



INFORME CSET-2017-PU-005-WT

Estudio de tecnologías de tratamiento de agua residual y concentración en la industria

Autores:

Sebastian Teichert
Felix Carrasco
Werner Platzer

Proyecto

CORFO 13CEI2-21803

Fecha

Agosto 2017

Contenido

1	Resumen Ejecutivo	3
2	Introducción	5
3	Tratamiento de aguas residuales	6
3.1	Conceptos Básicos	6
3.1.1	Tratamiento Mecánico	6
3.1.2	Tratamientos biológicos	7
3.1.3	Tratamiento químico	10
3.1.4	Tratamientos físicos	11
3.2	Parámetros relevantes	18
3.3	Requerimientos legales en Chile	19
4	Aplicaciones y conceptos de tratamiento	20
4.1	Industria Agropecuaria	20
4.1.1	Industria de aceite de oliva	21
4.1.2	Industria vitivinícola	28
4.1.3	Desarrollo de concepto	31
4.2	Industria del papel	34
4.2.1	Visión general	34
4.2.2	Agua residual y motivación	34
4.2.3	Características de aguas residuales	36
4.2.4	Estado del arte	37
4.2.5	Desarrollo de concepto	38
4.3	Industria Minera	42
4.3.1	Perspectiva general	42
4.3.2	Motivación	43
4.3.3	Características de aguas residuales	44
4.3.4	Propuestas de concepto	46
5	Conclusión	49
6	Referencias	51

1 Resumen Ejecutivo

El presente trabajo considera importantes sectores industriales de la economía chilena, que experimentan problemas específicos con las aguas residuales propias de sus procesos productivos. Para realizar este análisis, se describen estas áreas industriales, caracterizan sus problemas de aguas residuales, se determina la composición de estos residuos y finalmente se presenta un concepto adecuado para el tratamiento de estos residuos líquidos.

Los sectores industriales representativos seleccionados para este análisis corresponden la agroindustria (vitivinícola y de aceite de oliva), a la industria del papel y finalmente la industria minera; principalmente considerando su impacto en la economía nacional.

La producción de oliva y vino en Chile, se concentra principalmente en la zona centro, considerando además zonas del norte chico. Estas regiones se caracterizan por su alta radiación solar y escasez de agua. Considerando estas características, los tratamientos de agua aquí planteados buscan el aprovechamiento de la energía solar para tratar estos residuos de manera sustentable, y lograr recuperar y reutilizar el recurso hídrico.

Las aguas residuales de la industria del aceite de oliva, presentan altos niveles de contaminación por agentes orgánicos. Para este tipo de proceso, se seleccionó como método adecuado un tratamiento biológico anaeróbico de aguas residuales por medio de un reactor UASB. La tecnología es muy simple, los costos de operación son bajos, el agua residual tratada se puede utilizar de manera óptima como el agua de riego y el biogás producido se puede utilizar energéticamente. Para tratar aguas residuales de manera que puedan ser recicladas y reutilizadas en un determinado proceso, se puede acoplar un sistema de destilación solar aguas debajo de los reactores biológicos. Estos dispositivos usan la energía solar para finalmente obtener agua purificada de manera de poder ser reutilizada, incluso para consumo humano.

En el caso de la industria vitivinícola, las aguas residuales también están orgánicamente contaminadas, y además tiene altas fluctuaciones en la concentración de dichos componentes orgánicos, de manera estacional, e incluso diaria. Además, incluyen componentes biológicos nocivos como fenoles y plaguicidas. Para la eliminación de componentes e incluso de grandes cantidades de DQO, un innovador proceso de fotocatalisis solar sirve como pretratamiento. Posteriormente, un lodo activo convencional puede reducir la DQO restante, de forma que las aguas residuales puedan ser recicladas.

Se sabe que la industria papelera requiere de grandes cantidades de agua dulce para la producción de papel y celulosa; lo que se acompaña de una gran cantidad de aguas residuales. El problema en este contexto, corresponde a los

compuestos presentes en los residuos que son apenas biodegradables y no pueden eliminarse fácilmente de acuerdo con el estado actual de la técnica. La descarga de estas aguas residuales en los cuerpos de agua o en suelos, tiene un impacto negativo en el medio ambiente. La producción de papel se encuentra principalmente en el sur del Chile, donde las características del recurso solar no son favorables para su uso en sistemas de tratamiento des aguas. Por consiguiente, un biorreactor de membrana corresponde a una técnica de tratamiento adecuada en combinación con un lecho fijo. De esta manera, el agua residual puede ser purificada de tal manera que pueda ser reciclada. Sin embargo, debido a las características de modularización de estos sistemas, pueden ser alimentados por sistemas fotovoltaicos.

Las aguas residuales (relaves), en la industria minera del cobre, están caracterizadas por la presencia de metales pesados y tierras raras; muchos de los cuales presentan un impacto ambiental negativo si no son tratados correctamente y otros que pueden ser recuperados y comercializados. En este estudio se plantea un sistema de recuperación de minerales y de agua purificada, basado en tecnología de Membrana de Destilación, impulsado térmicamente por energía solar.

Finalmente, en el área de la minería no metálica, específicamente en la producción de litio, se plantea una manera de producción utilizando energía solar y sistemas de Membrana de destilación para lograr una concentración mayor de salmuera, optimizando el uso del recurso hídrico en este tipo de faena.

2 Introducción

El constante aumento del consumo de agua y la creciente escasez de agua requiere de nuevas soluciones y conceptos que permitan el uso sostenible del agua. El objetivo es mantener las aguas residuales en el futuro no como un residuo problemático, sino como una valiosa materia prima reutilizable.

La escasez de agua ya está causando pérdidas de producción en muchas áreas industriales, especialmente en la agricultura, que corresponde a una de las actividades humanas que más consume recurso hídrico. En particular, en el contexto de que el cambio climático que conduce a una mayor escasez de agua, el recurso agua debe ser tratado como un recurso estratégico y vital para el desarrollo humano. Con este escenario, los tratamientos de aguas residuales cobran una gran importancia.

El aumento constante del consumo de agua, también conduce a un aumento de aguas residuales. Si las aguas residuales no son tratadas, o tratadas de forma insuficientemente y liberadas al medio ambiente, representan un riesgo ambiental que no debe ser subestimado, pues puede perturbar todo el ecosistema, causar daños a largo plazo y, en última instancia, reducir aún más la disponibilidad de agua; lo cual finalmente conducirá también a daños económicos. El tratamiento inadecuado de las aguas residuales no permite una reutilización de ellas, ya sea para el uso en el proceso productivo o para otros fines. Como resultado de un adecuado tratamiento y reutilización de aguas residuales, el proceso se vuelve económicamente y ecológicamente más rentable, y por lo tanto es deseable en todos los aspectos.

En este contexto, el presente trabajo presenta y explica los fundamentos del tratamiento de aguas residuales, que sirven para la comprensión general de este trabajo. Posteriormente, se presentan y tratan varios sectores industriales importantes de la economía chilena, que tienen problemas con sus aguas residuales. Las industrias analizadas son la industria del papel, la agricultura (oliva y la producción de vino) y la industria minera (cobre y litio). Cada sector industrial se caracteriza por una calidad de agua residual específica propia de cada proceso, es por esto que para cada uno de ellos se debe estudiar una alternativa específica de tratamiento. Los conceptos desarrollados se adaptan a las respectivas circunstancias específicas, de manera innovadora y con el uso de energía solar, y pretenden servir como tratamiento descentralizado de aguas residuales.

3 Tratamiento de aguas residuales

3.1 Conceptos Básicos

El tratamiento de aguas residuales es un proceso en el cual se eliminan los contaminantes presentes en ellas. En general, el objetivo final es la modificación de las características de las aguas residuales para que cumplan con los estándares establecidos por normas de efluentes, y en algunos casos con los estándares para ser reutilizada en algún proceso específico. Para el tratamiento de las aguas residuales, se pueden aplicar diferentes técnicas y procesos (Fig. 1). A continuación se presentan y explican diversas técnicas y procesos que son importantes para la comprensión general del tratamiento de aguas residuales.

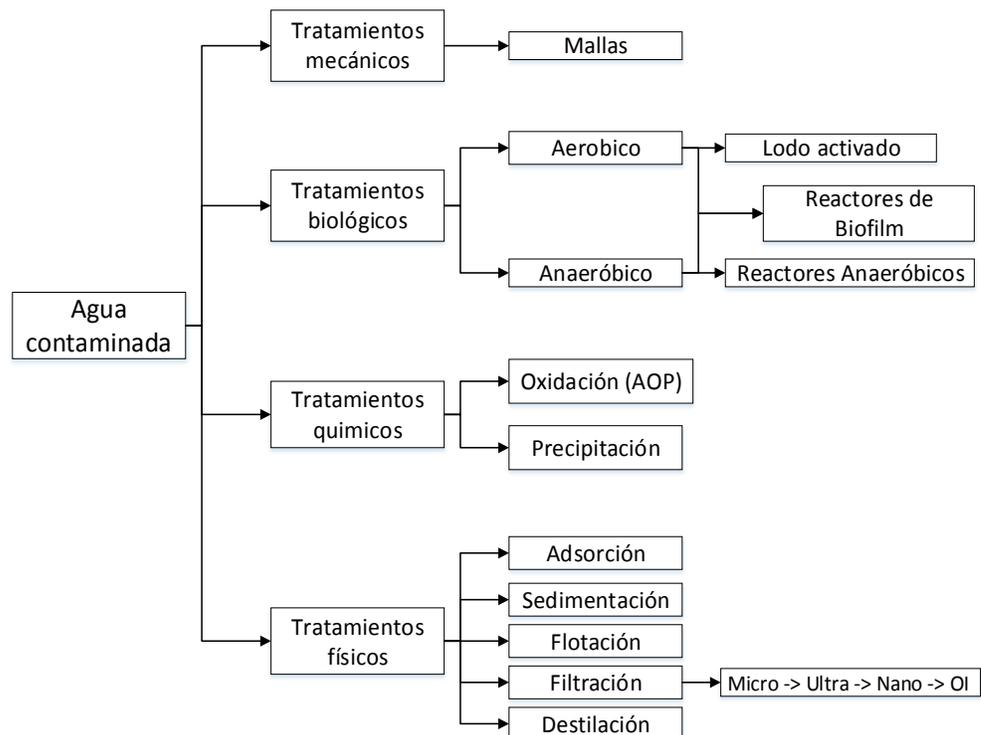


Figura 1: Métodos básicos en tratamientos de aguas

3.1.1 Tratamiento Mecánico

Los métodos de tratamiento mecánico son métodos que aplican exclusivamente a elementos mecánicos estáticos por donde se hace pasar el flujo contaminado para remover materiales. Principalmente, se utilizan como una etapa de tratamiento primaria y por lo tanto sirven como etapa de pre clarificación. Los compuestos sólidos e inorgánicos, así como las partículas suspendidas flotantes, de mayor tamaño, que pueden perturbar e interferir en

otras etapas del tratamiento, se pueden eliminar de las aguas residuales con este método. Un método típicamente aplicado son pantallas o mallas (Fig. 2). Con estos componentes también se previene el daño y obstrucciones de equipos, tuberías y accesorios de aguas abajo, que por lo general son de alto costo. Dependiendo de la composición de las aguas residuales, se aplican mallas gruesas (típicamente con aberturas de 6 mm o más) o mallas finas (1,5 - 6 mm).



Figura 2: Mallas como tratamiento primario

3.1.2 Tratamientos biológicos

Los procesos biológicos para el tratamiento de aguas residuales han visto aplicaciones en todo el mundo. Se considera que son procesos amigables con el medioambiente, fiables y rentables. Los tratamientos biológicos se utilizan principalmente para remover el material orgánico presente en el agua residual. Estos sistemas utilizan microorganismos para descomponer la materia orgánica y se utilizan a menudo como un proceso de tratamiento secundario. Dependiendo del metabolismo del microorganismo, los procesos se pueden clasificar en aeróbicos y anaeróbicos. En lo que sigue, ambos procedimientos se explicarán con más detalle.

Procesos aeróbicos:

La biodegradación de la materia orgánica es el resultado de la acción de microorganismos en presencia de oxígeno molecular. Estos microorganismos convierten la materia orgánica en CO₂, agua y material celular propio (lodo activado). La mayoría de las técnicas aplicadas corresponden a procesos de lodos activados y de película fija.

Procesos de lodos activados:

El proceso de lodos activados (ASP) es un proceso biológico aeróbico. La figura 3 muestra esquemáticamente el principio funcional del proceso de lodos activados.

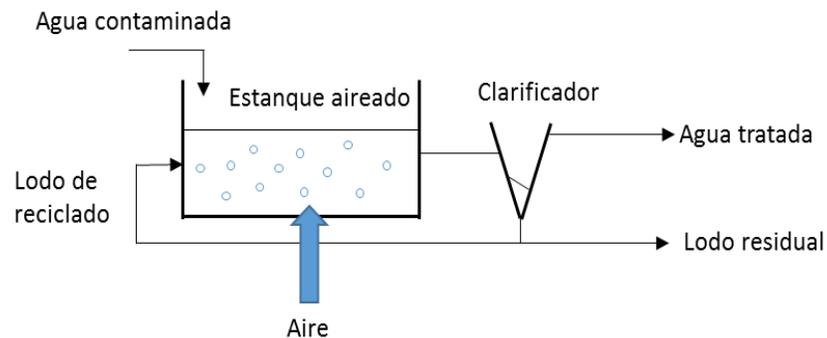


Figura 3: Principio de operación de proceso de lodos activados

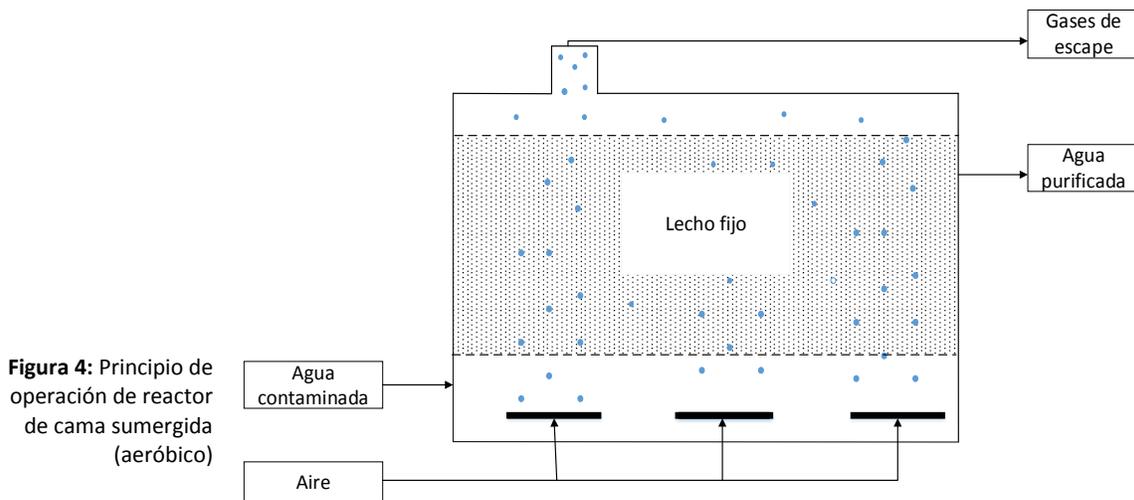
En principio, todos los procesos de lodos activados consisten en un tanque de aireación que sirve como biorreactor. Aquí, los microorganismos crecen debido al metabolismo del material orgánico y forman partículas que se agrupan en bandadas. Estas bandadas son capaces de asentarse, de modo que se pueden separar en una unidad de post-sedimentación, llamada clarificador. Una parte del lodo activado sedimentado se recicla al tanque de aireación, el exceso de lodo debe ser desechado.

Con este proceso, casi todos los materiales fácilmente biodegradables pueden descomponerse. Sin embargo, se requieren grandes cantidades de energía para airear el tanque y mantener óptimas condiciones aeróbicas. Además, se acumulan grandes cantidades de lodos residuales, cuya eliminación es costosa.

Sistema de película (Biofilm):

Los sistemas de biofilm, son procesos de tratamiento biológico que emplean un medio que soportará la biomasa en forma de un biofilm en su superficie o dentro de su estructura porosa. Un biofilm es capa delgada de microorganismo de varios micro metros. Los microorganismos así inmovilizados en el biofilm se protegen mutuamente contra influencias ambientales tales como estrés hidráulico, fluctuaciones de pH, estrés osmótico y sustancias químicas nocivas. Debido a la intensa interacción de los microorganismos, incluso los compuestos persistentes pueden degradarse, que se consideran biológicamente difíciles o no degradables bajo condiciones convencionales. Además, surgen menos excesos de lodos que deben eliminarse. Los sistemas de biofilm se pueden distinguir en sistemas de lecho fijo y de lecho móvil, dependiendo del tipo

actual de los materiales portadores. Un ejemplo para un sistema de lecho fijo es un reactor de lecho fijo sumergido (Fig. 4). Más comúnmente, los sistemas de biopelícula funcionan aeróbica, pero pueden también funcionar anaeróbicamente.



