo que pueden estar presentes en los efluentes de las plantas de tratamiento, en distintos cuerpos de agua e incluso en el agua potable a muy bajas concentraciones (Aguilar, 2018).

Tabla 6. Caracterización de concentraciones de contaminantes emergentes de tipo farmacéutico presentes en distintos efluentes hospitalarios a nivel mundial.

País	Caracterización	Concentración (mg/L)	Grupo farmacéutico	Referencia
Suecia	ciprofloxacino	52,3*	antibiótico	Lindberg et al., 2004
	sulfametoxazol	6.3*	antibiótico	
	ofloxacino	3.9*	antibiótico	
	trimetoprim	4.1*	antibiótico	
México	lincomicina	0.002	antibiótico	Brown et al., 2018
	sulfametoxazol	0.0008	antibiótico	
	ofloxacino	0.0255	antibiótico	
	trimetoprim	0.005	antibiótico	
	penicilina G	0.0052	antibiótico	
	ciprofloxacino	0.002	antibiótico	
España	acetaminofen	0.01602	analgésico	Ramos-Alvariño, 2012
	atenolol	0.0034	β -bloqueadora	
	carbamazepina	0.00004	anti convulsionante	
	codeina	0.0009	analgésico	
	diclofenaco	0.0014	analgésico	
	eritromicina	0.000019	antibiótico	
	ibuprofeno	0.01977	analgésico	
	ketorolaco	0.0042	antiinflamatorio	
	metronidazol	0.0059	antimicrobiano	
	propranolol	0.00135	β -bloqueadora	
	ranitidina	0.00098	bloqueador H ₂	
trimetoprim	0.000025	antibiótico		
Italia	diclofenaco	0,000665	analgésico	Verlicchi, 2012
	atenolol	0,000417	β -bloqueadora	
	hidroclorotiazida	0,000385	diurético	
	sotalol	0,000327	antiarrítmico	
	ciprofloxacino	0,000284	antibiótico	
	claritromicina	0,000283	antibiótico	
	carbamazepina	0,00024	anti convulsionante	
	furosemida	0,000235	diurética	
	timolol	0,000002	β -bloqueadora	

Continuación tabla anterior

	metoprolol	0,00021	β -bloqueadora	
	azitromicina	0,000175	antibiótico	
Noruega	acetaminofen	0.00067	analgésico	Majumder, 2021
	ibuprofeno	0.032	antiinflamatorio	
	diclofenaco	1.75×10^{-3}	analgésico	
	propranolol	0.015	β -bloqueadora	
	estriol			
	estradiol	5.00×10^{-4}	hormonas	
	estronea			

Valor de ciprofloxacino en Suecia es obtenido mediante el promedio de rangos inferior y superior, 3.6 y 101.0 mg/L respectivamente. Valor de sulfametoxazol en Suecia es obtenido mediante el promedio de rangos inferior y superior, 0.4 y 12.2 mg/L respectivamente. Valor de ofloxacino en Suecia es obtenido mediante el promedio de rangos inferior y superior, 0.2 y 7.6 mg/L respectivamente. Valor de trimetoprim en Suecia es obtenido mediante el promedio de rangos inferior y superior, 0.6 y 7.6 mg/L respectivamente. Valor de diclofenaco en Noruega es obtenido mediante el promedio de rangos inferior y superior, 0.0005 y 0.003 mg/L respectivamente. Valor de ibuprofeno en Noruega es obtenido mediante el promedio de rangos inferior y superior, 0.028 y 0.036 mg/L respectivamente. Valor de propranolol en Noruega es obtenido mediante el promedio de rangos inferior y superior, 0.01 y 0.02 mg/L respectivamente. Valor de estriol, estradiol y estronea en Noruega es obtenido mediante el promedio de rangos inferior y superior, 0.0001 y 0.0009 mg/L respectivamente.

Tabla 7. Clasificación por familia farmacológica de los distintos medicamentos encontrados en aguas residuales hospitalarias a nivel internacional.

Familia farmacológica	Concentración total promedio mg/L
Antibióticos	4,44000
Beta - bloqueadores	0,00363
Analgésicos	0,00514
Anti – convulsionantes	0,00014
Anti - inflamatorios	0,01800
Hormonas	0,00050

Fuente: elaboración propia con información obtenida de autores como Lindberg et al., 2004; Brown et al., 2006; Ramos-Alvariño, 2012; Verlicchi, 2012 y Majumder, 2021.

Como se muestra en la tabla 7, las distintas concentraciones promedio de los tipos de familias farmacológicas fluctúan entre los 0,00050 – 4,44000 mg/L donde la mayor cantidad se refleja en los antibióticos con una concentración promedio de 4,440 mg/L, valor que cuadruplica a las demás concentraciones de los distintos fármacos encontrados. Por consiguiente, en un orden de mayor

a menor se encuentran: los antiinflamatorios, analgésicos, beta – bloqueadores, hormonas y anti – convulsionantes con concentraciones promedio de 0,01800 mg/L, 0,0050 mg/L, 0,0030 mg/L, 0,0005 mg/L y 0,0001 mg/L respectivamente, lo que se asemeja a la literatura existente respecto a los estudios de caracterización de efluentes hospitalarios según lo indica la figura 5:

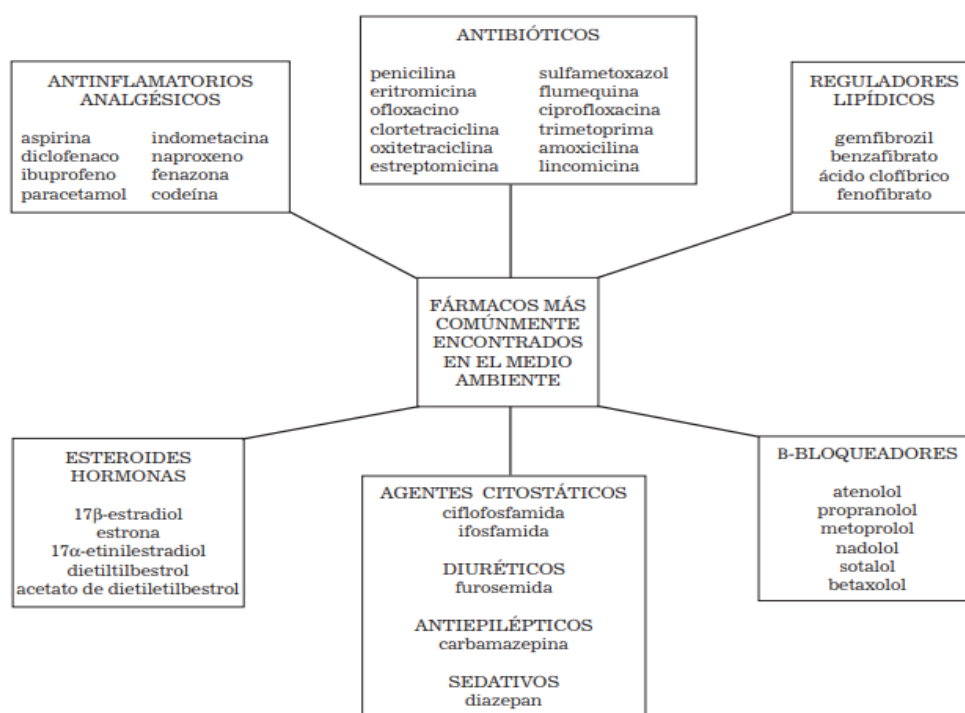


Figura 5. Productos farmacéuticos más frecuentemente encontrados en el medio ambiente.

Fuente: Quesada et al., 2009

Esta alta presencia de contaminantes emergentes muchas veces pasa inadvertida, pese a que tienen el potencial de acarrear un impacto ecológico, así como efectos adversos sobre la salud (Barceló et al., 2007; Stuart, 2012; Bolong et al., 2008), ya que, en las plantas de tratamiento, en su mayoría no cuentan con la tecnología suficiente para detectarlos. Desafortunadamente las EDAR convencionales están diseñadas principalmente para separar los sólidos en suspensión y eliminar la materia orgánica biodegradable y, por lo general no son capaces de eliminar por completo los productos farmacéuticos, dependiendo su eliminación de su adsorción en lodos biológicos y biodegradación. (Verlicchi. 2012)

Además, según las propiedades fisicoquímicas de los fármacos, sus metabolitos, productos de degradación, y las características de los suelos, estas sustancias pueden llegar a alcanzar las aguas subterráneas y contaminar los acuíferos o bien quedar retenidas en el suelo y acumularse pudiendo afectar al ecosistema y a los humanos a través de la cadena trófica (Janet et al., 2012).

En cuanto a los antibióticos, tal y como evidencia la tabla 8, existe una alta presencia de estos en el ambiente y según la literatura tienen una implicancia directa en los mecanismos de defensa propios de los organismos vivos (Jiménez, 2011). Tras su administración, los principios activos de los medicamentos se metabolizan, pero sólo en cierta medida (Majumder et al., 2019). Los principios activos no metabolizados se excretan, en gran parte, por la orina (generalmente entre el 55 y el 80% del total, con pocas excepciones,

como lo indica Ternes y Joss (2006) y, en parte, por las heces, como sustancias inalteradas, como mezcla de metabolitos o conjugadas con un compuesto inactivador unido a la molécula (Halling-Sorensen et al., 1998; Lienert et al., 2007), entrando así en el ciclo del agua. Además, los antibióticos se consideran en la actualidad dentro de los grupos de fármacos más peligrosos debido a la posibilidad de que se desarrollen cepas bacterianas resistentes que hagan que estos compuestos resulten ineficaces para el fin para el que fueron diseñados. Los antibióticos ocupan el tercer puesto en volumen de uso de todos los fármacos empleados en medicina humana, y el 70% de los empleados en medicina veterinaria, alterando fundamentalmente la micro biosfera y probablemente debido a esto, han recibido menos atención las consecuencias de la contaminación antibiótica sobre la biodiversidad (Al Aukidy et al., 2012).

En base a la información anterior, se puede dar a entender con la figura 6, la importancia que posee un sistema de tratamiento eficiente debido a que los hospitales entran a la recirculación del agua llegando esta directa o indirectamente al consumo humano.

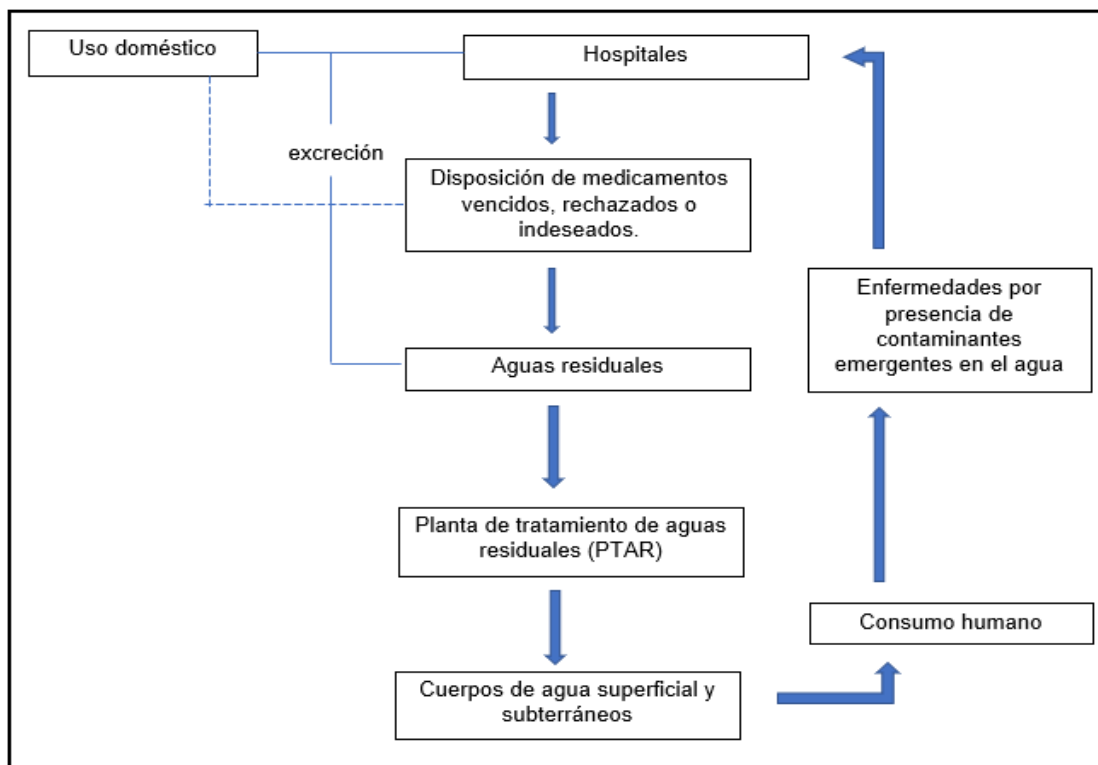


Figura 6. Diagrama de recirculación del ARH en base a la excreción conjunta con las aguas de uso urbano o doméstico.

