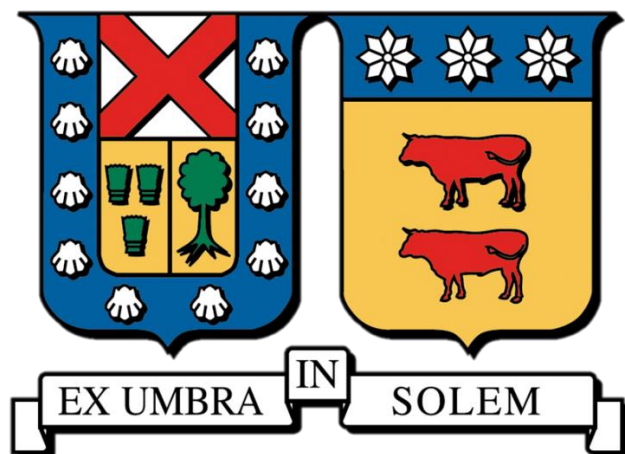


UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INDUSTRIAS



HUMEDALES ARTIFICIALES EN MERCADO DE
TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES, ANÁLISIS DE
UNA POTENCIAL TRANSICIÓN HACIA UNA ECONOMÍA
CON ENFOQUE CIRCULAR.

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL INDUSTRIAL

MAURICIO ESPINOZA PINO

PROFESOR GUÍA

PABLO VIVEROS GUNCKEL

PROFESOR CORREFERENTE

TOMÁS GRUBESSICH FERNÁNDEZ

VALPARAÍSO, OCTUBRE, 2017



RESUMEN EJECUTIVO

Sin duda identificar causas, consecuencias y soluciones a la crisis hídrica y el cambio climático han sido parte de los desafíos más importantes y complejos de las últimas 2 décadas, la situación no se ha logrado frenar y es por esto que cada vez existe mayor preocupación y ocupación para trabajar en pos de una reversión del proceso de degradación del medio ambiente, es decir, una restauración ecológica.

Se establece que los procesos productivos lineales han sido catalizadores de la degradación del medio ambiente y es necesaria una lógica cíclica que facilite e integre dentro de un modelo productivo el proceso de restauración de los sistemas naturales de los cuales depende el funcionamiento humano. Bajo este paradigma se caracteriza la economía circular que se plantea como un cambio de enfoque para enfrentar los desafíos actuales.

Dentro de las señales que se han enviado desde las entidades internacionales que asumen estos desafíos se ha identificado la urgencia que implica valorizar, de manera distinta a la actual, los componentes responsables de mantener el equilibrio entre los sistemas naturales, como los humedales. Responsables de múltiples servicios ecosistémicos necesarios no sólo para la naturaleza sino también para la actividad humana, además de poseer rasgos distintivos únicos, es así que destaca la capacidad de este sistema natural de retener y depurar el agua.

Considerando esto, el siguiente trabajo propone la utilización de humedales artificiales para realizar tratamiento de aguas residuales humanas. Siendo esta una tecnología validada pero aún no posicionada dentro del mercado de tratamiento de aguas. Se lleva a cabo un proceso de caracterización y una serie de análisis, tanto del contexto general como de la propuesta en sí, que permiten identificar qué factores de éxito y de riesgo son claves en promover la utilización, conservación y restauración de humedales.

Actualmente distintos sectores poseen nichos de innovación, donde existe fomento de utilización de tecnologías basadas en recursos renovables de origen biológico para resolver requerimientos de la actividad humana. El proceso de transición consiste en la maduración



de estos nichos para lograr una transición hacia un régimen tecnológico sustentable que recoja los principios de la economía circular y una visión integral y sistémica al momento de diseñar modelos de producción.

Finalmente se presenta un caso real de diseño de un humedal construido para tratamiento de aguas que permite establecer nociones de costos de inversión y una cuantificación simple de los beneficios que se desprenden de la integración de la lógica circular y los servicios ecosistémicos de los humedales. Donde es posible demostrar la competitividad del producto, más allá de una visión netamente financiera y económica.



CONTENIDO

1	ANTECEDENTES.....	7
1.1	SITUACIÓN GLOBAL.....	7
1.2	SITUACIÓN EN CHILE.....	18
1.2.1	Marco legal para uso de agua dulce en Chile.....	19
1.2.2	Disponibilidad y extracción de recursos hídricos en Chile.....	20
1.2.3	Normativa vigente referente a aguas residuales y uso para riego.....	21
2	OBJETIVOS DEL ESTUDIO.....	24
3	ESTADO DEL ARTE.....	25
3.1	REDISEÑO DE LA ECONOMÍA COMO RESPUESTA A LA CRISIS.....	25
3.2	ECONOMÍA CIRCULAR EN EL MUNDO.....	33
3.2.1	Economía Circular en la Unión Europea.....	33
3.2.2	Economía circular en Asia.....	35
3.3	ECONOMÍA CIRCULAR EN CHILE.....	36
3.4	ECONOMÍA CIRCULAR Y AGUA.....	37
4	HUMEDALES ARTIFICIALES COMO MÉTODO DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES.....	39
4.1	¿QUÉ ES UN HUMEDAL?.....	39
4.2	CONVENIO INTERNACIONAL RAMSAR.....	40
4.3	RASGOS DISTINTIVOS DE LOS HUMEDALES.....	41
4.4	TRATAMIENTOS DE AGUAS RESIDUALES ACTUALMENTE EN CHILE.....	43
4.4.1	Generalidades sobre el tratamiento de aguas de carácter residual.....	43
4.4.2	Sistemas de tratamiento utilizados.....	46
4.4.3	Sistemas de tratamiento utilizados en zonas Urbanas.....	51
4.4.4	Sistemas de tratamiento utilizados en zonas rurales.....	53
4.5	HUMEDAL ARTIFICIAL COMO FITODEPURADOR: LA PROPUESTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES.....	54
5	ANÁLISIS CUALITATIVO ENTRE HUMEDALES CONSTRUIDOS Y OTROS SISTEMAS DE TRATAMIENTO.....	60



5.1	ANÁLISIS CUALITATIVO DE LA PROPUESTA.....	61
5.1.1	Análisis Comparativo en funcionamiento:	62
5.1.2	Análisis FODA, Factores de riesgo técnico y económico:	64
6	FACTORES DE TRANSICIÓN HACIA UN ENFOQUE CIRCULAR: APLICADO A HUMEDALES ARTIFICIALES.....	68
6.1	ESCENARIO ACTUAL Y FUTURO SOBRE TECNOLOGÍAS SUSTENTABLES, SU ESTADO Y LA POSIBILIDAD DE TRANSICIÓN HACIA UN RÉGIMEN TECNOLÓGICO SUSTENTABLE	68
6.1.1	Humedales artificiales como un nicho de innovación.....	73
6.1.2	Antecedentes del paisaje socio-técnico en Chile	75
6.1.3	Conclusiones discusión	78
6.2	FACTORES DE RIESGO Y ÉXITO DE LA PROPUESTA	79
6.3	PERSPECTIVA ECOLÓGICA Y ECONÓMICA.....	80
6.3.1	Factores de éxito perspectiva ecológica y económica	80
6.3.2	Factores de riesgo perspectiva ecológica y económica	81
6.4	PERSPECTIVA SOCIO-POLÍTICA	83
6.4.1	Factores de éxito perspectiva socio-política	83
6.4.2	Factores de riesgo perspectiva socio-política	88
6.5	PERSPECTIVA COMERCIAL	88
6.5.1	Factores de éxito perspectiva comercial.....	89
6.5.2	Factores de riesgo perspectiva comercial	91
6.6	PERSPECTIVA TÉCNICA.....	94
6.6.1	Factores de éxito perspectiva técnica	94
6.6.2	Factores de éxito perspectiva técnica	95
7	CASO DE ESTUDIO: DISEÑO Y EVALUACIÓN HUMEDAL ARTIFICIAL PARA PARQUE VALLE LOS ULMOS.....	96
8	CONCLUSIONES	101
9	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	105
10	GLOSARIO	108



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Presiones humanas sobre los ecosistemas.	13
Tabla 2: Extracción de agua por sector a nivel global y continental	17
Tabla 3: Extracción de agua por sector y sub sector a nivel nacional	21
Tabla 4: Limite de conductividad específica y sólidos disueltos totales en uso de agua para riego	22
Tabla 5: Servicios ecosistémicos proporcionados por los humedales.	43
Tabla 6: Sistemas de tratamiento utilizados en plantas de tratamiento en zonas urbanas. ..	51
Tabla 7: Sistemas de tratamiento utilizados en plantas de tratamiento en zonas rurales.	54
Tabla 8: Matriz de requerimiento para tratamiento..	64
Tabla 9: Parámetros de diseño HAFSSH.	97
Tabla 10: Dimensiones HAFSSH.	97
Tabla 11: Presupuesto HAFSSH parque Valle los Ulmos.	99

ÍNDICE DE IMÁGENES

Imagen 1: Glaciar y laguna en RN Cerro Castillo, Región de Aysén, Chile..	8
Imagen 2: Esquema Economía Circular.	30
Imagen 3: Sistemas de tratamiento utilizados en plantas de tratamiento en zonas urbanas	52
Imagen 4: Evolución en Sistemas utilizados en plantas de tratamiento en zonas urbanas. .	53
Imagen 5: Pretratamiento a nivel doméstico del sistema	58
Imagen 6: Descripción gráfica de funcionamiento del sistema.	59
Imagen 7: Esquema proceso de levantamiento de factores clave.	79
Imagen 8: Ciclo de agua y Ciclo de los Nutrientes en torno a la utilización y reutilización en agricultura..	86
Imagen 9: Imagen corporativa Fundación Kennedy	87
Imagen 10: Imagen corporativa BioAntú.	92
Imagen 11: Imagen Corporativa Vetiver Chile.	92
Imagen 12: Sistema Tohá®.	93



1 ANTECEDENTES

1.1 SITUACIÓN GLOBAL

A lo largo de las últimas décadas el escenario referente a los recursos hídricos se ha vuelto cada vez más complejo. El origen de esta situación responde a una lógica multi-causal ya que desde una perspectiva antropocéntrica existen fenómenos como el crecimiento demográfico, la evolución económica bajo la lógica productiva actual, el sobreconsumo y desperdicio de agua potable, la contaminación constante y creciente de cauces naturales, limitaciones de volumen de oferta y una exigente demanda. Por otra parte en términos medioambientales el agua juega un rol importantísimo para la vida más allá de lo estrictamente humano donde existen relaciones de interdependencia muy agudas, ya que al ser modificado un factor se alteran de inmediatos ecosistemas enteros, independiente de las causas de estas alteraciones, ya se hacen evidentes fenómenos como el cambio climático, efecto invernadero, elevación de la temperatura promedio de la tierra, y otros fenómenos de ciclicidad más corta como el fenómeno de la niña o del niño que están directamente con la disponibilidad de agua en ciertos períodos.

A pesar de la abundancia con que el elemento hídrico se encuentra presente en nuestro planeta, tan solo el 2.53% de su volumen total corresponde a agua dulce, la gran masa corresponde a agua salada.



Imagen 1: Glaciar y laguna en RN Cerro Castillo, Región de Aysén, Chile. Fuente: Fotografía propia

Además, del agua dulce existente cerca de dos terceras partes que corresponden a glaciares y superficies de nieves perpetuas, donde el agua no se encuentra disponible. Los recursos hídricos casi en su totalidad son considerados renovables (la excepción corresponde a ciertas aguas de carácter subterráneo), existiendo gran variabilidad en términos de disponibilidad y precipitación estacional y anual en las diferentes partes del planeta. La principal fuente de agua para uso humano corresponde a la precipitación de agua en forma de lluvia. La forma en que dicha precipitación llega a ser incluida en los ciclos de consumo humano, corresponde al trabajo de filtración y absorción del suelo y de diversas especies que habitan en él. Posteriormente el agua presente en estos ecosistemas puede correr hasta el mar a través de los ríos o hasta los lagos y humedales, o puede evaporarse y volver a precipitar. Del total anual de agua dulce disponible, el ser humano utiliza un 8%, mientras que de la evapotranspiración anual (responsable de mantener los bosques, las tierras de pastoreo y de cultivo no irrigadas, así como los ecosistemas) consume el 26% y de las aguas de escorrentía accesibles son utilizadas en un 54% por el ser humano¹.

¹ WATER FOR PEOPLE, WATER FOR LIFE, Executive Summary of the UN World Water Development Report, First published by the United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO), Paris, France. © UNESCO-WWAP, 2003 © UNESCO/Mundi-Prensa Libros, 2003 para la edición española



Por lo tanto, el impacto del uso del agua de escorrentía así como el control ejercido sobre los recursos hídricos por parte del ser humano se encuentra bajo una revisión aguda. Prueba de esto son las mediciones que indican que el consumo de agua per cápita siempre vaya en aumento (debido a la “mejora” de los niveles de vida), por otra parte la población crece y en consecuencia tanto la demanda de consumo agua como, por consiguiente, la utilización de los porcentajes de agua disponible aumentan. Y en definitiva -al considerar la variabilidad del recurso hídrico a disposición en términos temporales y espaciales- se vuelve evidente que el agua comienza a escasear bajo el actual modelo de consumo, desembocando en la crisis del agua.

En lo que respecta a calidad del agua, existe un componente importante ya que la contaminación del agua afecta directamente la naturalidad del ciclo del agua, además de las alteraciones producidas en los ecosistemas encargados de absorber y almacenar el agua para sus habitantes y así mantener la biodiversidad necesaria para la vida. Según informes de la ONU se estima que unos 2 millones de toneladas de desechos se expulsan diariamente hacia cauces naturales, dichos desechos están compuestos por residuos industriales y químicos, sistemas de drenajes urbanos y desechos agrícolas (pesticidas, residuos de pesticidas y fertilizantes químicos no orgánicos).

Generalmente el desecho de residuos es llevado a cabo en zonas periféricas o en zonas donde la legislación es permisiva, cuando ocurre esto quienes resultan mayormente afectados son las poblaciones que habitan dichos lugares que por lo general corresponden a zonas con índice de pobreza elevados. Hasta la emisión del WWDR se estima que el 50% de la población de países en vías de desarrollo se encuentra expuesta a fuentes de agua contaminadas.

Si bien en términos cuantitativo resulta difícil estimar cuáles efectivamente serán las consecuencias del cambio climático, sí existe una tendencia hacia el desequilibrio que ha desembocado en condiciones meteorológicas extremas más frecuentes, por lo que inundaciones, sequías, aluviones, tifones y ciclones se cree que también sucedan con mayor frecuencia. Y debido al aumento de carga contaminante y de la temperatura del agua, se



verán afectados en forma cada vez mayor los caudales de los ríos en períodos de flujo escaso y la calidad del agua.

A raíz de esto, organismos -tanto de carácter mundial como nacional- han enfocado su labor netamente a resolver dicha problemática desde todas sus perspectivas. Prueba de esto es la declaración ministerial de La Haya en el año 2000 en el mes de marzo donde se aprueban siete desafíos o acciones base en relación a la resolución de la “crisis del agua” como ha sido denominada por el Informe de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos en el Mundo [The World Water Development Report (WWDR)], entidad que además adoptó los siete desafíos como criterios de seguimiento para controlar el progreso realizado en esta materia²:

- I. Cubrir las necesidades humanas básicas –asegurar el acceso al agua y a servicios de saneamiento en calidad y cantidad suficientes;
- II. Asegurar el suministro de alimentos –sobre todo para las poblaciones pobres y vulnerables, mediante un uso más eficaz del agua.
- III. Proteger los ecosistemas –asegurando su integridad a través de una gestión sostenible de los recursos hídricos.
- IV. Compartir los recursos hídricos –promoviendo la cooperación pacífica entre diferentes usos del agua y entre Estados, a través de enfoques tales como la gestión sostenible de la cuenca de un río.
- V. Administrar los riesgos –ofrecer seguridad ante una serie de riesgos relacionados con el agua.

² WATER FOR PEOPLE, WATER FOR LIFE, Executive Summary of the UN World Water Development Report, First published by the United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO), Paris, France. © UNESCO-WWAP, 2003 © UNESCO/Mundi-Prensa Libros, 2003 para la edición española



- VI. Valorar el agua –identificar y evaluar los diferentes valores del agua (económicos, sociales, ambientales y culturales) e intentar fijar su precio para recuperar los costos de suministro del servicio teniendo en cuenta la equidad y las necesidades de las poblaciones pobres y vulnerables.
- VII. Administrar el agua de manera responsable, implicando a todos los sectores de la sociedad en el proceso de decisión y atendiendo a los intereses de todas las partes.

Además, cuatro desafíos se han anexado con el objetivo de complementar el alcance y potenciar el impacto de las acciones correctivas o regenerativas los cuáles son:

- VIII. El agua y la industria –promover una industria más limpia y respetuosa de la calidad del agua y de las necesidades de otros usuarios.
- IX. El agua y la energía –evaluar el papel fundamental del agua en la producción de energía para atender las crecientes demandas energéticas.
- X. Mejorar los conocimientos básicos –de forma que la información y el conocimiento sobre el agua sean más accesibles para todos.
- XI. El agua y las ciudades –tener en cuenta las necesidades específicas de un mundo cada vez más urbanizado.

Si bien los desafíos planteados no tienen una escala de valorización es importante extenderse en aquellos que resultan trascendentales y justifican el siguiente trabajo de título. Ejemplo de esto son los desafíos III, IV, VI y VIII.

Desafío III: Proteger los ecosistemas

El medio ambiente, así como los ecosistemas que lo componen, tiene capacidades naturales de absorción y auto-depuración. No obstante lo anterior, si es que dicha capacidad se ve



sobrepasada, la biodiversidad se pierde, los medios de subsistencia no poseen la misma capacidad, las fuentes naturales de alimento se deterioran y se generan costos de re-estabilización extremadamente elevados. Las alteraciones de los equilibrios eco sistémicos provocan incremento en la frecuencia de desastres naturales, ya que se ha comprobado en aquellas zonas donde la erosión del suelo y la deforestación de bosque nativo ya no existe manera de neutralizar de forma natural los efectos del ciclo del agua, de esta forma las precipitaciones provenientes de las lluvias no se almacenan en la tierra causando inundaciones o desprenden material que posteriormente provoca aluviones en asentamientos urbanos cercanos.

Por otra parte una práctica que se ha vuelto común, como ejemplo local tenemos lo sucedido en zonas rurales de las regiones de Los Ríos y Los Lagos, corresponde al drenaje de humedales para transformar terrenos en zonas agrícolas (50% de los humedales fue drenado para este propósito durante el siglo XX)³ y, por otra parte, la disminución de la evapotranspiración, debido a desmontes y remociones de grandes cantidades de tierra. Este tipo de prácticas producen alteraciones en los sistemas naturales afectando la presencia de agua.

En casos como estos quienes resultan más afectadas son las poblaciones más vulnerables, ya que además de vivir en zonas periféricas inundables, contaminadas y con falta de acceso a fuentes de agua potable también se pierden fuentes de alimentos provenientes de la naturaleza.

Con el comienzo del nuevo milenio nuevas concepciones se han ido posicionando con mayor fortaleza a medida que pasan los años, entre ellas se destaca:

- ✚ Los ecosistemas proporcionan servicios esenciales al funcionamiento y subsistencia del ser humano, además de poseer su propio valor intrínseco.
- ✚ La disponibilidad futura de los recursos hídricos depende y requiere de una gestión participativa y regenerativa, basada en la observación de ecosistemas.

³ WATER FOR PEOPLE, WATER FOR LIFE, Executive Summary of the UN World Water Development Report, First published by the United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO), Paris, France. © UNESCO-WWAP, 2003 © UNESCO/Mundi-Prensa Libros, 2003 para la edición española



El siguiente cuadro presenta actividades humanas y el impacto generado sobre los ecosistemas que contienen agua dulce.

Actividad Humana	Efecto potencial negativo	Función en peligro
Crecimiento demográfico y del consumo	Aumenta la extracción de agua y la adquisición de tierras cultivadas mediante el drenaje de humedales; aumenta la necesidad de todas las demás actividades, con los riesgos consiguientes.	Prácticamente, todas las funciones del ecosistema, incluyendo funciones de hábitat, producción y regulación
Desarrollo de infraestructura (presas, canales, diques, desvíos, etc.)	La pérdida de integridad altera el ritmo y la cantidad de las corrientes fluviales, la temperatura del agua y el transporte de nutrientes y sedimentos, y como resultado el rellenado del delta bloquea las migraciones de peces	Cantidad y calidad del agua, hábitats, fertilidad de la llanura de inundación, pesquerías, economías del delta.
Conversión de tierras	Elimina componentes clave del entorno acuático; pérdida de funciones; integridad; hábitat y biodiversidad; altera pautas de escurrimiento; inhibe la recarga natural rellena de limo los cuerpos de agua.	Control natural de inundaciones, hábitats para pesquerías y aves acuáticas, recreo, suministro de agua, cantidad y calidad del agua.
Exceso de cosecha y explotación	Reduce recursos vivos, las funciones del ecosistema y la biodiversidad (agotamiento de aguas subterráneas, colapso de pesquerías).	Producción de alimentos, suministro de agua, calidad y cantidad de agua.
Introducción de especies exóticas	Competencia de especies introducidas; altera producción y ciclo de nutrientes; y causa pérdida de biodiversidad entre especies nativas.	Producción de alimentos, hábitat de fauna y flora, actividades de recreo.
Descarga de contaminantes en tierra, aire o agua.	La contaminación de cuerpos de agua altera la química y ecología de ríos, lagos y humedales; las emisiones de gas invernadero producen notables cambios en los patrones de escurrimiento y precipitación.	Suministro de agua, hábitat, calidad del agua; producción de alimentos; cambio climático puede también repercutir en la energía hidráulica, capacidad de dilución, transporte, control de inundaciones.

Tabla 1: Presiones humanas sobre los ecosistemas. Fuente: Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (UICN)



A pesar de no existir data íntegramente confiable, es claro que los ecosistemas acuáticos continentales se ven presionados constantemente por acción humana. Se estima que cerca del 60% de los ríos más caudalosos y grandes del mundo han visto interrumpido su flujo debido a la implementación de estructuras de carácter hidráulico⁴ como motor para la actividad productiva humana.

No solo los ecosistemas continentales se encuentran bajo amenaza, la pesquería como rubro industrial, comercial y artesanal, presente tanto en aguas interiores como en los océanos, se ha visto significativamente disminuida en cantidad de emplazamientos de explotación sostenible debido a la degradación del hábitat, especies invasoras introducidas que generan sobre poblamiento o eutrofización y exceso de extracción vía pesca de arrastre industrial.

En lo que respecta a biodiversidad en aguas interiores se ha evidenciado disminución en la presencia de algunas especies causadas por alteraciones de hábitat, y, si bien el levantamiento de información de esta arista es un tanto complejo debido a las características de los movimientos migratorios sobre todo en avifauna, se estima que un 24% de los mamíferos y un 12% de las aves habitantes de aguas continentales se encuentran bajo amenaza⁵ en términos de conservación.

Los métodos que actualmente operan con el objetivo de mitigar el daño sobre los ecosistemas corresponden, en su mayoría, a iniciativas políticas y estratégicas de carácter público o privado que tienen por objetivo proteger ecosistemas a través de educación ambiental; el establecimiento de normas y la promoción de gestión consciente del uso de la tierra y el agua; presentación regular de informes sobre el estado del medio ambiente y sus alteraciones; protección de ecosistemas que dan origen a los cauces naturales de agua; mantenimiento de los cauces de agua naturales; protección de especies, etc.

Dado el escenario de preocupación acerca de la relación disponibilidad de recurso hídrico-estado de conservación del medioambiente es que instituciones gubernamentales y no gubernamentales (ONG) se han sumado en interés y participación en restauración de

⁴ WATER FOR PEOPLE, WATER FOR LIFE, Executive Summary of the UN World Water Development Report, First published by the United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO), Paris, France. © UNESCO-WWAP, 2003 © UNESCO/Mundi-Prensa Libros, 2003 para la edición española

⁵ WATER FOR PEOPLE, WATER FOR LIFE, Executive Summary of the UN World Water Development Report, First published by the United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO), Paris, France. © UNESCO-WWAP, 2003 © UNESCO/Mundi-Prensa Libros, 2003 para la edición española



ecosistemas, en ese sentido algunas acciones y estrategias han logrado disminuir el impacto en términos de conservación de biodiversidad y uso de aguas interiores, al menos en la última década en lo que respecta a planificación estratégica y enfoque en la toma de decisiones.

A través de la inclusión de las mencionadas organizaciones se ha instaurado la gestión ambiental como un componente importante en otras organizaciones con enfoques diversos, y una de las tareas que genera mayor urgencia y preocupación es la recuperación y restablecimiento de sistemas naturales como los humedales y pantanos que se han visto afectados por la contaminación y destrucción producto de la actividad productiva humana.