Proceso Anaeróbico:

La digestión anaeróbica se lleva a cabo en ausencia de oxígeno, por una serie de microorganismos anaeróbicos, principalmente bacterias, que tienen tasas de crecimiento más bajas que los microorganismos aeróbicos. El tratamiento de aguas residuales tiene lugar en reactores anaeróbicos (Fig. 5). La materia orgánica se descompone en cuatro etapas microbiológicas al biogás. Las cuatro etapas metabólicas diferentes se llevan a cabo por 4 tipos diferentes de microorganismo.

- **Hidrólisis:** En esta fase de la digestión anaerobia, el material orgánico complejo se descompone en azúcares simples, aminoácidos y ácidos grasos.
- **Acidogénesis:** Los productos de la hidrólisis se transforman en ácidos inferiores.
- **Acetogénesis:** Los ácidos inferiores generados en la Acidogénesis se transfieren en ácidos principalmente acéticos.
- **Metanogénesis:** En esta fase terminal, las bacterias eliminan los productos intermedios de las etapas anteriores y los convierten en metano y dióxido de carbono.

La ventaja del tratamiento anaeróbico en comparación con el tratamiento aeróbico es, por un lado, que no se requieren grandes cantidades de energía para la aireación; y por el contrario, el biogás producido puede ser utilizado energéticamente (térmicamente y eléctricamente). Además, el exceso de lodo producido es significativamente más bajo que en el tratamiento aeróbico. Sin

embargo, el DQO (Demanda Química de Oxígeno) no se puede bajar tanto como en el tratamiento aeróbico y el sistema es más susceptible a las cargas fluctuantes.

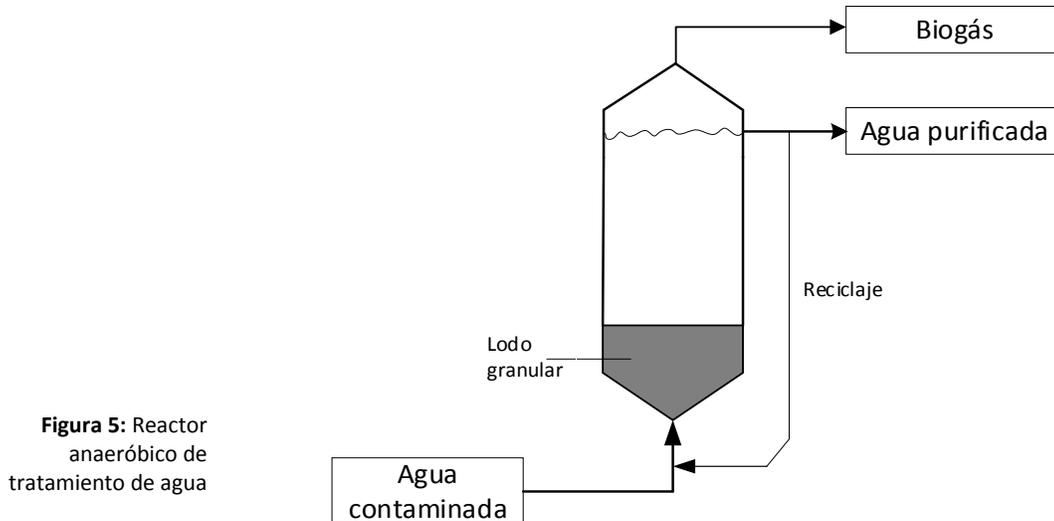


Figura 5: Reactor anaeróbico de tratamiento de agua

3.1.3 Tratamiento químico

En el tratamiento químico del agua, la composición del agua se cambia por la adición de productos químicos. Los métodos más comunes son la oxidación química y la precipitación química, que se explican a continuación.

Oxidación química (procesos avanzados de oxidación)

Los procesos avanzados de oxidación dependen de la producción de radicales altamente reactivos que se generan a partir del agente oxidante respectivo (Tab. 1). Estos radicales oxidan de forma no específica todos los compuestos orgánicos (ya veces inorgánicos) existentes en las aguas residuales. Los compuestos orgánicos no se degradan, pero su estructura química se altera, por lo que los compuestos persistentes son accesibles para la biodegradación y por lo tanto para el tratamiento biológico. La Tabla 1 muestra el potencial de electrodo estándar de agentes oxidantes más utilizados. A más alto potencial, más fuerte es el poder oxidante.

Tabla 1: Potencial de algunos agentes oxidantes

Agente Oxidante	E^0 [V] (pH = 0)
Oxígeno (O_2)	+1.23
Peróxido de hidrogeno (H_2O_2)	+1.77
Ozono (O_3)	+2.07
Oxígeno atómico (O)	+2.42
Radical hidroxilo ($OH\cdot$)	+2.80

Con referencia a la Tabla 1, el radical OH con un potencial de 2,80 V representa el agente oxidante más fuerte en soluciones acuosas; por lo cual los métodos de oxidación para el tratamiento de aguas residuales están dirigidos a producir radicales OH. Esto puede hacerse mediante el uso de ozono, peróxido de hidrógeno y oxígeno, así como por el uso de fuentes de energía con catalizadores. Los fuentes de energía pueden ser artificiales, por ejemplo luz ultravioleta, o naturalmente por la radiación solar. Los reactores que utilizan radiación solar para producir radicales OH, se llaman fotorreactores solares. Estos reactores utilizan la radiación solar directa.

Precipitación química / Floculación

La precipitación química es el método más común para eliminar las partículas más finas y disueltas de las aguas residuales. Para convertir las partículas disueltas en una forma de partículas sólidas, se añade un agente de precipitación al agua residual. Esta reacción provocada por el agente, hace que las partículas disueltas formen partículas sólidas. La precipitación se utiliza para la separación de iones metálicos (metales pesados), sulfuros y fosfatos. El hierro y las sales de aluminio son los agentes precipitantes más utilizados. En un proceso físico subsiguiente, estas partículas sólidas pueden separarse. La Figura 6 muestra el proceso de precipitación en una escala de banco.

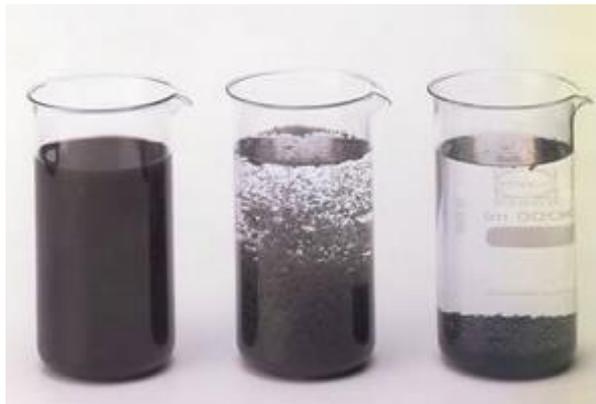


Figura 6: Proceso de precipitación

3.1.4 Tratamientos físicos

Los métodos físicos de tratamiento de aguas residuales realizan la eliminación de sustancias mediante el uso de fuerzas naturales, tales como la gravedad, las fuerzas de van der Waal, así como mediante el uso de barreras físicas tales como filtros. Los métodos más aplicados se explican a continuación.

Absorción física

La adsorción física es la adsorción de partículas (adsorbato) de una fase líquida a la superficie de un cuerpo sólido (adsorbente). La adsorción física se basa en fuerzas de van der Waals. El grado de adsorción depende de diversos factores,

tales como presión, temperatura, textura superficial del adsorbente y estructura química de la sustancia a adsorber.

La superficie adsorbente no puede unirse ilimitadamente a las moléculas. La fijación molecular es entonces terminada, cuando se ha establecido un equilibrio de adsorción entre el adsorbato y las partículas ya adsorbidas. Para conseguir una adsorción adicional, el adsorbente debe ser regenerado, reactivado o sustituido. Los adsorbentes utilizados en el tratamiento de aguas residuales son principalmente materiales basados en carbono, tales como carbón activado, o materiales minerales, por ejemplo zeolita (Fig. 7).



Figura 7: Carbón activado (izq.) y zeolita (der.)

Sedimentación

La sedimentación es la separación de partículas suspendidas que son más pesadas que el agua. La sedimentación de las partículas se basa en la fuerza de gravedad de las diferencias de densidad entre las partículas y el fluido. La sedimentación es ampliamente utilizada en sistemas de tratamiento de aguas residuales en diferentes etapas de tratamiento, particularmente como pre y postratamiento. Para el proceso de sedimentación se aplican corrientemente clarificadores (Fig. 8) para eliminar:

- Grano y materia particulada en la etapa de tratamiento primario.
- Lodos del tratamiento biológico.
- Manadas químicas del tratamiento químico.

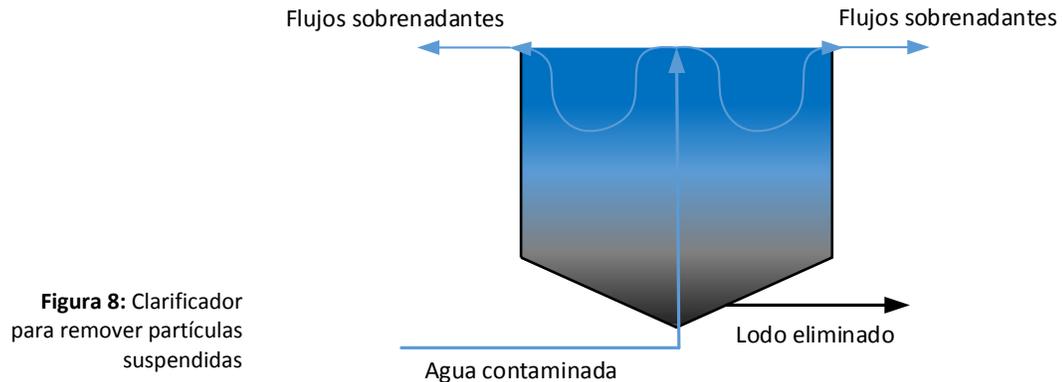


Figura 8: Clarificador para remover partículas suspendidas

Flotación

La flotación es un proceso para separar selectivamente los materiales hidrófobos de los hidrófilos. El proceso depende de la adhesión selectiva de las burbujas de aire a las superficies minerales en una suspensión mineral / agua (aguas residuales). Las burbujas de aire se unirán a partículas más hidrófobas, las harán flotar y transportarlas a la superficie del agua, donde pueden ser removidas (Fig.9).

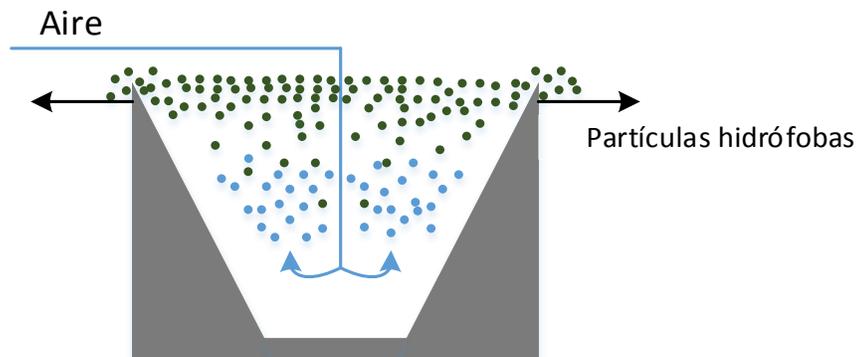


Figura 9: Proceso de Flotación

Filtración

La filtración es una operación física mediante la cual los sólidos se separan de los fluidos con un filtro. El filtro permite que pase el fluido, pero retiene el material sólido. El fluido que pasa a través del filtro se llama el filtrado, el material sólido que permanece en el filtro se denomina residuo. La filtración de aguas residuales es necesaria cuando los requisitos o umbrales del agua receptora son altos o si las aguas residuales también deben ser reutilizadas.

La filtración en el contexto del tratamiento de aguas residuales tiene, entre otras cosas, el propósito de eliminar el lodo activado restante, los agentes de

precipitación u otros compuestos. Dependiendo del tamaño de poro de la membrana, diferentes sustancias pueden pasar a través de la membrana. La figura 10 muestra una visión general de los diversos tipos de membranas y sustancias que son capaces de atravesar.

El mayor obstáculo de la filtración por membrana es el ensuciamiento de la membrana. El ensuciamiento de la membrana es un proceso mediante el cual una solución o una partícula se deposita sobre una superficie de membrana o en poros de membrana, de manera que el rendimiento de la membrana se degrada. El sistema tiene que ser detenido con frecuencia para restaurar el flujo por lavado a contracorriente, limpieza y sustitución, lo que resulta en altos costos de mantenimiento y operación. A continuación se explican con más detalle los diferentes tipos de filtración.

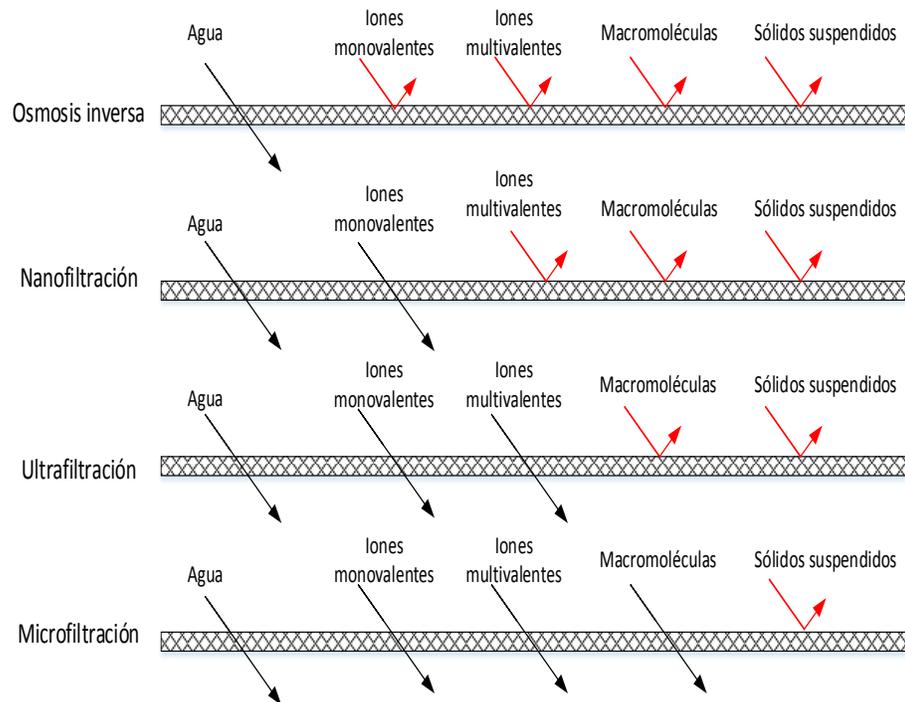


Figure 10:
 Characteristics of
 different filtration-
 types

i. Microfiltración:

La microfiltración sirve usualmente como un pretratamiento para otros procesos de separación tales como la ultrafiltración, y un postratamiento para procesos de filtración gruesa. El tamaño típico de poro utilizado para la microfiltración oscila entre aproximadamente 0,1 y 10 μm . De esta manera, las membranas son capaces de prevenir partículas tales como sedimentos, algas, protozoos, hongos y bacterias.

ii. Ultrafiltración:

Industrias como la química y farmacéutica, el procesamiento de alimentos y bebidas y el tratamiento de aguas residuales, emplean ultrafiltración para reciclar el flujo o agregar valor a los productos posteriores. El tamaño de poro típico utilizado para la ultrafiltración oscila entre aproximadamente 0,01 y 0,1 μm . De esta manera, las membranas pueden prevenir virus y otros patógenos.

iii. Nanofiltración:

Las membranas de nanofiltración tienen tamaños de poro en el rango de 1-10 nanómetros. Esto permite la eliminación de sustancias de alto peso molecular, materiales coloidales y moléculas poliméricas orgánicas e inorgánicas. Los materiales orgánicos de bajo peso molecular e iones como el sodio, el calcio, el cloruro de magnesio y el sulfato no son eliminados por las membranas UF.

iv. Osmosis Inversa:

Los tamaños de poro de la membrana varían de 0,1 a 5 nm. Es, con mucho, el mejor proceso de filtración por membrana disponible para la industria. Se utiliza a gran escala para la desalinización y purificación del agua, ya que filtra todo menos las moléculas de agua.