Fuente: elaboración propia

4.2 Segunda etapa: Análisis de sistemas de tratamiento de aguas residuales hospitalarias, aplicados a nivel internacional.

Dentro de los diferentes sistemas aplicados en ARH, las tecnologías que mayoritariamente tienen una eficiencia notoria en ellas se muestran en la figura 7. Por consiguiente, se clasifican los sistemas de tratamientos encontrados, en base a su reducción de DQO y condiciones de uso, como lo muestra la tabla 8.

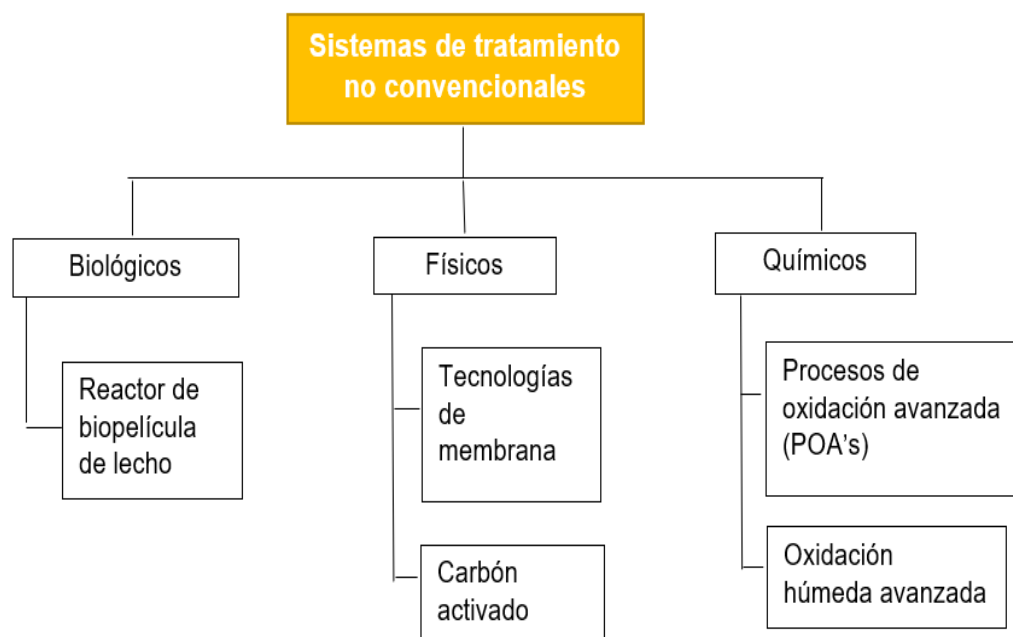


Figura 7. Clasificación de sistemas de tratamiento no convencionales en biológicos, físicos y químicos.

Fuente: elaboración propia

4.2.1 Sistemas de tratamiento aplicados a aguas residuales hospitalarias que son usados a nivel mundial.

Dentro de los sistemas a nivel internacional, indicados en la figura 7, estos pueden clasificarse según su porcentaje de reducción de DQO y condicionalidades de uso, como lo muestra la tabla 8.

Tabla 8. Tipos de sistemas de tratamiento clasificados según porcentaje (%) de reducción de DQO y condicionalidades de uso.

Tipo de proceso	Tratamiento	% disminución DQO	Condiciones de uso
Proceso biológico	Reactor de biopelícula de lecho	>83 %	Limitación DQO \leq 650 mg/L
Procesos físicos	Nanofiltración	93,50%	Temperatura máxima del agua de 40-50 °C y tratamiento previo aguas muy contaminadas.
	Osmosis inversa	96,8% (combinación con ultrafiltración)	Instalación de filtro de sedimentos antes del filtro de ósmosis inversa
	Carbón activado	66%	Limitación de temperatura entre 2 y 40°C y filtración previa.
Procesos químicos	Procesos de oxidación avanzada (POA)	61% (combinación con ozono)	Concentración de DQO \leq 5000 mg/L.
	Oxidación húmeda avanzada	S/I	DQO < 5000 mg/L

Fuente: elaboración propia con información obtenida de autores: Ingeniería Romin, 2017; Monge, 2018; Neyens, 2003; Restrepo et al., 2008; Ramírez et al., 2013; Díaz de los Ríos y Lorenzo (2018); Condorchem Envitech, 201?;

Como se observa en la figura 7, existen tratamientos no convencionales (TNC) que se dividen en biológicos, físicos y químicos. Dentro de estos procesos los más usados, según la literatura encontrada, son la osmosis inversa y los procesos de oxidación avanzada (POA) debido a que tienen una buena remoción de contaminantes (Ozonotech, 2019). Es por esto que se revisarán con más detalle a continuación.

Aunque ambos procesos tienen ventajas y desventajas (tabla 9), entre ellas se destaca el elevado costo asociado principalmente a la osmosis inversa lo cual para sistemas de tratamiento donde el agua se va a desechar, los costos toman un valor importante.

Tabla 9. Ventajas y desventajas de los procesos de osmosis inversa y POA.

TNC	Ventajas	Desventajas
Osmosis inversa	No utiliza productos químicos contaminantes o nocivos.	Elevado costo de operación y mantenimiento.
	Compatible con los sistemas de filtración habituales.	Filtro de agua por osmosis inversa desmineralizan el agua.
	Elimina minerales disueltos causantes de que el agua huelga mal, tenga mal sabor y adquiera colores inusuales (iAgua, 2018)	Requiere prefiltraciones para captar partículas que dañan la membrana de osmosis inversa.
POA	Transformación química de los contaminantes sin generación de lodos (Pinos, 2020) Eliminación de contaminantes orgánicos complejos refractarios que no son removidos con los tratamientos convencionales. (Pinos, 2018)	Elevados costos de los reactivos químicos y energéticos requeridos para operar el sistema. (GWT, 2018).

Fuente: elaboración propia con información de autores como: iAgua, 2018; Pinos, 2018; Craig, 2018; GWT, 2018; Jacóme et al., 2015; Ozonotech, 2019; Tecniaguas, 2019.

Como se puede observar en la tabla 9, la osmosis inversa si bien presenta una alta eficiencia en la remoción de DQO, es una de las tecnologías de proceso de más elevado costo, por lo tanto, dentro de los procesos físicos también se encuentra la nanofiltración cuya diferencia de porcentaje de remoción de DQO con respecto a la osmosis inversa, es sólo de un 3,3% (96,8% para O.I y 93,50% para NF). Por lo tanto, ambos procesos muestran una eficacia de sobre el 90% en la reducción de la carga de DQO. Por consiguiente y teniendo en consideración que los procesos de filtración son de menor costo (GWT, 2018) ocuparemos para las ARH del caso de estudio, el proceso de nanofiltración.

Dentro de los procesos de filtración, y como se indica en la figura 8, la nanofiltración se encuentra sólo una escala más bajo de la osmosis inversa, reteniendo en su totalidad virus, coloides, compuestos orgánicos disueltos y algunas sales (García, 2014). Además, puede retener contaminantes con un peso molecular de hasta 200 Da (dalton) como lo concluyeron Godoy y Aravena (2020).

Espectro de Filtración

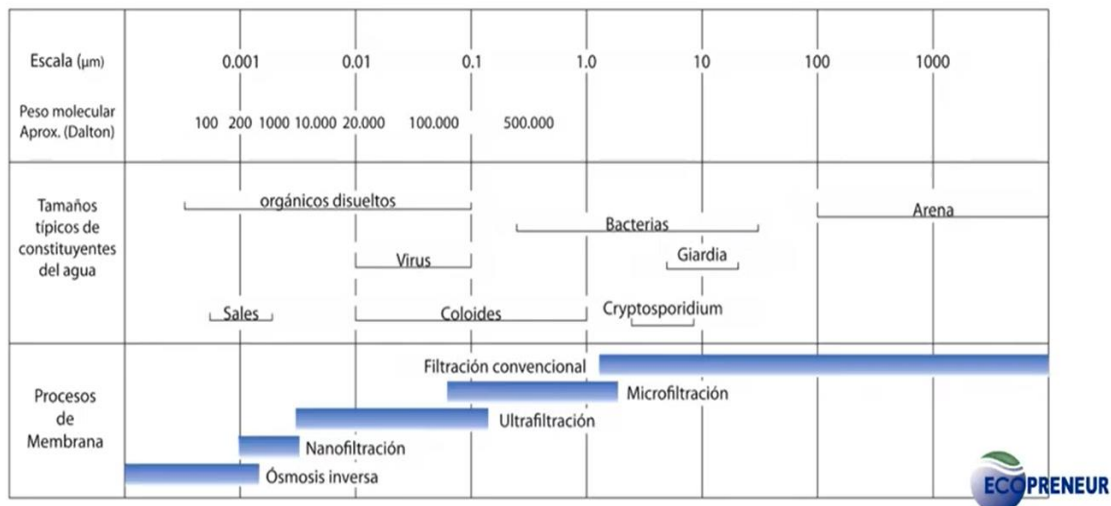


Figura 8. Espectro de filtración para cada proceso de filtración por membrana. Fuente: Godoy y Aravena (2020)

Teniendo en consideración el contexto actual de pandemia mundial causado por el virus SARS-CoV-2 (coronavirus), el cual según la literatura encontrada su tamaño promedio oscila entre 0.08 y 0.12 micras (Fong et al., 2020), mientras que las membranas de nanofiltración son de estructura microporosa y pueden retener partículas con un tamaño de 0,001 micras según lo indica la Asociación Española de Desalación y Reutilización (2020), es que se puede afirmar que este tipo de proceso de filtración de membrana podría retener las trazas de coronavirus encontradas en aguas residuales hospitalarias y así disminuir los cauces de agua como potencial fuente de contagio (Pastrian-Soto, 2020).

Lo mismo ocurre con la retención de contaminantes emergentes de tipo farmacéutico, ya que como se indica anteriormente en la figura 8, la nanofiltración puede retener partículas de hasta 200 Da, por lo tanto, la tabla

10 se encuentra basada en la familia de los compuestos farmacológicos de la tabla 7, para saber si pueden ser retenidos por la nanofiltración.

Tabla 10. Pesos moleculares promedio, en Dalton, de las diferentes familias farmacológicas.

Familia farmacológica	Peso molecular promedio (Da)	Retenido por NF
Antibióticos	467,56	Si
Beta - bloqueadores	277,36	Si
Analgésicos	248,90	Si*
Anti – convulsionantes	236,27	Si
Anti - inflamatorios	230,76	Si
Hormonas	277,05	Si

Fuente: elaboración propia

Como se observa en la tabla 10, todas las familias farmacológicas indicadas pueden ser retenidas por el proceso de nanofiltración, sin embargo, existe un analgésico cuyo peso molecular es de 151,16 Da, el acetaminofeno o paracetamol (también conocido como Tylenol®, Feverall®, Tempra®, Actamin® y Panadol®) es un medicamento que se usa para reducir la fiebre y el dolor (American Academy of Pediatrics, 2021). Dado su peso molecular, este analgésico no podría ser retenido por nanofiltración, pero su concentración, según la tabla 7, en ARH es relativamente baja en comparación con el resto de los fármacos. Otro caso similar, es el antimicrobiano metronidazol, cuyo peso molecular es de 171,16 Da y que es un antiinfeccioso de la familia de los 5-nitroimidazoles con un amplio espectro antimicrobiano

frente a protozoos y bacterias anaerobias (Asociación Española de Pediatría, 2015).

Sin embargo, la familia farmacológica de mayor impacto en las ARH son los antibióticos, cuyo peso molecular promedio es de 467,56 Da, por lo tanto, el proceso de nanofiltración resultaría útil en su retención y “dado que estos son los de mayor concentración y peligrosidad ambiental” (Sim et al., 2011), debido a que su resistencia es continuamente creciente, es que la nanofiltración se presenta como una tecnología de proceso eficaz.

Como se expuso anteriormente, algunos fármacos no son retenidos por las membranas de NF es por esto por lo que se hace necesario combinarlo con otro tipo de tratamiento como son los POA, debido a que al mezclar estos con tratamientos físicos, surge como una alternativa para reducir el impacto en el ambiente de estas aguas residuales, es decir, la combinación de estos tratamientos son los que entregan una mejor reducción en los parámetros contaminantes de las ARH como lo indica Muñoz y Chaparro (2013). Además, los costos totales de tratamiento se reducen en muchos casos al usar sistemas combinados; el tiempo de tratamiento se disminuye y se logra la mineralización total de los contaminantes en menores tiempos y costos que empleando tecnologías de forma separada (Hernández et al., 2018).