Desafío IV: Compartir los recursos hídricos.

Los recursos hídricos disponibles son utilizados por más de un usuario (regiones administrativas o países) y para más de un uso en particular (energía, conservación, alimentación). Aquellos pueblos, ciudades o países que utilizan desde un cauce natural el recurso hídrico siempre deben tener en cuenta cuál es el uso que se da de este recurso en aquellas localidades ubicadas aguas arriba, ya que cualquier alteración ocasionada en el cauce afecta directamente a aquellos ubicados aguas abajo, así mismo existen regulaciones entre localidades que utilizan un mismo cauce para que la calidad y cantidad de agua no se vean afectadas de sobremanera. “Una gestión equitativa y sostenible del agua común requiere instituciones flexibles y holísticas, capaces de responder a variaciones hidrológicas, cambios socioeconómicos, valores de la sociedad y, especialmente en el caso de cursos de agua internacionales, cambios de régimen político”⁶.

A propósito de lo anterior existe la Gestión Integrada de Recursos Hídricos [Integrated Water Resources Management (IWRM)], que busca mantener una buena utilización de las aguas de una cuenca además de tener en cuenta la variabilidad de los recursos hídricos en el espacio y en el tiempo utilizando dos enfoques esenciales: el buen funcionamiento del sistema natural y del sistema humano. Ejemplos de medidas utilizadas para proteger la cantidad y calidad de agua de un cauce compartido son: estrategias sobre asignaciones

⁶ WATER FOR PEOPLE, WATER FOR LIFE, Executive Summary of the UN World Water Development Report, First published by the United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO), Paris, France. © UNESCO-WWAP, 2003 © UNESCO/Mundi-Prensa Libros, 2003 para la edición española



intersectoriales, barreras tarifarias y subsidios selectivos, gestión de la extracción, aplicación y cumplimiento de estándares de calidad del agua, reglamentación del funcionamiento y mantención de los embalses, gestión de embalses multiuso, gestión de sistemas que cuentan con múltiples depósitos y gestión de las emisiones de caudales de compensación en los embalses.

Desafío VI: identificar y evaluar los distintos valores del agua.

En los últimos años, al evidenciar los efectos de la escasez de agua, se ha tomado conciencia en lo que respecta a la valoración del agua en sus múltiples dimensiones, incorporando y ampliando la importancia en esferas de carácter social, ambiental y cultural. Actualmente se entiende lo trascendental que resulta optimizar la utilización del recurso lo que se logra materializar a través del diseño de sistemas donde el agua cumple múltiples funciones y la garantía y promoción de un acceso equitativo y suministro acorde a las necesidades de los usuarios.

Se ha aprendido a distinguir entre el valor del agua (beneficio sobre los usuarios), el precio del agua (carga económica para los consumidores) y el costo de suministro del agua (costo de inversión y de explotación para generación de redes de suministro de agua). Además al momento de realizar la asignación del agua a través de instrumentos económicos se debe considerar la demanda de aquellos sectores de la población con mayor necesidad y el rol que cumple en el medio ambiente, no obstante lo anterior surgen problemas al no existir una herramienta que posea la capacidad de estimar el valor social, cultural y medioambiental del agua.

En este punto se encuentra la posibilidad de crear sistemas que operen de manera eficiente en todas las esferas, y que puedan satisfacer los intereses de los actores relacionados al agua íntegramente.

Desafío VIII: El agua y la industria.

La relación del agua y la industria tiene carácter multidimensional, primeramente vale la pena destacar el consumo de agua por parte de la industria, la mantención a través de los años de un nivel de producción de la magnitud actual ha puesto en jaque la disponibilidad



de agua con la calidad necesaria para la mantención de ecosistemas y uso humano, esto debido a que el uso asociado a la industria implica aguas residuales con cargas de contaminantes cuya extracción resulta compleja. En la tabla 2 es posible verificar los volúmenes de extracción a nivel mundial y desagregado por continente, se denota un factor común en aquellos continentes con mayor cantidad de países en vías de desarrollo donde la mayor extracción es llevada a cabo por el sector agrícola en promedio un 70%, a nivel mundial, asia, américa y africa marcan esta tendencia. Por otra parte los porcentajes de uso municipal, industrial y agrícola se equiparan en aquellos continentes donde hay mayor presencia de países desarrollados como Europa y América del Norte.

	Municipal [km ³]	Municipal %	Industria [km ³]	Industria %	Agrícola [km ³]	Agrícola %	Total
Global	464	12%	768	19%	2.769	69%	4.001
América del Sur	36	17%	26	12%	154	71%	216
América del Norte	79	13%	289	47%	241	40%	609
América Central	8	24%	6	18%	20	59%	34
Asia	234	9%	253	10%	2.069	81%	2.556
Europa	69	21%	181	54%	84	25%	334
África	33	15%	9	4%	184	81%	226
Oceanía	5	20%	4	16%	16	64%	25

Tabla 2: Extracción de agua por sector a nivel global y continental. Fuente: Food and Agriculture Organization of the United Nations. <http://www.fao.org/nr/aquastat>

Los once desafíos planteados no hacen referencia sólo a escasez de agua en términos de cantidad, además existen puntos exclusivamente enfocados a la calidad de las aguas residuales tanto a nivel industrial como a nivel particular/urbano. Las aguas residuales, independiente del tratamiento que se lleve a cabo, deben cumplir normas mínimas de saneamiento antes de proceder a su devolución a los cauces naturales.



De una forma complementaria el Programa Conjunto OMS/UNICEF de Monitoreo del Abastecimiento del Agua y del Saneamiento (PM) ha establecido dentro de sus Objetivos de Desarrollo del Milenio (ODM) la reducción de la proporción de la población sin acceso a agua potable y a servicios básicos de saneamiento. Si bien se ha logrado con éxito anticipado lograr el ODM referido al acceso al agua, alcanzando cifras en que el 90% de la población mundial actualmente tiene acceso a fuentes mejoradas de agua potable, en términos de saneamiento al año 2015 todavía 2.400 millones de personas aún carecen de acceso a instalaciones de saneamiento mejoradas.

Adicionalmente, se han revelado desafíos complementarios como las desigualdades entre las poblaciones urbanas y rurales, y la crónica exclusión de los pobres de los servicios de agua y saneamiento.

1.2 SITUACIÓN EN CHILE

En el año 2010, en Chile, se modifica la institucionalidad ambiental. A través de la ley 20.417 se crea el Ministerio del Medio Ambiente, el Servicio de Evaluación Ambiental y la Superintendencia del Medio Ambiente. Dicho reordenamiento responde a necesidades de otra índole dado los desafíos que buscan posicionar a Chile como un país cada vez más cerca del desarrollo, en primera instancia se responde a una de las 52 recomendaciones de la Organización para la Cooperación de Desarrollo Económico (OCDE), a la cual desde el año 2005 el país se encuentra en proceso de acceso, dicha recomendación precisa que el país debe “consolidar los esfuerzos para producir información ambiental, informes de la situación del medio ambiente e indicadores ambientales con el fin de fortalecer la toma de decisiones y la información pública”.

Por otra parte nuestro país requiere un foco particular frente al medio ambiente, ya que además de los ya comunes y periódicos terremotos e incendios, en los últimos años el efecto del cambio climático se ha puesto en manifiesto a través de catástrofes naturales que impactan en zonas urbanas como en el caso de aluviones en zonas donde no acostumbra precipitar⁷ (región de atacama), y desertificación y escasez de agua en zonas que antes eran

⁷ Temporal del norte de Chile, marzo 2015.



impensadas⁸ (regiones del bio-bio, de la araucanía, de los ríos y de los lagos) además la agudización profunda de problemas de sequía donde ya existe crisis hídrica hace más de 10 años⁹.

La Evaluación de Desempeño Ambiental llevada a cabo por la Organización para la Cooperación de Desarrollo Económico (OCDE) en 2016 “destaca positivamente el incremento significativo del uso de energías renovables en los sistemas eléctricos; la cobertura de agua potable y la recuperación de aguas servidas; y el incremento en áreas protegidas, particularmente las reservas marinas. Sin embargo, plantea que el modelo de desarrollo, basado en la explotación de recursos naturales, con una presión continua y creciente sobre los mismos, está mostrando sus límites¹⁰”.

Esto suma a lo señalado en el apartado anterior, ya que se ratifica que la situación del agua es crítica a nivel mundial y Chile no resulta ser la excepción a pesar de contar con abundantes extensiones de recurso hídrico, ya sea en estado sólido (glaciares, campos de hielo) o líquido (lagos, fiordos, ríos).

1.2.1 Marco legal para uso de agua dulce en Chile

En Chile, el código de Aguas de 1981 se refiere al agua como un bien nacional de uso público, pero también un bien económico y por lo tanto sujeto a transacciones del mercado. Entonces, el agua es reconocida como un patrimonio colectivo de los chilenos, pero la utilización y gestión del recurso son acogidas bajo las garantías constitucionales¹¹ del derecho de propiedad y bajo los criterios del mercado. Actualmente la gestión de los derechos de agua se encuentra a cargo de la Dirección General de Aguas (DGA).

Dentro del código de aguas se establecen dos tipologías de derechos de aprovechamiento de agua, uso consuntivo y no consuntivo. El primero corresponde al consumo de aguas que no

8 Prueba de esto son los fondos PRAE de CORFO del año 2016, que tenían dentro de sus enfoques de problemas a tratar los temas de desertificación y escasez de recursos hídricos de la zona.

9 La Provincia de Petorca ha sido foco de conflicto en los últimos años donde hay familias que no tienen acceso a agua para deshacerse de sus propios desechos.

10 Boletín Misión OCDE, Julio-Septiembre 2016.

11 Las Garantías Constitucionales que resguardan este principio se incluyen en el artículo 19 N° 20: igual repartición de los tributos, N° 21: derecho a desarrollar cualquier actividad económica, N° 22: obligación del Estado y sus organismos a no discriminar arbitrariamente en materia económica, N° 23: la libertad para adquirir el dominio sobre cualquier clase de bienes, N° 24: derecho de propiedad y N° 25: derecho de propiedad intelectual e industrial.



pueden ser reutilizadas y el uso no consuntivo hace referencia a la utilización de agua para posteriormente devolverla al cauce de origen en mismas cantidades y en las mismas condiciones que fue extraída.

Desde la perspectiva tradicional, el uso consuntivo del agua se produce en industrias como la agrícola, minería y consumo humano. Por otra parte uso no consuntivo del agua es característico de industrias como la hidroelectricidad y piscicultura. En contraste con los ejemplos anteriores es válido mencionar que actualmente existen métodos que tienen la capacidad de realizar tratamiento sobre aquellas industrias indicadas como de uso consuntivo, si bien pueden no ser devueltas al cauce natural sí al ciclo del agua a través de infiltración o regadío.

1.2.2 Disponibilidad y extracción de recursos hídricos en Chile

Chile es un país que cuenta con una alta disponibilidad de recursos hídricos, los siguientes datos obtenidos de la Política Nacional para los Recursos Hídricos emitida en 2015 dan cuenta de aquello:

- 🇨🇱 8.000 km de costa.
- 🇨🇱 3.934.936 km² espacios jurisdiccionales marítimos.
- 🇨🇱 11.452 km² de lagos y lagunas.
- 🇨🇱 24.114 cuerpos de hielo.
- 🇨🇱 23.641 km² superficie estimada de glaciares.
- 🇨🇱 4.200 km² campo de hielo norte.
- 🇨🇱 13.000 km² campo de hielo sur.
- 🇨🇱 97 cuencas hidrográficas (consideradas para balance hídrico).
- 🇨🇱 34 ríos transfronterizos

A pesar del potencial hídrico esbozado en estas cifras, la gestión de los recursos hídricos requiere de elementos nuevos ya que “actualmente en Chile, luego de una fuerte explotación de las aguas subterráneas, existen varios acuíferos o sectores de acuíferos



sobreexplotado, principalmente en partes de la zona norte y centro del país y donde se han generado conflictos importantes por el recurso hídrico”¹²

La tabla 3 presenta la extracción de agua por sector para el año 2006, donde es posible observar que la gran extracción y utilización de agua corresponde al sector agrícola y dentro de este al riego de cultivos. También es posible observar que la porción de utilización de agua de nivel municipal (servicios sanitarios) representa poco más del 3%, mientras que el sector industrial alcanza el 13% lo que da luces claras de que tanto los esfuerzos a realizar como las oportunidades se centran en el sector agrícola.

Sector	Sub-Sector	Extracciones (km ³)	Porcentaje del total
Agrícola		29,42	83,0%
	Riego de Cultivos	16,52	46,6%
	Acuicultura	12,67	35,8%
	Riego de plantaciones forestales	0,12	0,3%
	Ganadería	0,10	0,3%
Industrial		4,74	13,4%
	Industrial (excluyendo minería y enfriamiento)	2,65	7,5%
	Minería	1,98	5,6%
	Enfriamiento plantas termoeléctricas	0,12	0,3%
Municipal		1,27	3,6%
TOTAL		35,43	100,0%

Tabla 3: Extracción de agua por sector y sub sector a nivel nacional. Fuente: Food and Agriculture Organization of the United Nations. <http://www.fao.org/nr/aquastat>

1.2.3 Normativa vigente referente a aguas residuales y uso para riego

¹² Delegación presidencial para los recursos hídricos Ministerio del Interior y Seguridad Pública, Enero 2015. “Política Nacional para los Recursos Hídricos 2015”



Con respecto a normativa en tratamiento de aguas residuales y su posterior utilización y descarga se listan y describen las siguientes normas y decretos bajo el marco de la legislación Chilena¹³:

NCh 1.333 Of 78, del Instituto Nacional de Normalización. Norma de Calidad para el Recurso Agua según el uso dado en el cuerpo o masa de agua usado como receptor. Establece requisitos de calidad para el uso de las aguas en riego, recreación (con y sin contacto directo), teniendo en cuenta la protección de la vida acuática y estética. Fija los límites máximos para los diferentes parámetros considerados como requisitos de calidad. Su cumplimiento se encuentra regulado tanto por la DGA, el MOP, como por las oficinas del Servicios de Salud respectivo. Las limitaciones con respecto a uso de agua para riego es la siguiente:

Clasificación	Conductividad específica (c) [μmhos/cm] a 25°C	Sólidos disueltos totales (s) [mg/l] a 105°C
Agua con la cual generalmente no se observan efectos perjudiciales	$c \leq 750$	$s \leq 500$
Agua que puede tener efectos perjudiciales en cultivos sensibles	$750 \leq c \leq 1500$	$500 \leq s \leq 1000$
Agua que puede tener efectos adversos en muchos cultivos y necesita de métodos de manejo cuidadosos	$1500 \leq c \leq 3000$	$1000 \leq s \leq 2000$
Agua que puede ser usada para plantas tolerantes en suelos permeables con métodos de manejo cuidadosos	$3000 \leq c \leq 7500$	$2000 \leq s \leq 5000$

Tabla 4: Limite de conductividad específica y sólidos disueltos totales en uso de agua para riego. Fuente: Rojas (2015).

D.S. N° 90/2000, del Ministerio Secretaría General de la Presidencia. Tiene como objetivo de protección ambiental prevenir la contaminación de las aguas marinas y continentales superficiales de la República, mediante el control de contaminantes asociados a los residuos líquidos que se descargan a estos cuerpos receptores. Con lo anterior, se logra mejorar sustancialmente la calidad ambiental de las aguas, de manera que éstas mantengan o alcancen la condición de ambientes libres de contaminación, de conformidad con la

¹³ Ley Chile, 2017.



Constitución y las Leyes de la República. Otorga la facultad de fiscalizar el cumplimiento de esta norma a la SISS, la Dirección General de Territorio Marítimo y de Marina Mercante y a los Servicios de Salud correspondiente.

D.S. N° 46/2002, del Ministerio Secretaría General de la Presidencia. Norma de Emisión de Residuos Líquidos a Aguas Subterráneas. Establece la norma de emisión que determina las concentraciones máximas de contaminantes permitidas en los residuos líquidos que son descargados por la fuente emisora, a través del suelo, a las zonas saturadas de los acuíferos, mediante obras destinadas a infiltrarlo. El espíritu de la ley considera que las aguas subterráneas representan una importante fuente de suministro de agua para las ciudades. Que otros usos importantes de las aguas subterráneas, sobre todo entre la zona central y el norte del país, son la agricultura, la industria y la minería. Sin embargo, dada la importancia vital que tiene el consumo de agua para la población, se considera de la mayor relevancia el uso para el abastecimiento de agua potable, dentro del contexto general de la explotación de las aguas subterráneas.

DS 609/98, del MOP. Norma de Emisión para la Regulación de Contaminantes Asociados a las Descargas de Residuos Industriales, Líquidos a Sistemas de Alcantarillado. mejorar la calidad ambiental de las aguas servidas que los servicios públicos de disposición de éstas vierten a los cuerpos de agua terrestres o marítimos mediante el control de los contaminantes líquidos de origen industrial, que se descargan en los alcantarillados. Con lo anterior se logra que los servicios públicos de disposición de aguas servidas dispongan aguas residuales con un bajo nivel de contaminación, protegiendo así los cuerpos de agua receptores. Corresponderá a la norma que regula las descargas de residuos líquidos a las aguas superficiales determinar la calidad del efluente del servicio público de disposición de aguas servidas.

Considerando lo anterior se debe señalar que cualquier solución asociada a la problemática del agua y sus correspondientes tratamientos deben al menos cubrir los requerimientos legales.



2 OBJETIVOS DEL ESTUDIO

OBJETIVO GENERAL

Analizar la inclusión de una tecnología sustentable en el mercado de tratamiento de aguas, a través de la revalorización de los humedales como componentes fundamentales de la biósfera, su aplicación funcional como depurador de aguas y una discusión sobre el contexto hídrico y de producción actual, con el fin de proponer factores clave para una transición hacia una visión productiva sistémica entre la naturaleza y la actividad humana.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Caracterizar situación actual hídrica del planeta y del país, levantando información sobre problemáticas ecológicas, marcos institucionales y legales con el fin de establecer un estado inicial sobre el cual se estima necesario incluir una gestión de recursos productivos innovadora y tecnologías sustentables.

Fomentar la valoración de humedales como un sistema natural biodiverso y multifuncional, precisando su importancia a nivel ecológico, social y económico para justificar su conservación, restauración y aplicación tecnológica como respuesta a la crisis hídrica.

Analizar comparativamente tecnologías existentes en el mercado de tratamiento, con humedales artificiales desde un enfoque económico, ecológico y productivo efectuando análisis cualitativos, con el objeto de diagnosticar el estado actual del mercado y realzar el valor de la tecnología propuesta.

Llevar a cabo levantamiento de factores clave, generando discusión acerca del escenario actual utilizando antecedentes y análisis anteriormente expuestos en el estudio, con el objeto de restablecer la importancia de la utilización de tecnologías sustentables para la resolución de problemáticas de la actividad humana.



3 ESTADO DEL ARTE

Dado lo anterior y centrando la atención en la estructura de uso de aguas y su posterior tratamiento, existe una oportunidad clave y atingente de generar productos o servicios que colaboren a modificar esta estructura de forma en que el agua sea utilizada de manera más eficiente e integre múltiples procesos dentro del ciclo de utilización del hombre, antes de regresar a su cauce natural y cuando esto ocurra la calidad del agua cumpla al menos con la normativa vigente. De esta forma el agua se esgrime como un bien que con diversas características y fuentes puede cumplir funciones múltiples.

3.1 REDISEÑO DE LA ECONOMÍA COMO RESPUESTA A LA CRISIS

Tradicionalmente los modelos de producción son diseñados de forma lineal en términos de elaboración y consumo, donde a partir de la extracción de una materia prima se realiza la manufacturación de un bien el cual una vez terminada su vida útil pierde su valor y los respectivos desechos son tratados como residuos o derechamente basura. Este modelo instaurado de forma masiva durante la revolución industrial ha sido mejorado o flexibilizado en las últimas décadas gracias a la introducción de tecnologías de punta o modelos como la mejora continua (kai-zen), lean management (o lean thinking), entre otros.

Sin embargo a pesar de la mejora en eficiencia de procesos y en versatilidad de productos existen nuevos paradigmas que como planteamiento central señalan que “un sistema basado en el consumo en lugar de en el uso regenerativo de los recursos conlleva a pérdidas significativas a lo largo de la cadena de valor”. Lo anterior se basa en la idea de que la reducción de recursos utilizados y de energía necesaria para la producción no integra un cambio en la lógica productiva evidenciándose en que no modifica la naturaleza finita de los recursos, por lo que retarda efectos que ya se evidencian en los ecosistemas sin cambiar el rumbo actual. Uno de los principales propulsores de este nuevo paradigma es la Fundación Ellen MacArthur (EMF) creada en 2010 con el propósito de “inspirar a una



generación a repensar, rediseñar y construir un futuro positivo. La Fundación cree que la Economía Circular entrega un marco referencial coherente para un rediseño a nivel de sistema y como tal ofrece una oportunidad de emplear innovación y creatividad para posibilitar una economía y regenerativa”¹⁴. EMF forma parte de los antecedentes y referencias detrás de la propuesta elaborada en 2014 por la Plataforma Europea para la Eficiencia de Recursos¹⁵ (EREP por sus siglas en inglés) donde se promueve la migración de la Unión Europea hacia una economía circular y eficiente en el uso de recursos a través de una serie de recomendaciones en términos de medidas y políticas a aplicar¹⁶. La investigación realizada por la Fundación Ellen MacArthur agrupa varias señales que dan cuenta del estado actual de la economía y la industria en general, se detallan a continuación:

- ✚ “Pérdidas económicas y residuos estructurales: El modelo de creación de valor de la economía actual genera una cantidad de residuos asombrosa. En Europa, el reciclaje de materias y la recuperación de energía basada en residuos capturan sólo el 5% del calor original de las materias primas. Las investigaciones han encontrado considerables residuos estructurales en sectores que muchos consideran maduros y optimizados. Por ejemplo el coche medio se pasa el 92% del tiempo aparcado, el 31% de los alimentos se desechan a lo largo de la cadena de valor y la oficina media sólo se usa entre el 35 y el 50% del tiempo, incluso durante el horario laboral.
- ✚ Riesgo de precios: Muchas empresas han empezado recientemente a darse cuenta que un sistema lineal aumenta su exposición a los riesgos, sobre todo la volatilidad de los precios de los recursos y las interrupciones del suministro. El aumento de la volatilidad de los precios de los recursos puede lastrar el crecimiento económico al incrementar la

14 Ellen MacArthur Foundation, 2012. Towards the Circular Economy: Economic and Business Rationale for an Accelerated Transition. Disponible en:

<http://www.c2ccentre.com/sites/default/files/Towardsa%20Circular%20Economy.pdf>

15 Formada en 2012. Miembros EREP (2014): Comisionado Europeo Janez Potočnik, Vice-Presidente del parlamento Europeo Antonio Tajani, Comisionados Hedegaard, Šemeta and Rehn, representantes del parlamento europeo, ministros de estado, business CEO's, academia y representantes de ONG's y de la sociedad civil.

16 European Resource Efficiency Platform, 2014. Manifesto & Policy Recommendations. Disponible en: http://ec.europa.eu/environment/resource_efficiency/documents/erep_manifesto_and_policy_recommendations_31-03-2014.pdf



incertidumbre, desalentar la inversión de las empresas y elevar el coste de la protección frente a los riesgos relacionados con los recursos. En la pasada década, la volatilidad de los precios de los metales y la producción agrícola fue mayor que en ninguna otra década del siglo XX.

- ✚ Riesgo de suministros: Muchas regiones del mundo poseen pocos depósitos naturales de recursos no renovables propios, por lo que tienen que depender de las importaciones. La Unión Europea importa seis veces más materias y recursos naturales de los que exporta. Japón importa casi todo su petróleo y otros combustibles líquidos y gas natural, e India importa aproximadamente el 80 y el 40%. Además de los riesgos para el suministro de las propias materias primas, aumenta el riesgo para la seguridad del suministro asociada a las cadenas de suministro global largas y minuciosamente optimizadas.
- ✚ Deterioro de los sistemas naturales: El conjunto de consecuencias medioambientales negativas relacionadas con el modelo lineal es un desafío fundamental para la creación de riqueza global a largo plazo. El agotamiento de las reservas de bajo coste y, cada vez más, el deterioro del capital natural están afectando a la productividad de las economías. Entre los elementos que contribuyen a estas presiones medioambientales se encuentran el cambio climático, la pérdida de biodiversidad y el capital natural, la degradación del suelo y la contaminación de los océanos.”¹⁷

Entonces, el contexto económico descrito requiere del diseño de propuestas de modelos de producción diferente al tradicional, para efectos de este trabajo se considera relevante caracterizar la economía circular (EC) como:

“aquella que es restaurativa y regenerativa a propósito, y que trata de que los productos, componentes y materias mantengan su utilidad y valor máximos en todo momento, distinguiendo entre ciclos técnicos y biológicos. Se concibe como un ciclo de desarrollo

¹⁷ Ellen MacArthur Foundation. Hacia una economía circular: Motivos Económicos para una transición acelerada. Resumen ejecutivo de la Investigación realizada por la Fundación. Disponible en: https://www.ellenmacarthurfoundation.org/assets/downloads/publications/Executive_summary_SP.pdf



positivo continuo que preserva y mejora el capital natural, optimiza los rendimientos de los recursos y minimiza los riesgos del sistema al gestionar reservas finitas y flujos renovables... Este modelo económico trata en definitiva de desvincular el desarrollo económico global del consumo de recursos finitos”¹⁸.

En la Imagen 2 se logra visualizar un esquema explicativo de la economía circular considerando tres principios que sostienen el modelo propuesto.

✚ Principio 1: Preservar y mejorar el capital natural controlando reservas finitas y equilibrando los flujos de recursos renovables. Cuando se necesitan recursos, el sistema circular los selecciona de acuerdo a ciertos criterios que permiten la elección de tecnologías y procesos que utilizan recursos renovables o de mayor rendimiento, cuando resulta posible. Una economía circular mejora también el capital natural alentando los flujos de nutrientes dentro del sistema y generando las condiciones para la regeneración, por ejemplo, del suelo.

✚ Principio 2: Optimizar los rendimientos de los recursos distribuyendo productos, componentes y materias con su utilidad máxima en todo momento tanto en ciclos técnicos como biológicos. Esto implica diseñar desde la concepción de los elementos para refabricar, reacondicionar y reciclar, de esta forma se mantienen los componentes técnicos y materiales circulando y contribuyendo a la economía. Los sistemas circulares utilizan bucles internos más estrechos (p. ej. mantenimiento en lugar de reciclaje) cuando resulta posible, preservando así mayor energía implícita y valor.

Estos sistemas maximizan también el número de ciclos consecutivos y/o el tiempo empleado en cada ciclo, aumentando la vida útil de los productos y optimizando la reutilización. Los sistemas circulares promueven también que los nutrientes biológicos vuelvan e entrar en la biosfera de forma segura para que la descomposición resulte en

¹⁸ Ellen MacArthur Foundation. Hacia una economía circular: Motivos Económicos para una transición acelerada. Resumen ejecutivo de la Investigación realizada por la Fundación. Disponible en: https://www.ellenmacarthurfoundation.org/assets/downloads/publications/Executive_summary_SP.pdf



materias más valiosas para un nuevo ciclo. En el ciclo técnico, los productos **se** diseñan deliberadamente para ser consumidos o metabolizados por la economía y regenerar el valor del nuevo recurso. En el caso de las materias biológicas, la esencia de la creación de valor consiste en la oportunidad de extraer valor adicional de productos y materias mediante su paso en cascada por otras aplicaciones.

- ✚ Principio 3: Promover la eficacia de los sistemas detectando y eliminando del diseño los factores externos negativos. Implica reducir los daños en sistemas y ámbitos como la alimentación, la movilidad, los centros de acogida, la educación, la sanidad y el ocio, y gestionar factores externos como el uso del suelo y la contaminación acústica, del aire y del agua o el vertido de sustancias tóxicas.

La imagen 2 muestra un esquema basal que identifica elementos claves del funcionamiento de la Economía Circular, donde dentro de la gestión de renovables se señala la regeneración de la biósfera y el flujo de materia prima bioquímica. Desde la perspectiva clásica o lineal, los elementos bioquímicos son tratados y desechados hacia la biósfera, se prescinde de la valoración económica de la biósfera como sostenedora del sistema de organización de la actividad humana y por lo tanto no se concibe que hay una extracción y desecho de elementos bioquímicos que interrumpen ciclos naturales que permiten la disponibilidad de estos recursos en condiciones normales. Se propone un diseño que incorpora a la biósfera dentro de los ciclos productivos, que tenga la capacidad de potenciarla, regenerarla y acoplarse a ella por sobre la idea del modelo actual que desintegra la relación entre la actividad humana y los ciclos bioquímicos del medio ambiente.

PRINCIPIO 3
Fomentar la eficiencia del sistema mediante la revelación y el descarte de las externalidades negativas

PRINCIPIO 2
Optimizar el rendimiento de los recursos, mediante la circulación de los productos, componentes y materiales en uso, a su máxima utilidad en todo momento en ambos ciclos: técnico y biológico. Palancas: Regeneración, compartir, optimización, circularidad

PRINCIPIO 1
Preservar y mejorar el capital natural, controlando los stocks y equilibrando los flujos de recursos renovables Palancas: Regenerar, dematerializar, compartir

Renovables
Recursos finitos
Regenerar
Substituir materiales
Dematerializar
Restauración
Gestión del flujo de renovables
Gestión del stock

Agricultura / cosecha / recolección¹
Biosfera
Biogas
Digestión anaeróbica
Materia prima bioquímica²
Cascadas
Recolección
Consumidor
Recolección
Usuario
Recolección
Compartir
Mantenimiento
Reuso/redistribución
Renovación/refabricación
Reciclaje
Fabricación de partes
Proveedor de productos
Fabricación de productos
Proveedor de servicios
Minimizar pérdidas y externalidades negativas

1. Caza y pesca
2. Se pueden considerar ambas fuentes de la post-cosecha y de los residuos post-consumo, como insumos para el proceso
Fuente: Ellen MacArthur Foundation, SUN, and McKinsey Centro para negocios y medio ambiente. Dibujo de Braungart & McDonough, Cradle to Cradle (C2C)

Imagen 2: Esquema Economía Circular. Fuente: Ellen MacArthur Foundation, SUN, and McKinsey Centro para negocios y medio ambiente. Dibujo de Braungart & McDonough, Cradle to Cradle (C2C).



Complementario a los ya mencionados principios existen elementos clave para realizar una caracterización íntegra¹⁹ de la economía circular o regenerativa:

- ✚ La diversidad genera solidez. Se valora la diversidad como forma de generar solidez. En muchos tipos de sistemas, la diversidad es un motor fundamental de versatilidad y resiliencia. En sistemas vivos la biodiversidad es fundamental para sobrevivir a los cambios medioambientales. Los residuos se eliminan del diseño. No hay residuos ya que son eliminados desde la concepción y el diseño de los productos o servicios. Los componentes de carácter biológicos no poseen toxicidad y pueden retornar al ecosistema mediante la aplicación de diversas técnicas que tienen por objetivo devolver la biodiversidad y riqueza en términos de nutrientes al suelo. Los componentes de carácter técnico como polímeros, aleaciones y otras materias artificiales, se diseñan para ser recuperadas, renovados y mejorados, minimizando el aporte de energía necesaria y maximizando la retención de valor (tanto en términos económicos como de recursos).
- ✚ Como todo sistema, las economías precisan de un equilibrio de varias actividades y diversos actores para permanecer sustentable y funcional a largo plazo. Las empresas grandes aportan volumen y eficiencia a través de economías de escala en la aplicación de tecnologías y metodologías, mientras que las pequeñas ofrecen modelos alternativos mediante la innovación y flexibilidad cuando hay crisis.
- ✚ Las fuentes de energías renovables impulsan la economía. La energía necesaria para impulsar la economía debe ser de carácter renovable y debe considerar todas las externalidades y costos involucrados en el proceso de generación al momento de ser evaluada su factibilidad, el objetivo es reducir la dependencia de los recursos e incrementar la resiliencia de los sistemas (a las crisis del petróleo, por ejemplo). Esto es posible debido a que el enfoque de la economía regenerativa permite establecer

¹⁹ Ellen MacArthur Foundation. Hacia una economía circular: Motivos Económicos para una transición acelerada. Resumen ejecutivo de la Investigación realizada por la Fundación. Disponible en: https://www.ellenmacarthurfoundation.org/assets/downloads/publications/Executive_summary_SP.pdf



umbrales de utilización de energía más bajos en comparación con los métodos productivos actuales.

- ✚ Pensar en «sistemas». El pensamiento sistémico es aplicado en forma general. Muchos elementos que forman parte del mundo, como empresas, personas u organismos biológicos, son sistemas complejos en los que las distintas partes se encuentran fuertemente vinculadas entre sí, lo que tiene algunas consecuencias relevantes. La economía regenerativa valoriza los vínculos de carácter sinérgico y de autoregulación como elementos de gran importancia para el funcionamiento óptimo de los sistemas en general por lo que deben ser tomados en cuenta al momento de interactuar bajo este modelo.
- ✚ Los precios u otros mecanismos de retroalimentación deben reflejar los costes reales. Bajo este enfoque los precios entregan información y, por esta razón, se deben integrar dentro de los costos totales y siempre tomar en cuenta potenciales impactos positivos o negativos. Se deben eliminar los subsidios a aquellas industrias cuya operación no considere el impacto ambiental que provoca. Se rescata la transparencia como un elemento fundamental del modelo propuesto.

Como tendencia mundial vale rescatar la EREP en su manifiesto señala que la Unión Europea no tiene mayor opción que apuntar a la transición hacia una economía circular eficiente en términos de recursos y definitivamente regenerativa. Además se realiza un llamado al declarar que tanto los futuros trabajos, la orientación de las competencias, así como también la utilización de recursos, dependen de la capacidad de agregar valor a los procesos y materias primas, que componen la elaboración de un producto²⁰.

En el mundo destacan tres casos de adopción de economía circular a través de medidas gubernamentales Alemania, Japón y China. Donde se comparte los métodos de implementación.

²⁰ European Resource Efficiency Platform, 2014. Manifiesto & Policy Recommendations. Disponible en: http://ec.europa.eu/environment/resource_efficiency/documents/erep_manifesto_and_policy_recommendations_31-03-2014.pdf



Por su parte la OCDE propone un nuevo enfoque enmarcado dentro de la Estrategia de Crecimiento Verde lanzada en el año 2012 señalando que es posible guiar hacia un crecimiento sostenido con oportunidades de negocio a través de toda la economía. Angel Gurría, Secretario General de la OCDE define el concepto y señala lo siguiente:

“Crecimiento verde significa fomentar el crecimiento y el desarrollo económicos y al mismo tiempo asegurar que los bienes naturales continúen proporcionando los recursos y los servicios ambientales de los cuales depende nuestro bienestar. Para lograrlo, debe catalizar inversión e innovación que apunten al crecimiento sostenido y abran paso a nuevas oportunidades económicas.

Necesitamos el crecimiento verde porque los riesgos para el desarrollo van en aumento a medida que el crecimiento continúa erosionando el capital natural. Si tal situación no se controla esto significaría una mayor escasez de agua, un creciente estrangulamiento de los recursos, una mayor contaminación, cambio climático y una pérdida irreversible de la biodiversidad.”²¹

3.2 ECONOMÍA CIRCULAR EN EL MUNDO

Actualmente el modelo lineal extrae cerca de 65 mil millones de toneladas de materia prima al año. Según el Foro Económico Mundial, un 80% de ésta acaba como residuo, significando una pérdida irrecuperable de U\$ 2.6 trillones cada año.

El bajo rendimiento en este sentido ha significado un mejor posicionamiento de las ideas que rondan un modelo económico circular en grandes economías como la de la Unión Europea, Japón y China.

3.2.1 Economía Circular en la Unión Europea

El viejo continente ha querido liderar los procesos de migración hacia economía circular y ha establecido políticas para alcanzar las siguientes metas²²:

²¹ OCDE, 2011. Hacia el Crecimiento Verde. Un resumen para los diseñadores de políticas. Disponible en: <https://www.oecd.org/greengrowth/49709364.pdf>

²² “La eficiencia de los recursos y los residuos”, Fichas técnicas sobre la Unión Europea - 2017. Disponible en: http://www.europarl.europa.eu/ftu/pdf/es/FTU_5.4.6.pdf



- ✚ Reciclar el 65% de los residuos urbanos y un 75% de los residuos de envases para el año 2030.
- ✚ Reducir el depósito en vertederos al máximo del 10% de los residuos municipales para 2030
- ✚ Prohibición del depósito en vertederos de los residuos recogidos por separado.
- ✚ Fomento de instrumentos económicos para disuadir el depósito en vertederos.
- ✚ Definiciones simplificadas y mejoradas y métodos de cálculo armonizados para las tasas de reciclaje.
- ✚ Medidas concretas para promover la reutilización y estimular la simbiosis industrial (convertir el subproducto de una industria en la materia prima de otra).
- ✚ Incentivos económicos para que los productores comercialicen productos más ecológicos y apoyo a los regímenes de recuperación y reciclado (para envases, baterías, equipos eléctricos y electrónicos, y vehículos, por ejemplo)

Además la fundación Ellen MacArthur establece que la economía circular podría ahorrar a los fabricantes europeos cerca de U\$ 630 mil millones anuales para el año 2025 en los costos de material, que también conduce a la creación de más de dos millones de puestos de trabajo. Por otra parte Club of Rome²³ ha realizado múltiples estudios de beneficios sociales y económicos que se desprenden del hecho de migrar a un enfoque con economía circular, entre ellos²⁴:

Finlandia, migrar a una economía circular implicaría disminuir las emisiones de carbono en cerca del 70% para 2030. Las ganancias en términos de empleo se estiman en el rango de 75.000 trabajos adicionales.

Francia, emisiones de CO₂ disminuirían en dos tercios y la creación de empleos estaría en el rango de medio millón de empleos.

²³ Club de Roma: ONG fundada en 1968, responsable de múltiples estudios de interés ambiental y social, reconocida internacionalmente. De sus informes más conocidos es “The limits to growth”.

²⁴ “The circular economy and Benefits for Society, Jobs and Climate Clear Winners in an Economy Based on Renewable Energy and Resource Efficiency” 2016, Anders Wijkman and Kristian Skånberg. Disponible en: <https://www.clubofrome.org/wp-content/uploads/2016/03/The-Circular-Economy-and-Benefits-for-Society.pdf>



Holanda, situación similar se estima una reducción significativa en las emisiones de CO₂ y 200.000 nuevos empleos.

España, reducción del 60% - 70% de las emisiones de carbono y beneficios laborales en 400.000 puestos de trabajo.

Suecia, misma estimación en reducción de emisiones (dos tercios) y un aumento en 100.000 empleos representando casi el 3% de la fuerza laboral del país.

3.2.2 Economía circular en Asia

Japón busca una adaptación debido a su escasez de recursos naturales, adoptando un nuevo enfoque. China debido a su enorme consumo de recursos ha establecido nuevas estrategias y políticas. De esta forma ambos países han iniciado transiciones que se traducen en lo siguiente:

Japón: Ajustes estructurales para reducir la dependencia del petróleo, mejorando la eficiencia energética en las industrias. Legislación de las políticas ambientales, el establecimiento de un sistema jurídico global y la regulación de la gestión de residuos. El aumento de la participación social a través de campañas de educación y concientización pública. Como resultado la tasa de reciclaje en Japón es del 98%. En 2007, sólo el 5% de los residuos llegaba a los vertederos. Hoy la mayoría de los aparatos electrónicos son reciclados y hasta el 89% de los materiales que los componen son recuperados.

China: La creación de la ley de producción limpia en 2003. El compromiso de inversión de U\$ 1,2 millones en ciencia y tecnología para el desarrollo sustentable. La adopción de la ley de promoción de economía circular en 2009, que instauró un plan de tratamiento de residuos sólidos urbanos, ahorro de energía y la reducción de la tasa de emisiones. Beijing logró una reducción del 62% en el consumo de energía por PIB en 2010; un aumento del 45% en la tasa de reúso de aguas residuales tratadas; y una reducción del 45% en el consumo per cápita en 2005.



3.3 ECONOMÍA CIRCULAR EN CHILE

Fundación Chile ha liderado la introducción del modelo de economía circular en Chile, en su plataforma web dedicada a la economía circular es posible leer sobre 12 casos, ya sean iniciativas o empresas, que han tomado el enfoque de economía circular para desarrollar su modelo de negocio, sus productos o parte de sus procesos entre estas iniciativas destaca²⁵:

Neptuno pump: Empresa originaria de Iquique que ha tomado medidas sobre la cadena de valor de sus productos y se hace cargo de su uso posterior. El 60% de sus productos son fabricados con materiales reciclados por sus procesos de remanufactura de equipos. Además busca optimizar el uso de los recursos con la incorporación del ecodiseño y la meta de fabricar el 90% de las piezas con insumos reciclados en cinco años. Neptuno Pumps diseña y fabrica soluciones de bombeo energéticamente eficientes para el sector minero de la mano de reparación y reutilización de bombas dañadas, dicho proceso reduce los desechos en hasta un 75% además de disminuir las emisiones de carbono. Empresa reconocida con el premio “The Circulars” en 2016 realizado en el marco del World Economic Forum en Davos, Suiza y contó con la participación de los máximos exponentes de la economía circular en el mundo como Ellen MacArthur.

Humedal Artificial en La Ligua: En una de las comunas con situación hídrica crítica tanto en abastecimiento de agua potable como en acceso para agua de riego se ha emplazado un humedal artificial para tratamiento de aguas grises de la escuela Carlos Ariztía que permite reutilizar dichas aguas para riego del establecimiento educacional. Este humedal artificial permite que las aguas residuales sean tratadas mediante microorganismos que crecen en las raíces de las totoras, alimentándose de los compuestos orgánicos que puedan contener las aguas y, del mismo modo, son filtradas por una gravilla. Una vez lista esa fase, las aguas son desinfectadas, obteniendo parámetros aptos para la utilización en el riego. La escuela Carlos Ariztía de La Ligua consume alrededor de 6 mil litros de agua por día. Con esta iniciativa se espera recuperar 3 mil litros del recurso, a través del reúso. En otras palabras, el sistema logra usar las aguas grises utilizadas en los lavamanos, duchas y cocina para luego aplicarlas en el riego del colegio.

²⁵ Casos disponibles en : <http://www.economiacircular.fch.cl/casos>



Estudio de Reúso de aguas en Valparaíso: La sequía afecta agudamente al sector doméstico y productivo de la Región, en este escenario se llevó a cabo un estudio que propone aprovechar las aguas residuales que se arrojan al mar vía emisarios submarinos, sometiéndolas a tratamientos de limpieza. Como resultado general, el estudio determinó que se lograría abastecer al menos un tercio de la necesidad hídrica regional de los principales sectores productivos -sin considerar las restricciones legales-, si se reusara la totalidad de las aguas residuales tratadas. El análisis proyecta que la implementación de la iniciativa tendría un impacto en el PIB regional de hasta un 13% y una generación de hasta 83 mil empleos por el incremento de desarrollo de bienes en los sectores minería, industria y agricultura. Entre los impactos del proyecto está la generación de insumos, herramientas y metodologías para una política de reúso a nivel nacional, además de ser una propuesta alternativa para la falta de agua. Alineado con la economía circular, los sistemas de reúso buscan sacar el mayor provecho de un insumo para evitar la explotación desmedida de recursos. Al mismo tiempo, hace un llamado colaborativo para la distribución del recurso en los distintos sectores productivos de la localidad. Esta iniciativa contó con el financiamiento del Fondo de Innovación para la Competitividad (FIC-R) de la Región de Valparaíso y el apoyo de múltiples entidades público- privadas nacionales y regionales.

Como es posible apreciar la economía circular es perfectamente aplicable a la situación actual del país y responde a problemáticas reales como la crisis hídrica. Incluso dentro de los casos destacados ya existe como alternativa de tratamiento de aguas residuales la implementación de humedales artificiales, con la reutilización del agua tratada en riego.

3.4 ECONOMÍA CIRCULAR Y AGUA

Con respecto a la aplicación de este tipo de modelo en la industria de agua, se señalan como bases de la economía circular (Abu-Ghunmi et al., 2016):

- ✚ Diseño de productos, que agregue los ejes de la EC, otorgando valor al producto final desde la generación de sus componentes, esto implica incorporar al diseño conceptos como: durabilidad, renovabilidad y desmaterialización.



- ✚ Nuevos Modelos de Negocios, que presente dentro de sus objetivos la real valorización de los ecosistemas y sus servicios, de esta forma la regeneración, resiliencia y reutilización sean pilares del negocio.
- ✚ Redes de Manejo de Residuos construidas y operativas que permitan la recolección, reutilización, reciclaje de aquello que sea considerado como desecho pre y post utilización de un producto.
- ✚ Capacidad y condiciones propicias, se trata en el apartado de factores claves para la conservación, restauración y utilización de humedales. En particular aquellos factores bajo las perspectivas ecológica y económica y socio-política,

El principal beneficio de realizar tratamiento de aguas residuales resulta de evitar las consecuencias ambientales de la introducción de un exceso de Nitrógeno (N), Fósforo (P), Materia Orgánica y Sólidos Suspendedos Totales en cuerpos de agua usados como receptor (Hernández-Sancho et al., 2010), lo anterior incorporando costos sociales y ambientales a través del cálculo de precio sombra para la realización de un análisis costo-beneficio. El impacto ambiental evitado se relaciona con el exceso de nutrientes en el agua lo que produce eutrofización y anoxia en cuerpos de agua que sean utilizados como receptores.

Además la realización de tratamiento permite disminuir la presión existente sobre las fuentes de agua dulce y, en caso de aplicar la economía circular, los residuos extraídos de las aguas residuales tienen potencial como materia prima en procesos de elaboración de nuevos productos como por ejemplo biofertilizantes, generando así círculos cerrados en el sector agrícola.

El agua residual se transforma en un recurso no convencional ya que, además de la reutilización como recurso hídrico, se rescata su potencial energético y composición química al contener elementos necesarios para la vida como lo son el nitrógeno, el fósforo y materia orgánica. Si bien la re-utilización o descarga cero es ideal, no es siempre posible, por lo que se debe llevar a cabo un tratamiento que responda a los principios de la



economía circular o regenerativa.

Dado lo anterior el diseño de productos/servicios que posean un fin de restauración y elevación de valor de los desechos (sobre todo humano) aplicado al tema hídrico, genera una oportunidad no solamente de solucionar una problemática cumpliendo la norma establecida, sino que se enmarca en un contexto de cambio mundial que lidera en este momento la unión europea con la proposición de repensar el objetivo de la producción ampliando el punto de vista netamente antropocéntrico y considera la inclusión del bienestar del medio ambiente en conjunto con lo social, todo bajo una mirada sistémica integral.

Tomando en cuenta lo expuesto en los apartados anteriores el siguiente trabajo presenta la opción de realizar tratamientos de agua a través de humedales artificiales como un servicio que cumple de manera íntegra con el enfoque de una economía circular y como respuesta a la problemática de escasez de agua por deterioro de sistemas naturales y por el exceso de utilización sobre todo en la industria agrícola.

Propuesta la solución se procede a establecer caracterizaciones y puntos clave sobre el principal componente del sistema de tratamiento: el humedal.

4 HUMEDALES ARTIFICIALES COMO MÉTODO DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

4.1 ¿QUÉ ES UN HUMEDAL?

El artículo 1 de la Convención Ramsar señala que “los humedales son áreas de pantano, mallines, turberas o agua, ya sean naturales o artificiales, permanentes o temporales, con



agua estancada o en movimiento, dulce o salada, incluyendo áreas marinas cuya profundidad en marea baja no exceda los seis metros”.²⁶

Por consiguiente, de la forma en que está definido por la convención, los humedales incluyen una amplia variedad de hábitats continentales tales como los pantanos, turberas, terrenos inundables, ríos y lagos, y áreas costeras tales como salares, manglares, marismas intermarinas y praderas de algas, además de arrecifes de coral y otras áreas con profundidad hasta los 6 metros en marea baja, también incluyendo humedales hechos por el hombre como represas, reservas, arrozales y lagunas y estanques de tratamiento de aguas residuales.

Al resguardarse bajo esta definición todo tratamiento de aguas que corresponda a la replicación de un sistema natural posee un potencial de ser protegido por el convenio RAMSAR y de ser potenciado como una medida que soluciona una problemática cumpliendo los principios o características de la economía regenerativa o crecimiento verde, por lo que existe una respuesta integral a la crisis hídrica y ambiental ya descrita en capítulos anteriores

4.2 CONVENIO INTERNACIONAL RAMSAR

La convención sobre humedales (Ramsar, Irán, 1971) es un tratado intergubernamental cuya misión es “la conservación y uso prudente de todos los humedales, a través de acciones locales y nacionales y cooperación internacional, como una contribución para lograr desarrollo sustentable en todo el mundo”. A enero del 2016, 169 naciones se han unido a la Convención, y más de 2.220 humedales alrededor del mundo, cubriendo más de 214 millones de hectáreas, han sido designados para ser incluidos en la Lista de Humedales Ramsar de Importancia Internacional²⁷.

No obstante lo anterior y a pesar de ser Chile uno de los países adscritos al convenio internacional Ramsar actualmente sólo el 2% de los humedales en Chile se encuentra

²⁶ An Introduction to the Ramsar Convention on Wetlands, 7th ed. Ramsar Convention Secretariat, Gland, Switzerland.

²⁷ An Introduction to the Ramsar Convention on Wetlands, 7th ed. Ramsar Convention Secretariat, Gland, Switzerland.



protegido²⁸ en términos de superficie. Donde 1.460.400 hectáreas de pantanos, lagos, turberas, lagunas dulces y altiplánicas se encuentran bajo la categoría de humedal en Chile totalizando cerca de 18 mil humedales, implicando que el 1,93% de la superficie nacional está concentrada en humedales.

La mayor área ocupada por estos ecosistemas se encuentra en las regiones de Aysén con 444.200 hectáreas, luego Magallanes con 288.600 hectáreas y en Los Ríos con 129.300 hectáreas. Por otra parte 29.500 hectáreas de humedales se concentran en la isla de Chiloé siendo una de las zonas donde ha habido mucho crecimiento inmobiliario en lugares cercanos a humedales ejerciendo presión sobre ellos. Similar es el caso de la V región donde existen 6.600 hectáreas de estos ecosistemas y es la región con menor superficie y más presión inmobiliaria sobre la costa.

4.3 RASGOS DISTINTIVOS DE LOS HUMEDALES

Los humedales son ecosistemas con gran importancia para muchos sistemas biológicos entre ellos la humanidad, a continuación se indican características en relación con la actividad humana así como en relación con medio ambiente²⁹:

Ecosistemas acuáticos integrados a cuencas hidrográficas, mantienen la vida alrededor de corredores biológicos de gran extensión.

Mantienen economías locales al prestar bienes y servicios a las especies que los habitan, esto los convierte en un medio productivo para muchas especies a la vez, generando biodiversidad. La biodiversidad dentro de los conceptos de economía circular está relacionada fuertemente con la resiliencia y la capacidad de adaptarse a cambios.

²⁸ Todos los datos entregados sobre superficie de humedales y porcentajes corresponden al Catastro realizado por el Ministerio de Medio Ambiente año 2016.

²⁹ El siguiente listado de rasgos distintivos corresponde a elaboración propia tras revisión del Informe de inventario de Humedales llevado a cabo por Ministerio del Medio Ambiente (MMA) en 2011, la "estrategia regional de conservación y uso sostenible de los humedales altoandinos". Publicado por: Convención de Ramsar, Gobiernos de Ecuador y Chile, CONDESAN y TNC-Chile, 2008.



En particular para la actividad humana también han resultado ser proveedores desde siglos de alimento, refugio, asentamientos ganaderos y agrícolas, obtención de agua fresca y en la actualidad de áreas con potencial turístico y potencial de generación eléctrica.

Son reservorios naturales de aguas, también llamadas esponjas vegetales y proporcionan recarga a napas freáticas fuentes de agua subterránea.

Protegen asentamientos humanos ya que previenen inundaciones al absorber las aguas provenientes de las lluvias, deshielos y crecidas de río aguas arriba. Y aguas abajo mitigan de forma importante daños ante marejadas y maremotos. También regulan el cambio climático al ser grandes masas de agua.

Son estaciones de paso para especies migratorias que resultan de gran importancia para mantener los ciclos naturales de desplazamiento de estas especies, donde por ejemplo incluso muchas aves nidifican. Además presentan altos niveles de endemismo a nivel vegetal y animal.

Importantes almacenes de carbono en forma de nutriente, entregando materia orgánica a los suelos y generando restauración y enriquecimiento de éstos.

Son depuradores naturales, la vegetación existente en este tipo de ecosistemas tiene la capacidad de realizar fitodepuración y filtración incluso de afluentes provenientes de asentamientos urbanos, sin embargo la presión proveniente de parte de la actividad económica y productiva humana en las últimas décadas ha disminuido la capacidad de muchos de los sistemas. A raíz de esto se presenta la oportunidad de replicar la acción de los humedales para potenciar los beneficios holísticos presentes en este particular sistema biológico.

Complementando lo anterior se agrega la tabla 4 que proporciona información acerca de los servicios ecosistémicos que proporcionan los humedales³⁰, algunas de estos suministros se relacionan directamente con los rasgos distintivos de los humedales:

³⁰ Tabla utilizada en “MMA - Centro de Ecología Aplicada. 2011. Diseño del inventario nacional de humedales y el seguimiento ambiental. Ministerio de Medio Ambiente. Santiago. Chile.164 pp.”



Suministros de Servicios	Regulación de Servicios	Servicios Culturales
Productos obtenidos desde los ecosistemas	Beneficios obtenidos de los procesos de regulación de los ecosistemas	Beneficios no Materiales obtenidos de los ecosistemas
· Alimento · Agua potable · Combustible · Fibra vegetal · Bioquímicos · Recursos genéticos	· Regulación de clima · Control de enfermedades · Regulación del agua · Polinización	· Espirituales y religiosos · Recreación y turismo · Estético · Inspiracional · Educativo · Sentido de identidad · Patrimonio cultural
Servicios de Soporte Servicios necesarios para la producción de todos los otros servicios del ecosistema Formación de Suelos Ciclado de Nutrientes Producción Primaria		

Tabla 5: Servicios ecosistémicos proporcionados por los humedales. Fuente: Ecosistemas del Milenio

Se debe considerar al momento de comenzar a trabajar con humedales que al ser catalogado un sitio como Ramsar se logra mayor visibilidad para el país en términos de reconocimiento internacional y oportunidades económicas, ya que existen múltiples plataformas para lograr financiamiento y apoyo político si se tiene por objetivo potenciar actividades relacionadas a los humedales. Por parte del gobierno también se han dado señales en especial desde la Corporación Nacional Forestal (CONAF) donde actualmente existe un plan de manejo en conservación y restauración de humedales y la emisión de instrumentos para financiamiento de proyectos directos y específicos en conservación de humedales

4.4 TRATAMIENTOS DE AGUAS RESIDUALES ACTUALMENTE EN CHILE

4.4.1 Generalidades sobre el tratamiento de aguas de carácter residual

Aguas residuales o servidas son aquellas que se producen a partir del uso doméstico o industrial del recurso hídrico. Habiendo sido parte de procesos anteriores se catalogan de residuales, pues no pueden ser reutilizadas sin ser sometidas a un tratamiento previo. De



esta forma se garantiza que aquellos componentes presentes en este tipo de aguas no dañen ni perjudiquen personas o procesos que hagan uso o posean interacción con aguas de estas características.

Los principales contaminantes comúnmente presentes en aguas residuales y que deben ser considerados al momento de diseñar tratamientos que busquen la reutilización del recurso hídrico independiente de su origen son:

Materia Orgánica: Compuestos químicos orgánicos susceptibles a procesos de oxidación de manera natural. Dichos procesos agotan la presencia de oxígeno disponible en el medio provocando desequilibrios para el ambiente y para quien interactúe con aguas que contengan una alta concentración de materia orgánica en su composición.

Agentes Patógenos: Microorganismos presentes en aguas servidas que transmiten o generan enfermedades.

Nitrógeno y Fósforo: Elementos que poseen un rol significativo en el deterioro de masas acuáticas. Al favorecer el crecimiento de plantas, su excesiva presencia genera desequilibrios en aquellos ecosistemas en que se vierten o infiltran este tipo de aguas.

Aceites y grasas: Sustancias que no se disuelven en el agua al estar compuestas por moléculas de carácter hidrofóbico, a pesar de encontrarse presentes en pequeñas cantidades pueden ocupar gran parte de la superficie de las masas acuáticas formando natas y espumas. Además disminuyen el oxígeno disuelto en el agua y perjudican su producción al afectar en el proceso de fotosíntesis.

Los parámetros descritos a continuación se utilizan para medir la presencia de estos contaminantes en el agua:

 **DBO:** La demanda bioquímica de oxígeno, indica el contenido de materia orgánica en aguas servidas. Corresponde a la cantidad de oxígeno disuelto consumido por las bacterias que realizan la degradación biológica de la materia orgánica.



- ✚ SST: Sólidos suspendidos totales, indican el contenido de materia en suspensión en las aguas, se consideran sólidos suspendidos a aquellos elementos con diámetro por sobre los 2 [μm].
- ✚ NKT: Nitrógeno Kjeldahl es la suma del nitrógeno orgánico y el nitrógeno amoniacal. La principal fuente de nitrógeno en aguas domésticas corresponde a la orina.
- ✚ Fósforo: Posee una componente orgánica y una inorgánica. Su presencia se explica mayoritariamente por el uso de detergentes.
- ✚ Conductividad específica: Parámetro utilizado para medir las condiciones de salinidad de las aguas, corresponde a la medida de la capacidad de una sustancia para conducir la corriente eléctrica.
- ✚ Coliformes fecales: La concentración de estas sustancias presentes en aguas residuales corresponde a los desechos humanos (heces, orina, sangre), donde se encuentran agentes patógenos.

Existe una descripción general de aquellos métodos que conforman un tratamiento de aguas residuales y comprenden procesos químicos, físicos y biológicos. Tienen por objetivo reducir la cantidad de contaminantes presentes en este tipo de aguas de acuerdo con las normas vigentes. Se procede a definir los procesos que componen un sistema de tratamiento (Pizarro, 2011):

Tratamiento preliminar: Consiste en la remoción de elementos de mayor tamaño y de aquellos que pudieran provocar problemas en la operación de los equipos y/o unidades de proceso ubicadas aguas abajo. Está constituido por rejillas, desarenadores y desengrasadores. Estos remueven elementos flotantes, grasas, trapos, ramas, arenas.

Tratamiento primario: Tiene por objetivo la remoción de sólidos suspendidos sedimentables además de grasas, aceites y flotantes (sólidos más livianos que el agua) no removidos en



etapas anteriores. El proceso se realiza en grandes estanques denominados sedimentadores o clarificadores primarios, bajo condiciones relativamente estáticas y generalmente de flujo horizontal. Esta unidad típicamente de forma circular o también rectangular puede no existir, especialmente en plantas de lodos activados pequeñas que operan en la modalidad de aireación extendida.

Tratamiento secundario: Incluye procesos de coagulación y remoción de sólidos orgánicos y coloidales no sedimentables y la estabilización de la materia orgánica presente. Algunos compuestos son más difíciles de degradar y en algunos casos no pueden ser oxidados biológicamente. El proceso biológico es capaz de remover sólo la fracción biodegradable de la materia orgánica presente y no debe considerarse como sustituto del tratamiento preliminar debido a que apuntan a objetivos distintos. El tratamiento secundario está compuesto por un reactor biológico, un estanque de sedimentación secundaria y finalmente un tanque de desinfección. Existe una variedad de reactores biológicos que se diferencian entre ellos, en aspectos microbiológicos, cinética de reacción, condiciones de temperatura y clima, entre otros factores.

Tratamiento terciario o avanzado: Dirigido a la reducción final de la DBO, metales pesados y/o contaminantes químicos específicos y la eliminación de patógenos y parásitos.

4.4.2 Sistemas de tratamiento utilizados.

Quienes realizan la labor de extracción, potabilización, distribución y tratamiento de aguas en zonas urbanas son las empresas sanitarias. Actualmente existen diversas tecnologías para realizar tratamiento, de acuerdo al informe de gestión de la Superintendencia de Servicios Sanitarios (SISS), las tecnologías utilizadas en plantas de tratamiento de aguas residuales provenientes de zonas urbanas son las siguientes:

- **Lodos Activados:** Esta tecnología consiste en un tratamiento aerobio de cultivo en suspensión. Hoy en día es el proceso de tratamiento con mayor utilización, se destaca por consumir grandes cantidades de energía, generar efluentes de gran calidad y gran cantidad de biosólidos. Posee costos operacionales altos en comparación con otros



métodos de tratamiento secundario debido al suministro de oxígeno molecular al proceso vía difusores o aireadores de carácter mecánico (Bustamante, 1999). Vía lodos activados se genera biomasa microbiana al provocar la oxidación de la materia orgánica presente en las aguas residuales. Existen diferentes maneras de ejecutar tratamiento de aguas residuales vía lodos activados, sin embargo dos modalidades destacan debido a su mayor aplicación en plantas de tratamiento y estas son la Aireación Extendida y Reactor Discontinuo Secuencial (o Sequencing Batch Reactor, SBR):

- Aireación Extendida: Se lleva a cabo con baja concentración de materia orgánica por volumen de reactor y con tiempos de retención de larga duración. El tiempo de retención permite prescindir de sedimentación y la digestión de los lodos en el estanque de aireación y no de forma separada. Dado lo anterior es requerido un gran volumen en el estanque de aireación y gran consumo de oxígeno.
- Reactor Discontinuo Secuencial (SBR): Consiste en un único reactor que involucra todos los procesos de lodos activados. Posee mayor adaptabilidad que la modalidad de aireación extendida pudiendo operar de manera óptima ante variaciones de caudal o alta carga orgánica, incluso puede ser configurado para operar de igual manera que con aireación extendida.

✚ Tratamiento vía lagunas: Una laguna es un reactor de crecimiento suspendido, sin recirculación y la gran inversión económica corresponde al uso de la tierra, en operación, capacitación y mantenimiento los costos son mínimos en comparación con otros tratamientos. Los efluentes emitidos son considerados satisfactorios, cumpliendo las normas vigentes. Según el grado de mezcla y el tipo de aireación son clasificadas como:

- Lagunas aireadas: Corresponde a un sistema aerobio de cultivo en suspensión. Se encuentran compuestas por aireación mecanizada o difusora y la mezcla puede ser completa o parcial. En caso de existir recirculación de los biosólidos generados el sistema funciona de forma similar al de Lodos Activados con Aireación Extendida.
- Lagunas facultativas o de estabilización: Estanques de poca profundidad donde el contenido de oxígeno es relativo a la profundidad. El estanque posee un estrato



superior de carácter aeróbico donde el oxígeno es suministrado por fotosíntesis de las algas existentes en la superficie y por aireación atmosférica, un estrato inferior de carácter anaeróbico donde los sólidos depositados son descompuestos debido a la fermentación anaeróbica realizada por bacterias y en el estrato intermedio una zona parcialmente aeróbica y anaeróbica, donde la descomposición de residuos orgánicos la llevan a cabo bacterias facultativas. Prácticamente no genera lodos (Pérez, 2010).

✚ Emisario Submarino: No clasifica como un método de tratamiento, más bien como un método de efusión de aguas servidas. A pesar de lo anterior es una de las tecnologías de “tratamiento” de aguas residuales más utilizada en Chile. Corresponde a una tubería de gran longitud donde se lleva a cabo tratamiento primario y dilución para disminuir la presencia de coliformes, su función es disponer las aguas provenientes de sistemas de alcantarillados en cuerpos de agua a una distancia que no favorezca la contaminación de aguas naturales cercanas a la costa. Para efectos de comparación con tecnologías de tratamiento no se considera esta metodología, ya que no se alinea con la argumentación del presente trabajo

✚ Desinfección³¹: Utilizado para cumplir con la calidad microbiológica exigida para efluentes, para dichos efectos existe la posibilidad de llevar a cabo los procesos de desinfección mediante dos mecanismos:

Inactivación de microorganismos, se obtienen microorganismos sin capacidad reproductiva. Ejemplos de inactivación son:

- Radiación ultravioleta (UV)
- Cloración
- Ozonización

Eliminación de microorganismos, se separan los organismos del efluente sin necesidad de inactivarlos. Con respecto a la reducción de microorganismos las técnicas más utilizadas son:

- Filtración con membrana

³¹ “Plantas de tratamiento de aguas servidas – Desinfección”, NCh 3218. Instituto Nacional de Normalización (2009).



- Balsas para la maduración del efluente
 - Filtración en el terreno
- ✚ Biodisco: Consisten en una serie de discos, situados sobre un eje a corta distancia unos de otros. Los microorganismos se adhieren sobre la superficie de los discos hasta formar una película biológica (o biofilm) sobre la superficie mojada de los mismos. La rotación de los discos pone la biomasa en contacto, de forma alternativa, con la materia orgánica presente en el agua residual y con la atmósfera, para la absorción de oxígeno. La rotación es el mecanismo de eliminación de exceso de sólidos en los discos y sirve para mantener en suspensión los sólidos arrastrados, de modo que puedan ser transportados desde el reactor hasta el clarificador.
- ✚ Lombrifiltro (Pizarro, 2011): Sistema conformado por distintos estratos filtrantes inertes y orgánicos. En el estrato superior se tiene una alta densidad de lombrices y microorganismos encargados de efectuar la degradación de la materia orgánica presente en las Aguas Servidas Doméstica y Residuos Industriales Líquidos. Sistema que consiste en percolar las aguas servidas domésticas a través de un medio filtrante compuesto de aserrín o viruta en el cual se encuentra una gran cantidad de lombrices. La materia orgánica que queda retenida en el medio filtrante es removida por la acción de las lombrices junto con otros microorganismos presentes. Las lombrices, luego de digerir la materia orgánica, producen a través de sus deyecciones el denominado humus de lombriz, considerado abono orgánico para el suelo de alta calidad.
- ✚ Biofiltro (Metcalf & Eddy, 1985): También denominados filtros percoladores o filtros biológicos consisten en un lecho compuesto de material de soporte de diversas formas. La población microbiana (bacterias, hongos, protozoos, rotíferos y macro invertebrados) se adhiere a este lecho fijo, formando biofilms y degrada la materia orgánica de las aguas servidas a medida que éstas percolan hacia el fondo del estanque. El medio filtrante puede estar formado por piedras o diferentes materiales plásticos de relleno. Cuando los microorganismos crecen, aumenta el espesor de la película y el



oxígeno se consume antes de que pueda penetrar todo el espesor del biofilm, de esta forma se crea un ambiente anaerobio en la proximidad de la superficie.

- ✚ Biodigestor: Utilizado mayormente para la descomposición de desechos orgánicos. Corresponde a un contenedor herméticamente sellado que recibe el nombre de reactor. Dentro del reactor se depositan desechos de carácter orgánico como desechos vegetales, desechos frutales o el agua residual con alto contenido de materia orgánica. El proceso de fermentación anaeróbica que ocurre en el reactor al actuar sobre los desechos orgánicos produce una mezcla de gases con gran concentración de metano llamada biogás, que puede ser utilizado como combustible. Disminuye la DQO y DBO de las excretas de origen humano y animal.

- ✚ Fosa Séptica (Rojas, 2015): Sistema más conocido y comúnmente aplicado donde no existe red de alcantarillado, es una solución pensada para cumplir con las necesidades individuales o de pequeñas comunidades (hasta 350 personas). Son tanques prefabricados que ofician como tanque combinado de sedimentación, desengrasado y almacenamiento de lodos, los cuales se digieren en el fondo por digestión anaeróbica, sin mezcla ni calentamiento. El proceso consiste en que los sólidos sedimentables que se encuentran en el agua residual cruda forman una capa de lodo en el fondo de la fosa séptica, las grasas, aceites y material ligero tienden a acumularse en la superficie donde forman una capa flotante de espuma en la parte superior. El agua, exenta ya de sólidos, es extraída de la fosa e infiltrada en el suelo por medio de un pozo absorbente o drenes de filtración. Si bien la descomposición anaeróbica reduce el volumen del material sólido depositado en el fondo del tanque, siempre existe una acumulación neta de lodo, por lo que es necesario realizar una extracción periódica del contenido del tanque. Generalmente las fosas sépticas poseen doble compartimiento. El objetivo del doble compartimiento es disminuir la descarga de sólidos en el efluente. Los efluentes del sistema pueden destinarse a disposición en campos de infiltración o ser sometidos a una unidad de tratamiento complementario según se requiera.



4.4.3 Sistemas de tratamiento utilizados en zonas Urbanas

Con respecto a la presencia de dichos sistemas en plantas de tratamiento por parte de las sanitarias en zonas urbanas se tiene lo siguiente: De las 290 plantas de tratamiento de aguas servidas 173 se llevan a cabo a través de Lodos Activados alcanzando la mayor presencia con el 60%. La segunda tecnología más usada son los sistemas de Lagunas Aireadas con 56 plantas que corresponden al 19%. Con el 11% el tercer sistema con mayor utilización corresponde a Emisarios Submarinos esto corresponde a 33 plantas de tratamiento. El resto de tecnologías se encuentran presentes en cerca del 10% y la información detallada es señalada en la tabla 4 y la imagen 5.

Tecnologías en Plantas de tratamiento	Cantidad	Porcentaje
LODOS ACTIVADOS	173	60%
LAGUNAS AIREADAS	56	19%
EMISARIO SUBMARINO	33	11%
PRIMARIO + DESINFECCIÓN	12	4%
LAGUNAS ESTABILIZACIÓN	10	4%
BIODISCO	3	1%
LOMBRIFILTRO	2	0,7%
BIOFILTRO	1	0,3%
Total	290	100%

Tabla 6: Sistemas de tratamiento utilizados en plantas de tratamiento en zonas urbanas. Fuente: Informe de gestión Superintendencia de Servicios Sanitarios, año 2015.

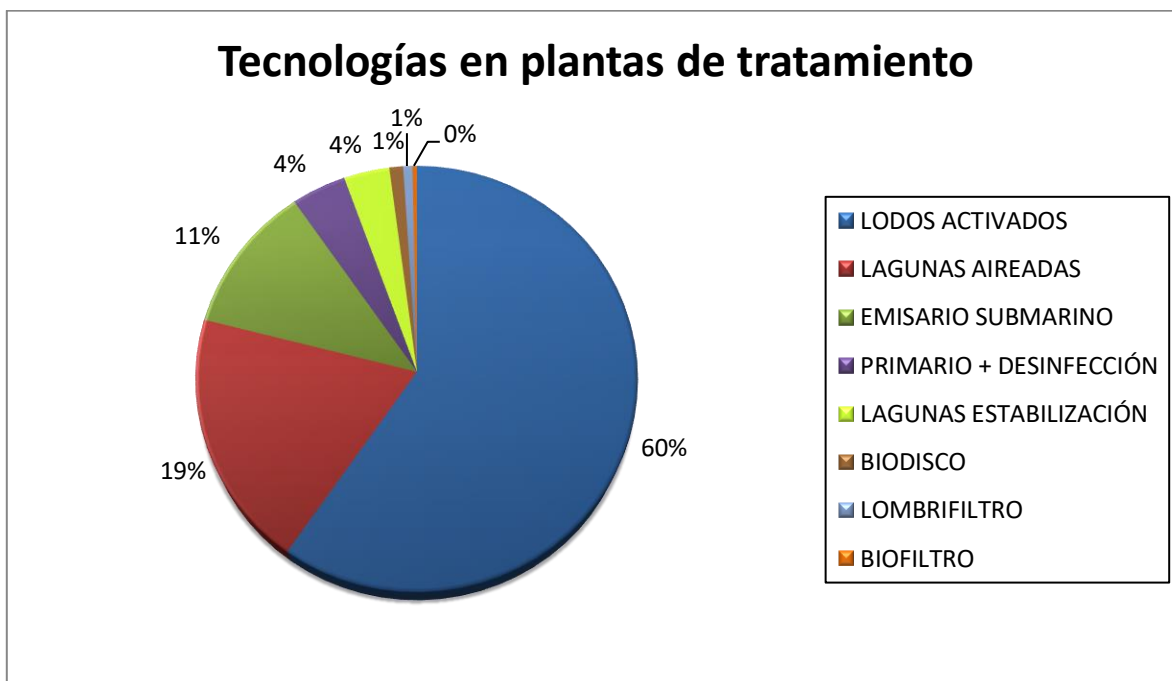


Imagen 3: Sistemas de tratamiento utilizados en plantas de tratamiento en zonas urbanas. Fuente: Informe de gestión Superintendencia de Servicios Sanitarios, año 2015.

En lo que respecta a la evolución de las tecnologías utilizadas para tratamiento de aguas residuales destaca la proliferación de plantas de tratamiento con utilización de lodos activados. En 1998 la presencia de plantas de tratamiento a través de lodos activados es nula mientras que en 2015 alcanza el valor de 173 plantas (ver imagen 6). Por otra parte también destaca la disminución en utilización de lagunas de estabilización de 61 plantas a 10 en 2015 y el aumento en lagunas aireadas.

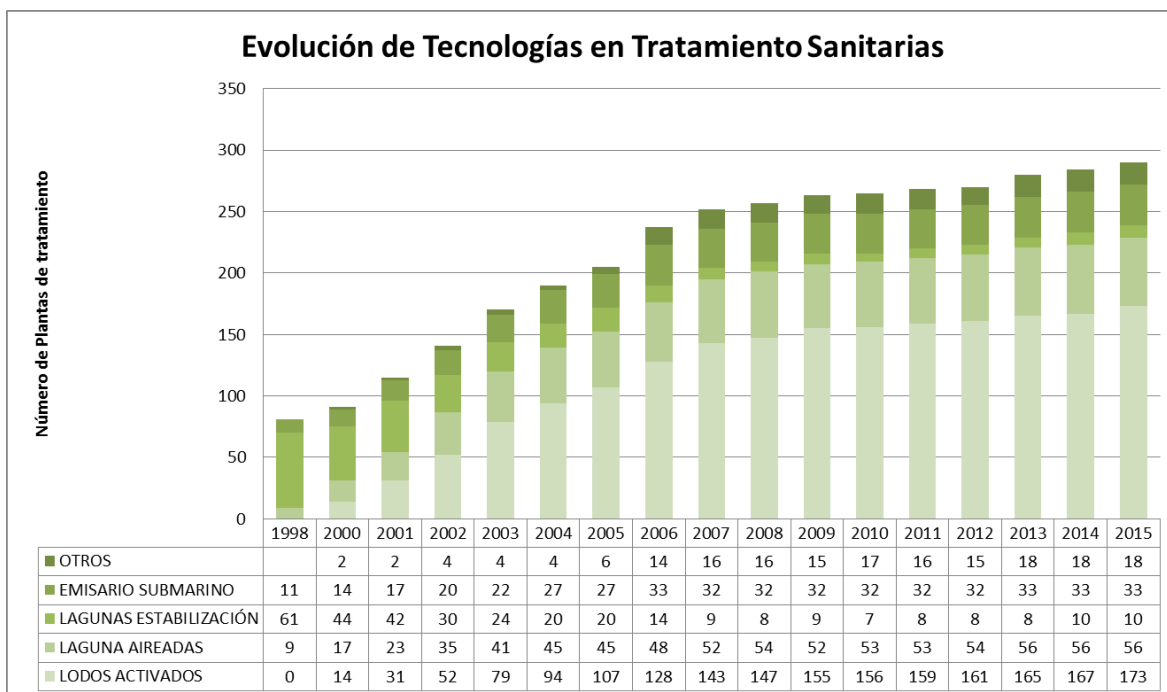


Imagen 4: Evolución en Sistemas utilizados en plantas de tratamiento en zonas urbanas. Fuente: Informe de gestión Superintendencia de Servicios Sanitarios, año 2015.

4.4.4 Sistemas de tratamiento utilizados en zonas rurales

Actualmente, no se ha creado un ente estatal con competencia exclusiva en materia de servicios sanitarios rurales, caben dentro de esta categoría los sistemas de Agua Potable Rural (APR) que se desarrollan en áreas calificadas como rurales. La SISS carece de capacidad para intervenir en la gestión técnica y administrativa de los servicios de APR entendiéndose dentro de esta gestión sus procesos de tarificación, de comercialización, tratamiento y distribución entre otros.

No obstante lo anterior, según la ley N° 19.594 las empresas concesionarias de servicios sanitarios urbanos, deben prestar asistencia técnica y administrativa a los comités y cooperativas de APR de cada respectiva región, siempre y cuando sea determinado por el MOP.



Existe información disponible sobre 157 plantas con la siguiente distribución tomando en cuenta las diferentes tecnologías:

Tecnología de Tratamiento	Cantidad	Porcentaje
LODOS ACTIVADOS (Aireación Extendida)	100	64%
BIOFILTRO	19	12%
FOSA SÉPTICA	13	8%
BIODISCO	11	7%
HUMEDALES ARTIFICIALES	7	4%
LAGUNAS DE ESTABILIZACIÓN	4	3%
BIODIGESTOR	2	1%
UNIDAD DE TRATAMIENTO AERÓBICO	1	1%
Total	157	100%

Tabla 7: Sistemas de tratamiento utilizados en plantas de tratamiento en zonas rurales. Fuente: Pizarro (2011).

Se puede evidenciar que nuevamente la tecnología con mayor presencia corresponde a lodos activados con un 64% de las plantas de las cuales se pudo obtener información. Existe presencia de Humedales artificiales en zonas rurales pero su utilización es reducida aún.

4.5 HUMEDAL ARTIFICIAL COMO FITODEPURADOR: LA PROPUESTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES.

Un humedal artificial es un terreno que se encuentra en condiciones de saturación debido a la existencia de aguas superficiales o subsuperficiales. Posee una profundidad reducida, bordeando los 60 cm y su lecho sirve como sustento y soporte para plantas emergentes. La función principal de la vegetación es proporcionar un sustrato para la formación de películas bacterianas, facilitar la filtración y la absorción de componentes del agua residual a tratar y permitir la transferencia de oxígeno al volumen de agua en tratamiento.

Se conocen como “humedales contruidos” a aquellos desarrollados de manera intencional en lugares no necesariamente inundados para el tratamiento de aguas residuales o pluviales,



por otra parte los “humedales creados” son zonas inundadas de manera intencional que poseen la finalidad de reemplazar o recrear un hábitat natural.

Los humedales contruidos favorecen una adecuada combinación de factores físicos, químicos y biológicos para la eliminación de microorganismos patógenos. Los procesos físicos incluyen los mecanismos de filtración, exposición a la luz ultravioleta y la sedimentación. Los factores químicos engloban la oxidación junto con la exposición a sustancias biocidas excretadas por algunas plantas y la absorción por parte de la materia orgánica. Los mecanismos de eliminación biológica incluyen la antibiosis, la presencia de predadores como nematodos y protistas, ataque por bacterias líticas y muerte natural (Gersberg y col., 1989a).

El tratamiendo de aguas servidas mediante la utilización de pantanos o humedales artificiales se ha posicionado en la última década en el mundo.

Existen antecedentes importantes de la utilización de este tipo de tecnologías alrededor del mundo en países como España, Alemania, Francia, EEUU, Reino Unido, Dinamarca, Colombia. Existen casos de estudio desde la segunda mitad de la década del 80 en Europa dónde se comienzan a construir humedales para tratar aguas residuales de diversas características. Destacan diversos casos en que se tratan aguas residuales de comunidades a través de gestión municipal, también en residuos de minería de metales y de carbón, en la industria petrolera y en el sector agrícola (Hammer, 1989).

Este tipo de tratamiento se relaciona de manera directa con los principios de una economía circular ya que realizar tratamiento de aguas residuales con este método implica:

La entrada al sistema son desechos de la actividad humana, es decir, responde a la necesidad de establecer un círculo cerrado en parte del ciclo productivo humano. Se utiliza como método de depuración una réplica de la naturaleza en la escala necesaria para cumplir con las necesidades del sistema de tratamiento. Los humedales desde su existencia han cumplido con la función de depurar aquellas aguas que circulan por el sistema.



El producto que se obtiene corresponde a agua en mejor calidad que la que ingresa al sistema. Además es agua enriquecida con elementos que son beneficiosos para el ecosistema si es que se ingresan a nuevos procesos productivos o si se utilizan para regadío. Los elementos extraídos catalogados como “contaminantes” poseen potencial como materia prima en la elaboración de nuevos productos, sobre todo en mercados de carácter verde u orgánico. Ejemplo de esto es la elaboración de fertilizantes orgánicos concentrados en elementos esenciales en agricultura como nitrógeno, fósforo y materia orgánica a partir de lodos.

Existe potencial de crecimiento en materia de humedales, ampliando este enfoque se fomenta la conservación y restauración de humedales, ya que potencia su valor ecológico y funcional.

La generación de lodos es menor que en otros sistemas de tratamiento, implicando menor frecuencia de retiro de lodos lo que significa una reducción importante de costos en este ítem

Si bien cada proyecto puede tener un diseño específico y enriquecido con los requerimientos de cada cliente, se puede esbozar a grandes rasgos el funcionamiento del tratamiento de aguas residuales con humedales construidos. Se describen cuatro partes esenciales:

- ✚ Estructura de entrada o de distribución del afluente: Tubería de distribución inserta en un medio de grava gruesa, encargada de repartir el agua servida a lo ancho del humedal.
- ✚ Vegetación: Corresponde a plantas acuáticas (macrófitas) emergente típicas de las zonas húmedas. Las especies más utilizadas y propias de este tipo de ecosistemas son *Typha* sp. (Totora), *Scirpus* sp. (Junco) y *Phragmites* sp. (Caña). Estos organismos se encuentran adaptados para vivir en condiciones de anegamiento permanente. Existiendo intercambio gaseoso entre las zonas inundadas y las zonas expuestas. Presenta el rasgo diferenciador con respecto al resto de las tecnologías, ya que el medio en el cual ocurre la depuración no pierde valor estético. Las funciones de la vegetación dentro de los humedales son:



- Su sistema radicular posee gran capacidad colonizadora y proporciona soporte para la creación de microambientes aeróbicos que albergan procesos microbianos con presencia de oxígeno, como la degradación aeróbica de la materia orgánica y nitrificación.
 - Asimilación de nutrientes, aportan a la eliminación de nutrientes presentes en el agua de manera modesta al absorber cerca del 10% de Nitrógeno y 20% del fósforo en aguas residuales urbanas con carga moderada.
 - Amortiguación de variaciones ambientales, regulación de temperatura al proporcionar sombra y protección ante eventuales congelamientos.
- ✚ Estructura de salida: Tubería para la recolección del agua tratada, inserta en un medio de grava.
- ✚ Impermeabilización: Generalmente corresponde a material PVC (geomembrana), evita que el agua servida contamine la napa subterránea vía infiltración y posibles desbordes ya que el agua subterránea no logra ingresar al humedal. En este tópico existe una oportunidad clara de investigación e innovación ya que hay algunos métodos de impermeabilización naturales que no están validados, en caso de validarlos es posible disminuir costos importantes de este tipo de tratamiento.

El sistema se conecta a las redes actuales de desecho, con la adición, de ser necesario, de cámaras desengrasadoras y fosa séptica en caso de no tenerlas.



Imagen 5: Pretratamiento a nivel doméstico del sistema

Posteriormente ingresa al humedal artificial donde al trabajar con pendiente en el diseño del fondo no necesita de inyección de energía externa para la realización del proceso. La gravilla y el sustrato que contiene las plantas del humedal artificial actúan como un filtro mecánico, mientras que los diversos microorganismos presentes en el sistema radicular propio de las plantas de pantano o de humedales se alimentan de las cargas excesivas de nutrientes y elementos patógenos presentes en el agua, al descargar por el efluente la calidad del agua es considerablemente mejor, al punto de poder utilizarse para riego agrícola o infiltración para recargar aguas subterráneas.

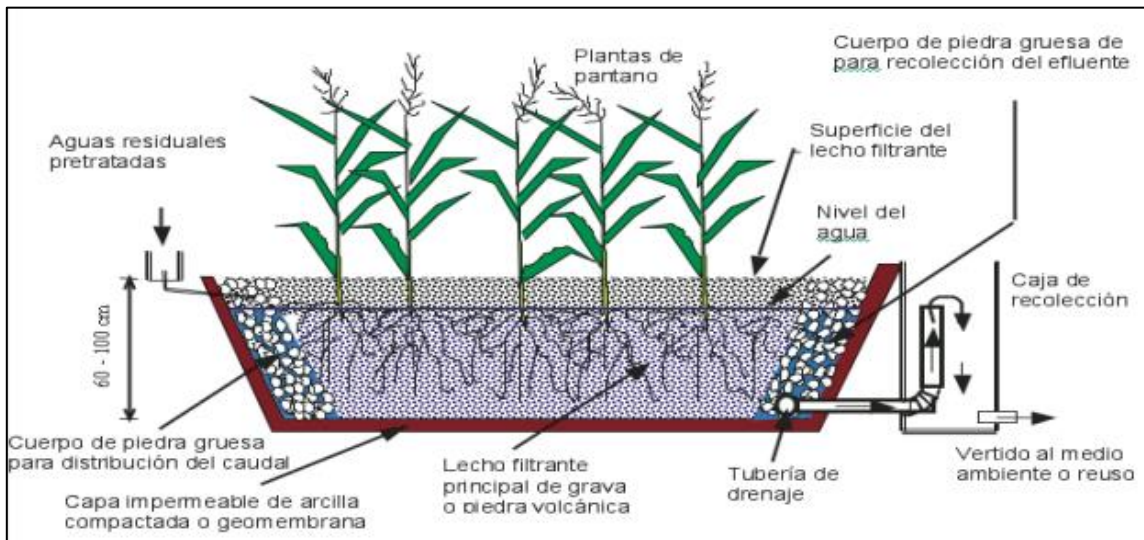


Imagen 6: Descripción gráfica de funcionamiento del sistema.

El método puede ser escalable a nivel particular domiciliario o a nivel industrial, todo depende del diseño de acuerdo a las cargas que se espera que reciba el sistema, se detallan las siguientes características del sistema. Posee las siguientes características al presentarse como tratamiento:

- **Económico:** Bajo costo de operación y mantención. No se requiere capacitación especializada para su operación y mantención. Potencial de explotación económica del humedal para otras áreas de interés como investigación, educación ambiental, recreación y esparcimiento. Representa un cambio de paradigma económico productivo al formar parte de una serie de soluciones que integran la naturaleza a la actividad humana.
- **Social:** El espacio de tratamiento puede ser habitable, a diferencia de otros métodos en los cuales el área destinada al tratamiento de aguas pierde su valor paisajístico e interacción con el entorno. Por otra parte se establece una oportunidad de generar redes de cooperación entre miembros de la comunidad a través de la mantención. Además se genera conocimiento teórico y práctico sobre el ciclo del agua, y cómo aprovechar



mejor el recurso hídrico aplicado a la producción de alimentos, o en su retorno a cauces sin generar impacto negativo en los mismos.

🌿 Medioambiental: No es solo almacenamiento e infiltración de desechos como la fosa séptica. Se realiza depuración del agua de manera natural replicando métodos que se han realizado de manera espontánea y permanente a través del tiempo en la naturaleza. Tiene gran capacidad de tratamiento frente a variedad y cantidad de contaminantes, por lo que puede ser utilizado en diferentes ámbitos, tanto social como industrial. Sistema con capacidad de autoregulación y modificable frente a variaciones en la cantidad de demanda de tratamiento. Las aguas vuelven a las napas subterráneas y superficiales en condiciones aceptadas por la normativa medioambiental chilena, donde tampoco existe infiltración de contaminantes dada las características de impermeabilización del sistema. En caso de realizarse en escalas de tamaño mayores existe la posibilidad de rescatar un ecosistema único como es el humedal.

Se presenta un método de tratamiento de aguas aún no masificado en nuestro país donde existe un potencial económico importante particularmente en ciertos rubros como la lechería, la piscicultura o, incluso, comunidades rurales y educativas. Son procesos que se han realizado por miles de años espontáneamente en la naturaleza, la diferencia es que en este caso en particular se encauza el flujo de entrada y de salida del agua al humedal para tratar los residuos de las mismas. Además mejora las condiciones medioambientales, según lo expuesto previamente, esto es una característica de durabilidad y sostenibilidad.

5 ANÁLISIS CUALITATIVO ENTRE HUMEDALES CONSTRUIDOS Y OTROS SISTEMAS DE TRATAMIENTO

Hoy en día el país abre la posibilidad de fomentar mayor auge en la problemática ambiental que afecta a los humedales y exime al territorio nacional de los múltiples beneficios y



soluciones que rodean a estos ecosistemas, prueba de esto es el levantamiento de información acerca de humedales como el “Diseño del inventario nacional de humedales y el seguimiento ambiental” promovido por el Ministerio del Medio Ambiente, Fondos de Protección ambiental enfocados a la restauración de la biodiversidad en ecosistemas alterados por la actividad humana o consecuencias del cambio climático como incendios, sequías prolongadas, erosión del suelo, evidenciando la relación sistémica entre todos los eventos mencionados. Sin embargo, previamente a promover estrategias para el posicionamiento de la construcción de humedales artificiales para la reutilización de aguas residuales, es necesario llevar a cabo un análisis comparativo de las diferentes tecnologías utilizadas como tratamiento de aguas servidas.

5.1 ANÁLISIS CUALITATIVO DE LA PROPUESTA.

En primera instancia vale la pena destacar la versatilidad de los humedales artificiales, ya que pueden ser usados para una variedad de aplicaciones, las que se nombran a continuación (Hoffmann et al., 2011):

Tratamiento de aguas residuales municipales, domésticas o aguas grises.

Tratamiento terciario de efluentes pre tratados en plantas convencionales de aguas residuales.

Tratamiento de aguas residuales industriales (lixiviados de relleno sanitario, compost, tratamiento de lodos, desechos de refinerías de petróleo, drenaje ácido en minas, desechos agrícolas, efluentes de fábricas textiles).

Tratamiento y retención de aguas pluviales, tratamiento natural para agua de piscinas (sin cloro) y tratamiento natural de ríos y lagos contaminados.

Muchas de estas aplicaciones no pueden ser emuladas por otro tipo de tratamientos que requieren construcciones de gran magnitud, mayor intervención y utilización de energía. Los humedales artificiales por ser un ecosistema depurador se integra de mejor forma a sistemas naturales.



5.1.1 Análisis Comparativo en funcionamiento:

En términos de funcionamiento existen ciertos parámetros considerados de mayor importancia para alcanzar desde condiciones mínimas de funcionamiento hasta una operación de carácter óptimo, dichos parámetros son³²:

Extensión de terreno: Considerado un parámetro de gran importancia debido al costo de construcción por m². Esta variable implica una debilidad importante de los humedales artificiales frente a otros sistemas de tratamiento sobre todo en zonas urbanas, sin embargo se debe considerar la oportunidad de impactar de forma positiva una mayor área de cobertura considerando los rasgos distintivos que poseen los humedales sobre otras tecnologías.

Mano de Obra: El requerimiento de mano de obra para el correcto funcionamiento de cada sistema es un parámetro a considerar. Bajo la lógica de la economía circular se espera que los sistemas tengan un grado de auto-valencia para que la dependencia sea mínima. La existencia de maquinaria implica la presencia de operarios y mayor riesgo de fallas. Ante esto se considera deseable un requerimiento bajo en términos de mano de obra, donde destacan las lagunas de estabilización y los humedales artificiales

Energía: La utilización de energía es un punto clave en la elección del sistema de tratamiento, bajo el enfoque de la economía circular el sistema debe ser capaz de generar su propia energía o poseer bajas necesidades de energía. En este caso los la utilización de lodos activados, lagunas aireadas y biodiscos al requerir de inyección de energía externa son considerados con requerimiento de consumo de energía medio o alto. Por otro lado lagunas de estabilización, humedales artificiales, lombrifiltro y biofiltro se consideran con bajos requerimientos de consumo energético.

³² Se dejan fuera del análisis las tecnologías que requieren de dilución o desinfección para cumplir la norma ya que no se adecúan con los lineamientos sustentables de este estudio, el biodigestor al ser un tratamiento complementario a los humedales también se deja fuera del análisis.



Generación de lodos: La disposición final de los lodos representa un gran problema, ya que en muchos sistemas de tratamiento son tratados como un desecho sólido común, a pesar de contener aún después del tratamiento gran cantidad de contaminantes en estado concentrado. Es por esto que la generación de lodos debe ser mínima para que el sistema sea considerado viable y responda a las tendencias actuales como la economía circular.

Operación y Mantenimiento (O&M): Relacionado directamente con el consumo de energía y la sostenibilidad de las tecnologías de tratamiento a través del tiempo. Se requiere generalmente que el sistema sea sencillo y de bajo costo. En zonas rurales donde no existe un nivel de conocimiento elevado con respecto a la operación de equipos eléctricos automáticos y mantenimiento de los componentes de éstos resulta una complicación importante. En plantas de tratamiento de carácter industrial o urbano la complejidad del sistema no debiese presentar problemas, mas sí el consumo constante de energía a través del tiempo.

Costos de construcción: Variable significativa de decisión, los sistemas convencionales, o de mayor presencia en el mercado, generalmente involucran altos costos de construcción debido a la complejidad en su operación, incluso en algunos casos no garantizando un funcionamiento adecuado (Pizarro, 2011). En este ítem destacan aquellos sistemas de tratamiento de funcionamiento simple o que replican la acción de la naturaleza como son las lagunas de estabilización, humedales artificiales y lombrifiltro, donde los costos de construcción se consideran bajos en comparación con sistemas más complejos.

La tabla 7 presenta un resumen de los requerimientos considerando los parámetros expuestos con anterioridad; permite establecer una comparación de forma rápida en términos de funcionamiento de los distintos sistemas de tratamiento.



Requerimiento en cuanto a:						
Tipo de Tratamiento	Extensión de Terreno	Mano de Obra	Consumo de Energía	Generación de Lodos	O&M	Costo de Construcción
Laguna de Estabilización	ALTO	BAJO	BAJO	BAJO	BAJO	BAJO
Humedales Artificiales	ALTO	BAJO	BAJO	BAJO	BAJO	BAJO
Lombrifiltro	MEDIO	MEDIO	BAJO	BAJO	BAJO	BAJO
Laguna Aireada	ALTO	MEDIO	ALTO	MEDIO	MEDIO	MEDIO
Biofiltros + infiltración	MEDIO	MEDIO	BAJO	BAJO	BAJO	MEDIO
Biodiscos	BAJO	ALTO	MEDIO	MEDIO	MEDIO	ALTO
Lodos Activados	BAJO	ALTO	ALTO	ALTO	ALTO	ALTO

Tabla 8: Matriz de requerimiento para tratamiento. Fuente: Pizarro (2011).

5.1.2 Análisis FODA, Factores de riesgo técnico y económico:

Considerando los rasgos distintivos de los humedales y la respectiva adaptación a humedal artificial como tecnología para tratamiento de aguas residuales se lleva a cabo un análisis FODA considerando las diversas tecnologías descritas en el apartado 4.4.2 como contraste. El objetivo es identificar posibles factores claves sobre los cuales debe sentarse una estrategia para fomentar la utilización de tecnologías sustentables basadas en sistemas naturales para la solución de problemas presentes en la actividad humana. Se listan a continuación:

Fortalezas:

Costos de inversión bajo en comparación con otras tecnologías de mayor complejidad. En términos de operación, se obtienen altos niveles de tratamiento sin la necesidad de inyección de energía eléctrica al proceso. También produce menor cantidad de lodos como



subproducto del tratamiento, disminuye la frecuencia de incurrir en gastos de tratamiento y disposición de los mismos.

Restauración de la Biodiversidad, elemento que otorga mayor capacidad de adaptación ante cambios del entorno y que posee un valor ecológico determinante en los sistemas naturales. Por otra parte se reestablecen relaciones simbióticas de la naturaleza ya que se utiliza flora nativa del lugar de realización del proyecto, plantas que realizan la depuración poseen una distribución generalizada y gran capacidad de adaptación.

Retención de aguas lluvia, evita inundaciones. Además de realizar depuración provee servicios que disminuyen riesgos de catástrofe tanto para los asentamientos humanos y como el ecosistema donde se ubican dichos asentamientos. Se integra de mejor forma a sistemas naturales que otros tratamientos.

Aumenta la plusvalía del suelo donde es emplazado el proyecto, ya que la utilización de plantas permite una valorización estética y de conservación de la planta de tratamiento. Incluyendo la posibilidad de habitar dichas plantas al transformarlas en áreas protegidas de acceso público o privado.

Es un sistema que se construye pensando en la utilización posterior de las aguas a tratar, no sólo para devolver al cauce natural bajo cumplimiento de la norma.

Debilidades:

Uso de extensiones de terreno de gran tamaño. La gran desventaja en comparación con otros sistemas de tratamiento es el requerimiento de superficie, ya que implica esfuerzos de inversión en terreno. Sin mencionar el costo de oportunidad.

Tiempo de estabilización del sistema de depuración mínimo de un año. Previamente a lograr un equilibrio del sistema no es posible reutilizar la salida del sistema en riego ya que hay gran probabilidad de no cumplir la normativa, como solución temporal es posible realizar infiltración.



Se requiere de tratamiento primario. Debido a la poca afinidad que poseen las plantas ante ciertos contaminantes como los aceites y grasas.

Rendimiento puede contener mayor variabilidad que un proceso convencional. Aunque sí ha existido cierta incertidumbre en los rendimientos de tratamiento a través de lodos activados (Pizarro, 2011).

Siempre debe contener agua, de lo contrario la efectividad del tratamiento puede verse alterada. También se acumulan metales, el fósforo y algunos patógenos en la vegetación del humedal, a pesar de que la remoción de estos elementos es baja. Por esta razón es necesario llevar a cabo una mantención, pero con periodicidad menor que en otros sistemas de mayor complejidad de funcionamiento.

Oportunidades:

Mayor valorización en los últimos años de resolución de problemas a través de tecnologías sustentables en el mercado nacional. Ver antecedentes de cambios en el paisaje socio-técnico, apartado 6.1.2.

Preocupación e interés por el valor ecológico de los humedales a nivel mundial y nacional. Esto implica una posibilidad de vinculación con organismos y convenios internacionales como RAMSAR. Y oportunidades de fomento estatal para la restauración, recuperación y generación de ecosistemas de este tipo.

Al representar una solución frente a la problemática del cambio climático. Permite establecer una vinculación teórica y práctica con la transición hacia un modelo circular en vez de lineal.

La utilización de grandes extensiones de terreno proveen una oportunidad, ya que el impacto positivo de los humedales se extiende en su área de cobertura y alrededores. Por lo que mayor extensión de terreno permite mayores beneficios y servicios suministrados por el humedal.



Amenazas:

Presión inmobiliaria en sectores urbanos, e incluso en algunos sectores de carácter rural. El problema de vivienda actual ha generado grandes presiones sobre el uso de suelo en los sectores urbanos, extendiéndose cada vez más a zonas periurbanas. Significando aumentos sin precedentes del costo de m² y por ende elevando los costos de oportunidad de utilización del terreno. En zonas rurales también existen presiones empresariales sobre zonas aledañas a sectores productivos como forestales, mineras y generación o transmisión eléctrica.

Falta de educación ambiental y ecológica en todos los niveles de formación académica. Esto ha limitado la visión del valor ecológico en productos y servicios, lo cual ha significado un obstáculo de ingreso de tecnologías sustentables a mercados.

Competidores con tecnología sustentable y mayor eficiencia en utilización del espacio. El sistema de lombrifiltro cumple con la lógica y principios circulares y un menor requerimiento de terreno para su funcionamiento, sin considerar el potencial de restauración ecológica que posee el humedal, el lombrifiltro representa un sustituto directo de la propuesta.

Si bien el trabajo y preocupación por el medio ambiente es un enfoque válido y existente, aún se considera incipiente frente a iniciativas de carácter privado que poseen sus modelos de producción y de negocios diseñados considerando la explotación tradicional de recursos naturales (economía lineal).

Se destacan aquellos elementos vinculantes con principios provenientes de la economía circular, ante una alternativa de tratamiento que no solamente soluciona los problemas de carácter hídrico, sino que además permite aumentar el valor ecológico y económico de los lugares donde se emplazan este tipo de proyectos y sus zonas aledañas.

En términos de funcionamiento se debe señalar que distintas tecnologías para tratamiento poseen rendimientos óptimos y existen para responder a diferentes contextos y necesidades. No obstante lo anterior, al incluir los lineamientos del modelo económico circular se debe



colocar atención en el potencial del servicio más allá de lo estrictamente técnico. La herramienta FODA permite evidenciar potenciales factores claves para la valoración de este elemento ecosistémico desde una perspectiva más integral.

6 FACTORES DE TRANSICIÓN HACIA UN ENFOQUE CIRCULAR: APLICADO A HUMEDALES ARTIFICIALES.

6.1 ESCENARIO ACTUAL Y FUTURO SOBRE TECNOLOGÍAS SUSTENTABLES, SU ESTADO Y LA POSIBILIDAD DE TRANSICIÓN HACIA UN RÉGIMEN TECNOLÓGICO SUSTENTABLE

Se ha establecido que la crisis hídrica es parte de una serie de problemáticas como el cambio climático, efecto invernadero, crisis energética, entre otras. Sin embargo, lo anterior se encuentra enmarcado en un contexto económico, social, político, tecnológico e institucional que han favorecido y encaminado a un desequilibrio entre las relaciones de producción del modelo actual y el estado de salud medioambiental. Es por esto que cualquier iniciativa propuesta en este contexto debe constituir un proceso evolutivo de transición hacia un nuevo paradigma socio-técnico y económico, esto debido a que la valorización propuesta por el modelo actual desestima los beneficios ecológicos y no posee la visión sistemática e integradora que desarrolle un bienestar para el planeta. En este sentido el desafío de los diversos actores involucrados en este tipo de iniciativas posee múltiples dimensiones – tal como fue mencionado anteriormente, dimensiones que responden a lo tecnológico, social, económico, entre otras – de las cuales se analiza en particular interrelación entre la innovación y desarrollo tecnológico y social.

Los cambios en paradigmas socio-tecnológicos pueden ser analizados desde un enfoque multinivel (Lopolito et al, 2011), presentando tres niveles con diferentes características: nichos de innovación, régimen tecnológico, ambos enmarcados en un contexto o paisaje socio-tecnológico.



- ✚ Nichos de innovación (Micro): Son comunidades pequeñas y con una configuración socio-técnica inestable donde las exigencias de rendimiento para las tecnologías son menores, lugares de crianza de innovaciones con carácter radical. Por lo que consisten en espacios protegidos, con financiamiento público y privado en escala pequeña para el desarrollo y uso de tecnologías para ser puestas a prueba, obtener información, aprendizaje y experiencia en términos de:
 - Qué tan deseable es la tecnología.
 - Potenciar mayor desarrollo o desarrollos próximos, definir tasa de utilización de la nueva tecnología.

- ✚ Régimen tecnológico (Meso): Comunidades grandes y con una configuración socio-técnica estable. Conjunto de reglas o lenguaje incorporado en un complejo de prácticas ingenieriles, tecnologías de procesos productivos, características de productos, habilidades, procedimientos, formas de manejar artefactos y personas relevantes, formas de solucionar problemas o definirlos, todos estos elementos enmarcados en instituciones e infraestructura que influyen el desarrollo tecnológico al generar innovaciones incrementales. Cumplen funciones o servicios sociales (distribución energía eléctrica, servicios sanitarios, salud, educación, transporte) y se identifican o definen por esto.

- ✚ Paisaje Socio-técnico (Macro): Es el entorno que contiene los dos niveles anteriores. Contexto amplio político, económico e institucional que se configura como un ambiente de selección, ya que favorece ciertos paradigmas y proporciona presiones sobre para innovación en nichos y regímenes. Como ejemplos claros de cambio en el paisaje socio-técnico que se han traducido en presiones para innovación se mencionan:
 - El fomento de parte de organismos mundiales y del estado chileno en generación de energía eléctrica por vías no convencionales.



- Mayor demanda de productos agrícolas con certificación orgánica, sobre todo en el mercado europeo donde incluso existen zonas donde no se aceptan productos que no garanticen su naturaleza orgánica.
- Plan de manejo de humedales elaborado por el ministerio del medio ambiente en Chile.

Nichos de innovación y regímenes tecnológicos poseen estructuras similares y se diferencian en tamaño y estabilidad. Por su parte el contexto socio-técnico implica la incorporación de factores más allá de lo tecnológico lo que implica una estructura y ritmo de cambio diferente y a veces impredecible.

El enfoque multinivel establece que las transiciones ocurren debido a través de interacciones entre procesos que ocurren en los tres niveles. En el nivel de nichos, actores trabajan en redes pequeñas para generar innovaciones radicales. Debido a que no se ha estabilizado un diseño de régimen tecnológico dominante, los esfuerzos se realizan en múltiples direcciones, implicando dispersión. Las innovaciones radicales pueden estabilizarse gradualmente llegando a convertirse en un diseño de régimen tecnológico dominante. Sin embargo para que una innovación radical irrumpa desde un nivel de nicho, algo debe ocurrir a nivel macro. Dicho de otra forma, la transición socio-técnica ocurrirá si los cambios en el paisaje han logrado poner una adecuada cantidad de presión en el régimen actual, desestabilizándolo y creando una ventana de oportunidad para que la transición ocurra (Lopolito et al. 2011).

Visto en el sentido opuesto, cambios en el paisaje socio-técnico pueden resultar en un ambiente favorable para que suceda un cambio tecnológico. Sin embargo, desarrollos del contexto externo no conforman de forma inmediata nichos y regímenes dominantes, al contrario deben ser percibidos y traducidos por actores para influir en la formación de éstos. Por lo tanto, un nicho de innovación debe estar consolidado para que la transición sea efectiva. De hecho, los cambios en regímenes comienzan cuando ciertas prácticas y normas desarrolladas en el nicho han alcanzado un grado suficiente de estabilidad y son adoptados



de forma más masiva. En resumen el régimen tecnológico dominante recibe diferentes tipos de presiones tanto desde el nivel micro (nichos) como desde el nivel macro (contexto), y son esas presiones las que eventualmente resultan en la transición socio-técnica.

Un nicho se encuentra consolidado cuando hay maduración en tres componentes específicos, que deben ser desarrollados para alcanzar la transición tecnológica. Estos componentes son:

🌈 Voluntad: Se trata de la convergencia de las expectativas de los diferentes actores hacia una visión común, lograr la transformación desde una voluntad difusa a una participación activa en el nicho tecnológico. Al surgir una oportunidad tecnológica se debe caracterizar un potencial escenario futuro que atraiga el interés de otros actores relevantes (emprendedores, diseñadores de políticas de fomento a nuevos nichos tecnológicos). De esta forma se logra reducir la disidencia e indiferencia inercial hacia una nueva tecnología por falta de información sobre ventajas y problemas al utilizarla. El proceso de convergencia de las expectativas se consolida cuando una cantidad considerable y en aumento de participantes tiene expectativas en común o cuando se encuentran basadas en resultados tangibles obtenidos desde la experiencia. La convergencia de expectativas debe considerar:

- Expectativas divergentes pueden afectar definición y priorización de metas
- Pueden ser parcializadas por una visión mayoritaria, determinada culturalmente
- Ordenar y confluir expectativas es importante para atraer recursos y nuevos actores
- Expectativas entregan indicaciones al proceso de desarrollo, actúan como marcos cognitivos para tomar decisiones en el proceso de diseño de las nuevas tecnologías
- La convergencia de expectativas es un proceso que va definiendo y moldeando los intereses y la forma de responder del nicho ante presiones de selección del entorno.

En resumen, la voluntad común se desarrolla mediante un proceso que valida la tecnología (datos y pruebas); responde a un problema bien planteado y claramente identificado; se acopla con otras soluciones a problemáticas aún no atendidas por el régimen tecnológico existente. Una voluntad común bien direccionada permite a los



actores legitimar el tiempo y esfuerzo invertido en el desarrollo y transición del nicho hacia un nuevo régimen tecnológico.

- ✚ Poder: Proceso de formación de una red que logre un nivel adecuado de peso político y socio-técnico. En primera instancia se deben identificar e incorporar a aquellos actores y grupos de interés que entreguen un valor extra a la red que compone el nicho. Se debe contar con empresas que tengan acceso a financiamiento para impulsar la iniciativa, instituciones públicas que posea información relevante adquirida en procesos de investigación y desarrollo, inversionistas interesados en el desarrollo de nichos tecnológicos, entre otros. Una red con una cantidad adecuada de poder ejerce presión para generar nuevos focos de financiamiento público y privado y estimula temáticas de agenda pública y económica que favorecen la transición socio-técnica. Se deben potenciar tanto los recursos estratégicos individuales que inciden sobre la tecnología del nicho y estructuran la red donde se relacionan los actores, como los colectivos que influyen sobre el proceso socio-técnico y facilitan cambios de comportamiento. Bajo esa específica circunstancia el nicho posee actores con recursos y con la cantidad de poder necesaria para actuar desde el nicho para la transición hacia un régimen tecnológico. La red de actores locales debe contar con presencia y una buena distribución de poder.
- ✚ Conocimiento: Después de la convergencia de expectativas y la obtención de recursos es necesaria la adquisición, multiplicación y propagación del conocimiento. Dependiendo de la complejidad de la transición socio-técnica es necesario integrar experiencias e intereses relevantes a través de actividades de aprendizaje y comunicación dentro del nicho. En este tipo de espacios es posible desarrollar procesos informales de aprendizaje, instancias directas e intensivas de compartir de forma voluntaria y recíproca conocimiento que ha sido incorporado por individuos de la red hacia el nicho. Idealmente la red debe contar con un sistema que integre eficientemente el conocimiento interno y externo atingente al nicho. Se debe tener en cuenta que el desarrollo e implementación de una innovación tecnológica es un proceso social de gran escala y son esenciales las interacciones cercanas entre los actores para el desarrollo de



los espacios de absorción, proliferación y discusión del conocimiento. La comunicación es influenciada por la arquitectura de la red desde donde operan los actores y se coincide (Morone et al. 2010) en la importancia de los vínculos (o los efectos negativos producto de la ausencia de ellos) dentro de los sistemas de innovación. El conocimiento no debe ser solo acumulado, debe ser compartido y discutido.

6.1.1 Humedales artificiales como un nicho de innovación

Actualmente el nicho de innovación de desarrollo de biotecnologías para solución de problemáticas presentes en la actividad humana no se ha configurado como un sector productivo, por el contrario se ha acoplado de forma experimental a otros sectores acorde al servicio que otorga (energía, agua, biorremediación, acuicultura). El enfoque de estos nichos de innovación responde a generar soluciones técnicas, lo que no ha permitido una maduración en términos de voluntad, poder ni conocimiento necesario para favorecer la transición hacia un régimen tecnológico con un enfoque en mayor eficiencia, sustentabilidad y menor generación de desechos, cuya base sea la replicación de procesos naturales que apuntan hacia la regeneración de la biósfera y el rediseño de procesos productivos de la actividad humana³³.

El escenario para los humedales contruidos no es ajeno a esta situación. El grado de utilización de la tecnología basada en lodos activados en sistemas de tratamiento, tanto rurales como urbanos, es consecuencia de una visión socio-económica regente cuyos elementos de decisión implican: tiempo de retorno de inversión; márgenes de rentabilidad que justifiquen dicho tiempo; pragmatismo en la elección y diseño de productos y procesos; generación de dependencia a través de reducción de vida útil de productos y sus componentes; así como el desconocimiento de las funciones y servicios ecosistémicos existente en la naturaleza y, por ende, la concepción de la naturaleza como amenaza o estorbo, categorizándola como un elemento exterminables o prescindibles. La visión actual ha desarrollado avances tecnológico de gran escala e impacto positivo en múltiples sectores

³³ Principios contenidos en economías de carácter circular



productivos como el industrial, comercial y agrícola. No obstante lo expuesto, existe un consenso mundial con respecto a la necesidad de un cambio hacia un enfoque sostenible y sustentable.

Entonces se identifica como uno de los factores determinantes – relacionado fuertemente a los elementos de desarrollo de transición de nichos: voluntad, poder y conocimiento – a la educación. El desarrollo de un proceso formativo que tenga por objetivo acoger una visión acorde a las necesidades del planeta mencionadas en apartados anteriores y que desencadene en o apoye procesos de transición. Vale la pena mencionar que dichos procesos formativos no son ajenos a la realidad actual, existen instituciones que de forma incipiente e independiente han respondido a esta necesidad en diversas partes del mundo, incluyendo Chile, y responden no sólo a problemáticas de carácter ambiental sino que entregan herramientas en un nivel de integración mayor de carácter holístico. Es necesario acotar que la presencia de estas instancias formativas no se podría considerar significativa en contraste a aquellas facilitadas por instituciones tradicionales de educación, pero sí ha existido una proliferación de alternativas (de diversas características y calidad) en los últimos años.

Se reconoce dicha proliferación en mayor presencia de establecimientos educacionales con métodos educacionales alternativos, como Waldorf o Montessori, insertos dentro del sistema formativo actual. Además de la creación de organizaciones como el Instituto Chileno de Permacultura y redes de educación libre. Ambas instancias educativas reconfiguran la visión de la naturaleza dejando de ser recursos naturales y convirtiéndose en sistemas que soportan la vida humana, actualmente se establece este tipo de formación complementaria y práctica a través de experiencias abiertas a la comunidad sin restricción etaria. Aun así, debido a condiciones de mercado actual, estas alternativas educacionales no se encuentran al alcance de toda persona que quiera acceder a ellas.

Un segundo elemento clave es la generación de redes de actores que integren elementos de poder, lo que permite obtener presencia en el mercado, consideración en instancias



legislativas y de debate. La construcción social aporta en el traslado de problemáticas y soluciones en flujo bidireccional y no permite invisibilidad de la red ante decisiones que resulten en consecuencias negativas para aquellos actores involucrados. Apuntar hacia la creación de instituciones con enfoque holístico que tengan como origen la red de actores, de esta forma se pretende redefinir prioridades apuntando hacia el bienestar social, económico y ecológico. Existen técnicas de apreciación económica y social, a través de mecanismos participativos que pueden ser utilizados para este fin, pero sólo pueden ser utilizados si existen las instituciones que permitan que se lleven a cabo decisiones transsectoriales.

Es importante incluir a personas de todos los estratos en el levantamiento de soluciones y prioridades ya que la racionalidad experta basada en la ciencia y la probabilidad es sólo una forma de racionalidad y que las preferencias personales que difieren de la opinión experta no son necesariamente irracionales (Slovic, 1992). Es importante recalcar que la inclusión de nuevas preferencias favorece la disminución de riesgos y una visión complementaria ya que se consideran percepciones además del análisis experto, lo cual posee relevancia debido a que no es correcto asumir que los expertos son neutrales y desinteresados protectores del bien común, es más autores argumentan que una elite de expertos científicos no se encuentra calificada ni legitimada políticamente para imponer políticas de manejo sobre el público en general. (Jasanoff, 1982)

6.1.2 Antecedentes del paisaje socio-técnico en Chile

Actualmente el paisaje socio-técnico difiere en distintas partes del mundo, en los países desarrollados existe mayor valorización sobre la importancia de encontrar soluciones alternativas para problemáticas generadas en el medio ambiente con origen en la actividad humana y se han logrado posicionar iniciativas como la economía circular dentro de los modelos productivos industriales y su comercialización, un ejemplo es la minería en países europeos de la zona norte como Finlandia. En contraste, en Chile aún existe un régimen tecnológico que favorece apertura hacia la inversión y modelos puramente lineales y



extractivos sin considerar el costo que esto posee hacia el medio ambiente. Durante los últimos años se ha reforzado la temática ambiental dentro de la agenda legislativa (creación del MMA, ley de la biodiversidad) lo que ha permitido ciertos avances en términos de concientización, sin embargo el impacto en la población general y -sobre todo- en el mundo empresarial no ha sido suficiente para generar un cambio de enfoque o un diseño distinto en la integración de la actividad humana con el ecosistema en el cual se emplaza. Lo que ha predominado desde la economía verde son acciones y políticas públicas que apuntan hacia la disminución en emisiones de carbono, medidas de compensación económicas ante daños ambientales, pero aún no existe una voluntad (expectativas en común) para orientar los procesos y métodos productivos hacia la regeneración de la biósfera.

Otro antecedente que indica que Chile aún está al debe en el tema de transición hacia un nuevo paisaje socio-técnico son las recomendaciones sugeridas en la evaluación de desempeño ambiental, realizada por la OCDE para nuestro país. Donde advierte que una protección adecuada del medio ambiente requiere del fortalecimiento adicional del sistema de gestión, en particular recursos humanos y técnicos en los organismos del Estado, así como metas más ambiciosas de protección de la base natural del país y los servicios ecosistémicos. Algunas de las recomendaciones específicas incluyen el mejoramiento de la información sobre la calidad de medios (agua, aire, biodiversidad, contaminación); aplicación reforzada de la Evaluación Ambiental Estratégica en los planes de ordenamiento territorial; inclusión de alternativas en la evaluación ambiental de proyectos; profundización de la reforma al código de aguas, dando prioridad a usos esenciales y respetando requerimientos ecológicos; actualización de los planes de descontaminación atmosférica y mejora de los sistemas de transporte público; aumento de los impuestos a los combustibles y a las emisiones de CO₂; igualación del impuesto del diésel con la gasolina; mejora en la productividad de materiales (Chile es el país con el mayor consumo de recursos por unidad de producto); promoción de la eco-innovación y del crecimiento verde; identificación de una trayectoria para llegar a cero emisiones de CO₂ en la segunda mitad del siglo.



Complementando lo anterior se indica en la evaluación la necesidad de fortalecer programas de adaptación al cambio climático; mejorar gestión de sustancias químicas en el sector industrial; aprobación de Ley de Biodiversidad e inversión en áreas protegidas; generación de planes de manejo en áreas destinadas a conservación; la eliminación de subsidios sectoriales que impactan de manera negativa a la biodiversidad; remediación de sitios y aire contaminados, pérdida de biodiversidad en ecosistemas y cuerpos de agua deteriorados. Todo esto apunta a restaurar los servicios ecosistémicos ya que su constante menoscabo implica daño a la salud de la población humana y animal, cambios climáticos irreversibles y disminución del potencial de desarrollo económico del país. Existe un énfasis en las recomendaciones de organismos político-económicas internacionales en que exista desde ya la compatibilización entre las metas de desarrollo socio-tecnológico; el desarrollo institucional base para el fomento de la transición hacia un nuevo régimen tecnológico y un nuevo paradigma socio-técnico y económico; el diseño de políticas gubernamentales y económicas con el cuidado y la protección del medio ambiente, apuntando a una sostenibilidad sistémica desde todas las perspectivas.

Lo anterior se presenta como evidencia de que las soluciones a la serie de problemáticas dentro de las cuales se enmarca la crisis hídrica se relacionan y contienen los siguientes elementos: biodiversidad; eficiencia energética; agricultura orgánica; desarrollo sustentable; disminución de emisiones de carbono, pero también la incorporación de un sistema de gestión de personas y creación de instituciones con un enfoque holístico.

Aun así existen experiencias que demuestran de que dichos elementos han comenzado a tomar mayor relevancia en el paisaje socio-técnico nacional, prueba de esto son las experiencias de economía circular en Chile (apartado 3.3) y financiamiento público y privado orientada a investigación, educación, desarrollo e implementación de proyectos enmarcados en los elementos mencionados que fomentan este nuevo paradigma, bajo el nombre de innovación y desarrollo socio-tecnológico. Esto ha permitido el surgimiento de nichos de innovación enfocados particularmente a resolver problemáticas aún pendientes en



el sector industrial en lo que concierne a medio ambiente y modelos de producción lineales y a nivel país en términos de institucionalidad política.

6.1.3 Conclusiones discusión

En primera instancia, es acertado mencionar que el nicho de innovación donde se integra el tratamiento de aguas a través de humedales construidos no ha logrado alcanzar una maduración suficiente en los mecanismos de voluntad, poder y conocimiento para establecerse como un régimen tecnológico dentro del país. Se identifican factores claves para concretar la transición tecnológica de este nicho de innovación hacia un régimen tecnológico sustentable. Dichos factores son una educación hacia una visión con mayor noción del valor ecológico y la generación de redes de actores que signifiquen una serie de acciones que potencien y mejoren la voluntad, poder y el conocimiento que resulten en la maduración del nicho de innovación en cuestión.

Por otra parte el paisaje socio-técnico ha permitido la creación de nuevos nichos de innovación apuntando hacia el desarrollo sustentable, pero no se ha logrado ejercer presión sobre el régimen tecnológico dominante que ha desencadenado el estado ecológico actual. Esto ha impedido un mayor posicionamiento de esta tecnología en el mercado de tratamiento hídrico al no reconocerse el valor ecológico, ya que se evalúa mediante una visión de carácter pragmático y utilitarista, que generalmente reconoce en la naturaleza un medio prescindible y poco práctico. A lo anterior se suman dos elementos determinantes catalogados como desventajas bajo la visión actual. Primero el requerimiento de superficies de terreno extensas para la implementación de este tipo de sistemas, sobre todo en zonas urbanas donde el uso de suelo requiere esfuerzos significativos en términos de gestión e inversión. La segunda desventaja es el tiempo de estabilización del humedal donde el objetivo es lograr el equilibrio de sus componentes, todo sistema que incorpore a la naturaleza dentro de su funcionamiento debe considerar este elemento. Si bien, bajo el punto de vista normativo, durante el tiempo de estabilización no se obtiene agua apta para riego a la salida del sistema, pero sí es posible disponer de esas aguas vía infiltración.

A pesar de esto existen antecedentes que dan cuenta de un interés cada vez mayor de parte de organismos internacionales y entidades gubernamentales en conservación, restauración e integración – a la actividad humana – de los sistemas naturales.

6.2 FACTORES DE RIESGO Y ÉXITO DE LA PROPUESTA

Para el levantamiento de factores claves se consideran los apartados anteriores como inputs del proceso de la siguiente forma:



Imagen 7: Esquema proceso de levantamiento de factores clave. Fuente: Elaboración propia.

Resultando el proceso en los siguientes factores claves que determinan el grado de éxito y gestión de riesgos a ser considerados al momento de incluir tecnologías sustentables como los humedales construidos para generar soluciones a problemáticas presentes en la actividad humana, en este caso el tratamiento de aguas. Muchos de estos factores de éxito y de riesgo han sido esbozados o mencionados en apartados anteriores, agrupándose bajo



cuatro perspectivas dependiendo de ciertas características de los factores. Las perspectivas son Ecológica y económica, Socio-Política, Comercial y Técnica. Sin duda algunos factores podrían pertenecer a más de una perspectiva en forma simultánea, pero para efectos prácticos se han categorizado de la siguiente forma:

6.3 PERSPECTIVA ECOLÓGICA Y ECONÓMICA

Dentro de los apartados anteriores se ha establecido la importancia de la integración entre los sistemas naturales y la actividad humana, entendiendo la interdependencia entre ambos procesos se agrupan – bajo una misma perspectiva – factores críticos de carácter ecológico y económico,

6.3.1 Factores de éxito perspectiva ecológica y económica

🌈 Regeneración de la biósfera: La regeneración de la biósfera se indica como un elemento clave dentro de la gestión del flujo de renovables (Imagen 2) que considera la economía circular dentro de sus elementos claves de funcionamiento. Lo anterior implica que efectivamente se debe realizar un trabajo restaurativo sobre el medio ambiente. De acuerdo a los rasgos distintivos de los humedales, éstos poseen un papel trascendental en la restauración de los ecosistemas que componen la biósfera. Tomando en cuenta esto, es preciso considerar la utilización de esta tecnología como parte de una cadena de restauración a nivel global, disociándose de la idea de que sólo se está realizando tratamiento de aguas. Al basar una tecnología en un sistema natural y dar solución a una problemática cuyo origen es la actividad humana se pretende avanzar en pos de una economía que responda a la problemática de la sustentabilidad. Aportar en la regeneración de la biósfera es un factor de éxito de esta propuesta.

🌈 Reutilización de aguas y eficiencia en otros recursos: Disminuir presión existente sobre los recursos naturales, con particular énfasis sobre el uso de agua. Presentar alternativas al modelo de generación de riqueza actual basado en extracción permanente de materias primas, sobreutilización de materiales y exceso en utilización de energías. Bajo un



enfoque circular se disminuye al mínimo la existencia de desechos y de existir se deben eliminar todos los componentes tóxicos e incluso resultar en beneficios para el lugar dónde sean dispuestos. El sistema se alimenta de aguas servidas, catalogadas como desecho, y la salida es agua apta para riego, creando valor de un desecho. Además, al revisar la tabla 8 se puede evidenciar los bajos requerimientos que implican la utilización de un humedal artificial en el tratamiento de aguas: bajos costos de inversión, mantenimiento y operación; el sistema opera por gravedad y, por consecuencia, no requiere inyección de energía externa. De esta forma, estos elementos se traducen en un factor de éxito la propuesta, al esgrimirse como una solución alineada con el enfoque circular y que contrarresta la crisis hídrica.

- Integrar un potencial sector industrial: Ser parte de un proceso de establecimiento de un nuevo sector productivo, donde se apliquen tecnologías sustentables para resolver el problema económico (necesidades v/s disponibilidad de recursos), permite avanzar hacia una mayor valoración económica de este tipo de soluciones. Dentro de las tecnologías sustentables desarrolladas en diversos nichos de innovación se utiliza como base la replicación de sistemas naturales, cambiando la percepción de estorbo y amenaza por una que reconoce a la naturaleza como un organismo que soporta e integra actividades productivas humanas que pueden o no tener por objetivo la restauración ecológica. En paralelo este elemento implica restauración, pero en este caso, a nivel de institucionalidad política, social y económica, favoreciendo la transición de nichos tecnológicos a regímenes tecnológicos, el cambio del paisaje socio-técnico y el aprovechamiento de grandes oportunidades económicas para llevarlo a cabo

6.3.2 Factores de riesgo perspectiva ecológica y económica

- Régimen tecnológico dominante: Tal como es mencionado en el apartado 6.1, la estructura determinante del desarrollo de soluciones existente ha repercutido en el proceso de degradación ecológica. Mientras el régimen tecnológico no sea modificado predominará una visión que excluye el componente ecológico al momento de valorizar procesos o productos. En consecuencia, los requerimientos de tiempo y espacio



seguirán determinando la decisión sobre la utilización de esta tecnología, ya que significan un esfuerzo económico significativo sobre todo a nivel de inversión en terreno. Aun así, existen inversionistas e industrias que ya incorporan el elemento ecológico en la valorización del tratamiento y cuentan con la capacidad y visión suficiente para amortiguar los efectos de este factor de riesgo.

- ✚ Factor climatológico: Como en todo ecosistema existen ciertas condiciones que determinan la efectividad de ciertos servicios que éste provee. En el caso de los humedales construidos hay variables como la temperatura, oxigenación, captación de aguas lluvia, entre otros que inciden sobre la efectividad de depuración del sistema. Este factor de riesgo es posible de disminuir llevando a cabo esfuerzos al momento del diseño, un buen diseño considera todos elementos de variabilidad y genera planes de contingencia ante la eventualidad de verse afectado por estos.
- ✚ Capital comprometido en modelos de producción lineales: Sin duda este debe ser uno de los factores de riesgo con mayor incidencia sobre la propuesta. Ya que la cantidad de capital comprometido en el régimen socio-técnico actual presenta un claro obstáculo para llevar a cabo una transición hacia el uso de tecnologías con enfoque circular o sustentable. La estructura y composición actual de los sectores productivos y de los mercados no son elementos que se modifiquen o adquieran nuevas visiones de manera sencilla, ya que el riesgo que significa reconfigurar un modelo productivo es alto al involucrar gran cantidad de variables. En este sentido el rol del sector público como facilitador de esta transición es determinante, ya que posee herramientas que tienen por objetivo disminuir la incertidumbre y controlar los efectos de este tipo de procesos socio-económicos. De todas formas es una labor que debe ejecutarse frente a sectores que poseen sus modelos de producción y de negocios orientados hacia una explotación sin regeneración de recursos naturales.



6.4 PERSPECTIVA SOCIO-POLÍTICA

La siguiente perspectiva engloba ciertas condiciones que pueden favorecer u obstaculizar una transición tecnológica desde el punto de vista social y político. Se entiende que existen múltiples roles que cumplir desde los diferentes estamentos de la sociedad, donde corresponde también destacar a aquellos que componen entidades gubernamentales, ya que existen herramientas que pueden cambiar la percepción y valoración de los sistemas ecológicos. Por otra parte posiciones políticas rígidas o falta de articulación social que resulta en la perpetuación de una visión lineal, cimentada en la extracción de los recursos naturales sin el respectivo trabajo regenerativo posterior. De esta forma se determinan factores de éxito y riesgo bajo esta perspectiva:

6.4.1 Factores de éxito perspectiva socio-política

Hacia una transición tecnológica: dentro del apartado 6.1 se establecen dos factores de éxito para garantizar la maduración del nicho de innovación de tecnologías sustentables, y favorecer su transición tecnológica, estos son:

- 🌈 Educación hacia una visión integral: Ciertos componentes del modelo extractivo de producción tienen origen común en la poca convivencia entre el proceso formativo para la actividad productiva del ser humano y la integración de éste dentro de un sistema natural que lo contiene. Lo anterior origina o convive con una visión económica que concibe a la naturaleza como un estorbo o como amenaza, impidiendo conocer y considerar elementos de la naturaleza proveedores de servicios ecosistémicos (como en el caso de los humedales, cuyas múltiples funciones se mencionan en el apartado 4.3) como elementos productivos y necesarios para garantizar un desarrollo sostenible de la actividad humana y del planeta. Debido a esto se considera clave el desarrollo de una educación que posea una visión sistémica o integral, que permita establecer relaciones sinérgicas y simbióticas entre asentamientos humanos y el componente funcional sistémico de elementos presentes en la naturaleza. A nivel social – sobre todo para aquellos actores que forman parte del nicho de innovación que incluye esta propuesta –



existe el desafío de propiciar estas instancias educativas integrales, favoreciendo la transición socio-tecnológica hacia una visión sistémica del planeta que permita el desarrollo sustentable a la hora de proponer soluciones a problemáticas humanas.

- Generación de una red de integración entre actores de diferentes sectores de la sociedad, con el fin de redefinir de soluciones y necesidades del contexto social actual. Prueba de la importancia de este elemento es el impacto que ha logrado en la Unión Europea la red de colaboración entre el parlamento europeo, privados, ONG's (fundación Ellen MacArthur, Club of Rome) justamente con el posicionamiento del modelo de economía circular. La gestión de una red bien articulada desde los mecanismos de voluntad, poder y conocimiento facilita una agenda global en ciencia, tecnología e innovación social y consta de: Reunir actores del sector empresarial, del sector social, de la ciencia, de la política e instituciones que tengan la intención de guiar colaborativamente en innovaciones necesarias para apuntar hacia cambios globales. Para dicho fin es necesaria la identificación de aliados estratégicos como:

Sector público: se apela a su calidad como ente regulador siendo responsable de la generación de políticas y cambios en marco regulatorio e institucional con la finalidad de:

- Establecer nuevos focos de inversión: Acceso a herramientas financieras y de gestión del riesgo para apoyar inversión en capital social, en I+D y en iniciativas sustentables.
- Aceleración de procesos de transición: Evitando y desalentando prácticas contaminantes; entregar información sobre composición de los productos;
- Revalorización de los productos: inclusión de costos por concepto de externalidades negativas y positivas precios.
- Propiciar colaboración entre industrias: a través de la entrega de líneas de acción e incentivos se puede lograr simbiosis industrial.
- Catalizar inversiones en modelos de negocios regenerativos.



- Facilitar y participar de las redes de actores relevantes con enfoque a resolver problemáticas locales, regionales y mundiales.

Ministerio del Medio Ambiente (MMA) y Corporación Nacional Forestal (CONAF): Responsables de la administración áreas protegidas dependientes del Estado y administración de recursos destinados para este propósito, se destacan responsabilidades como:

- Avanzar hacia una mayor protección del medio ambiente a través del aumento en superficie de áreas protegidas a lo largo del país.
- Facilitar restauración de zonas que se encuentren deterioradas y signifiquen una pérdida de valor ecológico.
- Aumentar la cantidad de sitios Ramsar en el país ya que a pesar de tener gran potencial sólo existen 9 sitios bajo esta categoría actualmente. El MMA ya ha generado un catastro y plan de manejo de humedales a cargo de la CONAF.
- Proteger la biodiversidad en los distintos ecosistemas y distintas escalas. Desafío presente en la agenda pública.

Fundaciones que promueven la restauración del valor ecológico de los ecosistemas como:

- ECOSAN³⁴: “La Fundación reconoce, que las excretas humanas y las aguas servidas no son basura que deba ser dispuesta, sino más bien son un recurso de alto valor que debe ser aprovechado”. Fundación que tiene por objeto difundir; investigar, desarrollar e innovar; capacitar y educar; patrocinar; implementar y ejecutar: el desarrollo sostenible, mediante el saneamiento sostenible o ecológico y gestión del agua, centrada en la influencia humana en el ciclo del agua y en el ciclo de los nutrientes, sus vínculos con la agricultura y el uso sostenible, tratamiento y reutilización de los recursos. La Fundación aborda el desarrollo sostenible desde el desarrollo económico, el desarrollo social y la protección del medio ambiente, como

³⁴ Extraído desde: <http://www.fundacionecosan.org/index.html>

pilares interdependientes que se refuerzan mutuamente. Entiende un modelo de saneamiento sostenible de forma holística holística, que en orden para ser sostenible, además debe ser socialmente aceptable, tecnológicamente apropiado y económicamente viable. Comprende el manejo sanitario del agua potable, las aguas residuales y excretas, los residuos sólidos y su reducción, reutilización y/o reciclaje, otros que reduzcan los riesgos para la salud, prevengan la contaminación y favorezcan el uso sostenible de los recursos.

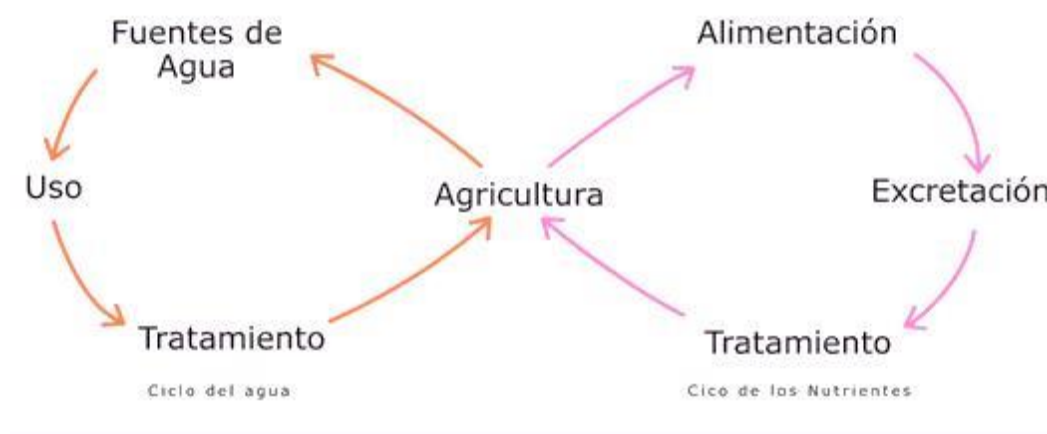


Imagen 8: Ciclo de agua y Ciclo de los Nutrientes en torno a la utilización y reutilización en agricultura. Fuente: Fundación ECOSAN.

- Fundación Chile³⁵: Promotora del rediseño de la cadena productiva desde un enfoque lineal a uno circular en Chile. Fundación Chile motivada por los lineamientos de la Economía Circular ha conocido la visión estratégica del modelo a través de la Fundación Ellen MacArthur, precursora de la EC en el mundo. Fundación Chile considera que la economía circular rompe los paradigmas que limitan la innovación y el emprendimiento. La experiencia de otros países nos señala que este modelo económico otorga grandes oportunidades de negocios con recursos sostenibles. Precursora de proyectos detallados en el apartado 3.3.

³⁵ Texto extraído desde: <http://www.economiacircular.fch.cl/>

- Fundación Kennedy³⁶: La Fundación Kennedy creada en 2004, ha trabajado en la protección del medio ambiente y en particular del agua como recurso fundamental. Esta labor se materializa a través de:

- Actividades ligadas a la conservación de humedales
- Ejecución de acciones de conservación y de manejo sostenible, creando experiencias piloto que posibiliten la generación de modelos metodológicos replicables
- Programas de difusión, sensibilización, promoción y educación en las comunidades sobre la importancia de los humedales.
- Promover la conservación de los humedales y ecosistemas similares
- Colaboración en proyectos de investigación relacionados con humedales
- Recaudación de financiamiento para proyectos de la fundación y para otros creados por organizaciones de la sociedad civil en el ámbito local.

Con el fin de desarrollar conciencia sobre la necesidad de proteger dicho patrimonio ambiental y evitar su degradación y pérdida.



Imagen 9: Imagen corporativa Fundación Kennedy. Fuente: www.fundacionkennedy.cl

- ✚ Habitabilidad: Uno de los rasgos diferenciadores de la propuesta de tratamiento sanitario a través de humedales corresponde a la posibilidad de habitar las plantas de tratamiento, ya que se transforman en grandes extensiones de áreas verdes con alto nivel de biodiversidad. Este factor de éxito permite generar un modelo de negocio que

³⁶ Extraído desde: <http://www.fundacionkennedy.cl/>



implica mayor cantidad de aristas que solo un servicio de depuración, donde una planta de tratamiento también puede ser considerada como: un parque de conservación o restauración; un sitio de observación de aves migratorias; un jardín botánico acuático; entre otras opciones. Al dar más de una función a una planta de tratamiento es posible agregar valor estético, ecológico e incluso económico del lugar de emplazamiento.

6.4.2 Factores de riesgo perspectiva socio-política

🌈 Institucionalidad actual: Existe un componente institucional que forma parte del régimen tecnológico dominante, cuyo propósito es resolver problemáticas en materia de organización y ordenamiento social. No obstante lo anterior, los cambios en el paisaje socio-técnico han determinado nuevos desafíos que se contraponen a algunos propósitos establecidos por la institucionalidad vigente. Un ejemplo de esto hace referencia al código de aguas donde existen concepciones del elemento que han llegado a generar situaciones de conflicto, un caso emblemático es la provincia de Petorca en la Región de Valparaíso, donde se privilegia el uso productivo del recurso hídrico para fines agrícolas por sobre requerimientos básicos sanitarios de la población. En este sentido hace falta un enfoque más amplio dentro de la institucionalidad que en primera instancia permita establecer objetivos comunes entre los actores, donde no exista prevalencia de una visión sin antes generar instancias de diálogo y mediación entre los diferentes estamentos involucrados ante situaciones como la descrita. Complementando lo anterior se esgrime que una visión holística de parte de las instituciones puede garantizar: adaptación y flexibilidad ante el cambio; mejor gestión sobre riesgos; inculcar una visión sistemática de distintos estamentos (REES, 2002)

6.5 PERSPECTIVA COMERCIAL

Bajo esta perspectiva se consideran aquellos elementos que permiten u obstaculizan que la propuesta de tratamiento sea acogida como una alternativa de tratamiento en el contexto comercial actual. Esto sin necesariamente significar un proceso de transformación social,



económico y ecológico como ha sido expuesto previamente. Vale la pena mencionar que bajo una perspectiva netamente comercial la solución no apunta a resolver la crisis hídrica mencionada como la principal problemática, sino que a la generación de un modelo de negocios rentable en base a la propuesta.

6.5.1 Factores de éxito perspectiva comercial

✚ Definir perfil de clientes y estrategias comerciales de captación. Un factor de éxito en todo modelo de negocios corresponde a identificar el perfil de clientes al cual dirijo mi producto y la forma en que me comunico con ellos. Para este caso en particular, dadas las características del contexto anteriormente descrito, se identifica una clara oportunidad de negocios en los siguientes segmentos del mercado: Agricultores y Ganaderos, son subsectores productivos que generalmente se encuentran interrelacionados en muchos aspectos tales como ubicación, insumos y tipo de desechos. Considerando esto existe la posibilidad de establecer alianzas comerciales con el fin de generar simbiosis industrial. Un ejemplo de este beneficio mutuo es como el tratamiento de purines, utilizando un sistema de depuración compuesto por un humedal artificial, permite obtener agua apta para riego conectada a un sistema de regadío de cultivos agrícolas o de follaje para ganado.

Otro segmento corresponde a comunidades rurales, cooperativas de aguas u organizaciones comunitarias de carácter rural. Ya que si logran unificar sus aguas residuales existe la posibilidad de distribuir los costos de implementación entre la cantidad de usuarios del sistema y ser beneficiarios de la reutilización de agua apta para riego. Dentro de este tipo de clientes, se encuentran incluso algunas entidades gubernamentales como SERVIU y el SEREMI del medio ambiente ya que esta tecnología presenta una solución a la contaminación causada por la disposición de desechos de las tomas de terreno en zonas periurbanas.

También existe la posibilidad de dirigir el producto a propietarios de extensiones de



terreno considerables con una visión ecológica desarrollada y con medios económicos para llevar a cabo un proyecto de conservación, restauración o simplemente depuración.

- Desarrollo de productos o procesos complementarios al servicio de tratamiento de aguas a través de humedales. Diversificar o especializar líneas de producción para captar un mayor porcentaje del mercado. Ejemplos de potenciales productos señalados a continuación:

Diseño de humedales flotantes modulares, que realicen depuración en lagos y lagunas que reciban cargas contaminantes de aguas de poblaciones habitacionales o industriales aledañas. También aplicado a reservorios de aguas lluvia o de escorrentía. Separador de sólidos y tratamiento en biodigestor. Este sistema se complementa al tratamiento de aguas residuales, generando las ventajas de contar con mejores condiciones de operación y la posibilidad de producir biogás. Otros productos a considerar como: Tranques de arcilla expansiva (gleying), diseño de red de agua potable y alcantarillado o baños secos ecológicos.

- Ausencia de equipos electromecánicos para su funcionamiento: No requerir este tipo de elementos en el proceso de depuración, permite disminuir considerablemente los costos de inversión, mantenimiento y operación de esta propuesta. Se refleja en prescindir de capacitación especializada en operación. No obstante lo anterior, existen procesos críticos en la construcción de humedales artificiales que sí requieren capacitación como la impermeabilización vía termofusión tratada dentro de los factores de riesgo técnicos
- Habitabilidad: Descrito anteriormente como factor de éxito desde la perspectiva social, también se debe tomar en cuenta su importancia a nivel comercial, entregando alternativas al desarrollar el modelo de negocios en torno a esta propuesta y agregando valor según lo ya expuesto.



6.5.2 Factores de riesgo perspectiva comercial

Competencia, se han logrado reconocer empresas que ya proponen esta tecnología o sustitutos para tratamiento de agua, lo cual representa un factor de riesgo desde una perspectiva comercial. Las empresas encargadas de proveer estos productos y servicios son tres y se listan a continuación:

BIOANTU³⁷: Empresa orientada a la realización de proyectos en manejo hídrico sustentable, descentralizados y eficientes, con especial énfasis en depuración biológica del agua, por medio de fitodepuración. Sus actuales productos son:

- Lagunas e Impermeabilización: Implementación de lagunas ornamentales y tranques de riego con impermeabilización mediante membranas de diferentes materiales, EPDM, HDPE, LDPE, PVC, TPO. Agregando valor estético.
- Piscinas Naturales: Diseño e implementación de piscinas naturales, las cuales operan bajo el principio de depuración biológica del agua por medio de plantas acuáticas, sin utilización de agentes químicos (desinfectantes y/o coagulantes).
- Tratamiento Ecológico de Aguas Negras y Grises: Ejecución de proyectos y asesorías en el manejo de aguas residuales mediante procesos naturales de depuración, logrando índices de calidad del agua acorde a las normas chilenas. Permite la recuperación de agua apta para riego.
- Cosecha de agua lluvia y atrapa niebla: Sistemas inteligentes y eficientes de cosecha de agua lluvia para usos domiciliarios, comerciales e industriales. Ejecución de proyectos para la correcta captación y acumulación de agua niebla.

³⁷ Extraído desde: <https://www.bioantu.cl/proyectos-1>



DEPARTAMENTO
DE INDUSTRIAS

UNIVERSIDAD TÉCNICA
FEDERICO SANTA MARÍA



Imagen 10: Imagen corporativa BioAntú. Fuente: www.bioantu.cl

BIOINGENIERÍA VETIVER CHILE³⁸: Empresa que posee como misión corporativa el desarrollo del sistema vetiver (VS) en Chile fomentando su uso para la prevención de daños al medioambiente y propender a su mejoramiento. También otorgar una nueva herramienta de ingeniería para la estabilización de infraestructura mitigando posibles desastres naturales. Su principal producto es tratamiento de aguas y estabilización de suelos a utilizando el vetiver, planta depuradora con múltiples particularidades entre las que se encuentra: la capacidad de resistir a sequías, alta tolerancia a la salinidad y alta tolerancia a metales pesados en suelo y agua.



Imagen 11: Imagen Corporativa Vetiver Chile. fuente: www.vetiver.cl

³⁸ Extraído desde: www.vetiver.cl

SISTEMA TOHÁ³⁹: También conocido como Biofiltro Dinámico Aeróbico o lombrifiltro, descrito en el apartado 4.4.2 de sistemas de tratamiento utilizados, corresponde a una tecnología de tratamiento de aguas residuales a través de un filtro percolador compuesto de diferentes estratos filtrantes y lombrices. Es una tecnología presente en el mercado desde el año 1994 y, a pesar de su poco tiempo en el mercado, existe presencia considerable de este sistema tanto en Chile como en países tales como Argentina, Paraguay, México, Bolivia, Ecuador, India, entre otros. Se presenta como un sustituto de los humedales construidos debido a la replicación de un sistema natural para el tratamiento de aguas con el rasgo diferenciador de ser mucho más eficiente en términos de espacio y flexibilidad. Sin embargo su complejidad y valor estético se presenta como desventaja.



Imagen 12: Sistema Tohá®. Fuente: www.sistematoha.cl

- ✚ Distribución de costos de inversión: la impermeabilización de la superficie donde se implementa el humedal artificial es catalogada como crítica desde el punto de vista tanto comercial, como técnico. Lo anterior debido a que el costo de la geomembrana y el proceso de termofusión generalmente implican entre el 30% al 40% de la inversión. Por lo que debe considerarse un factor de riesgo su correcta ejecución. Esto sin considerar la inversión en el terreno dado el elevado costo de m² y la necesidad de grandes extensiones de terreno para el emplazamiento de este tipo de proyectos.

³⁹ Extraído desde: www.sistematoha.cl



6.6 PERSPECTIVA TÉCNICA

La perspectiva técnica recoge aquellos elementos que se consideran críticos en el diseño e implementación del humedal, etapas que determinan el buen funcionamiento y el valor ecológico que es capaz de entregar esta tecnología

6.6.1 Factores de éxito perspectiva técnica

🌱 Elección de humedal construido: Dependiendo de las características de cada proyecto es imperante seleccionar de qué forma debe emplazarse el humedal. Para tratamiento leve o secundario es posible construir humedales con flujo superficial, dónde la acción depuradora es realizada a nivel de tallo y hojas de la vegetación. En el caso de tratamientos de agua con alta carga de contaminantes es requerido un medio granular en contacto con raíces de la vegetación, por lo que el flujo del agua debe ser bajo la superficie, por lo que debe considerarse un humedal artificial de flujo sub superficial o HAFSS. Además dependiendo de la presencia de ciertos elementos debe considerarse si el sentido del flujo es horizontal o vertical, estos parámetros de diseño responden a la necesidad de cada proyecto

🌱 Selección de plantas para sistema de depuración: Tal como se menciona en el apartado 4.5 la vegetación aporta múltiples funciones a los humedales y se presenta como un rasgo diferenciador al proporcionar valor estético a esta tecnología de depuración. Dado se considera como un factor de éxito considerar que las especies a utilizar deben:

Ser plantas nativas con un sistema eficaz de transporte de oxígeno hacia las partes subterráneas para promover la degradación aeróbica y la nitrificación y crecer fácilmente en las condiciones ambientales del sistema proyectado.



También poseer capacidad colonizadora activa, con eficaz extensión del sistema de rizomas y que alcancen una biomasa considerable por unidad de superficie, para conseguir la máxima asimilación de nutrientes y capacidad de tolerar los contaminantes presentes en aguas residuales. Además, la biomasa subterránea debe poseer una gran superficie específica para potenciar el crecimiento de la biopelícula.

- Mejora continua: Corresponde al área de investigación y desarrollo. Debe considerar generación de prototipos, validación de técnicas y procedimientos que tenga por objeto obtener productos y servicios con mayor valor ecológico, además de mayor impacto y capacidad de adaptación dentro del proceso de restauración ecológica. Implica:

Generar prototipos de Gleying a aplicar sobre la superficie a inundar utilizando técnicas como: el compostaje, impermeabilización en bioconstrucción y arcilla expansiva.

Integración al sistema de elementos propios de cada lugar de emplazamiento: Realizar procesos de constante aprendizaje y generación de conocimiento al implementar proyectos en zonas con características diversas, tomando en cuenta los siguientes elementos:

- Hacer uso de topología del terreno
- Respetar cauces naturales involucrados
- Balances que consideren la totalidad de la información hidrográfica disponible.
- Realización de estudio de estructura y composición del suelo y otros estudios de carácter climático, ornitológico, micológico, etc.

6.6.2 Factores de éxito perspectiva técnica

- Saturación: Considerar la variabilidad de los flujos hídricos de la zona de emplazamiento del proyecto es un parámetro crítico ya que el rebalse de este tipo de sistemas genera desestabilizaciones que alteran el funcionamiento del sistema de



depuración. Considerar colección de aguas lluvias y posible estacionalidad dependiendo de la naturaleza de cada proyecto

- ✚ Dimensionamiento: Otro factor de riesgo que debe ser previsto en la etapa de diseño, ya que un dimensionamiento excesivo favorece proliferación de la vegetación y un riesgo de eutrofización por falta de oxigenación, además de elevar el monto de inversión ya que el costo por m^2 es uno de los elementos más críticos dentro la estructura de costos de la propuesta. Por otra parte un subdimensionamiento representa la incapacidad del sistema para tratar la carga de contaminantes que compone el agua residual, provocando incumplimiento de normativa; contaminación de napas, riesgos sanitarios y alternaciones del medio que provocan inhabilitabilidad de las plantas de tratamiento.
- ✚ Impermeabilización con geomembrana: se considera un proceso crítico dentro de la etapa de construcción debido al costo del material y al nivel de capacitación requerido para ejecutar este proceso por lo que debe ser realizado por profesionales, a través de un proceso de termofusión, su instalación evita pérdidas por infiltración

7 CASO DE ESTUDIO: DISEÑO Y EVALUACIÓN HUMEDAL ARTIFICIAL PARA PARQUE VALLE LOS ULMOS.

Ubicado en la localidad de ensenada, comuna de Puerto Varas, Región de Los Lagos el parque Valle los Ulmos es un proyecto de conservación a través del desarrollo de un parque privado que cuenta con 650 hectáreas de territorio, de las cuales 24 has. han sido destinadas para la creación de 9 villages o conjuntos de parcelas de 5000 m^2 . Todo el resto de las superficies y recursos, son de uso común, donde se han incluido los espacios de mayor relevancia del lugar. Al igual que la mayoría de los campos, en este territorio han sido talados los bosques y los sectores planos cumplían la función de forraje para animales, en este escenario actual la principal tarea es restaurar y reconectar corredores ecológicos, en particular a través de gestión sobre los cuerpos de agua y recursos hídricos. Además, el proyecto contempla desarrollar agricultura orgánica y granja en menor escala, con el



propósito de transformarse en una comunidad autosustentable en el futuro, incluyendo el desarrollo de proyectos de educación y turismo que permitan posicionar el lugar como soporte de actividades comunitarias, rurales y de aprendizaje de oficios que brinden valor al quehacer rural y al entorno del parque. Dada esta situación es que la administración consideró pertinente la construcción de un humedal artificial para el tratamiento de aguas residuales provenientes desde el centro de visitantes. Al requerir depuración de aguas tanto grises como negras es pertinente seleccionar un humedal artificial de flujo subsuperficial horizontal (HAFSSH).

Tomando en cuenta estacionalidad de visitantes y caracterización de las aguas residuales se realiza el diseño del HAFSSH con los siguientes parámetros:

Datos Generales		
Parámetros	Unidad	Cantidad
Nº Habitantes	hab	12
Dotación	l/hab/día	200
Caudal Q	l/día	2400
Transformación Q	m ³ /día	2,4
Temperatura	°C	18
Porosidad	%	0,35
Profundidad	m	0,7
Relacion Largo Ancho	-	2:1
DBO Entrada	mg/l	322
Norma DBO Descarga	mg/l <	35

Tabla 9: Parámetros de diseño HAFSSH. Fuente: Humedal Chile

El diseño considera funcionalidad en términos de carga biológica e hidráulica, además de un factor de seguridad de 1.75 justificado bajo el argumento de la estacionalidad de visitantes. Se establecen las siguientes dimensiones de construcción del HAFSSH:

Factor de seguridad		1,75
Dimensiones		
Largo	m	15
Ancho	M	7
Área	m ²	110

Tabla 10: Dimensiones HAFSSH. Fuente: Humedal Chile



El área a construir corresponde a 110 m², representando un equivalente de 9 m² promedio por habitante.

La construcción del humedal posee tres etapas: un mes de obra gruesa, un mes de instalación de cámaras de inspección y tuberías y 8 meses de construcción del humedal propiamente tal. Completando una duración aproximada de 10 meses.

Dentro de los requerimientos se señalan: un arquitecto, maquinaria de excavación, dos jornales y dos especialistas para el proceso de termofusión.

En la tabla 11 se presenta el presupuesto preparado por Humedal Chile de un HAFSSH para el parque Valle los Ulmos, donde es posible evidenciar detalladamente los costos de inversión necesarios para materializar este proyecto significando un total neto de \$5.671.275. Además es posible verificar cuáles son los elementos de la propuesta que requieren mayor esfuerzo económico, tal como fue mencionado anteriormente el proceso de impermeabilización que considera la geomembrana, el geotextil y su instalación alcanzan un monto de \$1.618.315, representando cerca del 30% de los costos de inversión. También destaca en costos el relleno a través de gravilla significando \$702.813 y la adquisición de juncos que implica una inversión de \$562.692.



DEPARTAMENTO
DE INDUSTRIAS

UNIVERSIDAD TECNICA
FEDERICO SANTA MARIA

Partida ⁴⁰	Unidad	Cantidad	Precio Unit	Total
Diseño				
Ingeniería y diseño	gl	1	\$ 460.000	\$ 460.000
Sistema Tratamiento				
Obra Gruesa				
Zanja para Tuberías	hr/máq	1,0	\$ 20.000	\$ 20.000
Movimiento de tierra	hr/máq	16,0	\$ 20.000	\$ 320.000
Arena para Tubería	m3	2,4	\$ 13.000	\$ 31.590
Relleno (Bolones)	m3			\$ 301.206
Relleno (Gravilla)	m3			\$ 702.813
Geotextil	m2	169,6	\$ 2.500	\$ 423.922
Geomembrana	m2	169,6	\$ 4.213	\$ 714.393
Instalación Geomembrana	gl	1,0	\$ 480.000	\$ 480.000
Estanques y Fitting				
Cámara Inspección	un			\$ 191.970
Reducción	un			\$ 1.504
Válvulas	un			\$ 26.970
Tubería PVC-S	mt			\$ 60.210
Tee 1	un	1,0	\$ 978	\$ 978
Tapa 1	un	2,0	\$ 466	\$ 932
Tubería PVC-P	un			\$ 21.768
Unión Estanque	un	5,0	\$ 2.972	\$ 14.860
Tee 2	un	5,0	\$ 1.205	\$ 6.025
Tapa 1	un	6,0	\$ 544	\$ 3.264
Vinilit 473cc	un	1,0	\$ 5.915	\$ 5.915
Plantas				
Plantas Scirpus Spp	un			\$ 562.692
Mano de obra				
Jornales (2)	dia	5	\$ 30.000	\$ 150.000
Gastos Generales	gl	1		\$ 225.051
Subtotal				\$ 4.726.063
Margen mínimo	gl	1		\$ 945.213
Total Neto				\$ 5.671.275
I.V.A (19%)				\$ 1.077.542
Total Presupuesto				\$ 6.748.817

Tabla 11: Presupuesto HAFSSH Valle los Ulmos. Fuente: Humedal Chile.

⁴⁰ En algunas partidas se omite información de detalle y valores por requerimiento de Humedal Chile.



A modo de beneficios obtenidos tras la instalación del HAFSSH es posible cuantificar económicamente algunos de ellos. En primera instancia se debe aclarar que del caudal que ingresa al sistema es posible reutilizar casi la totalidad de éste para efectos de riego se considera una recuperación hídrica del 90% del caudal diario. Significando una cantidad anual de 788 m³ de agua apta para riego disponible para su utilización.

Bajo el supuesto que de no utilizar el HAFSSH el parque debiese obtener el agua para riego desde la distribuidora ESSAL, sanitaria de la Región de Los Lagos, se cuantifica el valor del m³ de agua con el valor de \$552 correspondiente al costo del agua potable con flúor⁴¹. Dado esto el beneficio económico anual por concepto de reutilización de aguas residuales para riego asciende a \$435.323.

Otro elemento que genera beneficios económicos es la frecuencia en el retiro de lodos, según cotizaciones realizadas a empresas de limpieza de fosas sépticas se obtuvo que el valor del servicio, dimensionado a la cantidad de habitantes supuesta, corresponde a \$200.000. El servicio de retiro de lodos se debe realizar una vez cada 6 años cuando se posee un HAFSSH, mientras que de sólo operar con la fosa séptica el servicio posee una frecuencia de entre 8 a 12 meses. Por ende al prorratar el valor de servicio en la cantidad de años que es requerido se obtiene un beneficio anual de aproximadamente \$170.000.

Es correcto asumir que, desde una perspectiva netamente financiera y bajo un análisis bastante simple de costo beneficio, el tamaño de esta inversión no resulta justificado ni en un horizonte de 5 años.

Sin embargo existen otros elementos que pueden sumar valor a la propuesta desde el punto de vista estético y ecológico como ya se ha mencionado previamente. Un producto similar que entrega mayor valor estético y un limitado valor ecológico en comparación con

⁴¹ El supuesto es aplicado debido a la falta de una estimación mejor.



los humedales es una piscina natural. El valor referencial de este tipo de construcciones es de \$150.000⁴² el m².

Por lo tanto con la inversión que se necesita para construir 110m² de humedal es posible construir una piscina natural de 45m² disminuyendo a la mitad el área de captación de aguas lluvia y sin los beneficios de reutilización de agua y disminución de frecuencia del servicio de retiro de lodos, pero con mayor beneficio en términos recreativos.

Tomando en cuenta el caso del parque Valle los Ulmos es correcto mencionar que el humedal construido es un producto que adecuado para con las necesidades del cliente, cuyos beneficios se reflejan más allá de lo económico. Aun así es una opción que se presenta viable frente a otras posibilidades como dejar sólo la fosa séptica o la instalación de una piscina natural con fines recreativos, ninguna de estas opciones permite la reutilización de aguas residuales para riego.

8 CONCLUSIONES

A modo de cierre del presente es posible establecer que se logra, en primera instancia, hacer un levantamiento de datos y argumentos emitidos desde organismos internacionales como la Organización de las Naciones Unidas (ONU), la Organización para la Cooperación y Desarrollo Económicos (OCDE) o la Organización Mundial de la Salud (OMS) que dan cuenta de una crisis hídrica de nivel mundial. Además es posible establecer que dentro de los elementos que se han identificado como causa y agravante de esta situación es la actividad humana. Desde los organismos anteriormente mencionados se han creado instancias de participación y diálogo con el objeto de que los gobernantes e industrias impulsen una mejor gestión sobre los recursos hídricos a nivel mundial. En términos globales la extracción de agua continental alcanza un total de 4001 km³ de los cuales el 69% corresponde al sector agrícola que es por lejos el sector productivo que más impacto genera, repitiéndose la tendencia a nivel mundial y en nuestro país donde 29,42 km³ de

⁴² <http://www.diariosustentable.com/2016/chilenos-construyen-innovadoras-piscinas-naturales-de-agua-cristalina/>



aguas continentales son extraídas para uso agrícola representando el 83% del total. Esto da cuenta que Chile no es la excepción, donde se han evidenciado alteraciones degenerativas en cuerpos de agua y, por ende, cambios climáticos que han generado alarmas incluso en las zonas más australes.

Ante esta situación se ha determinado que ya no es suficiente disminuir el daño sobre el medio ambiente y que éste requiere de forma urgente un proceso de restauración ecológica más allá de la conservación de los ecosistemas. Los enfoques productivos lineales utilizados mayoritariamente en el mundo se han mostrado limitados al no generar soluciones a esta problemática e incluso se agudiza. Considerando esto se logra caracterizar el enfoque circular, cuyos 3 principios fundamentales hacen referencia a los recursos renovables de carácter biológico y lo importante y eficiente que resulta integrarlos como parte de los sistemas productivos, pero desde una valorización ecológica diferente a la actual donde la biósfera es concebida como un soporte fundamental de la actividad humana y, por ende, debe ser restaurado constantemente como parte del flujo productivo. La economía circular se ha caracterizado en este trabajo como una opción viable al modelo de producción lineal y acorde al contexto, y se han logrado visibilizar experiencias en diversas industrias y países donde Chile no queda afuera.

Por otra parte se ha argumentado que como elemento fundamental para la regeneración del estado actual del medio ambiente se esgrimen los humedales, se han mencionado las múltiples funciones ecosistémicas que proveen en términos ecológicos, económicos y sociales. De esta forma en este trabajo se ha logrado evidenciar una revalorización que ha logrado generar interés mundial por los humedales estableciéndose convenios internacionales como la convención RAMSAR. Además se ha presentado la fitodepuración como un rango distintivo propio de los humedales que es posible replicar para realizar tratamiento de aguas residuales con origen en actividades humanas.

Se ha propuesto entonces que el uso de humedales artificialmente contruidos para tratamiento de aguas y la reutilización del agua tratada en el sector agrícola para regar es una solución que aplica de forma óptima los principios del enfoque circular, pero debe generar mayor presencia en el mercado de tratamiento de aguas para lograr un impacto



positivo en el medio ambiente. Para esto se han llevado a cabo análisis comparativos cualitativos y cuantitativos. Desde el punto de vista cualitativo se ha realizado un análisis FODA y de matriz de requerimientos donde se han logrado identificar ciertos elementos que han impedido un mejor posicionamiento de esta tecnología en el mercado como es el caso de las grandes extensiones de terreno que requieren estos sistemas o el tiempo de estabilización del sistema. Pero también se ha logrado establecer elementos que convierten a los humedales construidos en un producto competitivo dentro del mercado como los bajos costos de inversión, mantención y operación, junto con el valor estético que agregan en los sitios donde son emplazados.

Otro análisis cualitativo llevado a cabo corresponde a la discusión sobre cuál es la condición actual y los desafíos de las tecnologías sustentables como nichos de innovación, insertos en un paisaje socio-técnico que parece estar generando un ambiente propicio donde se han expuesto antecedentes de este cambio. A pesar de esto, se argumenta que las tecnologías sustentables no han logrado consolidarse como régimen tecnológico debido a falta de desarrollo de una voluntad común, redes de poder y conocimiento generalizado desde los actores involucrados en este tipo de iniciativa hacia el resto de la sociedad. Por otra parte también se ha dejado en claro que existe una resistencia de parte del régimen tecnológico actual desde los capitales involucrados y una visión más pragmática al momento de relacionarse con el medio ambiente.

La recopilación de antecedentes, el levantamiento de la propuesta y los análisis cualitativos que se han llevado a cabo se engloban en la definición de factores de éxito y de riesgo de la propuesta bajo cuatro perspectivas. En primera instancia se levantan los factores ecológicos y económicos que plantean una problemática amplia que depende de estos elementos clave para facilitar o impedir una transición hacia visión integral que considere los sistemas naturales como un beneficiario de las actividades humanas a través de modificaciones en su modelo productivo. Posteriormente se hace referencia a los factores clave desde la perspectiva socio-política donde se postula que la educación y la generación de redes entre actores de distintos sectores de la sociedad, pueden favorecer u obstaculizar los procesos necesarios para aportar hacia la transición anteriormente descrita en una escala



significativa. También se estableció qué elementos claves deben tomarse en cuenta desde una perspectiva comercial y técnica para que esta tecnología se posicione mejor a través de elementos diferenciadores que en el contexto actual se encuentran valorizados, pero que debido a las limitaciones de este estudio no pudieron cuantificarse. Es el caso del valor estético del lugar de emplazamiento o la posibilidad de ampliar el modelo de negocios.

Aun así, se logra realizar un análisis cuantitativo a través de un caso práctico de diseño de un tratamiento de aguas residuales a través de un humedal artificial de flujo subsuperficial horizontal (HAFSSH) llevado a cabo por Humedal Chile para el parque Valle los Ulmos ubicado en ensenada. Se levanta un presupuesto que implica una inversión de \$6.748.817 donde se estima que los beneficios en reutilización de agua y reducción en frecuencia del servicio de retiro de lodos no justifican esta propuesta desde lo netamente financiero, sin embargo al considerar las posibilidades que tiene el cliente y sus preferencias se establece que sí es la mejor opción para el caso expuesto.

La utilización de humedales artificiales es una realidad en el mundo y requiere de una atención particular en Chile considerando el estado de conservación actual, sólo el 2% de aproximadamente 1.5 millones de [ha], la replicación, restauración y conservación de humedales es un proceso necesario para poder restablecer la disponibilidad y calidad de elementos vitales como el agua y el suelo. Además se establece una oportunidad de negocio regenerativa que puede establecer un sector productivo que tenga por objeto garantizar el bienestar de los sistemas naturales que proveen de servicios ecosistémicos claves para el crecimiento y desarrollo humano de largo plazo.



9 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABU-GHUNMI, D., ABU-GHUNMI, L., KAYAL, B., BINO, A., (2016). Circular economy and the opportunity cost of not closing the loop of water industry: the case of Jordan. *Journal of Cleaner Production*, 131, 228-236.

BUSTAMANTE, M., 1999. Diseño conceptual de la disposición de lodos y biosólidos provenientes de plantas de tratamiento de aguas servidas. Tesis para optar al Título de Ingeniero Civil Químico. Santiago, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas.

GERSBERG, R., GEARHART, R., IVES, M., (1989a). Pathogen removal in constructed wetlands. In: *Constructed Wetlands for Wastewater Treatment*, D.A. Hammer, ed., Lewis Publishers, Che Michigan, pp. 431-446.

HAMMER, D. (1989). *Constructed Wetlands for Wastewater Treatment: Municipal, Industrial and Agricultural*, D.A. Hammer, ed.

HERNÁNDEZ-SANCHO, F., MOLINOS-SENANTE, M., SALA-GARRIDO, R. (2010). Economic valuation of environmental benefits from wastewater treatment processes: An empirical approach for Spain. *Science of The Total Environment*, 208(4), 953-957.

JASANOFF, S. (1982) Science and the limits of Administrative Rule-Making. *Osgood Hall Law Journal*, 20 195–219.

LOPOLITO, A. MORONE, P. SISTO, R. (2011). Innovation niches and socio-technical transition: A case study of bio-refinery production. *Futures*, 43, 27–38.

MMA - Centro de Ecología Aplicada. 2011. Diseño del inventario nacional de humedales y el seguimiento ambiental. Ministerio de Medio Ambiente. Santiago. Chile.164



MORONE, P. TAYLOR, R. (2010) Knowledge Diffusion and Innovation, Edward Elgar, Cheltenham, UK.

NÚÑEZ JOVER, J. (1999) La ciencia y la tecnología como procesos sociales: Lo que la educación científica no debería olvidar. Ciencia Tecnología Sociedad e Innovación. Universidad de la Habana. Cuba.

NÚÑEZ SOLÍS, J. (2001) Manejo y conservación de suelos. Editorial Universidad Estatal a Distancia San José, Costa Rica.

PÉREZ ODDERSHEDE, A. (2010) Selección de Sistema de Tratamiento de Aguas Residuales para Localidad de Santa Bárbara usando metodología de decisión multicriterio AHP. Memoria (Ingeniería Civil). Universidad de Chile.

PIZARRO FUENTES, L. (2011) Diagnóstico y desafíos para los Sistemas de Tratamiento de Aguas servidas en localidades rurales. Memoria (Ingeniero Civil). Universidad de Chile

RAMÍREZ, G. (2003) El corredor biológico mesoamericano. CONABIO. *Biodiversitas*, 47, 1-3.

REES, J. (2002) Riesgos y gestión integrada de recursos hídricos. Global Water Partnership Comité Técnico (TEC), TEC Background Papers, 6. Disponible en: <http://www.gwp.org/globalassets/global/toolbox/publications/background-papers/06-risk-and-integrated-water-management-2002-spanish.pdf>

ROJAS SÁNCHEZ, N. (2015) Análisis normativo, técnico y medioambiental de los baños secos en Chile: Tratamiento de aguas grises de un UDDT. Memoria (Ingeniera Civil Ambiental). Universidad Técnica Federico Santa María.



DEPARTAMENTO
DE INDUSTRIAS

UNIVERSIDAD TECNICA
FEDERICO SANTA MARIA

SLOVIC, P. (1992) Perception of risk: Reflections on the psychometric paradigm. En S. Krimsky & D. Golding (eds.), *Social Theories of Risk*. 117--152

UNESCO-WWAP (2003) Water for people, wáter for life: Executive Summary of the UN World Water Development Report, United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO), Paris, France. © UNESCO-WWAP Prensa Libros para la edición española.



10 GLOSARIO

Corredor biológico: un espacio geográfico delimitado que proporciona conectividad entre paisajes, ecosistemas y hábitats, naturales o modificados, y asegura el mantenimiento de la diversidad biológica y los procesos ecológicos y evolutivos.

Cuenca hidrográfica: Depresión del suelo rodeada de terreno alto. Ahora bien, una cuenca hidrográfica es una zona de terreno donde toda el agua que cae en ella, incluida la de las precipitaciones y la nieve derretida, converge en un único punto en un área de terreno bajo que corresponde a la salida de la cuenca y en la cual toda el agua de esta se une a un cuerpo de agua como un mar, un río, un lago, un estuario o el océano. En pocas palabras, una cuenca hidrográfica es toda la zona drenada por las aguas que en cierto punto se unen y desembocan hacia otro cuerpo de agua.

Escorrentía: La escorrentía es la cantidad del agua de lluvia que excede la capacidad de infiltración del suelo. Si la lluvia caída supera esa capacidad, el exceso escurre hacia arroyos, quebradas, ríos, lagos y océanos. Para realizar cálculos matemático-hidrológicos, el proceso de escorrentía normalmente se considera asociado a una cuenca, denominada área de captación de la lluvia.

Gleying: Proceso de anegamiento y reducción en los suelos. En suelos encharcados donde el agua reemplaza el aire en los poros, el oxígeno es rápidamente usado por los microbios que se alimentan de la materia orgánica del suelo. Obteniéndose un suelo impermeable denominado *gley*.

Lodos y fangos: mezcla de agua y sólidos separada de diversos tipos de aguas residuales mediante procesos naturales o artificiales.

Lodos activos: masa biológica (flóculos) que se produce en el tratamiento de las aguas residuales por el crecimiento de bacterias en suspensión y de otros microorganismos bajo condiciones aerobias o anóxicas.