Tratamiento térmico

Los tratamientos térmicos se basan principalmente en la destilación de agua, es decir en lograr la evaporación de agua por medio de aplicación de calor, para luego capturar el agua condensada al enfriarse. Los métodos más utilizados son MSF (Multi Stage Distillation), MED (Multi Effect Distillation), y VC (Vapour compression). Las tres tecnologías difieren entre sí por la temperatura y la presión a la que el agua es evaporada. Estas tecnologías son utilizadas principalmente en la desalación de agua.

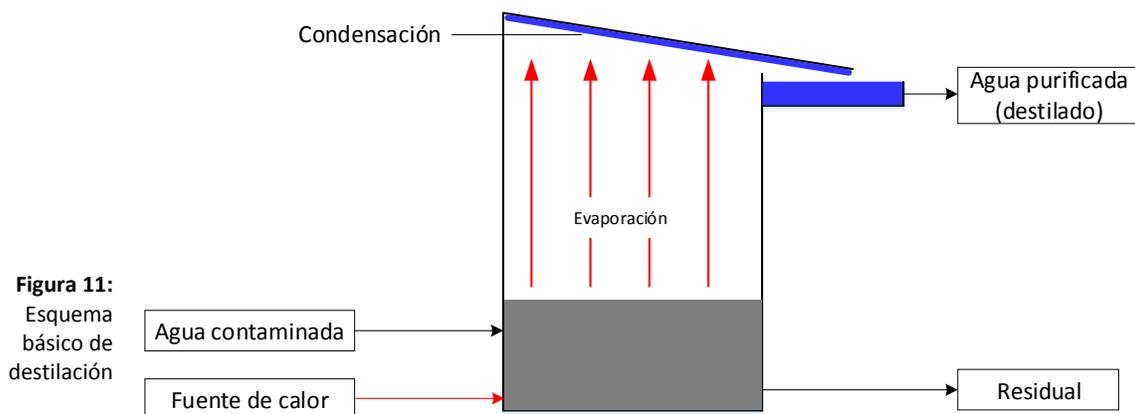


Figura 11:
 Esquema
 básico de
 destilación

Estos sistemas se caracterizan determinando la relación entre la cantidad de agua destilada y la cantidad de vapor utilizado para producir ese destilado, relación denominada GOR (Gain output ratio). Este valor se encuentra comúnmente entre 4 y 40. Mientras más alto sea, la tecnología es más eficiente.

El calor puede provenir de calor residual de algún proceso industrial, o plata de generación térmica, o también puede ser calor solar.

i. MSF (Multi Stage Flash):

En este proceso el flujo de agua a tratar es calentada en un rango de 90 a 115°C, en un estanque de manera de generar vapor. El vapor es ingresado por varias etapas de destilación, donde la presión de saturación es menor a la de la temperatura que viene el flujo caliente de vapor. El vapor al ser inyectado en esta etapa de baja presión se transforma en vapor de agua saturado, el cual es condensado, obteniéndose agua destilada.

Cada etapa produce aproximadamente 1% del agua destilada total. Las unidades típicas poseen de 19 a 28 etapas, con lo cual la recuperación de agua va desde 19 a 28%, llegando las últimas tecnologías a 45%. EL GOR de las plantas de MSF está entre 7 y 9; y la energía consumida en bombeo esta entre 2 a 3,5 kWh/m³, a lo cual se agregan entre 9,5 a 11 kWh/m³ de energía térmica [1].

ii. MED (Multi Effect Distillation):

Esta tecnología considera que el agua a tratar no es calentada, y solamente es inyectada como microgotas en bancos de tubos a aletas de un intercambiador de calor, que se encuentra a mayor temperatura. Estas microgotas se transforman en vapor, el cual luego es condensado.

Esta tecnología opera a temperaturas menores que MSF, entre 62 a 75°C y alcanza mayores índices GOR (hasta 24). El consumo eléctrico para bombeo, éste se encuentra entre 0,8 a 1,4 kWh/m³, y el consumo de calor es de 4,5 a 6,9 kWh/m³ [1].

iii. VC (Vacuum compression):

La tecnología de Compresión de Vapor (VC) utiliza el vapor comprimido producido por un compresor mecánico o un generador de vapor. En estos sistemas el agua salina es evaporada y dicho vapor es llevado hacia un compresor, donde sube su temperatura al ser comprimido, evaporando el agua que luego es pulverizada sobre tubos que llevan el vapor, para luego condensarse en agua destilada. Este sistema requiere para su operación entre 8 y 12 kWh/m³ de agua destilada.

A las tecnologías de tratamiento térmico se suma también la tecnología de Membrana de Destilación, que consiste en un sistema térmico que utiliza también una membrana hidrófoba para obtener agua purificada. Este sistema se basa en la diferencia de presión de vapor de la solución salina (a mayor temperatura), con el agua pura al otro lado de la membrana, con lo cual a través de la membrana pasan partículas de vapor de agua, quedando retenidos otros elementos.

3.2 Parámetros relevantes

En el medio ambiente se conocen unos 40 millones de compuestos orgánicos conocidos que no pueden definirse individualmente. Por lo tanto, se usan los llamados parámetros de suma. Estos parámetros reflejan las características del efecto y del material de una o más sustancias. El parámetro de suma más popular en el análisis de aguas residuales (de la industria del papel) son la DQO (demanda química de oxígeno) y la DBO (demanda bioquímica de oxígeno). Adicionalmente, existen TS (sólidos totales), TDS (sólidos disueltos totales) y TSS (sólidos suspendidos totales). A continuación, estos parámetros de suma se explican con más detalle.

Demanda química de oxígeno (DQO)

La DQO representa la cantidad de oxígeno (mg/L) que se requiere para oxidar todos los compuestos oxidables en una muestra a CO₂ con un agente oxidante fuerte en condiciones ácidas. La DQO se utiliza como parámetro para la carga orgánica en las aguas residuales.

Demanda bioquímica de oxígeno (DBO)

La DBO indica el contenido de oxígeno necesario (mg/L) para descomponer compuestos orgánicos en aguas residuales mediante el metabolismo de bacterias aerobias dentro de un cierto período de tiempo. En la mayoría de los casos, se utiliza el DBO₅. Esto define la cantidad de oxígeno requerida por los microorganismos para descomponer las sustancias que contienen agua dentro de un período de cinco días. La DBO₅ da conclusiones sobre la carga con sustancias orgánicas bioquímicamente fácilmente degradables en las aguas residuales.

Relación entre la DBO₅ y la DQO

La proporción de DBO₅ a DQO da información sobre la degradabilidad de los compuestos presentes en las aguas residuales. Si el DBO₅ está biodegradado, se elimina simultáneamente la "cantidad" correspondiente de DQO. Si todos los compuestos de las aguas residuales son biodegradables en un plazo de cinco días, la proporción DBO₅: DQO es 1, y de 0,6-1 indica compuestos fácilmente degradables en el agua residual, proporciones inferiores a 0,6 indican compuestos poco degradables. Después de un tratamiento biológico de aguas residuales, sólo los compuestos no degradables permanecen en el efluente. Esta carga orgánica restante impide el reciclaje del agua, de modo que las aguas residuales generalmente se liberan al medio ambiente donde puede tener impactos ambientales dañinos.

Sólidos totales (TS) y sólidos suspendidos (SS)

El TS puede clasificarse como suspendido o disuelto. TS es el residuo de material que queda en un recipiente después de la evaporación de una muestra. El SS es el peso seco de las partículas no puede pasar un filtro de dos micrómetros.

3.3 Requerimientos legales en Chile

La descarga de aguas residuales industriales en Chile está sujeta a valores límite legales. En Chile, los valores de los umbrales que deben cumplirse dependen del tipo de agua receptora. Refiriéndose al congreso nacional de Chile, Norma ID: 182637, se hace una distinción entre:

- Ríos (Cuerpos de agua fluviales)
- Lagos (Cuerpos de agua lacustres)

Las siguientes tablas (Tab. 2 y 3) muestran los umbrales de aguas residuales más importantes que deben cumplir la industria chilena. Como característica adicional, la capacidad de dilución del agua receptora juega un papel importante, si las aguas residuales son descargadas a los ríos.

Tabla 2: Valores umbrales importantes para aguas residuales en ríos

Parámetro	Límite (baja capacidad de dilución)	Límite (gran capacidad de dilución)
DBO ₅ [mg O ₂ /L]	35	300
pH	6,0 – 8,5	6,0 – 8,5
Sólidos suspendidos [mg/L]	80	300
Temperatura [°C]	35	40

Tabla 3: Valores umbrales importantes para aguas residuales en ríos

Parámetro	Límite
DBO ₅ [mg O ₂ /L]	35
pH	6,0 – 8,5
Sólidos suspendidos [mg/L]	80
Temperatura [°C]	30

Si no se cumplen estos umbrales, se deben pagar multas o se debe interrumpir la producción.

4 Aplicaciones y conceptos de tratamiento

Este capítulo cubre la situación de aguas residuales de tres áreas diferentes en la industria chilena. Se han seleccionado sectores industriales importantes para la economía chilena que tienen problemas con respecto a sus aguas residuales. En general, las aguas residuales tratadas no potable, pueden reutilizarse como agua de riego, agua de lavado y otros usos, en los que no se requiere agua de alta pureza. Las aguas residuales purificadas de estándar potable (obtenidas mediante filtración) pueden ser consideradas para su uso o reutilización como agua de proceso [2]. Como industrias importantes, el sector agroalimentario, la industria papelera y la industria minera fueron seleccionadas para este propósito.

4.1 Industria Agropecuaria

Debido a que la industria de procesamiento de alimentos es un gran consumidor de agua y generadores de aguas residuales, tiene un gran potencial para el reciclaje y la reutilización del agua. Considerando las tendencias actuales del consumo de agua, es poco probable que las industrias alimentarias en el futuro puedan depender únicamente de las fuentes de agua dulce. El agua regenerada será cada vez más importante, especialmente en las zonas donde el suministro de agua dulce es escaso y los precios son altos [2]. Además, las aguas residuales que se producen en algunas industrias agrícolas o agroalimentarias son perjudiciales para el medio ambiente y afectan a todo el ecosistema.

La industria alimentaria chilena es responsable del 23% de las exportaciones nacionales y cuenta con uno de los productos básicos de la economía chilena. Asimismo, el 31% de las empresas existentes en Chile (319.000) pertenecen a la categoría de alimentos y el 23% (2 millones de empleos anuales) son generados por este sector [3]. Además, la agricultura es el mayor consumidor de agua dulce en Chile. Con una demanda de aproximadamente 527 m³ de agua por segundo, la agricultura consume casi el 82% del total de los recursos de agua dulce en Chile [4].

Este trabajo se enfoca en los sectores agrícolas que representan una parte muy importante de la economía chilena y que tienen problemas con sus aguas residuales. Se trata de la industria olivarera y la industria vitivinícola. Posteriormente, se describen estos sectores, se caracterizan las aguas residuales y se ilustra un concepto para su tratamiento de aguas residuales.

4.1.1 Industria de aceite de oliva

En este capítulo se presenta una visión general de esta industria, a continuación se caracterizan las aguas residuales y se presenta un concepto aplicable.

4.1.1.1 Visión general

La producción chilena de aceitunas se ubica entre las regiones de Atacama, Maule; y en el valle de Azapa, concentrándose en las regiones de O' Higgins y Maule, que representan casi el 50 % del total del cultivo en Chile (Figura 12). Estas regiones se benefician de un clima mediterráneo templado, perfecto para producir aceite de oliva de alta calidad.

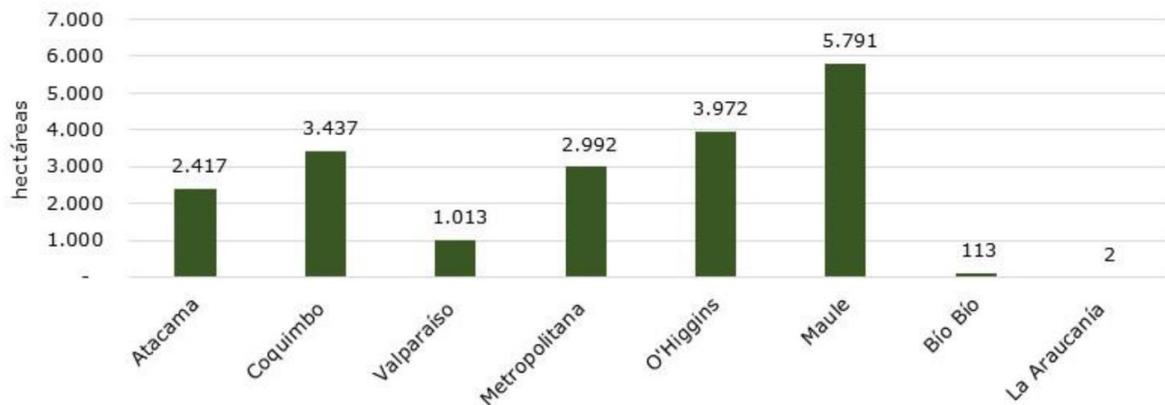


Figura 12: Superficie de cultivo de olivas en Chile [5]

La producción de aceitunas ha aumentado exponencialmente, pasando de sólo 192 t en 1997 a 21.600 t en 2012 [6]. La figura 13 muestra la tendencia de la producción de aceite de oliva de 2005 a 2014.

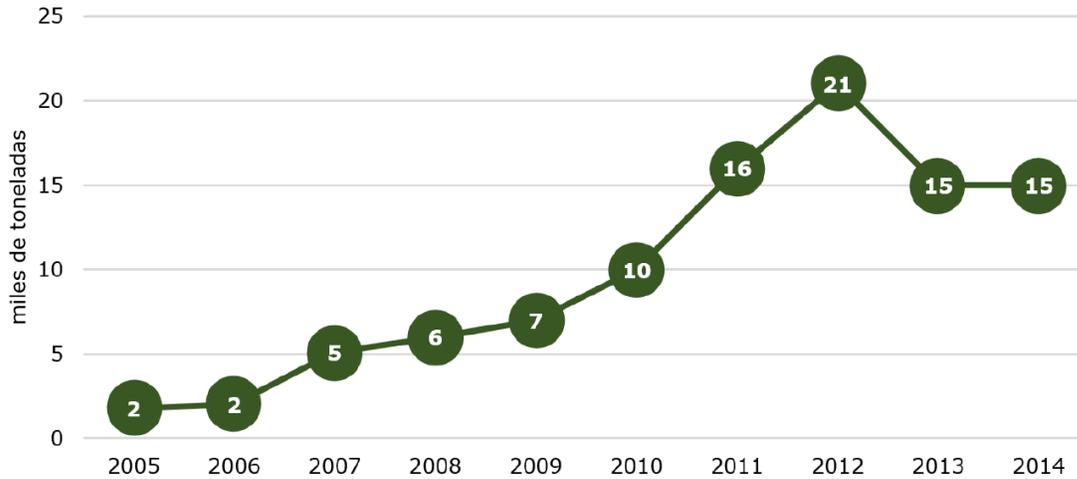


Figura 13: Tendencia de la producción del aceite de oliva en Chile desde 2005-2014 [5]

La disminución de la producción entre 2012 (21 mil toneladas) y 2013 a 2014 (15 mil toneladas en cada año) se debió a la escasez de agua de riego y las bajas temperaturas en la primavera de 2013.

4.1.1.2 Agua residual y motivación

Las aguas residuales procedentes de la transformación del olivar, en las siguientes aguas residuales de molienda (OMW), se consideran el principal residuo de esta industria y representan uno de los efluentes industriales más fuertes. Dependiendo del proceso de producción aplicado, se generan aguas residuales de 0,5 a 1,5 m³ por 1000 kg de aceitunas, por lo que en todo el mundo se generan unos 5,4 × 10⁶ m³ de OMW y 1,8 × 10⁶ m³ de aceite de oliva [7]. Esto significa que se producen unos 3 litros de aguas residuales por litro de aceite de oliva producido.

Las características de los OMWs son variables, dependiendo de muchos factores como el método de extracción, el tipo y la madurez de las aceitunas, la región de origen, las condiciones climáticas y los métodos de cultivo/transformación asociados [8]. Todos tienen en común la alta cantidad de compuestos orgánicos. Además, los OMWs contienen altos contenidos de crecimiento microbiano, inhibiendo compuestos como los fenólicos y los taninos, que son difíciles de tratar. En el capítulo siguiente se puede encontrar una caracterización y composición detallada de las aguas residuales. Por otra parte, las plantas oleaginosas son pequeñas y dispersas, y sus temporadas de funcionamiento dependen en gran medida de las condiciones climáticas. Por este motivo, a menudo es imposible un tratamiento centralizado de las aguas residuales [9].