Bajo este contexto, se ha demostrado que los POA son tecnologías capaces de degradar los contaminantes emergentes (Guillermo, 2020). En este proceso, los compuestos orgánicos se oxidan completamente en dióxido de carbono (CO_2), agua (H_2O) y ácidos minerales. Para ello, se forman oxidantes

conocidos como radicales hidroxilos libres (-OH), que reaccionan fácilmente con los compuestos orgánicos debido al electrón no apareado (Ghosh et al., 2010). Así pues, los POA producen grandes cantidades de radicales hidroxilos, lo que mejora la degradación de los compuestos orgánicos difíciles. Además, en este tipo de procesos los contaminantes son degradados o descompuestos y, teóricamente, no se generan productos resultantes que deban ser eliminados después del tratamiento (Guillermo, 2020). De esto se deduce que los costos operacionales se reducen debido a que no existe ninguna corriente secundaria de desechos, como sí ocurre cuando se utilizan otros procesos, como las tecnologías de adsorción o los procesos de fangos activos.

Considerando lo anterior, en la tabla 11 se enumeran las principales tecnologías de POA.

Tabla 11. Principales tecnologías de POA.

Ozonización	Oxidación en agua subterránea
Ozonización/peróxido de hidrogeno	Fotólisis ultravioleta de vacío (UV)
Procesos Fenton	Ultravioleta/peróxido de hidrógeno
Oxidación electroquímica	Ultravioleta/ozono
Ultrasonido	Fotólisis/fenton

Fuente: Forero et al., 2005

El uso de estas tecnologías se delimita bajo una relación entre el carbono orgánico total (COT), que es el parámetro más directo de la carga orgánica, aunque no estima el consumo de oxígeno directamente, con el caudal del

RIL. Por lo tanto, hay que adecuar el POA a usar con la cantidad de caudal generado por el RIL y la materia orgánica que presenten las aguas residuales, tal como lo indica la figura 9 a continuación.

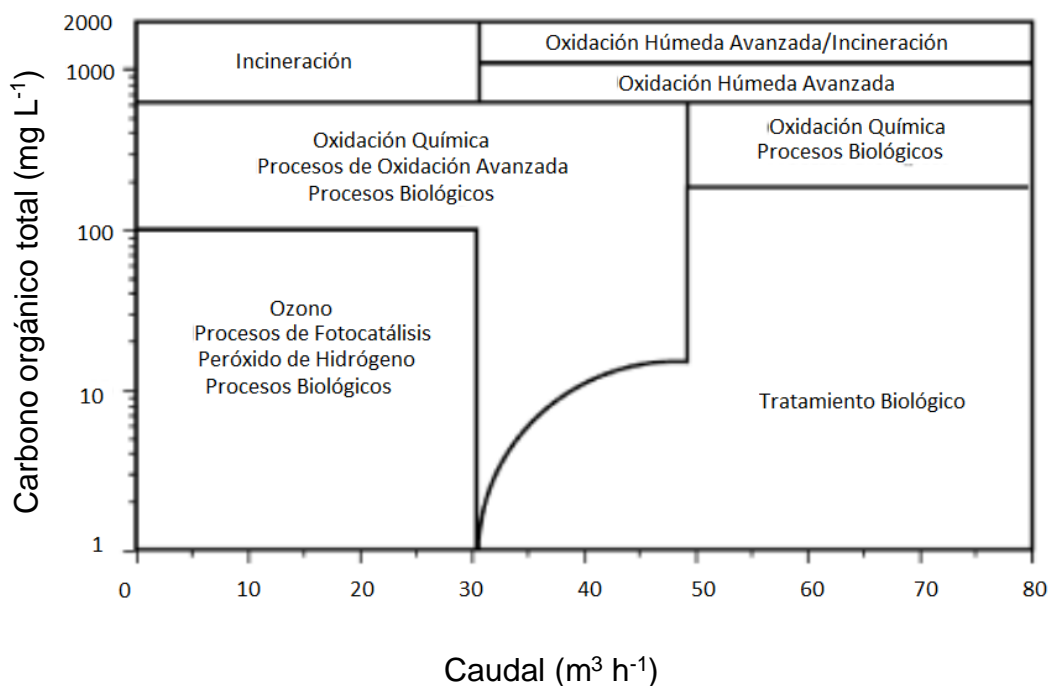


Figura 9. Tecnologías para el tratamiento de contaminantes en agua.
Fuente: Forero et al., 2005

De las tecnologías mencionadas en la tabla 12, los agentes oxidantes más comúnmente utilizados en los POA son el ozono (O₃), los rayos ultravioletas (UV) y el peróxido de hidrógeno (H₂O₂). Sin embargo, considerando los costos asociados a cada una de estas tecnologías, el O₃ y los rayos UV presentan los mayores costos de operación y mantenimiento.

En la tabla 12 se indican ventajas y desventajas de los tratamientos con H₂O₂, UV y O₃.

Tabla 12. Ventajas y desventajas presentes en las tecnologías de ozono, peróxido de hidrógeno y ultravioleta.

Tratamiento	Ventajas	Desventajas
O ₃	<p>Utiliza períodos cortos de contacto (aproximadamente de 10 a 30 minutos).</p> <p>No existen residuos peligrosos que necesiten ser removidos después del proceso porque el ozono se descompone rápidamente.</p>	<p>Muy reactivo y corrosivo, requiriendo así de materiales resistentes como el acero inoxidable.</p> <p>El proceso no es económico para las aguas residuales con altas concentraciones de SST, DBO₅, DQO o COT.</p> <p>El costo del tratamiento es alto en cuanto a la inversión de capital y la demanda de energía eléctrica.</p>
UV	<p>El equipo de desinfección UV es sencillo en su diseño, operación y mantenimiento.</p>	<p>Por sí sola, aun no se encuentra comercializada ya que funciona eficazmente en combinación con otros POA.</p>
H ₂ O ₂	<p>No forma subproductos tóxicos y se denomina por lo tanto oxidante ecológico.</p> <p>Disminuye significativamente la carga de contaminantes recalcitrantes descargado en una unidad de tratamiento biológico.</p> <p>Menores costos de operación y mantenimiento.</p>	<p>En las instalaciones donde se aplica, inicialmente suelen darse problemas de puntos de salida de agua por la acumulación de materiales sólidos arrastrados por el efecto de limpieza del H₂O₂</p>

Fuente: Gogate y Pandit (2004).

Considerando la tabla 12, el POA a utilizar como tratamiento de ARH en conjunto con el proceso de nanofiltración, es el peróxido de hidrógeno ya que este se aplica comúnmente en el tratamiento de aguas residuales y por lo general para mejorar los procesos de tratamiento biológico, ya que es capaz de degradar tanto contaminantes recalcitrantes, como tóxicos. Se aplica para la neutralización de aguas residuales cianoalcalinas y la oxidación de los sulfuros (Córdova, 2021). Además, según la Agencia para Sustancias Tóxicas y Registro de Enfermedades de los EE. UU, el H_2O_2 se encuentra dentro de los desinfectantes de más alto nivel con una concentración del 7,5% cuyo costo actualmente bordea los \$95.000 (pesos chilenos). Así, sus costos operacionales y de mantenimiento son mucho menores que los demás procesos de oxidación, por lo cual su uso se ve más favorecido en el caso de estudio a utilizar.

4.3 Diseño conceptual de un sistema de tratamiento de aguas residuales hospitalarias aplicable al caso de estudio: Hospital Herminda Martin de Chillán.

El diseño conceptual por presentar en el caso de estudio cuenta con los siguientes parámetros:

- i. Planta de tratamiento de aguas servidas (PTAS) la cual recibe las aguas residuales del hospital y cuyas características de descarga, tecnología y desinfección se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 13. PTAS existente en la ciudad de Chillán de la región de Ñuble.

Planta de tratamientos de aguas servidas – Chillán					
Empresa planta	Nombre de obra	Comuna	Descarga a:	Tecnología	Desinfección
ESSBIO S.A	PTAS - Chillán	Chillán	Estero Las Toscas	Lodos Activados	Gas cloro

- ii. Membrana de microfiltración (MF) encargada de la retención de partículas de tamaño mayor para evitar colmatar la siguiente etapa de filtración.
- iii. Membrana de nanofiltración (NF) encargada de la retención de compuestos más complejos y de menor tamaño, como algunos fármacos, virus y orgánicos disueltos.
- iv. Proceso de oxidación avanzada (POA) – peróxido de hidrógeno (H_2O_2) el cual recibirá el agua de rechazo del proceso de NF y lo someterá a una oxidación avanzada para recuperar en cierto porcentaje tal agua.

Este diseño conceptual se presenta también como un diagrama de flujo, indicado en la figura 10, para comprender de mejor forma el orden de cada proceso definido anteriormente y cómo se desarrolla paso a paso.

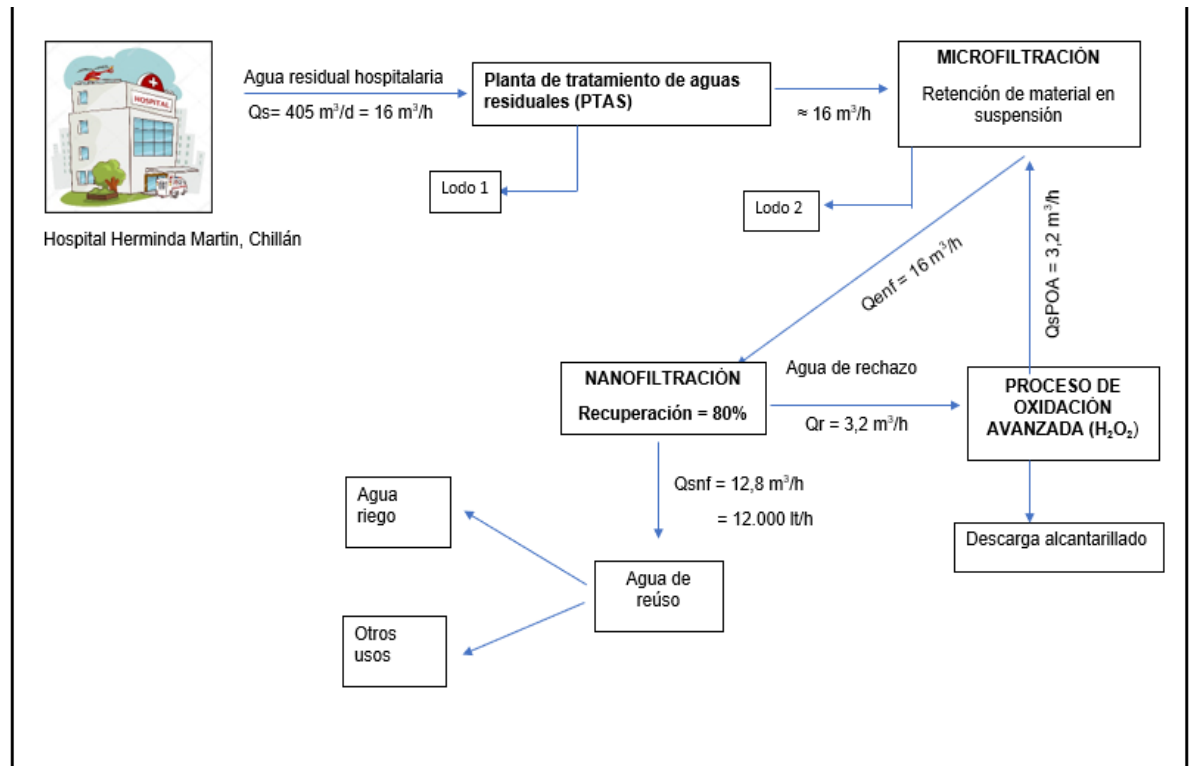


Figura 10. Diagrama de flujo del diseño conceptual presentado al caso de estudio.

4.3.1 Parámetros de entrada de cada etapa del sistema de tratamiento presentado.

Los cálculos presentados fueron desarrollados a partir de la literatura obtenida con información similar al sistema de tratamiento diseñado, que se indica en la tabla siguiente, para así obtener un modelo preliminar del tratamiento.

Tabla 14. Parámetros de entrada de las etapas del diseño de tratamiento a partir de literatura citada.

Parámetros de entrada	Unidades	Valor	Ref. bibliográficas		
Caudal ARH	$m^3 d^{-1}$	405	Datos hospital Herminda Martin	17	m^3/h
Tasa de recuperación NF	%	80	Lan et al., 2018		
Factor de sobredimensión	/	1,5	Ajuste de elaboración propia		
TRH secundario PTAS (TRH1)	horas	6	Henríquez, 2020		
TRH AOP (TRH2)	horas	2	Ghafoori et al., 2014		
Flujo estable	$L h^{-1} m^{-2}$	42	Lan et al., 2018		

Fuente: elaboración propia con datos de bibliografía indicada en la tabla.

Tabla 15. Cálculos asociados a los parámetros de entrada de las etapas del diseño.

ETAPA	CÁLCULOS		
PTAS	volumen 2dario (6 hr trh)	m ³	152
	área PTAS (sobred)	m ²	598
NF	flujo entrada (similar a Qaru).	m ³ /h	17
	flujo de salida (recuperación = 80%)	m ³ /h	13.6
	rechazo (20%)	m ³ /h	3.4
Oxidación	volumen 3ario: rechazo (2 hrs.)	m ³	10

Fuente: elaboración propia

Los cálculos presentados en la tabla 15 fueron obtenidos a partir de las siguientes ecuaciones:

Para determinar el volumen de la PTAS, considerando un tiempo de retención hidráulica (TRH) de 6 horas, se emplea la ecuación 1.

$$V1 = \left(Qh * \frac{TRH1}{24} \right) * fsd \quad [1]$$

Donde:

Qh = caudal de aguas residuales provenientes del hospital (m³/d)

dato obtenido a partir del promedio de aguas residuales desde el año 2018 hasta 2020

TRH1 = tiempo de residencia hidráulica que presenta la PTAS (horas)

fsd = factor de sobredimensión (establecido a criterio personal).

Para determinar el área de la PTAS, se emplea la ecuación 2.

$$A = \left(\frac{Qh * 1000}{24} * \frac{1}{Jstab} \right) * fsd \quad [2]$$

Donde:

Jstab = flujo estable de la PTAS (lt/m² * h)

Qh y fsd definidos en ecuación anterior

Para determinar el flujo de salida de la NF, considerando una recuperación del 80%, se emplea la ecuación 3.

$$Q_{snf} = \left(\frac{80}{100}\right) * Q_{enf} \quad [3]$$

Donde:

Q_{snf} = caudal de salida de la NF (m³/h)

Q_{enf} = caudal de entrada a la NF (m³/h)

Para determinar el flujo de rechazo, considerando la recuperación del 80%, se emplea la ecuación 4.

$$Q_r = \left(\frac{20}{100}\right) * Q_{enf} \quad [4]$$

Donde:

Q_r = caudal de rechazo de la NF (m³/h)

Para determinar el volumen del POA, considerando un TRH de 2 horas, se emplea la ecuación 5.

$$V_2 = (Q_r * TRH_2) * f_{sd} \quad [5]$$

Donde:

TRH₂ = tiempo de residencia hidráulica del POA – H₂O₂ (horas)

Considerando lo anterior, el diseño planteado presenta 2 efluentes finales: el de la NF y el del POA. El efluente que se obtiene de la NF tiene como destino servir como agua de reúso, ya sea para riego u otros usos que se le puedan acreditar.

4.3.1.1 Calidad del agua post tratamiento con membrana de NF.

Las membranas de NF presentan una serie de características específicas indicadas anteriormente (figura 8) que la hacen una muy buena opción al momento de tratar efluentes de aguas residuales. Dentro de las membranas de NF, se encuentran distintas particularidades y la que se encuentra en la tabla 16, será la que se ocupará para el análisis que sigue a continuación.

Tabla 16. Caracterización de la membrana de NF.

Variable	Membrana de NF
Corte de peso molecular	mínimo: 200 Da máximo: 300 Da
Permeabilidad al agua pura	mínimo: 0,86 L/m ² * día/Kpa máximo: 2,23 L/m ² * día/Kpa
Retención de sal	mínimo: 0,96 máximo: 0,98
Potencial zeta	mínimo: -48,04 MV máximo: -10,78 MV
T° máx. de operación	45°C
Presión máx. de operación	41 bar
Velocidad máx. de flujo de alimentación	1,4 m ³ h ⁻¹
Rango de pH, operación continua	2,0 - 11,0
Rango de pH, limpieza a corto plazo (30 min)	1,0 - 12,0
Rechazo de sales estabilizadas	> 97,0 (%)

Fuente: Yangali-Quintanilla et al., 2010; Egea-Corbacho et al., 2019

El efluente del tratamiento por NF presenta una alta calidad en cuanto a la remoción de contaminantes emergentes, contaminantes orgánicos y otros elementos potencialmente dañinos para la salud humana, fauna y vida acuática. Lo anterior se demuestra en diversos estudios realizados a distintos tipos de efluentes que fueron sometidos previamente al tratamiento por membrana de NF, cuyos parámetros estudiados fueron los metales pesados (tabla 17 y 18), contaminantes orgánicos (tabla 19) y algunos contaminantes emergentes de tipo farmacéutico (tabla 20), donde la membrana fue capaz de retenerlos.

En la tabla 17 y 18, se presenta la disminución de parámetros ocupando la NF aplicada a un RIL minero. Este ejemplo es empleado para analizar el escenario más drástico en cuanto a contaminación de metales pesados en efluentes, tomando en consideración que en aguas hospitalarias estas concentraciones serían menores. Por lo tanto, si la NF logra eliminar concentraciones de metales pesados de un RIL minero, podrá eliminar sin problema los contaminantes de un RIL hospitalario. Lo anterior se sustenta con la tabla 19 donde presenta porcentajes de eficiencia de remoción casi en un 100% para Pb^{+2} , Cd^{+2} , Fe^{+2} , Al^{+2} y Mg^{+2} y sobre el 80% en Zn^{+2} y Li^{+2} , obteniendo concentraciones de permeado muy bajas en comparación a la concentración inicial.

Tabla 17. Resultados de análisis de metales pesados presentes en el permeado, correspondiente a un efluente minero, para membrana de NF.

Elemento	Alimentación (mg/L)	Retención (%)	Permeado (mg/L)
NO ₃ - N	15,5	24,9	11,5
Cl	14,03	63,9	5,07
NH ₄ - N	9,53	56,2	4,17
S	14,6	98,8	0,17
Na	28,1	50,7	13,7
Mg	15,9	81,8	2,89
K	15	53,1	7,04
Ca	32,2	77,5	7,24
Sr	0,28	79,1	0,06
B	0,1	4,1	0,09
Zn	0,08	7,8	0,07
Ba	0,12	80,8	0,02
Mn	0,04	>75,0	<0,01
Cu	0,02	0	0,07
As	<0,01	0,04	0,04

Fuente: Hayrynen et al., 2009.

Tabla 18. Técnica de NF en diferentes estudios para diversos elementos.

Especie	Condiciones				Eficiencia de remoción (%)	Permeado* (mg/L)
	pH	Concentración inicial (mg/L)	T (°C)	Método y complemento		
Pb ⁺²		150		NF, recubrimiento de poliamida aromática en sustrato de polisulfona con poros de 0,262 nm		5
Cd ⁺²	5,8	40	25		98,5 - 96	1,1
Fe ⁺² Al ⁺²		4920 3050		Purificación de ác. Fosfórico por NF. Membrana DS5 DL 0,5nm.		147,6 91,5
Mg ⁺²	6,0 - 7,0	3400	25		98 - 96	102

Continuación tabla anterior

Cd ²⁺	2,0			Tartrato de Na y K (PST) en un proceso de NF con membrana GE Osmosnic	95,5 - 98	2,6
Zn ²⁺	- 11,0	80	20 - 22			
Mg ⁺²	6,0	2000		Recuperación de Li en alta relación de salmuera con membrana NF 90		349
Li ⁺	- 7,0	8000	20		80,1 - 85	1396

*: Cálculo de permeado realizado con el promedio del porcentaje de eficiencia de remoción.

Fuente: Caviedes et al., 2015

Para el caso de la eficiencia de remoción de los macro componentes, se tiene un caso de estudio cuyos resultados se explicitan en la tabla 19, donde se observa que los porcentajes de remoción son altos, por lo que se cumple con la Normativa Europea la cual es mucho más exigente que la Norma Chilena.

Tabla 19. Caracterización del efluente de la PTAR de España luego de ser sometido al tratamiento terciario de NF.

PTAR Macedonia	Afluente	Eliminación (%)	[Eliminación ¹]	Efluente ²
DQO	434	63	273,42	160,58
DBO5	329	69	227,01	101,99
SST	215	85	182,75	32,25
turbidez	277,51	99	274,73	2,78
nitrógeno total	70,06	28	19,62	50,44
nitratos	8,16	0	0	8,16
E.coli	6,91	100	6,91	0
Coliformes totales	7,88	100	7,88	0
pH	6,95	sin variación	0	6,95
conductividad	2090	60	1254	836
fosfatos	7,58	99	7,5	0,08
ion cloruro	268,2	39	104,6	163,6
COT	76,38	99	75,62	0,76
NH ⁴⁺ o N ₂ en forma amoniacal	82,87	30	24,86	58,01

1 - 2: cálculos de elaboración propia en base a datos experimentales del afluente y % de eliminación.

Fuente: Egea-Corbacho et al., 2019

En base a lo anterior, la eficacia de la tecnología se corrobora al analizar el permeado, donde se observa un alto rendimiento de eliminación de los contaminantes, a excepción del nitrato, que, según algunos autores, estos compuestos monovalentes, no son rechazados por las membranas de NF, pasando posteriormente a la corriente de permeado, por ende, como estos no se eliminan, se puede afirmar que la remoción se debe al nitrógeno en su forma amoniacal (Egea-Corbacho et al., 2019). Por lo tanto, estos porcentajes se tomarán en consideración para analizar, más adelante, la calidad de la NF del diseño propuesto según la normativa chilena.

Tabla 20. Evolución de la concentración de algunos contaminantes emergentes (estimulantes y antibióticos) sometidos al tratamiento con NF según estudios realizado en una EDAR de España.

CE's	Cafeína (mg L ⁻¹)			Teobromina (mg L ⁻¹)			Teofilina (mg L ⁻¹)			Amoxicilina (mg L ⁻¹)			Penicilina G (mg L ⁻¹)		
	Tiempo (h)	1	24	72	1	24	72	1	24	72	1	24	72	1	24
Alimentación	0,725	1,065	1,255	0,42	0,724	0,727	0,461	0,616	0,715	0,164	0,167	0,165	0,155	0,226	0,214
Rechazo	0,929	0,979	1,713	0,642	0,633	1,125	0,665	0,648	0,873	0,18	0,17	0,169	0,235	0,217	0,557
Permeado	0,037	0,029	0,043	0,004	0,006	0,004	0,057	0,066	0,083	<LODs	<LODs	<LODs	0,012	<LODs	<LODs

*LODs: límite de detección

Fuente: Egea-Corbacho et al., 2019

En el estudio anterior se ocupó NF en un efluente proveniente de una EDAR ubicada en España. En la tabla 20, se indica que esta tecnología de membrana es capaz de bajar los valores a menores que cero, en una hora. La eficacia de la NF ante estos contaminantes también se avala con otros estudios realizados por Yangali-Quintanilla et al., 2010 el cual obtuvo resultados similares con otros tipos de CE's.

Debido a la alteración generada por estos contaminantes al ambiente y a todo organismo vivo, incluido el ser humano, es que en la comunidad europea ya se encuentran normados por la directiva 98/83/EC, R.D. 1620/2007, entre otras. Lamentablemente en Chile no existe esta normativa regulatoria de tales contaminantes, ya sea industriales o municipales, a pesar del hecho que generan problemas medioambientales graves.

Lo anterior es avalado por un estudio donde se analizaron muestras de efluente alrededor del mundo, “revelando que el Río Mapocho es uno de los cursos de agua más contaminados por productos farmacéuticos con valores de concentración de 4 $\mu\text{g/L}$, similar al Danubio en Europa o el Támesis en Inglaterra” (Wilkinson et al., 2022). Por lo tanto, tomando en consideración que las ARU se mezclan con las ARH, se explicaría que estos valores de CE's sean elevados en el río Mapocho, demostrando así la urgente necesidad de segregarse y tratar las ARU y las ARH. Es por esto que implementar un tratamiento terciario de NF en efluentes hospitalarios es imperativo para poder disminuir la carga de estos CE's en los cuerpos acuáticos del país. Tal como se indicó en la figura 6, estas aguas que presentan estos fármacos, uno de sus destinos finales es el consumo humano, lo cual tiene como consecuencia alteraciones a nivel endocrino, cancerígeno, mutagénico, entre otros.

En definitiva, la aplicación de la NF en ARH es importante por 2 razones: 1) elimina CE's, los que presentan un peligro ambiental tanto para la biota como para los seres humanos y 2) permite mejorar la calidad del agua para poder reusarla, sobretodo en épocas de escasez hídrica que, según el Ministerio de Obras Públicas (MOP) ya afecta a gran parte de nuestro país expresándose en una mega sequía sostenida y racionamiento de agua en varias regiones (DGA, 2022).

4.3.1.2 Calidad del agua de NF evaluada a partir de la Normativa Chilena Actual para establecer su calificación o no calificación en los diferentes usos posibles.