Hasta ahora no existen técnicas de tratamiento apropiadas para las OMWs. Más comúnmente, los OWMs se concentran en estanques de evaporación y se

dejan secar durante la temporada de verano [7]. Otras prácticas aplicadas incluyen la disposición de tierras, vertidos en ríos, lagos o mares cercanos, lo que genera problemas ambientales como la contaminación del suelo, la contaminación del cuerpo de agua, la filtración subterránea y el olor [8]. En términos de efecto contaminante, 1 m³ de OMWs equivale a 100 - 200 m³ de aguas residuales domésticas [10].

En este contexto, este trabajo se ocupa del desarrollo de un método para el tratamiento de la OMWs de manera de reducir sus impactos ambientales. Por otra parte, el agua tratada puede utilizarse como agua de regadío, sobre todo porque el cultivo del olivo se realiza en zonas áridas o semiáridas con escasos recursos hídricos. El proceso a desarrollar debe tolerar las condiciones de los OMWs, debe purificarse ecológica y económicamente, y debe ser compacto y descentralizado.

Una tecnología aplicable corresponde a un tratamiento anaeróbico en un reactor de flujo ascendente de lodos (UASB). A continuación se presenta un desarrollo de concepto técnico, que incluye importante información básica sobre la industria de oliva en Chile.

4.1.1.3 Características de aguas residuales

En general, se generan dos corrientes de aguas residuales durante la producción de aceite de oliva. Pueden sub-dividirse en agua de lavado de aceitunas (OWW) y aguas residuales de molienda (OMW). La Figura 14 muestra ambos tipos de aguas residuales.



Figura 14: OWW (izq.) y OMW (der.) almacenamiento

Ambas aguas residuales son bastante similares en su composición, pero OWW contiene una concentración más baja (de 1/10 a 1/50) de contaminantes como la demanda química de oxígeno (DQO) y compuestos fenólicos que OMW. La Tabla 4 muestra las características más importantes de ambas aguas residuales [11].

Tabla 4: Características de las aguas residuales generadas durante los procesos de producción de olivas

Parámetros	OWW [11]	OMW [8]
pH	5,77	3 - 5.9
TS [mg/L]	-	24.800
SS [mg/L]	-	1.000 – 9.000
DBO5 [mg/L]	588	35.000 – 110.000
DQO [mg/L]	1.632	45.000 – 170.000
Compuestos fenólicos [mg/L]	202	500 – 24.000

Como muestra la Tabla 4, todos los compuestos de aguas residuales son extremadamente concentrados. En comparación con aguas residuales municipales, la DQO y TS de éstas es típicamente 450-700 mg/L y 200 - 300 mg/L, respectivamente. Así, el valor de DQO del OMW es hasta 240 veces y el de la TS es 82 veces mayor que en las aguas residuales municipales.

Los compuestos fenólicos en las aguas residuales también deben ser considerados. El alto contenido de polifenoles no es fácilmente biodegradable y a menudo tóxico para muchos microorganismos del medio ambiente.

4.1.1.4 Desarrollo de concepto

La producción de aceite de oliva es generalmente desarrollada por pequeñas empresas que no pueden pagar los costos de un tratamiento de aguas residuales adecuado a menos que sea un procedimiento muy simple y barato. Sin embargo, la mayoría de las tecnologías de tratamiento requieren altos costos de inversión y un alto nivel de conocimiento tecnológico. Por lo tanto, el proceso a desarrollar debe ser sencillo, fiable, rentable, compacto y permitir un tratamiento de aguas residuales económico y descentralizado. Como proceso adecuado se plantea un tratamiento biológico anaeróbico realizado con un reactor UASB.

Además, el cultivo de aceite de oliva se da principalmente en regiones soleadas del centro y norte chico de Chile. En consecuencia, se presenta otro concepto, que explota esta radiación solar para procesar las aguas residuales. Se trata de una destilación solar, que puede ser complementada con un reactor tipo UASB para producir agua reutilizable.

Reactor e lodos anaeróbicos flujo ascendente

La UASB es un proceso de tratamiento anaeróbico que se aplica a las aguas residuales logrando una elevada eliminación de contaminantes orgánicos. El principio de un UASB se muestra en la Figura 15.

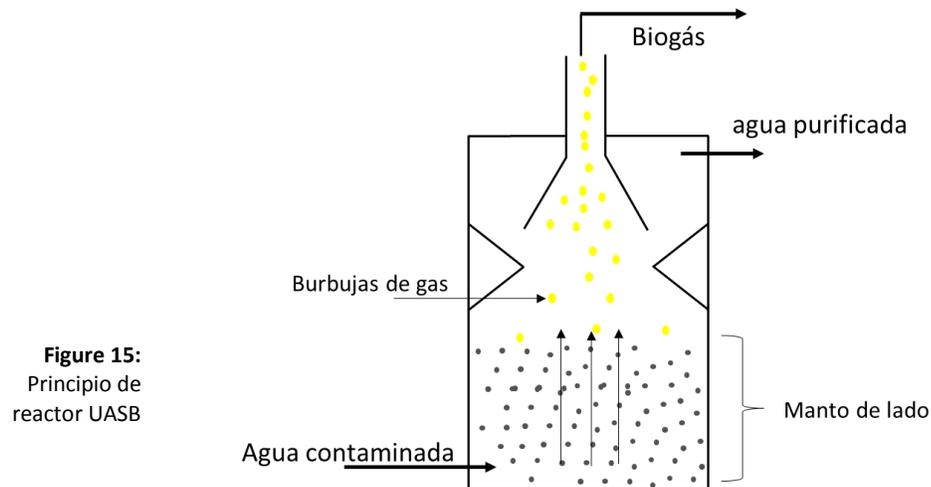


Figure 15:
Principio de reactor UASB

Las aguas residuales entran al reactor desde el fondo y fluyen hacia arriba. Un manto de lodo en suspensión compuesto de gránulos microbianos trata el agua residual a medida que fluye a través de ella. Las bacterias que viven en los lodos descomponen la materia orgánica por digestión anaeróbica y la transforman en biogás. Debido a su peso, los gránulos y sólidos permanecen en el reactor y no son lavados en el flujo ascendente. En la parte superior del reactor se acumulan las burbujas de gas que se forman y salen del reactor.

Debido a su diseño sencillo y al bajo nivel de tecnología en comparación con los procesos aeróbicos convencionales, los reactores UASB son baratos en construcción y mantenimiento. Especialmente los costos de operación son bajos, ya que generalmente consideran solo el funcionamiento de la bomba de alimentación. Las concentraciones óptimas de influentes están por encima de 400 mg DQO/L, por lo que los reactores UASB son adecuados para el tratamiento de aguas residuales de OWW [12].

Descripción del proceso

Después de un pretratamiento formado por mallas (2), el agua residual entra en un depósito de dilución (3). Se requiere dilución previa al tratamiento biológico para reducir la toxicidad de los compuestos fenólicos a los microorganismos. Además, la adición de nutrientes y el ajuste del pH para mantener el pH en alrededor de 7 también fueron necesarios para

proporcionar condiciones óptimas para los microorganismos. La siguiente figura (16) muestra el diagrama de proceso planteado.

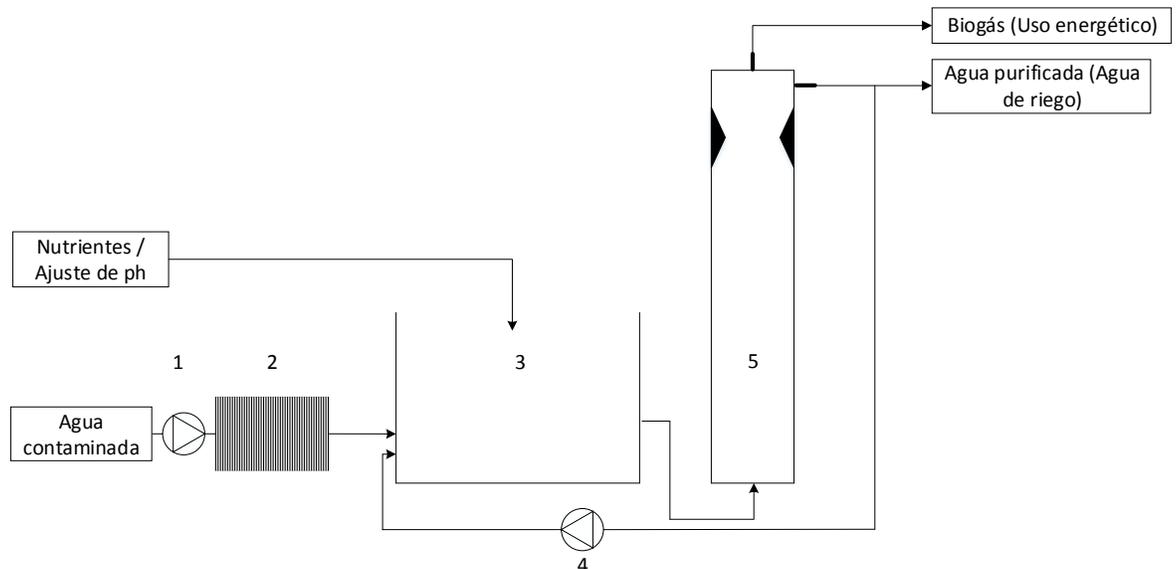


Figura 16: Esquema de proceso del reactor UASB. Nota: 1- Bomba de alimentación; 2- malla; 3- depósito de dilución; 4- bomba de recirculación; 5- reactor

Las aguas residuales diluidas y enriquecidas con nutrientes entran en el reactor UASB en su parte inferior. Con un tiempo de retención hidráulica (TRH) de 2 a 5 días, se puede lograr una reducción de la DQO de hasta el 80%. Con el aumento de la TRH hasta 25 días, es posible una reacción de DQO de hasta el 87,9 %. Por otra parte, es factible la producción de metano hasta $0,35 \text{ m}^3$ por kg de DQO eliminado. En referencia a la Tabla 5 y suponiendo el menor contenido de DQO en las aguas residuales (45.000 mg/L y una reducción de DQO del 80 %, se puede obtener una cantidad de metano de $12,6 \text{ m}^3$ mediante el tratamiento de un metro cúbico si las aguas residuales equivalen a aprox. 12 L de Diesel. El metano producido sale del reactor, puede ser almacenado en un tanque y utilizado para fines energéticos.

Las aguas residuales purificadas dejan el reactor en la parte superior. Una parte de las aguas residuales limpiadas se utiliza para la dilución. De esta manera se puede ahorrar el consumo de agua dulce para la dilución. Además, la TRH de las aguas residuales es más larga, por lo que se puede suponer que la reducción de DQO es aún mayor. De esta manera, las aguas residuales tratadas todavía tienen contenido de DQO. Por lo tanto, no se puede utilizar como agua de lavado o agua de proceso y tampoco se debe desechar en aguas superficiales. Pero es perfectamente adecuado para ser utilizado como agua de riego. El resto del contenido orgánico de las aguas residuales también sirve como fertilizante para que los suelos especialmente áridos puedan beneficiarse de la aplicación [8].

En resumen, este proceso es simple, tiene costos de operación muy bajos. En este caso, también es difícil realizar una estimación de costes. Sin embargo, los costes de funcionamiento se calculan como muy bajos en comparación con otros costes de tratamiento con aprox. 0,20 - 0,31 US\$/m³. Además, una característica económica del proceso es la utilización energética del biogás generado, lo que puede conducir a una reducción de los costos totales de explotación hasta un 30-45 % [13].

Destilación solar

Si el objetivo es tratar las aguas residuales de una manera de obtener un producto, o agua purificada, de calidad para reutilizar en el proceso o para ser utilizada en consumo humano; el agua obtenida de los reactores biológicos UASB, de calidad para regadío, puede ser tratada por medio de un sistema de destilación solar (Fig. 17).

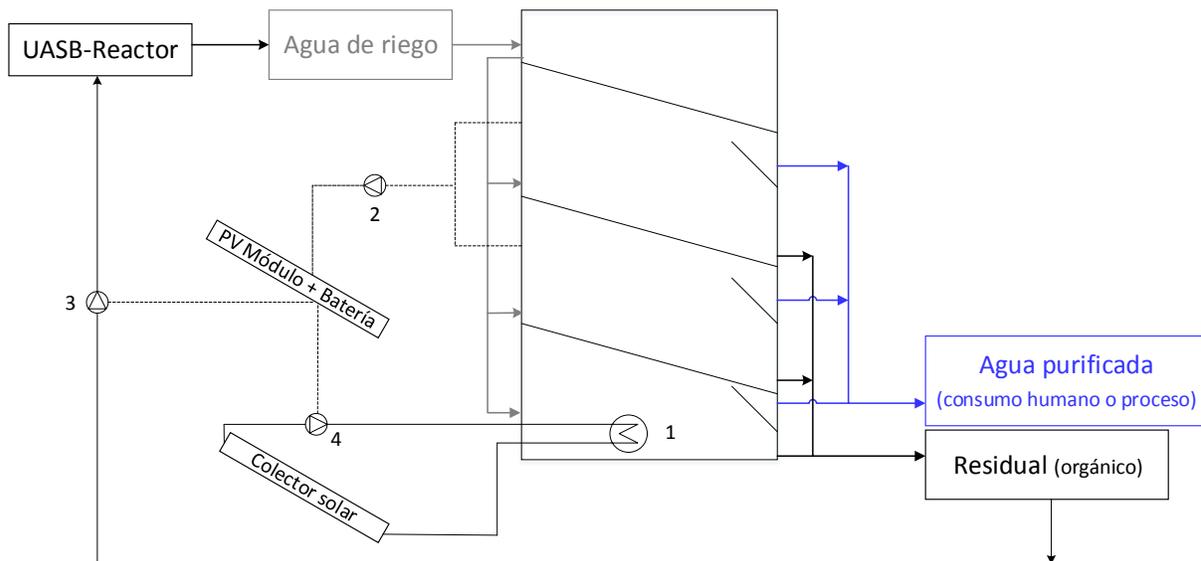


Figura 17: Esquema de proceso de destilación solar. Nota: 1- Intercambiador de calor; 2- bomba de vacío; 3- bomba de recirculación, 4- bomba de circulación colector solar

El agua proveniente del reactor UASB, se ingresa al evaporador por su sección superior y se distribuye a los diversos niveles inferiores. En el nivel más bajo, las aguas contaminadas se calientan con la ayuda de calor solar hasta que se evapora. El vapor de agua se condensa y por lo tanto libera su calor a los niveles superiores. Este calor se utiliza para calentar el agua, que al existir una presión menor, por efecto del vacío creado, se evapora a temperaturas menores que la temperatura de saturación a la presión atmosférica del sitio. El condensado finalmente se deduce como agua purificada.

En las zonas bajas de cada nivel se aglomera el residuo, que consiste en concentrados orgánicos principalmente. Este producto residual se recupera y

se envía nuevamente al reactor UASB, donde los componentes orgánicos se degradan y se cierra el proceso.

4.1.2 Industria vitivinícola

Este capítulo trata de la industria vitivinícola chilena. En un primer momento se presenta una visión general, a continuación se caracterizan las aguas residuales y se desarrolla y presenta un concepto para el tratamiento de estas aguas.

4.1.2.1 Visión general

Chile es el octavo productor mundial de vino y el quinto exportador más grande del mundo, alcanzando una participación de mercado del 8% en volumen del mercado vitivinícola internacional. Lo más importante es la exportación de vinos chilenos. Chile exporta el 70% de vino a 150 países de destino, convirtiendo así su industria vitivinícola en la más globalizada del mundo. La figura 18 muestra el total de las exportaciones de vino de 1992 a 2014.

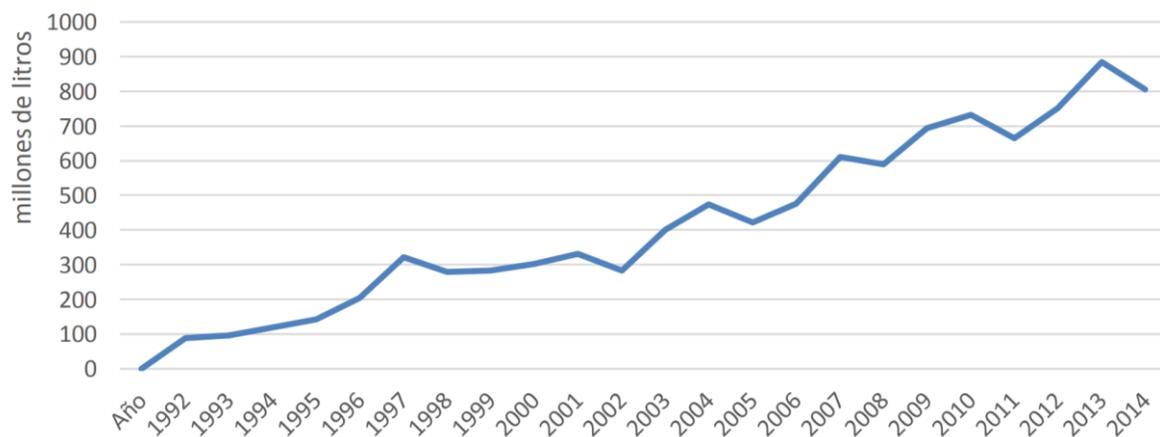


Figura 18: Exportación total de vino en Chile (1992 – 2014) [14].