En un contexto de mega sequía como el que vive Chile actualmente, reutilizar el agua se vuelve primordial para asegurar su provisión en múltiples usos. Por lo tanto, con relación al reúso de aguas residuales, su implementación permitiría recuperar un importante caudal que actualmente se pierde y que posibilitaría abordar hasta el 10% de la brecha hídrica del país, es decir, la diferencia entre la demanda y la oferta de agua disponible en las fuentes de abastecimiento (Fundación Chile, 2020). Es por este motivo que se debe considerar dentro del esquema de este estudio, la posibilidad de reusar el agua en distintos usos, cumpliendo las normativas establecidas para cada uno.

En consideración con las tablas anteriores (17, 18, 19 y 20), al efluente que resulta de la NF, según el diseño planteado, se le atribuyen posibles usos que deben cumplir con la Normativa Chilena 1333 de 1978, modificada en 1987 (NCh1333.Of78) y que rige sobre cada uno de ellos e indica los parámetros máximos aceptables. Esta norma se aplica a las aguas destinadas a los siguientes usos:

- A. Agua para consumo humano
- B. Agua para bebida de animales
- C. Riego

D. Recreación y estética (estética – recreación con contacto directo – recreación sin contacto directo)

E. Vida acuática

Por lo tanto, los parámetros de efluente de NF obtenidos en la literatura se someterán, a continuación, a una comparación con lo establecido en la NCh1333.Of78 y con la NCh409.Of84, para conocer si el efluente cumple con la normativa y así se le pueda otorgar el uso con el que dé cumplimiento

Como se muestra en la tabla 22 y 23 se puede observar que el agua obtenida desde la NF puede ser ocupada para diversos usos según la NCh1333.Of78 y NCh409.Of98, esto asociado al cambio climático, deficiencia y calidad del agua, nos permite reutilizarla en otras actividades lo que generaría:

- Necesitar menor cantidad de agua para las actividades mencionadas en la norma ya que estas pueden ser realizadas con el agua reutilizada y por lo tanto generar un menor costo del agua debido a que se necesitaría menos.
- Aportar al medioambiente debido a la calidad del agua

Tabla 21. Comparación de valores según la NCh1333.Of78 y NCh409.Of8 con respecto a lo obtenido por la NF

Usos	Parámetros	Unidad	Valor norma	Valor NF	Cumple para uso
A. AGUA PARA CONSUMO HUMANO. B. AGUA PARA BEBIDAS DE ANIMALES.	Coliformes	UFC/100 ml	≥ 5	0,00	SI
	E. coli	UFC/100 ml	0	0,00	
	Turbidez	NTU	≤ 2	16%	
	Cu	mg/L	2,0	0,07	
	Fe	mg/L	0,3	1,5% respecto a alimentación	
	Mn	mg/L	0,1	<0,01	
	Mg	mg/L	125,0	2,89	
	Zn	mg/L	3,0	0,07	
	Cd	mg/L	0,01	2% respecto a alimentación	
	Pb	mg/L	0,05	3,75	
	Amoniaco	mg/L	1,5	0,46	
	Cloruro	mg/L	400	138,53	
	pH	adimensional	6,5 - 8,5	7,68	
C. RIEGO	Cl ⁻		200	5,07	SI
	B		0,75	0,09	
	Zn		2	0,07	
	Ba		4	0,02	
	Mn		0,2	<0,01	
	Cu		0,2	0,07	
	As		0,1	0,04	
	Pb	mg/L	5	3,75	
	Fe+2		5	1,5% respecto a alimentación	
	Al +2		5	2% respecto a la alimentación	
	Cd+2		0,01	2% respecto a la alimentación	
	Li+		2,5	15% respecto a la alimentación	
	pH	adimensional	5,5 - 9,0	6,0 - 7,0	

Continuación tabla anterior

D. RECREACION Y ESTETICA (CONTACTO DIRECTO E INDIRECTO)	pH	adimensional	6,5 - 8,3	8,3	SI
	Turbidez	NTU	50	16	
	Coliformes	UFC/100 ml	1000	0	
E. VIDA ACUATICA	pH	adimensional	6,0 - 9,0	8,3	SI
	Turbidez	NTU	< 30	0,16	

Tabla realizada en base a las diferentes tablas presentadas en el anexo 1,2,3 y 4

Fuente: NCh1333.Of78 - NCh409.Of8

El cumplimiento que se demuestra en la tabla 21 permite el reúso de agua, tomando en consideración que nos encontramos en un país que cuenta con un 54,3% de sus comunas decretadas con escasez hídrica (DGA, 2022) y que, en los últimos años, el consumo de agua ha aumentado en los hospitales debido principalmente a la pandemia como lo indica Rume y Didar-UI (2020), ya que como lo demuestra la figura 11, la ocupación de camas aumentó drásticamente durante el contagio por Covid-19 considerando que los reportes de consumo de agua por cama elaborados por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA) indican que los rangos varían entre 150 litros/cama/día hasta 1325 litros/cama/día.

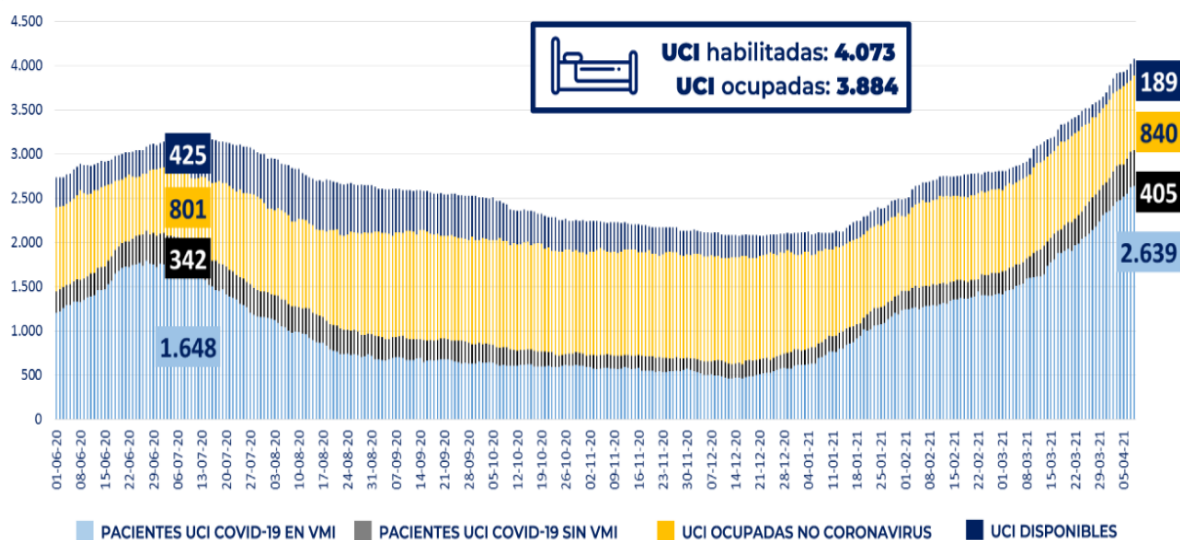


Figura 11. Evolución de ocupación de camas UCI durante el primer año de pandemia en Chile.

Es por este motivo que es necesario el reúso de agua, tomando en consideración que según la Red Global de Hospitales Verdes y Saludables (2015), hasta el 70% del consumo hospitalario de agua se acredita a procesos que van desde los relacionados con equipos mecánicos hasta el transporte de aguas servidas. Lo anterior nos lleva a que este 70%, asociado a lo que se puede reutilizar el agua, lleva a una disminución en el costo asociado al agua de entrada al hospital como se indica en la Red Global de Hospitales Verdes y Saludables (2017). Lo anterior ayuda a disminuir la presión sobre los distintos acuíferos que alimentan el agua potable de la ciudad de Chillán.

4.3.2 Evaluación de costos de inversión y tratamiento asociados al diseño del sistema de tratamiento planteado.

Bajo el contexto de diseño del sistema de tratamiento, cada etapa del proceso, como PTAS (lodos activados), procesos de membrana (MF y NF) y proceso de oxidación avanzada (H_2O_2), lleva consigo un costo asociado de inversión, tratamiento, mantención y operación, los cuales se indican a continuación en las tablas 22 y 23.

Tabla 22. Estimación preliminar de costos asociados al sistema de tratamiento planteado para los procesos de PTAS y membrana (MF y NF)

Ecuaciones de costos (1)						
	Valor de lodos activados	Unidad	Referencias de calculo	Valor de membrana	Unidad	Referencias de calculo
Costo de inversión	0,6	millones de US\$	Fundación Chile, 2012	0,9	millones de US\$	Fundación Chile, 2012
Costo de tratamiento	0,2	US\$/m ³		0,7	US\$/m ³	

Tabla 23. Estimación preliminar de costos asociados al proceso de oxidación avanzada.

Ecuación de costo (2)			
	Valor para AOP	Unidad	Referencia de calculo
Costo capital	0,01	millones de US\$	Plumlee et al., 2014
Costo de operación y mantención anual	1,12	US\$/m ³	

En la tabla 23 se muestran los costos preliminares asociados a las 2 primeras etapas del sistema de tratamiento planteado, según figura 10, en las cuales se tienen 2 tipos de costos, el de inversión que es la etapa pre – operativa que comprende los estudios de factibilidad, estudios definitivos (ingeniería conceptual, ingeniería de detalle), planos y licencias, terrenos, instalaciones fijas y bienes de capital y sus futuras reposiciones. Además, se encuentra el costo de tratamiento que considera la energía consumida en bombeo y mantención.

Por otra parte, en la tabla 24 se indican los costos preliminares asociados al tratamiento fisicoquímico (terciario) utilizando la tecnología de POA-H₂O₂, los cuales consideran también 2 tipos de costos, el capital que es el coste en el que incurre una empresa para financiar sus proyectos de inversión a través de los recursos financieros propios y también, el costo de operación y mantención anual que considera los gastos asociados con la operación del proyecto en el día a día y que engloba a su vez los costos de mantenimiento y administración.

Con respecto a lo anterior, los costos calculados en las tablas 23 y 24, dependen directamente del caudal de salida del ARH, en el caso de ecuación de lodos activados y tecnologías de membrana, mientras que para el caso de la tecnología POA, depende del caudal de rechazo del proceso de NF. Estos cálculos se obtienen a través de las siguientes ecuaciones:

Para determinar los costos asociados a la etapa de lodos activados se emplean las siguientes ecuaciones 6 y 7:

$$\text{Costo de inversión: } y=0,0012(Qs^3)-0,1598(Qs^2)+44,048 (Qs)+406,25 \quad [6]$$

$$\text{Costo de tratamiento: } y= -0,0377(\ln Qs)+0,2482 \quad [7]$$

Para determinar los costos asociados a membrana se utilizaron las ecuaciones 8 y 9:

$$\text{Costo de inversión: } y=0,3485(Qs^{0,6}) \quad [8]$$

$$\text{Costo de tratamiento: } y=0,7774(Qs^{-0,112}) \quad [9]$$

Finalmente, para determinar los costos asociados al POA, se emplearon las ecuaciones 10 y 11: (Qr en MGD ($1MGD = 43,81 \text{ lt/s}$))

$$\text{Costo de capital: } y=0,474(Qr^{-0,056}) \quad [10]$$

$$\text{Costo de operación y mantención anual: } y=0,038(Qr^{-0,052}) \quad [11]$$

Con respecto a lo anterior, se tiene que los costos de tratamiento son los más elevados pues consideran directamente los gastos en energía consumida en el proyecto. Además se observa que el costo de inversión asociado al sistema de tratamiento planteado está en el rango de US\$1500 – US\$1600 , lo cual se calificaría como un valor bajo, comparado al monto de inversión total que significa la construcción de un hospital en Chile, que actualmente su valor es

de US\$10448 millones. Sumado a esto, el monto de inversión asociado a la construcción del nuevo hospital regional de la ciudad de Chillán es de US\$200 millones (año 2014). Por lo tanto, la inversión asociada al sistema de tratamiento propuesto significaría sólo un 0,02% del valor total para la construcción de un hospital regional en Ñuble.

La obtención de los costos totales asociados al tratamiento e inversión se ilustran a continuación, donde se puede distinguir que los valores son bastante bajos asociado a la parte ambiental y social. Además, considerando los numerosos beneficios ambientales que la implantación de este sistema de tratamiento traería consigo, el reúso del agua aportaría aún más a la disminución de costos asociados a la adquisición de agua para otros servicios dentro del hospital, contribuyendo así a la disminución de la escasez hídrica que afecta fuertemente tanto a la región de Ñuble, como a nivel mundial.

- Costo de inversión total para lodos activados, MF y NF:

1,5 millones de US\$

- Costo de tratamiento total para lodos activados, MF y NF:

$0,9 \frac{\text{US\$}}{\text{m}^3}$

- Costo capital para proceso de AOP

0,01 millones de US\$

- Costo de operación y mantención anual para AOP

$1,12 \frac{\text{US\$}}{\text{m}^3}$

5. CONCLUSIONES

Objetivo específico 1

-Las principales variables estudiadas en aguas residuales hospitalarias son DBO5, pH, SST y DQO siendo este último parámetro el directo indicador de contaminación de las aguas residuales.

Un punto en común de todos los países analizados en este estudio es que sus efluentes hospitalarios llegan directamente a los sistemas de recolección de aguas negras municipales sin un tratamiento previo, mezclándose y tratándose con las aguas residuales urbanas asumiendo una similar carga contaminante entre ambos efluentes siendo que las ARH superan en 2 órdenes de magnitud, en cuanto a parámetros de contaminación, a las ARU. Es por esto que segregar las aguas de estos efluentes es el primer paso y el de mayor importancia para comenzar a tratar estas ARH de una manera correcta y amigable con el medio ambiente, sobre todo con el ecosistema acuático que es el mayor afectado con las descargas a los cuerpos de agua superficiales y subterráneos.

-Dentro de las variables que aumentan la generación de efluentes hospitalarios, se encuentra la afluencia de público que se atiende en cada uno de ellos y la ocupación de camas, con su gasto asociado, por parte de estos. Es por esto que existe una relación directa entre el gasto que se genera por cama y la cantidad de ARH, pero esta relación no se ve reflejada en muchos hospitales, sobretodo latinoamericanos, ya que no se relaciona con el tamaño

del hospital o con el n^o de pacientes, por lo cual se concluye que la gestión del agua utilizada en estos hospitales es deficiente.

-Uno de los contaminantes más riesgosos que se encuentran en las ARH, son los CE's que incluyen productos de cuidado personal y fármacos. Dentro de estos último se destacan los antibióticos, los cuales se presentan comúnmente en aguas residuales con concentraciones promedio de 4,440 mg/L y que no son eliminados por los tratamientos convencionales existentes. Por lo tanto, se tiene la necesidad de poseer un sistema de tratamiento eficaz ante estos CE's para así disminuir sus concentraciones en los cuerpos de agua y el riesgo de intoxicación que afectaría a las personas debido a su capacidad de desarrollar cepas bacterianas resistentes.

Objetivo específico 2

-Los sistemas de tratamiento no convencionales nacen como una excelente opción para tratar efluentes con presencia de contaminantes difíciles de remover. De las diferentes opciones existentes en la literatura, el proceso de NF en conjunto con un POA de peróxido de hidrogeno fue el escogido para llevar a cabo el caso de estudio presentado debido a que la tecnología de NF obtiene una remoción de DQO de 93,5%, un tamaño de poro de 0,001 micras y retiene partículas con un peso molecular de hasta 200 Da lo que la posiciona como un eficiente tratamiento para contaminantes de pequeño tamaño, dentro de las cuales se encuentran los antibióticos cuyo peso molecular promedio es de 290 Da. Además, el tratamiento conjunto de NF y POA-H₂O₂ logra oxidar

los compuestos orgánicos en CO₂ y H₂O que no son dañinos para el medio ambiente, también reduce los tiempos de operación y se comprobó que sus costos son menores en comparación con la tecnología de RO cuya eficiencia es alta pero costosa debido al requerimiento de procesos previos de filtrado para no colmatar el filtro de membrana. Finalmente, este tratamiento es capaz de retener trazas de Covid -19 debido a que su tamaño es mayor al del poro de NF, reduciendo así su concentración en aguas residuales que se han presentado como una fuente de contagio directa.

Objetivo específico 3

-El diseño para el hospital Herminda Martin de Chillán, cuenta con 3 etapas: planta de lodos activados, membrana de MF, membrana de NF y un POA, donde el caudal de entrada al sistema corresponde a 16 m³/h y que se mantiene hasta la NF, ya que los procesos anteriores retienen lodo, sedimentos y un porcentaje muy bajo de agua, es por ello que se asume el mismo valor de entrada para el proceso de MF y NF. Para el caso del POA con H₂O₂, su afluente es el retenido de la NF para eliminar las partículas y/o contaminantes que pudieron llegar hasta ese punto, concluyendo así que el agua mejora su calidad

-Para el análisis del permeado de la NF, se concluye que, en los parámetros usados para comparar con la norma chilena actual, es un agua que cumple y es apta para los usos de consumo de agua potable, bebida para animales, riego, recreación y vida acuática ya que mostro alta retención de metales

pesados, elementos orgánicos y/o aniones y contaminantes emergentes. Por lo tanto, aplicar el tratamiento terciario de NF en ARH permitiría darle un reúso a estas aguas, que no solo contribuye a la disminución de la escasez hídrica en Chile, sino que también disminuye los costos asociados a cada uso si el agua ocupada en cada uno de ellos fuera adquirida de forma independiente.

-Para este diseño se consideran los costos de inversión y tratamiento para los procesos de PTAS - MF – NF y los costos de capital, operación y mantención anual para el POA con H₂O₂. Los costos que resultan de estos procesos son, solo un 0,02% de la inversión completa de construcción de un hospital regional en Ñuble.

Además, como se menciona anteriormente, este diseño considera fuertemente la calidad del agua en sus efluentes finales para poder darles un reúso importante, que a los cortos periodos de tiempo ya representarían un ahorro cercano al 70% de agua, colaborando de manera eficaz con el medio ambiente y también con la salud de las personas, ya que de una u otra manera, esta agua tiene contacto con ellas mejorando el acceso a un agua de calidad y por ende, a mejorar su calidad de vida.

Es por lo anterior, que, a modo general, se concluye que al evaluar las alternativas de tratamiento avanzado para la retención y eliminación de contaminantes tanto emergentes como metales pesados, aniones y otros, es factible el uso de tecnologías de membrana MF y NF en combinación con un POA de H₂O₂ para ser aplicado en el efluente del centro de salud pública de la Región de Ñuble, el Hospital Herminda Martin de Chillán. Además, tomando

en consideración la construcción de un nuevo hospital regional en la ciudad, es que este diseño presentado también podría aplicarse en sus futuros tratamientos de efluente, con los cambios que se consideren necesarios.

6. LITERATURA CITADA

1. Agency for Toxic Substances and Disease Registry. 2016. Resúmenes de salud pública - Cloro (Chlorine) [en línea]. Public Health Service, USA. <https://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es_phs172.html>. [Consulta: 27 noviembre 2021].
2. Aguilar, S. 2018. Caracterización de aguas residuales hospitalarias. *Dinámica Ambiental* 2(2): 37-42.
3. Al Aukidy, M., P. Verlicchi, A. Jelic, M. Petrovic and D. Barceló. 2012. Monitoring release of pharmaceutical compounds: Occurrence and environmental risk assessment of two WWTP effluents and their receiving bodies in the Po Valley, Italy. *Sci. Total Environ.* 438: 15-25.
4. Al Qarni, H., P. Collier, J. O'Keeffe and J. Akunna. 2016. Investigating the removal of some pharmaceutical compounds in hospital wastewater treatment plant operating in Saudi Arabia. *Environ. Sci. Pollut. Res. Int.* 23(13): 13003-13014.
5. American Academy of Pediatrics. 2021. Tabla de dosificación del acetaminofeno para tratar la fiebre y el dolor [en línea]. Healthy Children, USA. <<https://www.healthychildren.org/Spanish/safety-prevention/at-home/medication-safety/Paginas/acetaminophen-for-fever-and-pain.aspx>>. [Consulta: 01 marzo 2022].
6. Aqueveque, M.A. 2010. Evaluación del consorcio microbiano comercial BEC-118 en reactores tipo reactor de biopelícula de leche móvil (MBBR) para Norske Skog Bio Bío Ltda. Proyecto de título, Ingeniero Civil en Biotecnología. Universidad San Sebastián, Facultad de Ingeniería y Tecnología. Concepción, Chile.

7. Asociación Española de Desalación y Reutilización. 2020. Diferencias entre microfiltración, ultrafiltración, nanofiltración y osmosis inversa [en línea]. Asociación Internacional de Desalinización, España. <<https://aedyr.com/diferencias-microfiltracion-ultrafiltracion-nanofiltracion-osmosis-inversa/>>. [Consulta: 08 marzo 2022].
8. Asociación Española de Pediatría. 2015. Metronidazol [en línea]. Asociación Española de Pediatría. <<https://www.aeped.es/comite-medicamentos/pediamecum/metronidazol>>. [Consulta: 03 marzo 2022].
9. Azizi, N., J. Amini, K. Karimyan, K. Shafari, H. Shafari, H. Arfaenia and H.R. Ghaffari. 2016. Management of collection, treatment and disposal of hospital wastewater. Case study: Hamadan and Kermanshah province hospitals. *Int. J. Pharm. Technol.* 8(2): 12924–12933.
10. Barceló, L., M. López. 2007. Contaminación y calidad química del agua: el problema de los contaminantes emergentes [en línea]. Fundación Nueva Cultura del Agua, España. <https://fnca.eu/phocadownload/P.CIENTIFICO/inf_contaminacion.pdf>. [Consulta: 08 marzo 2022].
11. Beltrán, A., M. Escudero, S. Córdova y C.R. Rosero. 2019. Monitoreo microbiológico para la gestión ambiental de aguas residuales hospitalarias. *Cienc. Digital* 3: 342-353.
12. Bolong, N., A. Ismail, M.R. Salim and T. Matsuura. 2008. A review of the effects of emerging contaminants in wastewater and options for their removal. *Desalination* 239(1-3): 229-246.

13. Botero-Coy, A.M. D. Martínez-Pachón, C. Boix, R.J. Rincón, N. Castillo, L.P. Arias-Marín, L. Manrique-Losada, R. Torres-Palma, A. Moncayo-Lasso and F. Hernández. 2018. An investigation into the occurrence and removal of pharmaceuticals in Colombian wastewater. *Sci. Total Environ.* 642: 842-853.
14. Bravo, L.C. 2018. Impactos de la escasez hídrica sobre las prácticas cotidianas de uso de agua de las mujeres mapuches en la comuna de San Juan de la Costa. Memoria de título, Geógrafa. Universidad de Chile, Facultad de Arquitectura y Urbanismo, Escuela de Pregrado. Santiago, Chile.
15. Brown, K.D., J. Kulis, B. Thomson, T.H. Chapman and D.B. Mawhinney. 2008. Occurrence of antibiotics in hospital, residential, and dairy effluent, municipal wastewater, and the Rio Grande in New Mexico. *Sci. Total Environ.* 366(2-3): 772-783.
16. Castro, H. 2010. Conflictos por el agua en Chile: Entre los derechos humanos y las reglas del mercado. Programa Chile Sustentable. Santiago, Chile.
17. Caviedes, D.I., R.A. Muñoz, A. Perdomo, D. Rodríguez y J.J. Sandoval. 2015. Tratamientos para la remoción de metales pesados comúnmente presentes en aguas residuales industriales: una revisión. *Rev. Ing. Reg.* 13(1): 73-90.
18. Comité Español del ACNUR. 2019a. Escasez de agua en el mundo: causas y consecuencias [en línea]. Comité Español del ACNUR. <https://eacnur.org/blog/escasez-agua-en-el-mundo-tc_alt45664n_o_pstn_o_pst/>. [Consulta: 26 mayo 2021].

19. Condorchem Envitech. 2017. Solutions for the treatment of wastewater with refractory COD [en línea]. Condorchem Envitech. <<https://condorchem.com/en/blog/treating-effluent-refractory-cod/>>. [Consulta: 03 marzo 2022].
20. Córdova, Z.M. 2021. Tratamiento de aguas residuales de la industria textil mediante procesos de oxidación avanzada ($O_3/UV/H_2O_2$) para su vertimiento en la red de alcantarillado. Tesis, Doctorado en Ingeniería Ambiental. Universidad Nacional Federico Villareal, Escuela Universitaria de Posgrado. Lima, Perú.
21. Craig, R. 2018. Ventajas y desventajas de la osmosis inversa [en línea]. Leaf Group. <<https://www.geniolandia.com/13182429/ventajas-y-desventajas-de-la-osmosis-inversa>>. [Consulta: 03 enero 2022].
22. Diaz de los Ríos, M., Y. Lorenzo 2018. Perspectivas del tratamiento de efluentes de destilerías y plantas de derivados mediante tecnologías de membranas. Centro Azúcar 45: 14-23.
23. DGA (Chile). 2022. Escasez hídrica para el 47,5% de la población [en línea]. Ministerio de Obras Públicas, Chile. <<https://dga.mop.gob.cl/noticias/Paginas/DetalledeNoticias.aspx?item=835>>. [Consulta: 10 marzo 2022].
24. Egea-Corbacho, A., S. Gutierrez and J.M. Quiroga. 2019. Removal of emerging contaminants from wastewater using nanofiltration for its subsequent reuse: Full-scale pilot plant. J. Clean. Prod. 214: 514-523.
25. Espigares, M., J. Pérez. 2003. Aguas residuales y su composición [en línea]. Universidad de Salamanca, España. <https://cidta.usal.es/cursos/edar/modulos/edar/unidades/LIBROS/logo/pdf/Aguas_Residuales_composicion.pdf>. [Consulta: 10 marzo 2022].