Como se observa en la Figura 18, la exportación de vino muestra un crecimiento sostenido de alrededor del 11% anual. Las exportaciones de vino representan el 2,6% del total de las exportaciones chilenas y el 14% de las exportaciones del sector forestal, agropecuario y ganadero. El sector cuenta con más de 260 empresas, de las cuales la mayoría, 79% son pequeñas y medianas empresas [15].

En 2014, la superficie total de cultivo para la producción de vino fue de más de 137.000 hectáreas (para comparación: la producción de papa es de 54.082 hectáreas). En 2015, la producción total de vino superó los 1.286.707 miles de litros [16].

La industria vitivinícola opera en varias regiones del país, desde la Región de Coquimbo en el norte hasta la Región de la Araucanía en el sur. Las regiones de Maule y O' Higgins presentan la mayor concentración de superficie plantada de vid, que representa el 53,4 % [15].

4.1.2.2 Agua residual y motivación

La industria vitivinícola es una gran productora de aguas residuales generadas por los diversos procesos y operaciones que se llevan a cabo en la producción de vino, principalmente por las operaciones de lavado y enjuague de tanques de fermentación, barricas y otros artículos. La generación total de las aguas residuales es muy variable y oscila entre 2 y 14 litros por litro de vino producido [17]. Teniendo en cuenta como promedio una producción de 8 litros de agua residual por litro de vino producido, en Chile se generaron 10.293.656 m³ de agua residual en 2015.

En general, las aguas residuales tienen un alto contenido de materia orgánica fácilmente biodegradable, bajo pH, contenido variable de sólidos en suspensión y olores desagradables [18]. Las cargas de contaminación varían enormemente en relación con las tecnologías de vinificación aplicadas. [19]. Debido a su alta carga orgánica y su bajo valor pH, la eliminación de los efluentes de las bodegas en arroyos, ríos y suelos implica riesgos ambientales inaceptables [20]. La alta DQO agota el oxígeno y lleva a la muerte de peces y otros organismos acuáticos. El pH bajo mata también a los organismos acuáticos y afecta al crecimiento de los cultivos [21]. Por otra parte, el tratamiento de las aguas residuales de las bodegas presenta un reto debido a las fuertes fluctuaciones estacionales y diarias de volumen y composición. La vendimia suele durar sólo 3 meses al año, durante los cuales se genera la mayor parte de las aguas residuales (normalmente más del 60-70 %). El resto del tiempo las aguas residuales son significativamente más bajas en fuerza y volumen. Además, las bodegas suelen estar ubicadas en zonas rurales o suburbanas con infraestructuras limitadas, lo que dificulta un tratamiento adecuado de las aguas [22].

En general, las productoras suelen tener muy pocas o ninguna operación de tratamiento de sus aguas. A menudo se desechan en lagunas (Figura 25). Además, la descomposición anaeróbica en las lagunas genera olores desagradables. Otras aplicaciones de las aguas residuales son la disposición en aguas superficiales o el riego en campos de césped [23].

El proceso a desarrollar debe soportar, especialmente las fuertes fluctuaciones diarias y estacionales de volumen y composición. Además, tiene que ser económico y compacto para garantizar un tratamiento descentralizado de las aguas residuales, incluso en lugares remotos.

Como tecnologías adecuadas, sirven a un proceso convencional de lodos activados y a un biorreactor de membrana. Ambos conceptos sirven para diferentes propuestas.

4.1.2.3 Características de aguas residuales

Las aguas residuales de las bodegas proceden de diversas operaciones de lavado, como el lavado de chancadoras y prensas, así como durante la trituración y el prensado de las uvas [23]. Durante el embotellado y el trasiego surgen más aguas residuales [17]. Las aguas residuales de las bodegas en una laguna aireada se pueden ver en la Figura 19.



Figura 19: Laguna de aguas residuales vitivinícola

En la Tabla 5 se enumeran las características típicas de las aguas residuales de la industria vitivinícola que surgen durante los diferentes períodos de trabajo.

Tabla 5: Características de aguas residuales de industria vitivinícola [17]

Periodo de laboratorio	Parámetros				
	pH	DQO [mg/L]	BBO ₅ [mg/L]	TS [mg/L]	Compuestos fenólicos [mg/L]
Vendimia	5-7	5.360–10.170	1.770 - 8.085	2.160–10.270	6–32
1er trasiego	4-8	4.460–7.260-	2.250 - 4.360	2.555–3.210	20–35
2do trasiego	5	1.580–5.930	250 - 900	2.170–4.470	5–29
Embotellado	8	1.805	580	2.200	2

Las aguas residuales de las bodegas contienen grandes cantidades de materia orgánica soluble fácilmente biodegradable. Los azúcares, los alcoholes y otros carbohidratos de cadena corta constituyen una gran parte de la demanda química de oxígeno. La relación DBO₅/DQO es de aproximadamente 0,4 - 0,9 e

indica la biodegradabilidad generalmente fácil. Sustancias duramente degradables como los taninos y ligninas se encuentran en pequeñas concentraciones en las aguas residuales como resultado de su extracción de la piel, carne y semillas de uvas. Los ácidos orgánicos juegan un papel destacado en la acidez de las aguas residuales [21]. También existen pesticidas presentes en las aguas residuales, que se liberan durante el proceso de limpieza de las uvas. Los pesticidas y los fenoles pueden dañar los microorganismos y pueden interferir con un tratamiento biológico. Las concentraciones de compuestos de nitrógeno y fósforo en las aguas residuales de las bodegas suelen ser bajas [18].

4.1.3 Desarrollo de concepto

Las aguas residuales de la industria vitivinícola contienen fenoles y pesticidas que pueden dañar la microbiología de un tratamiento biológico. Además, la carga orgánica es alta y fluctuante, lo que también puede provocar daños en la microbiología. Por lo tanto, se debe seleccionar un pretratamiento especial que elimine los compuestos peligrosos. Como un proceso adecuado e innovador que utiliza directamente la radiación solar, se selecciona la fotocatalisis solar. A continuación se realiza una breve descripción de esta tecnología para luego hacer una presentación del concepto.

Fotocatalisis Solar

La fotocatalisis solar es un proceso tipo AOP (Advanced Oxidation Process). Por este proceso se generan radicales OH, que son extremadamente reactivos y oxidan todos los compuestos orgánicos existentes y a veces incluso inorgánicos.

En el caso de la fotocatalisis, el OH⁻ radical es generado por la iluminación de semiconductores con radiación solar natural en el agua. Como semiconductor, el dióxido de titanio (TiO₂) se añade en forma de polvo a las aguas residuales [24]. El dióxido de titanio no es tóxico y se utiliza principalmente como pigmento en color. La reacción química del proceso se presenta en la Figura 20.

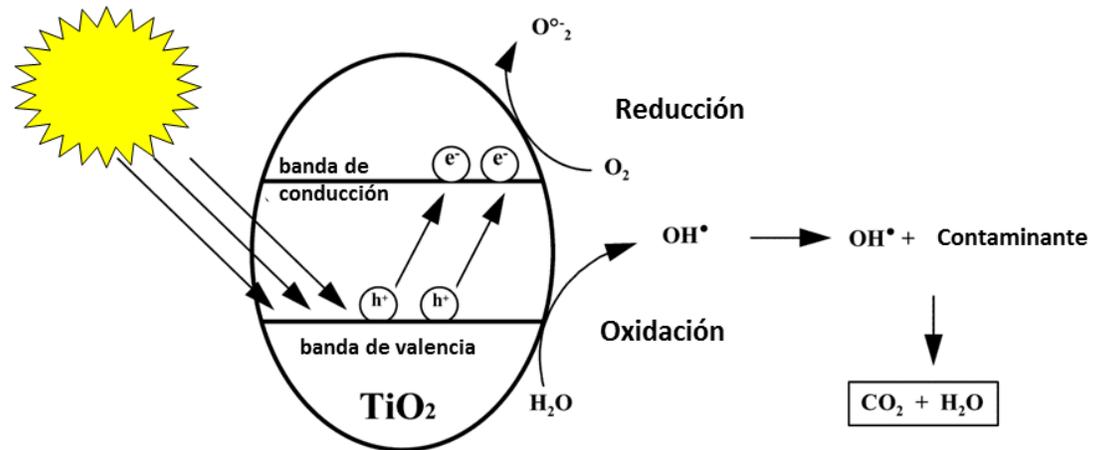


Figura 20: Proceso de fotocatalisis

El proceso se da en fotoreactores solares (Fig. 21).

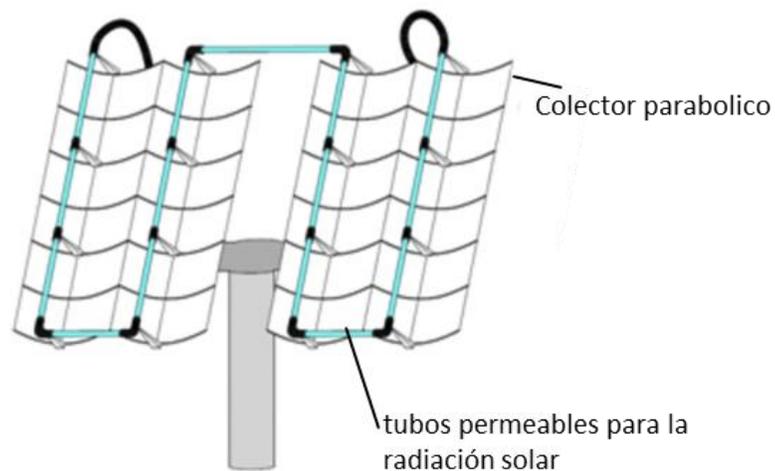


Figure 21: Fotoreactor Solar [25].

Los reactores consisten en superficies reflectantes y parabólicas que concentran la radiación solar en un tubo transparente a lo largo de la línea focal parabólica a través del cual fluye el fluido reactante (aguas residuales con TiO_2 suspendido). El sistema debe considerar un flujo turbulento con una homogeneización eficiente, y debe ser un sistema cerrado, previniendo la vaporización.

Mediante la aplicación de fotocatalisis solar, se pueden eliminar de las aguas residuales compuestos muy tóxicos como clorofenoles, microorganismos patógenos y pesticidas [25].

Se ha comprobado, en experiencias piloto, que este proceso puede reducir en un 50 % la demanda química de oxígeno (DQO) inicial. Un tratamiento biológico aguas abajo eliminó un 45% adicional, de modo que la DQO inicial se

redujo en un 95%. De esta manera, las aguas residuales son tratadas y pueden ser reutilizadas [26]. En resumen, un fotoreactor en combinación con un tratamiento aeróbico es aplicable para las aguas residuales de la industria vitivinícola.

Descripción del proceso

La figura 22 muestra un esquema del proceso propuesto considerando fotocatalisis y tratamiento aeróbico.

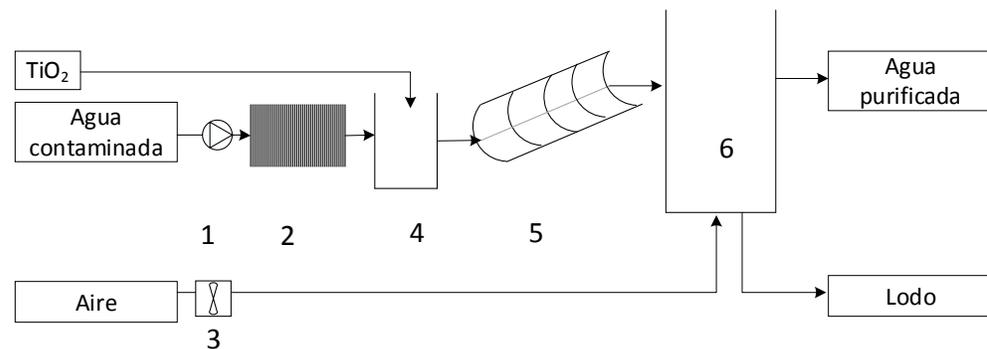


Figura 22: Diagrama de proceso de fotocatalisis con tratamiento aeróbico. Nota: 1-bomba de alimentación; 2- malla; 3- soplador; 4-estanque homogenizador; 5- fotoreactor, 6 – proceso aeróbico de lodos activados.

Después de un pretratamiento consistente en mallas para remover material de mayor tamaño, las aguas residuales se recogen en un estanque homogenizador donde se añade TiO_2 (dióxido de titanio). Posteriormente, las aguas residuales fluyen a través de un fotoreactor solar, donde se da la reacción química, y donde los compuestos orgánicos y nocivos se degradan. Después el agua pre tratada entra en un proceso convencional de fangos activados, donde el DQO restante se degrada.

4.2 Industria del papel

Este capítulo trata de la industria chilena del papel. Primeramente se presenta un panorama general, luego se caracteriza el agua residual y se presenta un concepto adecuado para el tratamiento del agua.

4.2.1 Visión general

La producción total de papel en Chile mostró una tendencia positiva en 2015, a pesar de la creciente digitalización. Esto se debe principalmente a la creciente producción de papel de embalaje, que representa el mayor segmento de la producción chilena de papel, contando aprox. 75% de la producción total. La Figura 23 muestra los principales segmentos de producción de la industria chilena del papel en 2015.

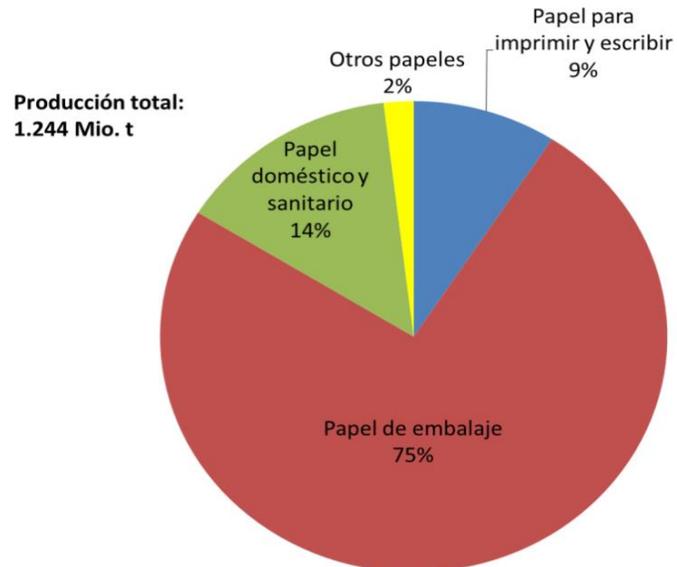


Figura 203: Segmentos de producción de la industria papelera [27]

El segundo mayor grupo de productos con una participación del 14% es el papel doméstico y sanitario, seguido por el papel de imprenta y de escritura con un 9%. La producción total de papel en 2015 fue de 1,244 Mt. En Chile existen 11 grandes fábricas de papel cuyo volumen de producción anual está entre 50.000 y 500.000 toneladas [28].

4.2.2 Agua residual y motivación

La industria del papel es un gran consumidor de agua dulce y una importante fuente de aguas residuales, generada durante las diversas etapas de las

actividades de fabricación de papel. El agua residual producida tiene impactos perjudiciales para el medio ambiente y representa una seria amenaza para la vida silvestre y humana. En todo el mundo, la industria del papel produce la tercera mayor cantidad de aguas residuales después de las industrias metalúrgica y química [29]. Incluso con las técnicas operativas más modernas y eficientes, la industria del papel produce hasta 250 m³ de aguas residuales por tonelada de producto de papel secado [30].