26. Fong, W., C. Severiche y W. Fong. 2020. Sistemas de acondicionamiento de aire y ventilación como foco infeccioso de SARS CoV-2 en hospitales, clínicas e instituciones de salud. *IPSA Scientia*. 5(1): 28-35.
27. Forero, J.-E., O.-P. Ortiz y F. Ríos. 2005. Aplicación de procesos de oxidación avanzada como tratamiento de fenol en aguas residuales industriales de refinería. *Cienc. Tecnol. Futuro* 3(1): 97-109.
28. Fundación Chile. 2017a. Tecnología de lodos activados. Comisión Nacional del Medio Ambiente. Santiago, Chile (Documento de trabajo, contacto@fch.cl)
29. Fundación Chile. 2017b. Tecnologías de membrana de osmosis inversa. Comisión Nacional del Medio Ambiente. Santiago, Chile (Documento de trabajo, contacto@fch.cl).
30. Fundación Chile. 2020. Cinco medidas para abordar la crisis del agua en la reactivación sostenible [en línea]. Fundación Chile, Chile. <<https://fch.cl/noticias/cinco-medidas-para-abordar-la-crisis-del-agua-en-la-reactivacion-sostenible/>>. [Consulta: 15 marzo 2022].
31. García, Y.A. 2014. Nanofiltración de residuos líquidos de una industria de levadura para planificación. Tesis, Magíster en Ciencia de los Alimentos. Universidad Austral de Chile, Facultad de Ciencias Agrarias, Escuela de Graduados. Valdivia, Chile.
32. García, U. 2019. Propuesta de una planta de tratamiento de aguas residuales para el Hospital Psiquiátrico Roberto Chacón Paut, La Unión, Cartago, Costa Rica. Tesis, Licenciatura en Ingeniería en Gestión Ambiental. Universidad Nacional de Costa Rica, Facultad de Ciencias

de la Tierra y el Mar, Escuela de Ciencias Ambientales. Heredia, Costa Rica.

33. Gautam, A.K., S. Kumar and P. Sabumon. 2007. Preliminary study of physico-chemical treatments options for hospital wastewater. *J. Environ. Health Res.* 83(3): 298-306.
34. Genesis Water Technologies. 2018. Beneficios y desventajas del proceso de oxidación avanzada [en línea]. Genesis Water Technologies. <<https://es.genesiswatertech.com/blog-post/pros-and-cons-of-the-advanced-oxidation-process/>>. [Consulta: 18 diciembre 2021].
35. Ghafoori, S., M. Mehrvar and P.K. Chan. 2014. A statistical experimental design approach for photochemical degradation of aqueous polyacrylic acid using photo-Fenton-like process. *Polymer Degradation and Stability* 110: 492-497.
36. Ghosh, P., A.N. Samantha and S. Ray. 2010. COD reduction of petrochemical industry wastewater using Fenton's oxidation. *Can. J. Chem. Eng.* 88(6): 1021-1026.
37. Godoy, H., F. Aravena. 2020. Ultrafiltración y osmosis inversa: Fundamentos y aplicaciones [en línea]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=Pj_gVy5gqd8&ab_channel=ECOPRENEUR>. [Consulta: 12 marzo 2022].
38. Gogate, P.R., A.B. Pandit. 2004. A review of imperative technologies for wastewater treatment II: hybrid methods. *Adv. Environ. Res.* 8(3-4): 553-597.

39. Grisales, D., J. López y T. Rodríguez. 2011. Remoción de la materia orgánica y toxicidad en aguas residuales hospitalarias aplicando ozono. *Dyna* 79(173): 109-115.
40. Guillermo, P.J. 2020. Estudio de contaminantes emergentes presentes en efluentes acuosos urbanos: técnicas analíticas y tecnologías de tratamiento. Tesis, Máster en Ingeniería Ambiental y Procesos Sostenibles. Universidad Politécnica de Cartagena, Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial. Cartagena, España.
41. Halling-Sørensen, B., S.N. Nielsen, P.F. Lanzky, F. Ingersley, H. Holten and S. Jorgensen. 1998. Occurrence, fate and effects of pharmaceutical substances in the environment – a review. *Chemosphere* 36(2): 357-393.
42. Häyrynen, K., E. Pongrácz, V. Väisänen, N. Papa, M. Mänttär, J. Langwaldt and R.L. Keiski. 2009. Concentration of ammonium and nitrate from mine water by reverse osmosis and nanofiltration. *Desalination* 240(1-3): 280-289.
43. Henríquez, F.J. 2020. Diseño y evaluación de un proceso de tratamiento de aguas servidas en base a celdas de combustible microbiológicas. Memoria de título, Ingeniero Civil Químico. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Ingeniería Química, Biotecnología y Materiales. Santiago, Chile.
44. Hernández, S., M.S. Rodríguez y V.M. Sarria. 2008. Mejoramiento de la biotratabilidad de aguas residuales de tintorería a través de un proceso de oxidación avanzada. Universidad de los Andes, Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental. Bogotá, Colombia (Documento de trabajo, s.hernandez38@uniandes.edu.co).

45. Herrera, O.F., E.J. Corpas. 2013. Reducción de la contaminación en agua residual industrial láctea utilizando microorganismos benéficos *Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial* 11(1): 57-67.
46. IAgua. 2018. Reutilización de agua residual con ozono [en línea]. IAgua. <<https://www.iagua.es/noticias/interozono/reutilizacion-agua-residual-ozono>>. [Consulta: 29 diciembre 2021].
47. Ibrahim, C., S. Hammami, N. Chérif, S. Mejri, S. Pothier and A. Hassen. 2019. Detection of Sapoviruses in two biological lines of Tunisian hospital wastewater treatment. *Int. J. Environ. Health Res.* 29(4): 400-413.
48. Induanalisis. 2019. DBO y DQO [en línea]. Induanalisis. <https://www.induanalisis.com/publicacion/detalle/dbo_y_dqo_31>. [Consulta: 21 octubre 2021].
49. INE (Chile). 2017. Censo de población y vivienda [en línea]. INE, Chile. <<https://www.ine.cl/estadisticas/sociales/censos-de-poblacion-y-vivienda/informacion-historica-censo-de-poblacion-y-vivienda>>. [Consulta: 07 marzo 2022].
50. Ingeniería Romin. 2017. Las ventajas de las membranas de nanofiltración [en línea]. Ingeniería Romin. <<https://romin.com/2017/08/las-ventajas-las-membranas-nanofiltracion/#!/empresa>>. [Consulta: 18 diciembre 2021].
51. Jacóme, A., P. Ures y J. Suárez. 2015. Procesos de oxidación avanzada (AOPs) (FT-AVA-001 [en línea]. INDITEX. <<https://www.wateractionplan.com/documents/177327/558161/Procesos+de+oxidación+avanzada+%28AOPs%29.pdf/f6afdea9-3481-e102-73cc-4676a626b5d1>>. [Consulta: 29 diciembre 2021].

52. Janet, M.J., A.M. Soto, J.I. Usma y O.D. Gutiérrez. 2012. Contaminantes emergentes en aguas, efectos y posibles tratamientos. *Producción + Limpia* 7(2): 52-73.
53. Jiménez, C. 2011. Contaminantes orgánicos emergentes en el ambiente: productos farmacéuticos. *Revista Lasallista de Investigación* 8(2): 143-153.
54. Kümmerer, K. 2011. Emerging contaminants. pp: 69-87. In: *Earth systems and environmental sciences. Volume 3.* Elsevier. Oxford, USA.
55. Lan, Y., K. Groenen-Serrano, C. Coetsier and C. Causserand. 2018. Nanofiltration performances after membrane bioreactor for hospital wastewater treatment: Fouling mechanisms and the quantitative link between stable fluxes and the water matrix. *Water Res.* 146: 77-87.
56. Lienert, J., T. Bürki and B.I. Escher. 2007. Reducing micropollutants with source control: substance flow analysis of 212 pharmaceuticals in faeces and urine. *Water Sci. Technol.* 56(5): 87-96.
57. Lindberg, R., P.-Å. Jarnheimer, B. Olsen, M. Johansson and M. Tysklind. 2004. Determination of antibiotic substances in hospital sewage water using solid phase extraction and liquid chromatography/mass spectrometry and group analogue internal standards. *Chemosphere* 57(10): 1479-1488.
58. Majumder, A., B. Gupta and A. Gupta. 2019. Pharmaceutically active compounds in aqueous environment: a status, toxicity and insights of remediation [en línea]. *Environ. Res.* 176: <<https://doi.org/10.1016/j.envres.2019.108542>>. [Consulta: 17 enero 2022].

59. Majumder, A., A.K. Gupta, P.S. Ghosal and M. Varma. 2021. A review on hospital wastewater treatment: A special emphasis on occurrence and removal of pharmaceutically active compounds, resistant microorganisms, and SARS-CoV-2 [en línea]. *J. Environ. Chem. Eng.* 9(2). <<https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.104812>>. [Consulta: 17 enero 2022].
60. Manzo, V., J. Goya-Pacheco, D. Arismendi, M. Becerra-Herrera, A. Castillo-Aguirre, R. Castillo-Felices, M. Rosero-Moreno, E. Carasek and P. Richter. 2019. Cork sheet as a sorptive phase to extract hormones from water by rotating-disk sorptive extraction (RDSE). *Anal. Chim. Acta* 1087: 1-10.
61. Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. 2019. Tipos de vertidos [en línea]. Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, España. <<https://www.miteco.gob.es/es/agua/temas/concesiones-y-autorizaciones/vertidos-de-aguas-residuales/tipos-vertidos/default.aspx>>. [Consulta: 01 diciembre 2021].
62. Monge, S.B., A. Torres-Pinto, R.S. Ribeiro, A.M.T. Silva y C. Bengoa. 2018. Manual técnico sobre procesos de oxidación avanzada aplicados al tratamiento de aguas residuales industriales. Programa CYTED. Madrid, España.
63. Muñoz, C.E., T.R. Chaparro. 2013. Combinación de procesos de oxidación avanzada y procesos anaerobios para tratamiento de aguas residuales hospitalarias. *Afinidad* 71(565): 63-67.

64. Muñoz, M., P. García-Muñoz, G. Pliego, Z.M. de Pedro, J.A. Zazo, J.A. Casas and J.J. Rodriguez. 2016. Application of intensified Fenton oxidation to the treatment of hospital wastewater: Kinetics, ecotoxicity and disinfection. *J. Environ. Chem. Eng.* 4(4): 4107-4112.
65. Naciones Unidas. 2014. Decenio internacional para la acción “El agua fuente de vida” 2005-2015 [en línea]. Naciones Unidas, USA. <<https://www.un.org/spanish/waterforlifedecade/quality.shtml>>. [Consulta: 30 mayo 2021].
66. Naciones Unidas. 2019. Agua: Desafíos globales [en línea]. Naciones Unidas, USA. <<https://www.un.org/es/global-issues/water>>. [Consulta: 02 junio 2021].
67. Neyens, E., J. Baeyens. 2003. A review of classic Fenton’s peroxidation as an advanced oxidation technique. *J. Hazard. Mater.* 98(1-3): 33-50.
68. Ortiz, D.M. 2014. Simulación del impacto ambiental generado por la construcción y operación del proyecto “Sistema de alcantarillado mixto y tratamiento de aguas residuales en la ciudad de Villa la Unión y sectores aledaños a la Laguna de Colta”. Municipio del Cantón Colta. Chimborazo, Ecuador (Documento de trabajo, dmpius87@hotmail.com).
69. Ozonotech. 2019. Tratamiento de DBO y DQO con ozono [en línea]. Mellifiq Brand, España. <<https://www.ozonotech.com/es/aplicaciones/tratamiento-de-agua/tratamiento-de-dbo-y-dqo-con-ozono/>>. [Consulta: 17 diciembre 2021].