Teniendo en cuenta la cantidad anual de papel producido en Chile, se produce un volumen anual de aguas residuales de hasta 125.000.000 m³. El agua residual producida contiene una variedad de compuestos principalmente orgánicos, pero también inorgánicos. Más comúnmente, las aguas residuales se tratan en una serie de plantas de tratamiento de aguas residuales y luego se liberan al medio ambiente. Por lo tanto, su calidad tiene que cumplir con las normas ambientales. De lo contrario, no se permite la descarga de las aguas residuales, se deben pagar multas elevadas o se debe interrumpir la producción. El reciclaje de aguas es menos común en la industria del papel. Este procedimiento minimizará las descargas externas al medio ambiente reduciendo considerablemente la producción de aguas residuales y ahorrando grandes cantidades de agua dulce. Un problema en este contexto son los compuestos orgánicos presentes en las aguas residuales, que son difíciles de biodegradar. Incluso después de un tratamiento de aguas residuales, estos compuestos permanecen en el agua tratada, sin poder cumplirse los valores de umbral prescritos.

Por otro lado, es imposible reciclar las aguas residuales. En este contexto, este trabajo se refiere al desarrollo de un proceso mediante el cual las aguas residuales de la industria papelera pueden ser tratadas de tal manera que puedan ser recicladas posteriormente. El proceso a desarrollar debe tolerar las condiciones típicas de las aguas residuales de la industria papelera y tiene que purificarlo ecológica y económicamente. Como una tecnología adecuada se plantea un biorreactor de membrana, que combina un tratamiento biológico con una filtración.

4.2.3 Características de aguas residuales

Durante el proceso de producción del papel, se generan diferentes flujos de aguas residuales con diferentes características. La Tabla 6 muestra las características de aguas residuales más importantes creadas durante la producción de papel. Además se muestra la relación calculada de DBO₅ a DQO, que indica la biodegradabilidad de las corrientes de aguas residuales.

Tabla 6: Características de aguas residuales generadas en varios procesos de celulosa y papel [31]

Proceso	Parámetros					
	pH	TS [mg/L]	SS [mg/L]	DBO ₅ [mg/L]	DQO [mg/L]	Razón DBO ₅ /DQO
Molino blanqueador Kraft	10.1	-	37-74	128-184	1124-1738	0,11
Molino de sulfito	2.5	-	-	2000-4000	4000-8000	0,5
Pulpa	10	1810	256	360	-	-
Blanqueamiento	2.5	2285	216	140	-	-
Celulosa blanqueada	7.5	-	1133	1566	2572	0,61
Preparación de madera	-	1160	600	250	-	-
Fabricación de papel	7.8	1844	760	561	953	0,59
Molino de papel	-	3750	250	-	3500	-
Lavado de chips	-	-	6095	12000	20000	0,6
Digestor	11.6	51583	23319	13088	38588	0,34

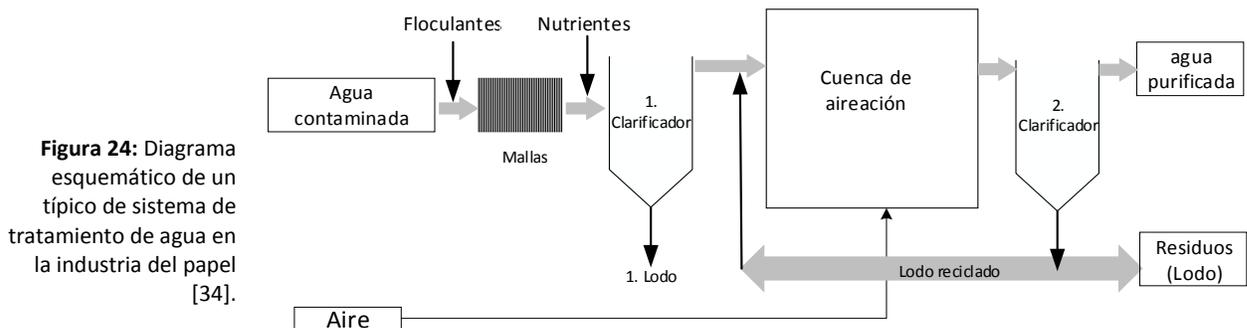
Como se ve en la Tabla 6, el valor de pH de los diferentes flujos de aguas residuales varía de 2,5 a 11,6. También el TS y el SS muestran grandes fluctuaciones y pueden ser caracterizados como altos.

En relación con la proporción de DBO₅/DQO, puede observarse que casi todos los flujos de aguas residuales pueden caracterizarse como compuestos poco biodegradables (valores inferiores a 0,6) o incluso no biodegradables (valores inferiores a 0,2). Los compuestos apenas biodegradables en las aguas residuales se componen a aprox. 50% de lignina y sus derivados. Una forma más compartida de celulosas, así como resina y ácidos de resina [32, 33].

4.2.4 Estado del arte

Este capítulo describe y explica los procesos utilizados para el tratamiento de aguas residuales en la industria papelera, que corresponde también a lo utilizado en Chile. Así, por ejemplo, se puede mencionar la fábrica de papel en Valdivia.

A continuación se presentan y explican los procesos típicos de tratamiento de aguas residuales aplicadas en la industria del papel (Figura 24).



Como una primera etapa de pretratamiento, el flujo pasa por mallas para eliminar grandes partículas flotantes o suspendidas. Como segunda etapa de pretratamiento, la sedimentación es el procedimiento más común aplicado al material fibroso separado de las aguas residuales. Dependiendo de la calidad del agua, la coagulación y la floculación es una tecnología bien establecida. Los productos químicos comúnmente utilizados son sulfato de aluminio, cloruro de polialuminio, cloruro férrico y sulfato férrico. También se aplica ampliamente como pretratamiento una flotación.

Después del pretratamiento, un tratamiento biológico es siempre la segunda etapa de tratamiento. El más popular en la industria del papel es el proceso de lodos activados. También ampliamente utilizado en la industria del papel se encuentran los reactores de biopelícula en lecho móvil (MBBF) con portadores que flotan en el reactor e inmovilizan el microorganismo en su superficie.

Como postratamiento, generalmente se aplica un clarificador secundario para separar y reciclar los lodos activados. Si se deben manejar flujos de aguas residuales específicos o mejorar la calidad de las aguas residuales, se aplican procesos físico-químicos como la filtración por membranas (UF, NF y RO) en la industria papelera. Además, se aplica la oxidación química con ozono, peróxido de hidrógeno u otros agentes oxidantes químicos [34]. A continuación, el agua purificada es conducida a un recipiente cercano.

4.2.5 Desarrollo de concepto

Debido a las grandes cantidades de aguas contaminadas y al alto porcentaje de carga orgánica, se debe utilizar un tratamiento biológico aerobico, ya que éste es el más económico. La producción de papel en Chile se encuentra principalmente en el sur, donde las condiciones climáticas no permiten el uso directo del sol para el tratamiento de aguas contaminadas. En consecuencia, para este propósito, se utiliza un biorreactor de membrana en combinación con un lecho fijo de piedras de lava. Esto puede ser instalado de forma compacta y descentralizada y alimentado por la energía fotovoltaica, requerida principalmente para bombeo, inyección de aire y control.

Biorreactor de membrana (MBR)

La tecnología MBR es una combinación de un sistema de tratamiento biológico convencional (lodos activados) y una separación físico-líquido-sólido, mediante micro o ultrafiltración, en un solo sistema. MBR puede ser utilizado para el tratamiento de aguas residuales municipales e industriales y es una de las innovaciones más importantes en el tratamiento de aguas residuales en la actualidad. En el tratamiento de aguas residuales municipales, el MBR se ha convertido en la tecnología preferida frente al proceso de lodos activados [35]. Se estima que la tasa de crecimiento anual de los RBM en el mercado mundial es de 15% [36].

En un sistema MBR, las membranas se sumergen en un reactor biológico aireado. La membrana es impermeable a bacterias, sólidos y compuestos orgánicos disueltos. Estos compuestos permanecen en el reactor para una mayor biodegradación. La Fig. 25 muestra el principio de un biorreactor de membrana (izquierda) y las membranas sumergidas en el reactor aireado.

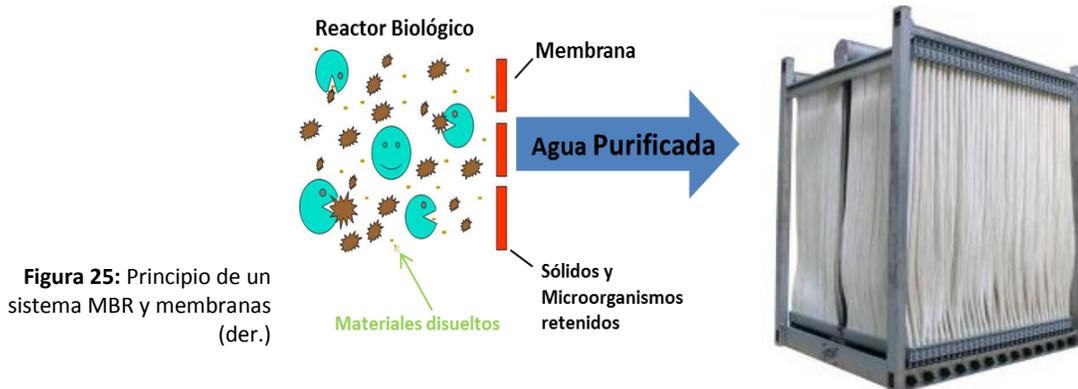


Figura 25: Principio de un sistema MBR y membranas (der.)

Los MBR tienen muchas ventajas sobre los tratamientos convencionales de lodos activados, incluyendo requisitos de reactores y pequeñas dimensiones, buena capacidad de desinfección, mayor carga volumétrica y menor producción de lodos [37]. La aireación tiene un doble propósito de

proporcionar oxígeno a las bacterias y reducir el ensuciamiento de la membrana. Esto garantiza un funcionamiento continuo y rentable [38].

El diseño compacto de los MBR hace que esta tecnología sea de gran interés para el tratamiento descentralizado de aguas residuales y la reutilización de aguas residuales domésticas o grises (hoteles, condominios y complejos de apartamentos u oficinas). Si se implementa de forma descentralizada, también es posible un suministro eléctrico con energías renovables.

Debido al hecho de que los compuestos orgánicos en las aguas residuales de la industria papelera son difícilmente biodegradables, un sistema de lecho fijo debe soportar la biodegradación. Los procesos de biopelícula generalmente tienen un rendimiento de degradación más alto que los procesos convencionales en los que el microorganismo está suspendido (lodos activados). Por otra parte, muchos estudios han señalado que los principales agentes para el ensuciamiento de membranas son polímeros orgánicos solubles, tales como productos microbianos solubles y polímeros extracelulares. La biomasa adherida, como la biopelícula, adsorbe estos polímeros orgánicos solubles [39]. De este modo, el índice de suciedad en un biorreactor de membrana puede reducirse hasta un 43 % [37].

El microorganismo debe ser inmovilizado en materiales portadores porosos, ya que éstos ofrecen ventajas sobre la inmovilización superficial. Los poros proporcionan una superficie más grande en la que la biopelícula puede formarse y protegerse de las fuerzas de corte externas. Debido a la adsorción de los compuestos de las aguas residuales, se garantiza un tiempo de contacto más largo e inalterado de los microorganismos y los compuestos de las aguas residuales. Como un material portador poroso adecuado en Chile podría servir la piedra de lava natural (Fig. 26).



Figura 26: Piedra de lava porosa

Las piedras de lava están disponibles a nivel regional y en grandes cantidades y son mucho más baratas que los soportes sintéticos o las piedras pómez producidas industrialmente. En Chile, no hay necesidad de excavar para extraer las piedras de lava porque están disponibles en la superficie de las laderas volcánicas, por lo que la extracción y el vertido no tienen impactos ambientales negativos. Permiten una adsorción de los compuestos difícilmente

biodegradables en las aguas residuales. Las piedras de lava ya se utilizan en los biofiltros como material portador. Esto indica que es factible la inmovilización de microorganismos. La Universidad Católica del Norte de Chile investigó un reactor de lecho fijo de piedra de lava para la depuración de aguas residuales municipales a escala de laboratorio (Fig. 27). Después del tratamiento, el agua es apta para su uso en actividades agrícolas.



Figura 27: Biofiltro de piedra de lava en escala laboratorio [40]

En resumen, las piedras de lava son un material sostenible, ecológico y económico.

Descripción de proceso

La Figura 28 muestra el diagrama de flujo del proceso a desarrollar.

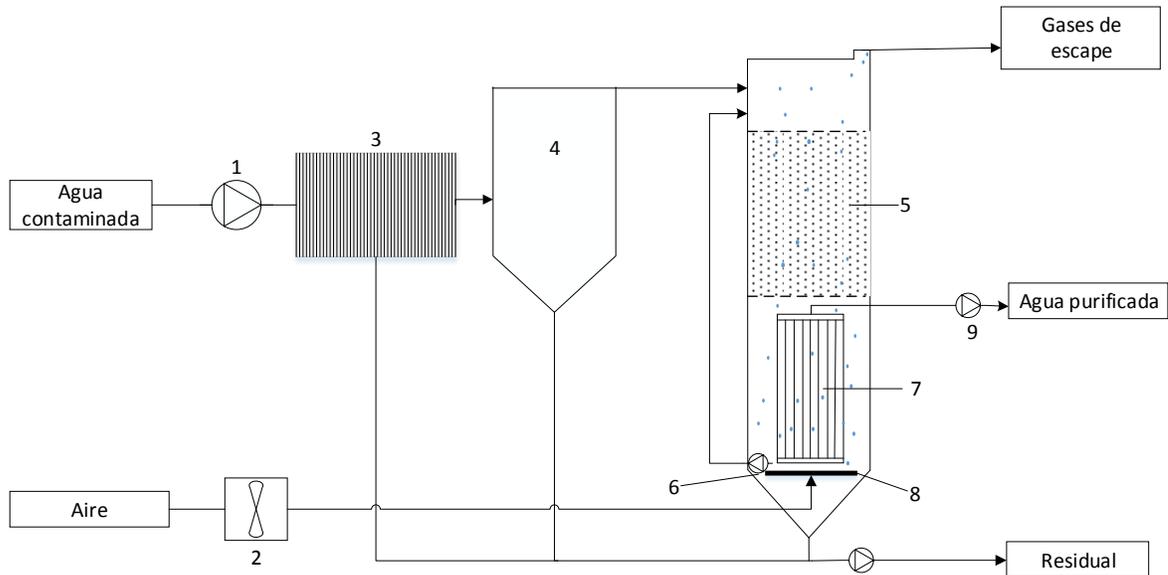


Figura 28: Diagrama de proceso membrana-biorreactor, 1- bomba; 2- soplador; 3- malla; 4- clarificador; 5- piedra de lava (cama fija); 6- bomba de recirculación; 7- modulo ultra-filtración; 8- difusor de aire, 9- bomba volumétrica

Después de un pretratamiento consistente en pantallas y un clarificador (3 y 4), el agua residual entra en el reactor. Primero fluye a través del lecho de piedra de lava. Los poros de las piedras de lava están recubiertos por una biopelícula. Los compuestos de aguas residuales son absorbidos por los poros de las piedras de lava y la biopelícula y luego son degradados por los microorganismos aeróbicamente a CO_2 , agua y biomasa de microorganismos. El agua purificada sale del lecho fijo de piedra de lava y entra en las membranas de ultrafiltración, donde se purifica. Los microorganismos suspendidos o los componentes de aguas residuales no degradados hasta ahora no son capaces de pasar la membrana, permanecen en el reactor y son bombeados en la parte superior del reactor para una mayor biodegradación. En la parte inferior del reactor se encuentra el sistema de aireación. Las burbujas de aire actúan en el lecho fijo y crean cizalladura en la superficie de la membrana, de modo que se eliminan las capas de suciedad adheridas [38]. El agua altamente purificada sale del reactor y está disponible para su reutilización. Otros productos son el aire de escape (principalmente CO_2) y los residuos, que deben ser eliminados.

Una estimación general de los costes de un MBR es difícil de llevar a cabo, ya que los costes de funcionamiento dependen de muchas circunstancias externas. Para hacer una evaluación aproximada, se pueden utilizar los valores de la EPA (Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos). Sugieren que los costos de operación de los sistemas MBR son de US\$ 0,47 /m³

incluyendo todos los cargos de electricidad, reemplazo de membranas, honorarios químicos, pero sin incluir la amortización de la inversión inicial [41].

4.3 Industria Minera

En este capítulo se abordarán algunas soluciones que pueden ser aplicadas en la industria minera, tanto para tratar relaves (minería del cobre), como para concentrar fluidos de proceso (minería del litio). En ambos casos, se planteará el uso de Membrana de Destilación (MD), con calor solar.

4.3.1 Perspectiva general

La industria minera en Chile corresponde a la de mayor desarrollo y es la que aporta la mayor parte de la riqueza del país. Entre los años 2011 y 2015 el sector minero representó alrededor del 60% de las exportaciones totales del país, experimentando una baja desde el año 2013 al año 2015, principalmente impulsado por la baja del precio internacional del cobre, principal producción minera de Chile [42]. Las exportaciones mineras de minerales metálicos de Chile están principalmente compuestas por cobre, hierro, plata, molibdeno, oro y zinc. Sin duda que la industria del cobre en Chile es la de mayor importancia. Chile produce el 30% del cobre mundial, y tiene el 29% de las reservas mundiales de este mineral.

En cuanto al mercado de los minerales no metálicos se destaca principalmente el litio. Chile posee una de las mayores reservas de litio del mundo, con aproximadamente 7,5 millones de toneladas, representando un 53% de las reservas totales (Fig. 29) [43].

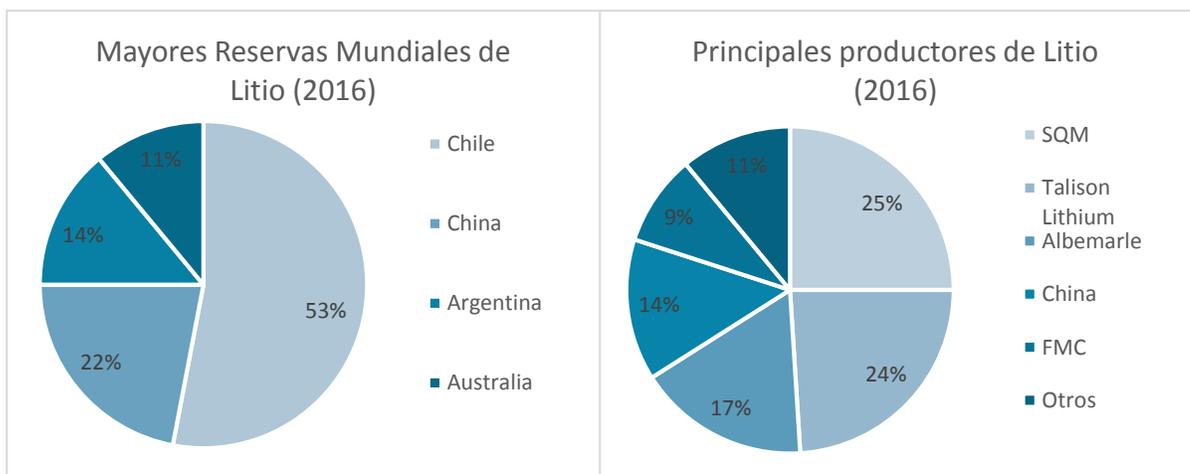


Figura 29: Reservas mundiales de litio y principales productores (2016).

El mercado del Litio representa un gran potencial debido al creciente uso de este mineral en el desarrollo de baterías para equipos electrónicos y vehículos.

La producción anual de Litio en Chile es de 11.700 t, con un costo de producción de entre 2.000 a 3.000 USD/t (LiCO₃, carbonato de Litio). Se proyecta que la demanda anual de litio crezca hacia el año 2035 en 611.000 t/año (actualmente es de 188.000 t/año).

En cuanto a la utilización del recurso hídrico, la actividad minera en Chile demanda el 3% del agua para su operación, y corresponde a la industria que menos consume este recurso (Tabla 7). Sin embargo la gran concentración de actividad minera se da en la zona norte del país, donde el recurso hídrico es muy escaso. Es por esto que la industria minera se encuentra desarrollando proyectos de desalinización de agua de mar para ser utilizadas en sus procesos y además proyectos de mejora de la eficiencia en el uso del recurso hídrico, como recuperación y reutilización de agua para sus operaciones.

Tabla 7: Demanda de agua por zona en Chile (m³/h) [44].

Zona	Agropecuario	Agua Potable	Industrial	Minero	Total
Norte	51,45	6,09	3,74	10,41	71,69
Centro	389,25	38,17	20,23	4,04	451,69
Sur	84,26	9,91	13,89	2,71	110,77
Austral	1,76	0,67	5,99	2,83	11,25
Total Nacional	526,72	54,84	43,85	19,99	645,4

4.3.2 Motivación

La industria del cobre en el año 2015, tuvo un consumo de 15,4 m³/s. De los cuales 13,1 m³/s, corresponden a aguas continentales y 2,3 m³/s son aguas de mar. La recirculación de agua ascendió a 40,4 m³/s [45], representando aproximadamente un 72,5 % de recirculación, calculado como la relación entre el total de agua recirculada que ingresa y la cantidad total de agua que entran a la operación sin discriminar por su origen.

La mayor cantidad del agua consumida en la industria del cobre en Chile es consumida por las plantas concentradoras con 9,2 m³/s, seguido por la hidrometalurgia con 2 m³/s. Específicamente en las plantas concentradoras la recirculación de agua llegó a un 73,2 % durante el año 2015. La recirculación en las plantas concentradoras cobra vital importancia pues disminuye el uso de aguas continentales y disminuye la descarga de aguas contaminadas. A pesar de esto se deben intensificar los esfuerzos del uso eficiente del recurso hídrico.

Por otra parte, el proceso de producción de litio, en forma de carbonato de litio e hidróxido de litio, se desarrolla extrayendo salmueras continentales que poseen aproximadamente un 0,6 % de Litio, ubicadas en salares de la zona norte del país. La salmuera es transportada a piscinas de evaporación hasta que la salmuera logra una concentración del mineral de 6 % [46], donde

finalmente es transportada a la planta de procesamiento, aquí se obtienen productos como carbonato de Litio e hidróxido de Litio.

Este proceso requiere de grandes áreas para la instalación de las piscinas, y además de importantes cantidades de agua. El uso de salmuera es de 1700 l/s, y el de agua es de 286 l/s [47]. Se estima que la evaporación anual en el salar de Atacama, con una superficie de 3.000 m² aproximadamente evapora 3.200 mm por año [48]. Si bien este sistema de evaporación por piscinas es favorable en el norte de Chile y además de bajo costo; es claramente un proceso poco sustentable desde el punto de vista hídrico.

En ambas actividades se pueden aplicar conceptos de tratamiento de aguas para tratar aguas residuales e incluso mejorar los procesos de concentración de producto y recuperar minerales valiosos. En los próximos párrafos se realizará una caracterización de las aguas residuales de la actividad minera específicamente en la minería del cobre, y de las salmueras utilizadas para la extracción de litio de manera de describir una aplicación asociada a la concentración de salmuera para optimizar el proceso.

4.3.3 Características de aguas residuales

Minería Metálica (Cobre)

Como se mencionó, en la minería del cobre las plantas concentradoras de cobre son las que más utilizan agua para su operación, pero a su vez son las que han logrado reutilizar el recurso hídrico de mejor forma, llegando a un 73,2 % de reutilización en el año 2015, destacándose la región de Antofagasta. Sin embargo se ha observado una tendencia desde el año 2012 al año 2015, de un aumento en el consumo de aguas continentales especialmente en las regiones de Arica y Parinacota, Antofagasta y Coquimbo; aumento que se debe a un incremento en el procesamiento de mineral.

La utilización de agua en estas faenas se concentra en el procesamiento de minerales y también en otros servicios como supresión de polvo, transporte de concentrado, consumo de operarios etc.

En las plantas concentradoras de cobre, las principales pérdidas de agua se dan por filtraciones, evaporaciones de estanques en flotación y espesamiento, perdidas en transporte de concentrados y tranques de relaves. Este último corresponde a uno de los puntos de mayor pérdida de agua en el proceso del cobre, por lo cual además constituye un gran potencial de mejora en la gestión del recurso hídrico. A Diciembre de 2016, se tiene un registro de 696 depósitos de relave en Chile, generados por la industria del cobre, oro, hierro y zinc (en menor medida). De éstos, 112 relaves se encuentran activos [49].

La composición típica de los relaves de caracteriza por elementos y especies, entre los que se cuentan:

- Elementos mayores en forma de óxidos: Silicio, Aluminio, Titanio, hierro, calcio, magnesio, manganeso, sodio, potasio, fósforo y azufre.
- Elementos comunes en trazas: cobre, vanadio, cromo, cobalto, níquel, rubidio, zirconio, arsénico, plata, torio, molibdeno, uranio, oro, tungsteno, entre otros.
- Tierras raras elementales: lantano, cerio, neodimio, europio, gadolinio, samario, entre otros.

En las muestras de relaves que se han estudiado, la suma de los elementos formadores de roca suma 99,07 % de la masa total de relaves “depositados”. Estos elementos mayores son inocuos desde el punto de vista ambiental. El resto de elementos 0,9 3% podría generar problemas ambientales en ciertas concentraciones.

En Chile según la composición de los relaves, los principales elementos asociados a contaminación ambiental son cobre, cromo, níquel, zinc, plomo, arsénico, cadmio y mercurio.

En la actualidad los relaves se acumulan en depósitos llamados tranques de relave, donde la recuperación de agua para proceso, se da por simple precipitación de los metales pesados y recuperando el agua que queda en la superficie del tranque. Los avances en esta área se han enfocado en disminuir la evaporación del agua reutilizable. Sin embargo la presencia de metales valiosos y tierras raras como oro, plata, tungsteno, etc.; si son extraídos de forma purificada pueden aportar valor económico. Considerando lo anterior se hace interesante la opción de tratar los relaves antes de que se produzca la precipitación de minerales en el tranque de relave. Con esto se pueden ver beneficiados los planes de cierre de faena al comercializar dichos productos recuperados, y asegurando además, si se reduce la acidez del depósito, la inocuidad del depósito disminuyendo los costos de cierre y simplificando el plan de cierre.

Minería No Metálica (Litio)

La minería no metálica del litio en Chile, utiliza salmueras ubicadas bajo salares para procesarlas por medio de evaporación solar, de esta forma aumentar la concentración de litio, para luego ser procesada en planta química para obtener carbonato de litio e hidróxido de litio. La composición inicial de salmueras contiene litio (representando aprox. 0,2%), potasio, magnesio, entre otros. El salar de Atacama donde se encuentran las explotaciones mayores de litio, cuenta con aprox. 1500 ppm de litio. En el salar de Maricunga por ejemplo

la concentración de litio bordea 1050 ppm, y en La Isla está por sobre 1000 ppm.

El proceso de concentración por evaporación en piscinas puede durar entre 12 y 24 meses, con lo cual se obtiene una salmuera de concentración por sobre 4 % de litio. Se estima que la evaporación anual en el salar de Atacama por operación de extracción de litio, con una superficie de 3.000 km² es de aproximadamente 3.200 mm por año [48].

Si bien este sistema de evaporación por piscinas es favorable en el norte de Chile debido a la alta radiación, y además de bajo costo; es claramente un proceso poco sustentable desde el punto de vista hídrico. Actualmente las principales faenas de litio ubicadas en el salar de Atacama, extraen aproximadamente 1800 l/s de salmuera y 300 l/s de agua [47].

La recarga del salar obedece a modelos hidrogeológicos donde el núcleo del salar o salmuera es alimentado por un acuífero que, en el caso de los salares del norte de Chile, proviene de las precipitaciones que se producen especialmente en el altiplano.

Considerando lo anterior, es que es importante optimizar el uso del recurso hídrico, tratando de disminuir la evaporación de agua en el proceso de obtención de litio; agua que puede ser utilizada en el misma planta de proceso; disminuyendo el estrés hídrico de los acuíferos en cuestión.

4.3.4 Propuestas de concepto

En ambos ámbitos de estudio, minería metálica y no metálica, para tratar los relaves y salmueras respectivamente, se planteará la tecnología de Membrana de Destilación (MD), que corresponde a una tecnología térmicamente impulsada y utiliza una membrana hidrofóbica para su operación. Las moléculas de vapor de agua presentes en la solución salina pasan a través de la membrana hidrofóbica y porosa, condensándose en el lado del flujo frío. Esta tecnología presenta algunas ventajas comparativas respecto de los demás sistemas de desalación. Para su operación requiere de menor temperatura (60 – 80°C), sin necesidad de llevar el agua a tratar temperatura de ebullición, en comparación con otros sistemas de destilación; y requiere además de una menor presión hidrostática para operar en comparación con el sistema de Osmosis Inversa, que basa su operación en elevar la presión del fluido, con lo cual es más demandante desde el punto de vista energético.

La tecnología MD es capaz de operar obteniendo calor de fuentes energéticas renovables como lo es la energía solar y geotérmica; y operar en conjunto con otras tecnologías de tratamiento (sistemas híbridos) como Microfiltración (MF), Ultrafiltración (UF) y Osmosis Inversa (OI). Los sistemas MD son factibles de ser usados para tratar agua de mar y aguas salobres superficiales y

subterráneas; además puede ser utilizada para remover material orgánico y metales pesados de soluciones acuosas de rechazo de procesos productivos.

Esta tecnología ha sido aplicada por medio de plantas piloto en diferentes procesos, entre los que se cuentan desalación de agua, tratamiento de aguas residuales de procesos industriales, tratamiento de aguas con minerales pesados, etc. Actualmente existen desarrollos comerciales de tecnología MD pero de capacidades menores (hasta 2 m³/día) [50].

Los pilotos y estudios desarrollados a la fecha indican una gran variabilidad de costos de agua producida, que pueden ir desde 0,3 a 130 \$/m³ (WPC: Water produced cost) [51]. Esta variabilidad se da por la poca información comercial que existe referente al costo de membranas y de los módulos de ésta. Una ventaja de estos sistemas es que gran parte de la energía requerida para realizar el proceso corresponde a energía térmica (90 %), con lo cual se puede estimar el costo de operación de estos sistemas determinando el costo térmico del proceso. En general, se estima que el consumo térmico de los sistemas MD bordea 44 kWh/m³, y el consumo eléctrico cerca de 2 kWh/m³.

En la minería del cobre, y específicamente para el tratamiento de los relaves generados principalmente por las plantas concentradoras, el concepto propuesto se enfoca en el objetivo de recuperar minerales valiosos y además obtener agua purificada en el proceso (Fig 30).

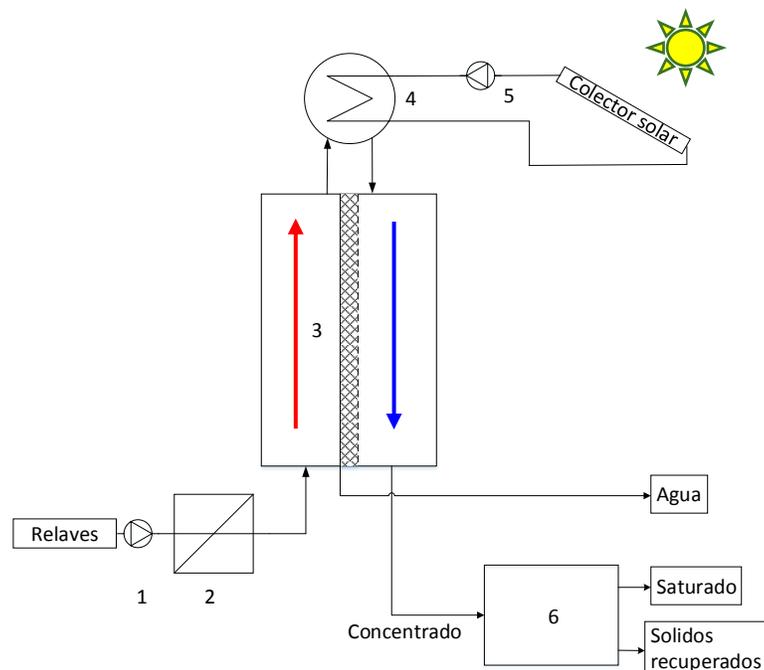


Figura 30: Diagrama esquemático de propuesta de sistema de tratamiento de relaves de minería de cobre, donde: 1-Bomba de impulsión, 2- Malla o pretratamiento, 3- Membrana de destilación, 4- intercambiador de calor; 5- Colector solar y bomba de circulación, 6- cristalizador.

El sistema propuesto considera bombear los relaves a través de un sistema de pretratamiento, el cual puede ser microfiltración o ultrafiltración, dependiendo de las características específicas del relave. Posteriormente el fluido pasa por un proceso MD donde se encuentra a contraflujo, el mismo fluido pero a mayor temperatura, provocando de esta manera que las moléculas de vapor pasen desde el lado caliente hacia el lado frío, siendo colectadas en conductos ubicados entre los dos flujos.

El fluido se calienta por medio de un intercambiador de calor, donde ingresa con un fluido térmico a mayor temperatura, el cual puede provenir de un campo solar, o de algún circuito de recuperación de calor residual.