70. Pastrian-Soto, G. 2020. Bases genéticas y moleculares del Covid-19 (SARS-CoV-2). Mecanismos de patogénesis y de respuesta inmune. *Int. J. Odontostomat.* 14(3): 331-337.
71. Paz, M., H. Muzio, V. Gemini, A. Magdaleno, S. Rossi, S. Korol y J. Moretton. 2004. Aguas residuales de un centro hospitalario de Buenos Aires, Argentina: características químicas, biológicas y toxicológicas. *Hig. Sanid. Ambient.* 4: 83-88.
72. Pinos, V. 2020. Nueva planta de tratamiento se requiere para el 2020 [en línea]. UCUENCA, Ecuador. <<https://www.ucuenca.edu.ec/component/content/article/233-espanol/investigacion/blog-de-ciencia/1509-oxidacion?Itemid=437>>. [Consulta: 17 diciembre 2021].
73. Plumlee, M.H., B.D. Stanford, J.-F. Debroux, D.C. Hopkins and S.A. Snyder. 2014. Costs of advanced treatment in water reclamation. *Ozone Sci. Eng.* 36(5): 485-495.
74. Quesada, I., U.J. Jáuregui, A.-M. Wilhelm y H. Delmas. 2009. Contaminación de las aguas con productos farmacéuticos. Estrategias para enfrentar la problemática. *Rev. CENIC Cienc. Biol.* 40(3): 173-179.
75. Ramírez, J.H., O.M. Martínez y L.M. Fernández. 2013. Remoción de contaminantes en aguas residuales industriales empleando carbón activado de pino pátula. *Av. Investig. Ing.* 10(1): 42-49.
76. Ramos-Alvariño, C. 2013. Comportamiento de los indicadores sanitarios y ecotoxicológicos de las aguas residuales con trazas de medicamentos. *Rev. Cuba. Quím.* 25(2): 180-205.

77. Red Global de Hospitales Verdes y Saludables. 2015. Soluciones hospitalarias [en línea]. Salud sin Daño – América Latina, Argentina. <<https://www.hospitalesporlasaludambiental.net/agua/>>. [Consulta: 15 marzo 2022].
78. Red Global de Hospitales Verdes y Saludables. 2017. Utilización de indicadores para controlar el consumo de agua e implementar acciones que promuevan su ahorro: Hospital León Becerra [en línea]. Red Global de Hospitales Verdes y Saludables. <<https://www.greenhospitals.net/wp-content/uploads/2018/03/Hospital-Le%C3%B3n-Becerra-Ecuador.pdf>>. [Consulta: 16 marzo 2022].
79. Restrepo, G.M., L.A. Ríos, J.M. Marín, L.F. Montoya y J.A. Velásquez. 2008. Evaluación del tratamiento fotocatalítico de aguas residuales industriales empleando energía solar. *Dyna* (75)155: 145-153.
80. Rume, T., S. Didar-UI. 2020. Environmental effects of COVID-19 pandemic and potential strategies of sustainability [en línea]. *Heliyon* 6(9). <doi: 10.1016/j.heliyon.2020.e04965>. [Consulta: 16 marzo 2022].
81. Saavedra, M. 2015. Evaluación de los efectos de efluentes de plantas de tratamiento de aguas servidas sobre *Oncorhynchus mykiss* mediante el uso de experimentos de laboratorio y terreno en la cuenca del Río Bío Bío. Tesis, Doctorado en Ciencias Ambientales con mención en Sistemas Acuáticos Continentales. Universidad de Concepción, Dirección de Postgrado, Facultad de Ciencias Ambientales, Programa de Ciencias Ambientales con mención en Sistemas Acuáticos Continentales. Concepción, Chile.

82. Santos, J.L., I. Aparicio and E. Alonso. 2007. Occurrence and risk assessment of pharmaceutically active compounds in wastewater treatment plants. A case study: Seville city (Spain). *Environ. Int.* 33(4): 596-601.
83. Sim, W.-J., J.-W. Lee, E.-S. Lee, S.-K. Shin, S.-R. Hwang and J.E. Oh. 2011. Occurrence and distribution of pharmaceuticals in wastewater from households, livestock farms, hospital and pharmaceuticals manufactures. *Chemosphere* 82(2): 179-186.
85. Stuart, M., D. Lapworth, E. Crane and A. Har. 2012. Review of risk from potential emerging contaminants in UK groundwater. *Sci. Total Environ.* 416: 1-21.
84. Suarez, S., J.M. Lema and F. Omil. 2009. Pre-treatment of hospital wastewater by coagulation-flocculation and flotation. *Bioresour. Technol.* 100(7): 2138- 2146.
86. Tecniaguas. 2019. Procesos de oxidación avanzada (POA) [en línea]. Tecniaguas, Colombia. <<https://www.tecniaguas.com/index.php/es/productos-tecniaguas/item/procesos-de-oxidacion-avanzada-poa>>. [Consulta: 01 marzo 2022].
87. Ternes, T., A. Joss. 2006. Human pharmaceuticals, hormones and fragrances - The challenge of micropollutants in urban water management. Volume 5. IWA Publishing. London, UK.
88. Verlicchi, P., A. Gallieti, M. Petrovic and D. Barceló. 2010. Hospital effluents as a source of emerging pollutants: An overview of micropollutants and sustainable treatment options. *J. Hydrol.* 389(3-4): 416-428.

89. Verlicchi, P., M. Al Aukidy, A. Gallieti, M. Petrovic and D. Barceló. 2012a. Hospital effluent: Investigation of the concentrations and distribution of pharmaceuticals and environmental risk assessment. *Sci. Total Environ.* 430: 109-118.
90. Verlicchi, P., M. Al Aukidy and E. Zambello. 2012b. Occurrence of pharmaceutical compounds in urban wastewater. Removal, mass load and environmental risk after a secondary treatment-A review. *Sci. Total Environ.* 429: 123-155.
91. Wang, J., J. Shen, D. Ye, X. Yan, Y. Zhang, W. Yang, X. Li, J. Wang, L. Zhang and L. Pan. 2020a. Disinfection technology of hospital wastes and wastewater: Suggestions for disinfection strategy during coronavirus disease 2019 (COVID-19) pandemic in China [en línea]. *Environ. Pollut.* 262. <<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114665>>. [Consulta: 01 marzo 2022].
92. Wang, J., F. Haiting, S. Zhang, Z. Ni, L. Ni, Y. Chen, L. Zhuo, Z. Zhong and T. Qu. 2020b. SARS-CoV-2 RNA detection of hospital isolation wards hygiene monitoring during the Coronavirus disease 2019 outbreak in a Chinese hospital. *Int. J. Infect. Dis.* 94: 103-106.
93. Wilkinson, J.L., A.B.A. Boxall, D. Kolpin and C. Teta. 2022. Pharmaceutical pollution of the world's river [en línea] *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 119(8). <<https://www.pnas.org/doi/epdf/10.1073/pnas.2113947119>>. [Consulta: 01 marzo 2022].
94. Yangali-Quintanilla, V., A. Sadmani, M. McConville, M. Kennedy and G. Amy. 2010. A QSAR model for predicting rejection of emerging contaminants (pharmaceuticals, endocrine disruptors) by nanofiltration membranes. *Water Res.* 44(2): 373-384.

7. ANEXOS

Tabla A1. Requisitos para cumplir con la calidad de agua potable y animal.

TIPO II* : se divide en elementos esenciales (Cu, Cr, F-, Fe, Mn, Mg, Se y Zn) y no esenciales (As, Cd, CN-, Hg, NO₃-, NO₂-, NO₃-/NO₂- y Pb)

A) y B) REQUISITOS DE AGUA PARA CONSUMO HUMANO Y BEBIDAS DE ANIMALES				
	Elementos	Límite máximo establecido por norma	Valor obtenido luego de tratamiento con NF	Cumplimiento
TIPO I	Coliformes totales	≥ 5 UFC/100 ml	0 UFC/100 ml	si
	E. coli	ausencia	0,00	si
	Turbidez	≤ 2 NTU	0,16 NTU	si
TIPO II*	Cu	2 mg/L	0,07 mg/L	si
	Cr	0,1 mg/L	no establecido	no establecido
	F-	1,5 mg/L	no establecido	no establecido
	Fe	0,3 mg/L	1,5% respecto a alimentación	si
	Mn	0,1 mg/L	<0,01 mg/L	si
	Mg	125,0 mg/L	2,89 mg/L	si
	Se	0,01 mg/L	no establecido	no establecido
	Zn	3,0 mg/L	0,07 mg/L	si
	As	0,01 mg/L	0,04 mg/L	no
	Cd	0,01 mg/L	2% respecto a alimentación	si
	CN-	0,05 mg/L	no especifica	no especifica
	Hg	0,001 mg/L	no especifica	no especifica
	NO ₃ -	50,00 mg/L	no especifica	no especifica
	NO ₂ -	3,00 mg/L	no especifica	no especifica
	NO ₃ -/NO ₂ -	1,00	no especifica	no especifica
Pb	0,05 mg/L	3,75 mg/L	no	
TIPO IV	amoníaco	1,5 mg/L	0,46 mg/L	si
	cloruro	400 mg/L	138,53 mg/L	si
	pH	6,5 < pH < 8,5	7,68	si
	sulfato	500 mg/L	no especifica	no especifica
	SDT	1500 mg/L		

Fuente: Norma Chilena Oficial – NCh1333.Of78 – Modificada en 1978.
Requisitos de calidad del agua para diferentes usos. INN.

Tabla A2. Requisito de los elementos para uso en riego.

c) RIEGO			
Elemento	Límite máximo establecido por norma	Efluente NF	Cumplimiento a norma
NO ₃ - N	no establecido	11,5	no establecido
Cl-	200 mg/L	5,07	si
NH ₄ - N	no establecido	4,17	no establecido
S	no establecido	0,17	no establecido
Na porcentual	35%	48,75%	no
Mg	no establecido	2,89	no establecido
K	no establecido	7,04	no establecido
Ca	no establecido	7,24	no establecido
Sr	no establecido	0,06	no establecido
B	0,75 mg/L	0,09	si
Zn	2,00 mg/L	0,07	si
Ba	4,00 mg/L	0,02	si
Mn	0,20 mg/L	<0,01	si
Cu	0,20 mg/L	0,07	si
As	0,10 mg/L	0,04	si
Pb	5,00 mg/L	3,75	si
Fe +2	5,00 mg/L	1,5% respecto a alimentación	si
Al +2	5,00 mg/L	2% respecto a la alimentación	si
Cd +2	0,010 mg/L	2% respecto a la alimentación	si
Li +	2,50 mg/L	15% respecto a la alimentación	no
pH	5,5 - 9,0	6,0 - 7,0	si

Fuente: Norma Chilena Oficial – NCh1333.Of78 – Modificada en 1978.
Requisitos de calidad del agua para diferentes usos. INN.

Tabla A3. Requisitos de parámetros para uso de agua en recreación y estética.

D) RECREACIÓN Y ESTÉTICA (CON Y SIN CONTACTO DIRECTO)			
Característica	Requisito	Valor obtenido luego de NF	Cumplimiento
pH	6,5 a 8,3	8,3	si
T°C máximo	30	no aplica	no aplica
Claridad, mínimo	Visualización de discos Secchi a 1,20m de profundidad	no aplica	no aplica
Sólidos flotantes visibles y espumas no naturales	Ausentes	no aplica	no aplica
Aceites flotantes y grasas, mg/L	5	no aplica	no aplica
Aceites y grasas emulsificador, mg/L	10	no aplica	no aplica
Color, unidades Escala Pt-Co, máximo	100	no aplica	no aplica
	Ausencia de colorantes artificiales	no aplica	no aplica
Turbiedad	50 NTU	0,16 NTU	si
Coliformes fecales/100ml	1000	0 UFC/100 ml	si
Sustancias que provoquen olor y sabor inconveniente	Ausente	no aplica	no aplica

Fuente: Norma Chilena Oficial – NCh1333.Of78 – Modificada en 1978. Requisitos de calidad del agua para diferentes usos. INN. Extraído de: https://ciperchile.cl/pdfs/11-2013/norovirus/NCh1333-1978_Mod-1987.pdf

Tabla A4. Requisito de las características para vida acuática.

E) VIDA ACUÁTICA			
Característica	Requisito	Valor obtenido luego de NF	Cumplimiento
Oxígeno disuelto, mg/L	5 mínimo	no aplica	no aplica
pH	6,0 - 9,0	8,3	si
Alcalinidad total, mg/L de CaCO ₃	20 mínimo	no aplica	no aplica
Turbiedad debido a descarga	< 30 NTU	0,16 NTU	si
Temperatura	En flujos de agua corriente, no debe aumentar el valor natural en más de 3°C	no aplica	no aplica
Color	Ausencias colorantes artificiales	no aplica	no aplica
Sólidos flotantes visibles y espumas no naturales	Ausentes	no aplica	no aplica
Sólidos sedimentables	No deben exceder del valor natural	no aplica	no aplica
Petróleo o cualquier hidrocarburo	No debe haber detección visual	no aplica	no aplica
	No debe haber cubrimiento de fondo, orilla o ribera	no aplica	no aplica
	No debe haber olor perceptible	no aplica	no aplica

Fuente: Norma Chilena Oficial – NCh1333.Of78 – Modificada en 1978. Requisitos de calidad del agua para diferentes usos. INN.