En el caso del proceso de extracción de litio desde salmueras, lo que se propone es optimizar el uso del recurso hídrico y de la salmuera. Como se mencionó, actualmente este proceso se basa en un aumento de la concentración de litio en la salmuera basándose en evaporación solar. Lo que se plantea es utilizar el mismo concepto de uso de la energía solar para aumentar la concentración de la salmuera pero sin perder agua por esta evaporación en piscinas (Fig 31).

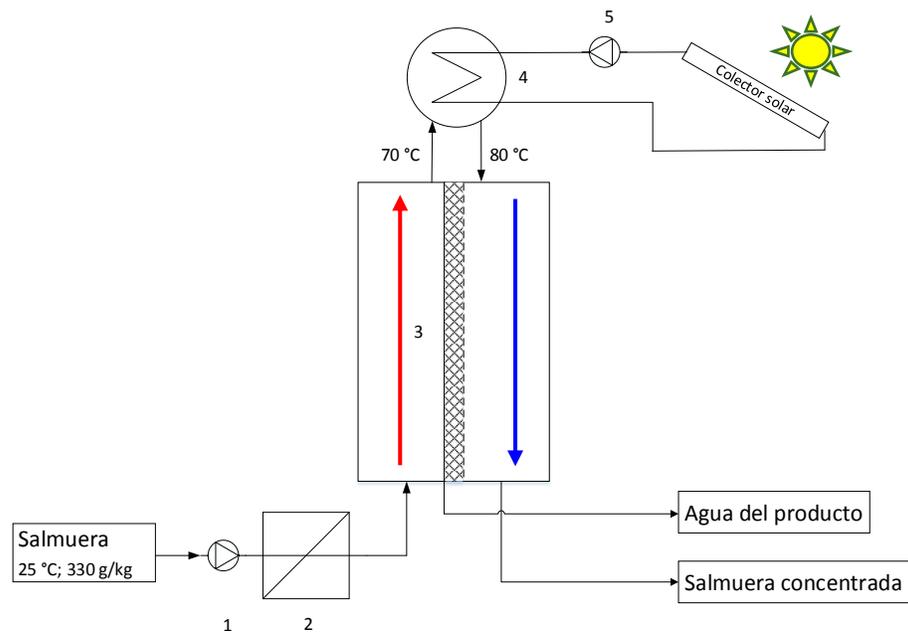


Figura 31: Diagrama esquemático de propuesta de sistema de tratamiento de salmueras de litio para obtención de salmuera concentrada, donde: 1-Bomba de impulsión, 2- Malla o pretratamiento, 3- Membrana de destilación, 4- intercambiador de calor, 5- Colector solar y bomba de circulación.

De esta forma es posible obtener una salmuera de mayor concentración, recuperando agua en el proceso, lo cual contribuye a la eficiencia hídrica del proceso y reduce el estrés hídrico de las zonas de explotación.

5 Conclusión

El presente informe se centra en importantes sectores de la industria chilena que tienen problemas con sus aguas residuales. Para ello se seleccionaron la industria alimentaria (aceitunas y vino), la industria papelera, y la minería. Para cada sector industrial se presenta un concepto de tratamiento de aguas residuales adecuado.

Se puede resumir que los sectores industriales en los que se procesan las materias primas naturales, en su mayoría tienen problemas con sus valores de DQO en sus aguas residuales. El vertido de aguas residuales con altos valores de DQO tiene efectos negativos en el medio ambiente. Además, las aguas residuales no pueden ser reutilizar sin un tratamiento adecuado, por lo que se debe utilizar agua dulce para el proceso. El tratamiento de estas aguas residuales y la reducción de la DQO son, por lo tanto, razonables en todos los aspectos. La forma más efectiva y económica de descomponer la DQO son los tratamientos biológicos; sin embargo, los tratamientos biológicos a menudo no pueden tratar completamente las aguas residuales por sí solos. En consecuencia, se requieren procesos de pre-tratamiento y post-tratamiento. En el presente estudio, se buscó aprovechar la energía solar para impulsar estos tratamientos.

En la industria del aceite de oliva, el tratamiento anaeróbico es particularmente beneficioso porque el proceso es muy simple y económico. Mediante la aplicación de los reactores USAB para el tratamiento de aguas residuales de molienda de oliva, se puede alcanzar una reducción de DQO de hasta el 85 %. Sin embargo, el agua tratada de esta manera no puede ser utilizada como agua de proceso, pero tiene propiedades óptimas para el uso como agua de riego. Esto es especialmente importante en este contexto, ya que la producción de aceitunas en Chile se produce en zonas con escasez de agua y suelos pobres en nutrientes. Los costes de funcionamiento del tratamiento anaeróbico a través de un reactor UASB se estiman en unos 0,20-0,31 USD/m³. Además, el biogás producido puede ser utilizado energéticamente. De este modo, se pueden reducir aún más los costes de fabricación completos.

Sin embargo, si el foco está en purificar aún más las aguas residuales tratadas anaeróbicamente, se puede aplicar una destilación solar. Esta tecnología es muy eficiente en el uso de energía y puede purificar completamente las aguas residuales.

Las aguas residuales de la industria vitivinícola contienen principalmente compuestos fácilmente degradables; para ello, un tratamiento biológico es lo más adecuado; sin embargo, también poseen compuestos biológicos nocivos como los fenoles y los plaguicidas, se selecciona un pretratamiento adecuado que consiste en una fotocatalisis solar. Esta tecnología todavía no es muy

común y sólo existen pilotos. En un proceso de fotocátalisis solar, los componentes nocivos e incluso las cantidades altas de la DQO pueden ser eliminados. Un proceso biológico tipo aeróbico, aguas abajo descompone el resto de la DQO para que las aguas residuales puedan ser purificadas completamente. En general, también se puede aplicar una fotocátalisis en la industria olivarera, ya que también se encuentran presentes altos niveles de fenoles.

Si el objetivo es tratar las aguas residuales de forma que puedan ser recicladas y reutilizadas, los biorreactores de membrana pueden reducir el DQO y el TS en un 99 %. Debido a que las aguas residuales de la industria papelera contienen grandes cantidades de compuestos difícilmente degradables, el biorreactor de membrana se complementa con un lecho fijo de piedra de lava. Con la menor producción de lodos, el índice de ensuciamiento de la membrana puede reducirse hasta un 43 % en comparación con los biorreactores de membrana convencionales. Los costes de funcionamiento son de unos 0,47 US\$/m³. El proceso desarrollado representa un concepto innovador.

Si las aguas residuales contienen grandes cantidades de compuestos inorgánicos, como es el caso en la industria minera, la destilación por membrana es una tecnología muy interesante, para su aplicación con calor solar. La destilación por membrana permite la separación de agua de afluentes con alta concentración de metales pesados, e incluso puede ser parte de un sistema híbrido que combine tecnologías para la recuperación de estos minerales valiosos.

Se puede concluir que todas las tecnologías presentadas tienen un gran potencial en el futuro, ya que pueden ser instaladas de forma compacta, ya que pueden ser instaladas de forma descentralizada, donde la energía para operar estos sistemas es generado por energía solar, ya sea térmica o como electricidad, o bien la propia naturaleza de la radiación solar para provocar reacciones químicas como sucede con la fotocátalisis solar. En general, no sólo una tecnología puede conducir al resultado deseado, sino siempre una combinación de varios.

En el futuro, se hace cada vez más importante no ver las aguas residuales como un producto de desecho, sino como un producto valioso que puede ser reciclado y reutilizado - ya sea como agua de proceso o para otros propósitos. De esta manera se obtienen beneficios económicos, sociales y ambientales.

6 Referencias

1. Voutchkov, N., *Desalination engineering: planning and design*. 2012: McGraw Hill Professional.
2. Klemes, J., R. Smith, and J.-K. Kim, *Handbook of water and energy management in food processing*. 2008: Elsevier.
3. t13.cl, Fuente: <http://www.t13.cl/noticia/negocios/transforma-alimentos-busca-aumentar-participacion-mundial-chile-industria-alimentaria>. 2017.
4. Atlas-del-agua, *Atlas del agua 2016, Capítulo 4, Gestión del agua*. 2016.
5. ODEPA, *El aceite de oliva*. 2015.
6. ChileOliva, *Informe anual del mercado nacional de aceite de oliva*. 2012.
7. Khatib, A., et al., *Reducing the environmental impact of olive mill wastewater*. American Journal of Environmental Sciences, 2009. **5**(1): p. 1.
8. Paraskeva, P. and E. Diamadopoulos, *Technologies for olive mill wastewater (OMW) treatment: a review*. Journal of Chemical Technology and Biotechnology, 2006. **81**(9): p. 1475-1485.
9. Inan, H., et al., *Olive oil mill wastewater treatment by means of electro-coagulation*. Separation and purification technology, 2004. **36**(1): p. 23-31.
10. Tsagaraki, E., H. Lazarides, and K. Petrotos, *Olive mill wastewater treatment. Utilization of By-products and Treatment of Waste in the Food Industry*, 2007: p. 133-157.
11. Maza-Márquez, P., et al., *Biotreatment of industrial olive washing water by synergetic association of microalgal-bacterial consortia in a photobioreactor*. Environmental Science and Pollution Research, 2017. **24**(1): p. 527-538.
12. sswm.info, Fuente: http://www.sswm.info/category/implementation-tools/wastewater-treatment/hardware/semi-centralised-wastewater-treatments/u#reference_book7934. 2017.
13. Ahn, Y.-H., K.-S. Min, and R. Speece, *Full scale UASB reactor performance in the brewery industry*. Environmental technology, 2001. **22**(4): p. 463-476.
14. World-Integrated-Trade-Solution, *Recuperado el 15 de Mayo de 2015, de World Integrated Trade Solution*. 2015.
15. Felzensztein, C., *The Chilean wine industry: new international strategies for 2020*. Emerald Emerging Markets Case Studies, 2014. **4**(2): p. 1-12.
16. odepa.gob.cl, Fuente: <http://www.odepa.gob.cl/vides-superficie-y-produccion-3/>. 2017.
17. Oliveira, M., C. Queda, and E. Duarte, *Aerobic treatment of winery wastewater with the aim of water reuse*. Water Science and Technology, 2009. **60**(5): p. 1217-1223.
18. Serrano, L., et al., *Winery wastewater treatment in a hybrid constructed wetland*. Ecological Engineering, 2011. **37**(5): p. 744-753.

19. Zorpas, A.A. and A. Saranti, *Multi-criteria analysis of sustainable environmental clean technologies for the treatment of winery's wastewater*. International Journal of Global Environmental Issues, 2016. **15**(1-2): p. 151-168.
20. Lucas, M.S., J.A. Peres, and G.L. Puma, *Treatment of winery wastewater by ozone-based advanced oxidation processes (O₃, O₃/UV and O₃/UV/H₂O₂) in a pilot-scale bubble column reactor and process economics*. Separation and Purification Technology, 2010. **72**(3): p. 235-241.
21. Strong, P.J. and J.E. Burgess, *Treatment methods for wine-related and distillery wastewaters: a review*. Bioremediation Journal, 2008. **12**(2): p. 70-87.
22. Valderrama, C., et al., *Winery wastewater treatment for water reuse purpose: Conventional activated sludge versus membrane bioreactor (MBR): A comparative case study*. Desalination, 2012. **306**: p. 1-7.
23. Malandra, L., et al., *Microbiology of a biological contactor for winery wastewater treatment*. Water Research, 2003. **37**(17): p. 4125-4134.
24. Robert, D. and S. Malato, *Solar photocatalysis: a clean process for water detoxification*. Science of the Total Environment, 2002. **291**(1): p. 85-97.
25. Spasiano, D., et al., *Solar photocatalysis: materials, reactors, some commercial, and pre-industrialized applications. A comprehensive approach*. Applied Catalysis B: Environmental, 2015. **170**: p. 90-123.
26. Oller, I., et al., *Pre-industrial-scale combined solar photo-Fenton and immobilized biomass activated-sludge biotreatment*. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2007. **46**(23): p. 7467-7475.
27. Instituto-Forestal, *Chilean statistical yearbook of forestry*, <http://wef.infor.cl/publicaciones/anuario/2016/Anuario2016.pdf>. 2016.
28. Instituto-Forestal, *Directorio de la industria forestal Chilena 2017*, <http://wef.infor.cl/publicaciones/directorio/2017/Directorio2017.pdf>. 2017.
29. Savant, D., R. Abdul-Rahman, and D. Ranade, *Anaerobic degradation of adsorbable organic halides (AOX) from pulp and paper industry wastewater*. Bioresource Technology, 2006. **97**(9): p. 1092-1104.
30. Shankar, R., L. Singh, and P. Mondal, *Removal of lignin from wastewater through electro-coagulation*. Ecological Technologies for Industrial Wastewater Management: Petrochemicals, Metals, Semi-Conductors, and Paper Industries, 2015. **1**: p. 217.
31. Ashrafi, O., L. Yerushalmi, and F. Haghigat, *Wastewater treatment in the pulp-and-paper industry: A review of treatment processes and the associated greenhouse gas emission*. Journal of environmental management, 2015. **158**: p. 146-157.
32. Möbius, C.H., *Abwasser der Papier und Zellstoffindustrie*. Aufl. Quelle: <http://www.cm-consult.de>, Datei AbwasserCM_410. pdf, 1997.
33. Ebrahimi, M.S.M., *Prozessintegriertes mehrstufiges Membranverfahren zur Reduzierung schwer abbaubarer Stoffe im Bleicherei-abwasser der Sulfitzellstofferzeugung und energetische Nutzung der abgetrennten Lignine*. 2010.

34. Chandra, R., *Environmental waste management*. 2016: CRC Press.
35. Iorhemen, O.T., R.A. Hamza, and J.H. Tay, *Membrane Bioreactor (MBR) technology for wastewater treatment and reclamation: membrane fouling*. Membranes, 2016. **6**(2): p. 33.
36. Meng, F., et al., *Fouling in membrane bioreactors: an updated review*. Water Research, 2017. **114**: p. 151-180.
37. Rodríguez-Hernández, L., A. Esteban-García, and I. Tejero, *Comparison between a fixed bed hybrid membrane bioreactor and a conventional membrane bioreactor for municipal wastewater treatment: a pilot-scale study*. Bioresource technology, 2014. **152**: p. 212-219.
38. Yin, Z., V.V. Tarabara, and I. Xagorarakis, *Effect of pressure relaxation and membrane backwash on adenovirus removal in a membrane bioreactor*. Water research, 2016. **88**: p. 750-757.
39. Liu, Q., et al., *Performance of a hybrid membrane bioreactor in municipal wastewater treatment*. Desalination, 2010. **258**(1): p. 143-147.
40. Universidad-Católica-de-Chile, *Piedras volcánicas y radiación solar revolucionan tratamiento de aguas servidas en el norte*, <http://www.noticias.ucn.cl/destacado/piedras-volcanicas-y-radiacion-solar-revolucionan-tratamiento-de-aguas-servidas-en-el-norte/>. 2016.
41. Costwater.com, *MBR operating cost*, Internetaddress: http://www.costwater.com/membranes/mbr/mbr_operating_cost.htm
- 2017.
42. *Anuario de la Minería de Chile 2015 (Servicio Nacional de Geología y Minería)*.
43. *U.S. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries 2017, Lithium*.
44. *Atlas del Agua, Chile 2016. Serie de Estudios Básicos DGA, S.E.B. N° 6, ISBN: 978-956-7970-30-8; Diciembre 2015*.
45. *Consumo de agua en la minería del cobre al 2015. DEPP 06/2016. Comisión Chilena del Cobre.*
46. *Pedro Pavlovic Zuvic, 2014. La Industria del Litio en Chile. Artículo Revista de Ingenieros, Chile*.
47. *Presentación Comisión Chilena del Litio (2014). Evaluación de Impacto Ambiental de la Extracción de Salmuera en Salar de Atacama, SGA*.
48. *Peter Ehren, Macarena Gonzalez Prieto. "Process and Environmental Consultancy From Resource to Product", Seminario Comisión de Litio, 22 de Agosto de 2014*.
49. *Resultados Catastro de Depósito de Relaves 2016. Servicio Nacional de Geología y Minería Subdirección de Minería Departamento de Depósitos de Relaves*.
50. *Camacho, Dumée, Zhang, Li, Duke, Gomez and Gray, "Advances in Membrane Distillation for Water Desalination and Purification Applications", ISSN 2073-4441, www.mdpi.com/journal/water; 2013*.
51. *Khayet and Matsumura, "Membrane Distillation, Principles and Applications"; ISBN: 978-0-444-53126-1, Elsevier, 2011*.

Fraunhofer Chile Research
Center for Solar Energy Technologies (CSET)
Centro de Innovación UC Anacleto Angelini, Piso 8
Av. Vicuña Mackenna 4860, Macul, Santiago, Chile

www.fraunhofer.cl

Proyecto apoyado por:

