

# Humedales construidos para tratamiento y reúso de aguas servidas en Chile: reflexiones

• Ismael Vera\* • Camila Jorquera •  
*Centro de Investigación y Desarrollo en Recursos Hídricos (CIDERH), Chile*

\*Autor de correspondencia

• Daniela López • Gladys Vidal •  
*Universidad de Concepción, Chile*

## Resumen

Vera, I., Jorquera, C., López, D., & Vidal, G. (mayo-junio, 2016). Humedales construidos para tratamiento y reúso de aguas servidas en Chile: reflexiones. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 7(3), 19-35.

Este trabajo tuvo por objetivo analizar el tratamiento de aguas servidas para Chile, como ejemplo de país en vía de desarrollo, discutiendo sobre la participación y desarrollo de los humedales construidos (HC), abordando la realidad actual, junto a los desafíos técnicos y normativos, que permitan un aumento de su aplicación, y la reutilización de efluentes en riego de actividades agrícolas. Para esto, se realiza una discusión y análisis de reportes oficiales, bibliografía y normativa. Los resultados mostraron que Chile tiene una cobertura de tratamiento de 100% en zonas urbanas. Sin embargo, para las áreas rurales, la cobertura alcanza como máximo 20%. Pese a que existen más de 800 PTAS, los HC tienen una participación minoritaria, inferior a 2%, utilizados sólo en PTAS descentralizadas de la zona centro como tratamiento secundario. Los HC instalados fueron competitivos en costos de construcción y operación. Así, HC experimentales mostraron un desempeño depurativo similar al de sistemas de lodos activados. Esto haría a los HC una tecnología atractiva de implementar en PTAS descentralizadas. Para esto, se analizaron propuestas de PTAS basadas en HC; también se realizaron propuestas de secuencias de tratamiento por zona geográfica, pero existen desafíos por vencer y que se discuten en este artículo. Finalmente, la reutilización de efluentes demanda de más estudio e investigación, así como de un marco regulatorio específico. Además, se necesita la definición de temas jurídicos y de incentivos. Estos puntos serían similares a otros de países en vías de desarrollo.

**Palabras clave:** conductividad eléctrica, humedales construidos, materia orgánica, patógenos, reúso.

## Abstract

Vera, I., Jorquera, C., López, D., & Vidal, G. (May-June, 2016). *Constructed Wetlands for Wastewater Treatment and Reuse in Chile: Reflections*. *Water Technology and Sciences (in Spanish)*, 7(3), 19-35.

This work aimed to analyze the wastewater treatment in Chile, as example of developing country, for discussing the participation and development of Constructed Wetlands (CW), addressing the current situation besides technical and regulatory challenges that allow increasing in their application, and water reuse of their effluents in irrigation activities. For this, official reports, scientific and regulatory information were discussed and analyzed. The results showed that Chile has a treatment coverage of 100% in urban areas. However, in rural areas the coverage is below 20%. Although there more than 800 WWTP, the CW have a minority participation below 2%, and CW were used only in decentralized WWTP as secondary treatment. CW were competitive in construction and operation cost. Likewise, experimental CW showed similar depurative performance than activated sludge systems. This would make to CW an attractive technology for decentralized WWTP. For this, WWTP proposals based on CW were analyzed, and new treatment sequences were also developed and discussed by area, but there are challenges to overcome. This challenges were discussed in this paper. Finally, wastewater reuse requires further research, as well as a specific regulatory framework. Furthermore, important definitions in legal and incentives issues are required. These points would be similar to other developing countries.

**Keywords:** Electrical conductivity, constructed wetlands, organic matter, pathogens, reuse.

---

Recibido: 27/03/2015  
Aceptado: 11/12/2015

---

## Introducción

Las aguas servidas se originan por la mezcla de tres fuentes principales: a) residuos líquidos domésticos (incluyendo residencias, instituciones y comercio); b) aguas de infiltraciones y precipitaciones; c) residuos industriales líquidos (RILES) (Romero, 2004). El cuadro 1 presenta características típicas de aguas servidas, donde se observan altas concentraciones de parámetros relacionados con la materia orgánica (demanda química de oxígeno, DQO, demanda biológica de oxígeno a los cinco días, DBO<sub>5</sub>); sólidos (sólidos suspendidos totales, SST); nutrientes (amonio, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>; fosfato, PO<sub>4</sub><sup>-3</sup>; nitrógeno total, NT; fósforo total, PT), y organismos patógenos (coliformes fecales). Por esta razón, para el reúso de aguas servidas se necesita su adecuación a partir de procesos de tratamiento.

La actividad de tratamiento posee tres partes: recolección, tratamiento y descarga (Massoud, Tarhini, & Nasr, 2009). De ellas, el tratamiento se realiza en una instalación física denominada "planta de tratamiento", que constituye el eje central de mejoramiento de calidad del agua y, por tanto, el factor que rige su calidad efluente para la descarga o reúso. En este sentido, las plantas de tratamiento de aguas servidas (PTAS) se pueden clasificar en: a) centralizadas y b) descentralizadas (Massoud *et al.*, 2009). Las PTAS centralizadas son grandes instalaciones que tratan las aguas servidas recolectadas por una extensa red de alcantarillado instalada

en zonas urbanas de más de 2 000 habitantes. Emplean tecnologías de tratamiento que se caracterizan por presentar un alto grado de mecanización, consumos energéticos importantes, bajo valor estético y necesidad de personal especializado para su mantenimiento (Romero, 2004). Por el contrario, las PTAS descentralizadas son instalaciones de tratamiento localizadas cerca del origen, tratando la producción de aguas servidas de poblaciones por lo general inferiores a 2 000 habitantes (Libralato, Volpi, & Avezzù, 2012). En este rango de población se incluyen de manera principal zonas rurales y áreas periurbanas. En el caso de PTAS descentralizadas, se ha recomendado el uso de tecnologías "más simples", como los humedales construidos (HC).

Los HC son sistemas de ingeniería diseñados y construidos para embalsar el agua bajo diferentes condiciones operativas, aprovechando así los procesos naturales que involucran vegetación, suelos y bacterias, para tratar los residuos líquidos como las aguas servidas (Vymazal, 2007). De acuerdo con la dirección de flujo y la posición del nivel de agua, los humedales construidos se clasifican principalmente en tres tipos: a) flujo horizontal superficial (HS); b) flujo horizontal subsuperficial (HSS); c) flujo vertical subsuperficial (HV) (Fonder & Headly, 2013). La figura 1 presenta los tres tipos de HC descritos y sus componentes principales. Esta tecnología de tratamiento ha mostrado un crecimiento importante en el mundo a partir de la década de 1990. Por tanto, los HC representan una variante

Cuadro 1. Concentraciones típicas encontradas en aguas servidas. Adaptado de Rojas, Vera y Vidal (2013), y Vera, Araya, Andrés, Sáez y Vidal (2014).

Parámetro	Unidad	Rango
pH	Und.	6.5-8.5
Demanda química de oxígeno (DQO)	mg/l	250-1 600
Demanda biológica de oxígeno a los cinco días (DBO <sub>5</sub> )	mg/l	110-800
Sólidos suspendidos totales (SST)	mg/l	120-450
Nitrógeno total (NT)	mg/l	20-120
Amonio (NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> )	mg/l	12-100
Fósforo total (PT)	mg/l	2-23
Fosfato (PO <sub>4</sub> <sup>-3</sup> )	mg/l	3-15
Coliformes fecales (CF)	NMP/100 ml	1 x 10 <sup>3</sup> -2 x 10 <sup>8</sup>

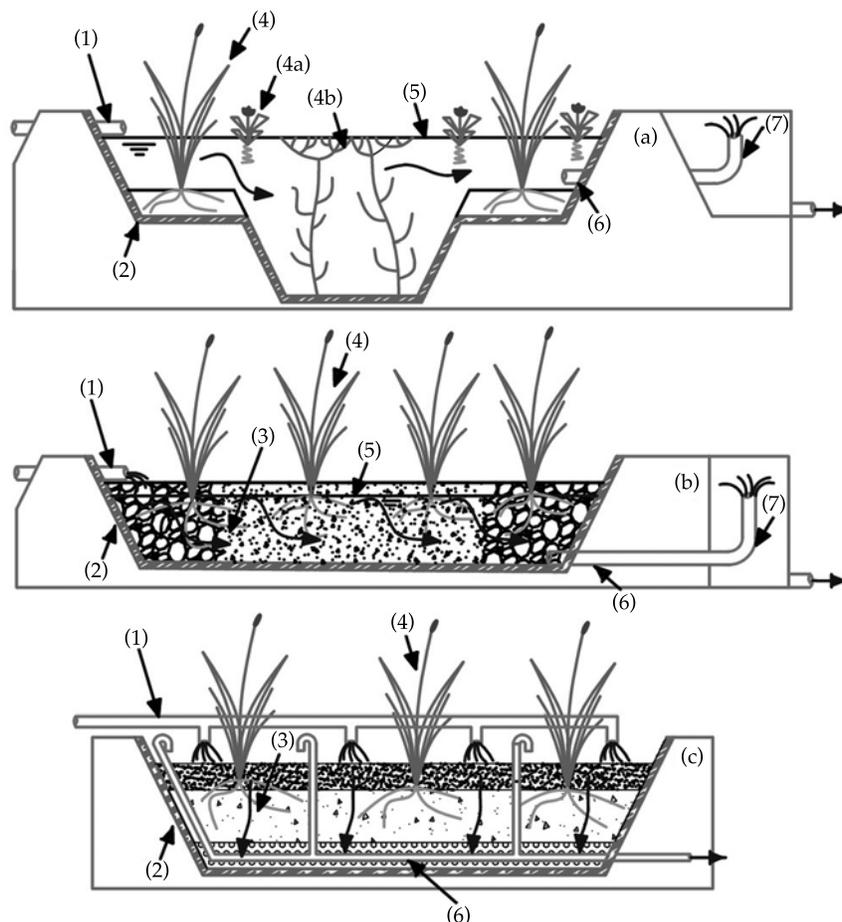


Figura 1. Tipos de HC y componentes: (a) HC de flujo horizontal superficial (HS); (b) HC de flujo horizontal subsuperficial (HSS); (c) HC de flujo vertical (HV); (1) tubería influyente; (2) impermeabilización; (3) medio de soporte; (4) vegetación emergente; (4a) vegetación flotante; (4b) vegetación sumergida; (5) nivel de agua; (6) tubería de recolección; (7) estructura de drenaje para mantenimiento de nivel de agua.

interesante de explorar para países en vías de desarrollo (Zurita, Belmont, De Anda, & White, 2011).

Por otra parte, el reúso de aguas servidas tratadas se enmarca en el manejo sustentable del recurso hídrico. En este contexto, para la planeación e implementación de programas de reúso de aguas servidas tratadas, un aspecto clave del éxito es la definición de la categoría de reúso. Al respecto, en el cuadro 2 se resumen las diferentes categorías, con ejemplos de aplicación en las que pueden reutilizarse las aguas servidas tratadas (Asano, 2005). Es importante indicar

que cada categoría presenta requerimientos específicos de calidad que varían de acuerdo con la reglamentación vigente de cada país. A modo de ejemplo, el cuadro 3 presenta un comparativo de algunos parámetros de calidad de agua requeridos para riego por diferentes guías.

Tomando en cuenta lo anterior, el objetivo del presente trabajo es analizar el esquema de tratamiento de aguas servidas para Chile, como ejemplo de país en vía de desarrollo, discutiendo sobre la participación y desarrollo de sistemas "más simples", como los HC, a fin de abordar la realidad actual, junto con los desafíos técnicos

Cuadro 2. Categorías de reúso. Adaptado de Asano (2005), y Metcalf and Eddy (2007).

Categoría número	Nombre	Ejemplos de uso
1	Riego agrícola	Riego de cultivos, viveros comerciales
2	Riego de área verdes	Parques, jardines de escuelas, campos de golf, cementerios
3	Reciclaje industrial y reutilización	Agua de enfriamiento, agua de caldera, aguas de proceso, aguas para construcción
4	Recarga de acuíferos	Recarga subterránea, control de cuñas salinas, control de la subsidencia
5	Usos recreacionales y ambientales	Lagos y lagunas, mejora de pantanos, reservas naturales, regulación de caudales, pesquería
6	Usos urbanos no potables	Provisión contra incendios, climatización, agua para sanitarios
7	Reúso potable	Ablandamiento del agua, mezcla con agua natural para potabilización

Cuadro 3. Guías que establecen límites para algunos parámetros de calidad del agua empleada para riego. Adaptado de Norton-Brandao, Scherrenberg y Van Lier (2013).

Guía	Unidad	WHO (1989)	USEPA (2012)	ANZECC (2000)	Real Decreto Español (2007)	Decreto Italiano (2003)	Norma Chilena-NCh 1333 (1987)
Tipo de guía/ parámetro		Calidad de agua residual para agricultura	Calidad de agua tratada para riego	Calidad de agua para riego	Calidad de agua tratada para riego	Calidad de agua residual tratada para reúso	Calidad de agua para riego
Conductividad eléctrica (CE)	dS/m	-	-	< 0.65; 0.65-1.3 2.9-5.2 <sup>e</sup>	3	-	≤ 0.75 0.75-1.5 1.5-3.0 3.0-7.5 <sup>g</sup>
pH	-	-	6	-	-	6-9.5	5.5-9.0
Nitratos (N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )	mg/l	-	-	-	5	-	-
Nitrógeno total (N)	mg/l	-	10 <sup>b,c</sup>	5; 25-125 <sup>f</sup>	10	15	-
Fósforo total (P)	mg/l	-	5 <sup>b,d</sup>	0.05; 0.8-12 <sup>f</sup>	-	2	-
Sólidos suspendidos totales (SST)	mg/l	-	-	-	20	10	-
Coliformes fecales (CF)	UFC/100 ml	≤ 1 000 <sup>a</sup>	-	-	-	-	< 1 000 <sup>h</sup>

WHO: World Health Organization (Organización Mundial de la Salud); USEPA: United States Environmental Protection Agency (Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos); ANZECC: Australian and New Zealand Environment and Conservation Council (Consejo para la Conservación y Medio Ambiente de Australia y Nueva Zelanda). <sup>a</sup>Riego para cultivos susceptibles de ser consumidos crudos, cultivo de cereales, cultivos industriales; <sup>b</sup>cultivos alimentarios; <sup>c</sup>parámetro exclusivo del estado de New Jersey; <sup>d</sup>parámetro exclusivo del estado de Michigan; <sup>e</sup>cultivo sensible, moderadamente sensible, tolerante, respectivamente; <sup>f</sup>máxima concentración (mg/l) que puede ser tolerada para 20 y 100 años, respectivamente; <sup>g</sup>sin efecto, efecto en cultivos sensibles, efectos adversos en mayoría de cultivos, cultivos tolerantes, respectivamente; <sup>h</sup>cultivo de frutas y verduras en estado crudo.

y normativos, que permitan un aumento de la cantidad de PTAS basadas en HC, y de efluentes a reutilizar, en especial en riego de actividades agrícolas.

## Metodología

Chile está localizado entre los paralelos 17° 29' S y 56° 32' S, extendiéndose en una franja estrecha que tiene un ancho promedio de 180 km, y un largo de 4 270 km. Su longitud lo provee de climas muy variados, desde un árido desierto por el norte a nieves eternas en el sur. Debido a esto, para los análisis, se dividió el territorio en tres macrozonas geográficas: a) norte (regiones de Arica y Parinacota, Tarapacá, Antofagasta, Atacama y Coquimbo); b) centro (regiones de Valparaíso, Metropolitana, O'Higgins, Maule, Bío Bío y la Araucanía); c) sur (Regiones de los Ríos, Lagos, Aysén y Magallanes). Cada una de estas macrozonas posee características extrapolables a la situación presente en otros países en vías de desarrollo.

Además, Chile, al igual que muchos otros países en vías de desarrollo, en los últimos años, por la variación climática, producto probablemente del calentamiento global, ha visto reducida la cantidad de precipitación caída hasta en un 40% en la zona centro del país. Por otro lado, toda la macrozona norte se caracteriza por ser un gran desierto, con precipitaciones inferiores a los 5 mm/año en las zonas costeras (DGAC, 2014). Esta realidad lleva a la necesidad de buscar fuentes hídricas alternativas, donde la reutilización de aguas servidas tratadas constituye un escenario poco explotado, tal como ocurre en muchos países en vías de desarrollo.

Tomando en cuenta lo anterior, la metodología de este trabajo fue la discusión y análisis de diferentes aspectos relacionados con la situación del tratamiento de aguas servidas y el reúso de sus efluentes en un país en vía de desarrollo como Chile. El orden metodológico fue el siguiente: a) discusión sobre sistemas de tratamiento de aguas servidas instalados; b) situación actual de los HC como ejemplo del uso de tecnologías "más simples" en el país,

enfocando la discusión a desarrollos a escala real, piloto y laboratorio, avances, potencial de aplicación y desafíos; c) junto con lo anterior, análisis del marco regulatorio para descarga y reúso; d) reflexión sobre las limitaciones para un mayor desarrollo del reúso de aguas servidas tratadas.

## Resultados y discusión

### *Tratamiento de aguas servidas en el país*

Para 2012, las zonas urbanas presentaron una cobertura de tratamiento de 100% del agua servida colectada, cobertura lograda con poco más de 250 PTAS de tipo centralizadas (SISS, 2013a). Si la cobertura de alcantarillado alcanza en el país 96.51% de la población en zonas urbanas (SISS, 2013b), Chile, como nación en vía de desarrollo, posee un alto grado de cobertura de tratamiento para las zonas urbanas. Esta realidad contrasta con la presentada por Zurita, Roy y White (2012) para México, donde cerca de 60% del agua servida producida no se trata. La figura 2 resume la participación porcentual de las diferentes tecnologías de tratamiento aplicadas en PTAS centralizadas y descentralizadas de zonas urbanas y rurales de Chile. Las PTAS de zonas urbanas fueron diseñadas para eliminación de sólidos y materia orgánica con desinfección por cloración. Siguiendo la tendencia mundial, la tecnología empleada en más de 60% de los casos corresponde a las diversas modalidades de lodos activados (SISS, 2013a). Respecto al uso de HC en PTAS centralizadas de las zonas urbanas, la figura 2a muestra que no existe registro de su uso.

La zona centro del país presenta una tendencia similar al promedio nacional en la aplicación de tecnologías en PTAS centralizadas (más de 50% de las PTAS posee tecnología de lodos activados), con una eliminación de DBO<sub>5</sub>, DQO y SST superior al 80%, mientras que la eliminación de NT y PT varía entre 20 y 60% (Vera, Sáez, & Vidal, 2013). Para la zona norte, más de 50% de las PTAS centralizadas está basada en sistemas lagunares y emisarios submarinos. Por

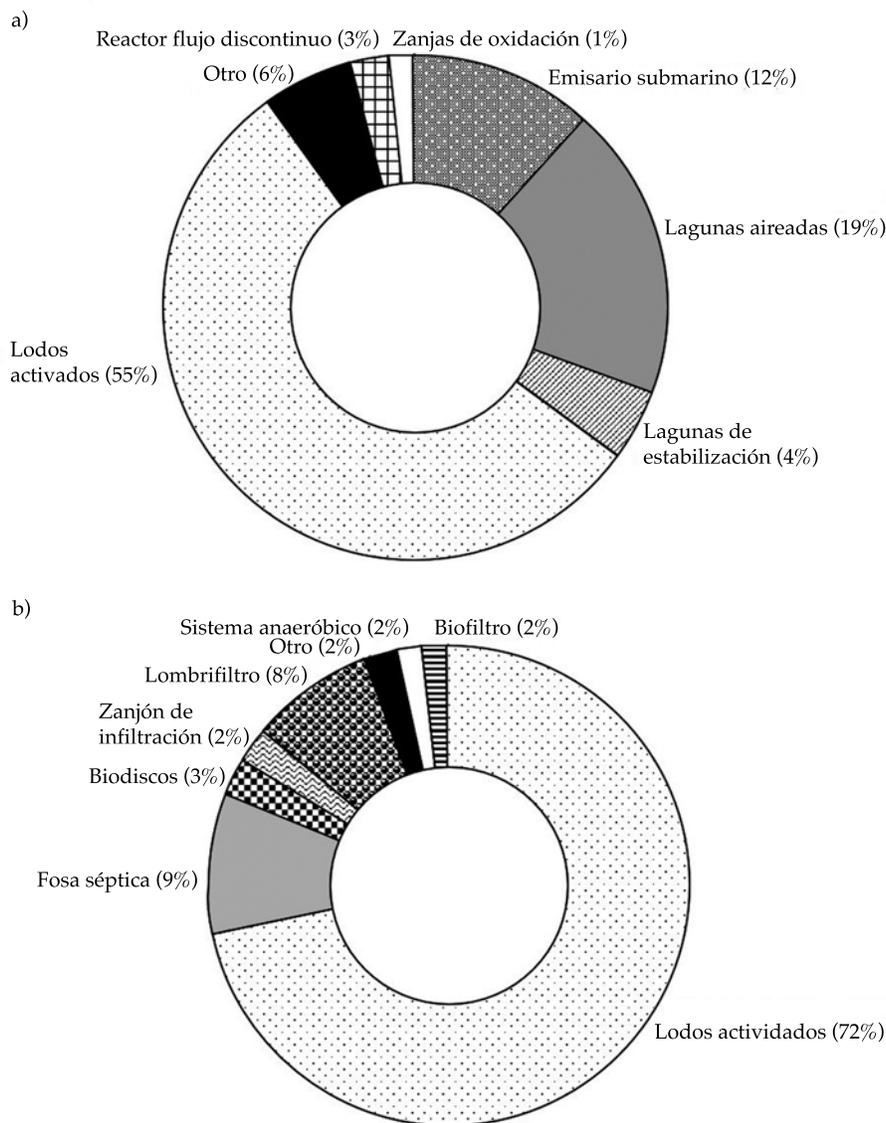


Figura 2. Participación porcentual de tecnologías de tratamiento aplicada en las PTAS en Chile; a) zonas urbanas; b) zonas rurales. A partir de SISS (2013a) y Subdere (2012).

otro lado, la zona sur sigue la tendencia nacional con la aplicación de lodos activados en más de 70% de las PTAS centralizadas (SISS, 2013a). Sin embargo, no existen reportes en la literatura que indiquen el funcionamiento de las PTAS en el norte y sur del país. Pese a esto, las PTAS en Chile están sujetas a constante autorreporte y fiscalización, y deben cumplir con lo establecido en dos normativas específicas: a) Decreto Supre-

mo 90 (DS 90) de 2000, que regula la descarga a aguas superficiales y marítimas (BCN, 2000) y b) Decreto Supremo 46 (DS 46) del 2002, que regula la descarga a aguas subterráneas (BCN, 2002). Por tanto, podría indicarse que los efluentes de la PTAS en Chile deben poseer valores inferiores a los indicados en el cuadro 4.

Por otra parte, para las zonas rurales o descentralizadas en general, existen un poco

Cuadro 4. Resumen de algunos parámetros de calidad de agua regulados por el DS 90 (BCN, 2000) y DS 46 (BCN, 2002), aplicables al territorio continental y marítimo de Chile.

Parámetro	Unidad	Sitio de descarga					
		Fluvial 2	Fluvial 3	Lagos	Mar 1	Mar 2	Acuífero
pH	Und.	6.0-8.5	6.0-8.5	6.0-8.5	6.0-9.0	5.5- 9.0	6.0-8.5
DBO <sub>5</sub>	mg/l	300	35	35	60	-	-
SST	mg/l	300	80	80	100	300	-
NT <sup>a</sup>	mg/l	75	50	10 <sup>b</sup>	50	-	10 <sup>d</sup> -15 <sup>e</sup>
PT	mg/l	15	10	2	5	-	-
CF	NMP/100 ml	1 000	1 000	1 000-70 <sup>c</sup>	1 000-70 <sup>c</sup>	-	-

Fluvial 2: con capacidad de dilución; fluvial 3: sin capacidad de dilución; mar 1: dentro de la zona de protección litoral; mar 2: fuera de la zona de protección litoral; <sup>a</sup>en la norma se considera como nitrógeno total Kjeldahl (NTK); <sup>b</sup>corresponde a la suma del NTK más el nitrito y nitrato; <sup>c</sup>el valor de 70 es aplicable sólo en áreas aptas para la acuicultura y explotación de recursos bentónicos; <sup>d</sup>aplicable a acuíferos con vulnerabilidad alta; <sup>e</sup>aplicable a acuíferos con vulnerabilidad baja.

más de 550 sistemas de tratamiento de tipo descentralizado instalados (Subdere, 2012). La figura 2b muestra que al igual que en las zonas urbanas, la tecnología de lodos activados es la más empleada, con una proporción de participación superior a 70%. También la figura 2b muestra que cerca de 19% de las PTAS de zonas rurales usa tecnologías de tratamiento secundario y sólo un 9% emplea tecnología de tratamiento primario, como fosas sépticas.

A pesar de la gran cantidad de PTAS descentralizadas (sobre 550), se ha estimado que en Chile, máximo un 20% se trata de las aguas servidas producidas en las zonas rurales (Casen, 2009). Esta situación sería similar e incluso mejor a la presente en otros países en vías de desarrollo. Además, existe poca o nula información de su funcionamiento. Rodríguez (2012), evaluando PTAS de zonas rurales de la zona centro (región de Coquimbo, Valparaíso, Maule y Metropolitana), concluye que la mayoría de ellas funciona de manera inadecuada desde el punto de vista de la sostenibilidad económica y de cumplimiento de normativa vigente (DS 90 y DS 46, cuadro 4). Además, plantea la necesidad de implementar tecnologías alternativas a los lodos activados.

### *Humedales construidos en el país y su aplicación al reúso*

En Chile, para tratamiento de aguas servidas, se pudo establecer que los HC presentan una participación minoritaria, instalados como tratamiento secundario principalmente, en un máximo de 10 PTAS de zonas rurales de la zona centro (Subdere, 2012). No se especifica el tipo de HC aplicado, pero podría tratarse principalmente de HC de flujo horizontal subsuperficial (HSS). El cuadro 5 resume algunas características de estas PTAS, y las compara con la situación documentada para España y Grecia. Al respecto, el cuadro 5 muestra que los primeros sistemas instalados en Chile se construyeron a partir del año 2002, con una vida útil proyectada de 20 años.

En cuanto a los costos de construcción y operación, se puede indicar que su rango sería similar al de los países comparados. Además, si se comparan estos costos con los presentados por Vera et al. (2013) para PTAS centralizadas de zonas urbanas de la zona centro de Chile basadas en lodos activados (costos, construcción: 65-200 USD/hab. operación: 4-27 USD/hab.-año), el resultado muestra cómo estos

Cuadro 5. Comparativo de características de sistemas de humedales construidos en Chile.

Característica	Lugar		
	Chile <sup>a</sup>	España <sup>b, c</sup>	Grecia <sup>d</sup>
Población (hab.)	65-450	< 2 000	< 3 000
Año inicio operación	2002-2006	1996-2002	1997-no especificado
Vida útil establecida (años)	10-20	-	-
Costo construcción (USD/hab.)	85-630	286-654	560-750
Costo operación (USD/hab.)	13-27	36-101	7.5-10
Etapas de tratamiento donde se utilizan	Secundario principalmente	Secundario principalmente	Secundario principalmente
Método de desinfección	Luz ultravioleta (principalmente)-cloración	No posee un sistema específico	No especificado

<sup>a</sup>Subdere (2012); <sup>b</sup>Puigagut, Villasenor, Salas, Becares y García (2007); <sup>c</sup>Vera, García, Sáez, Moragas, & Vidal (2011); <sup>d</sup>Tsihrintzis & Gikas (2010). Valores de cambio: 1 USD= \$477.13 pesos chilenos; 1 € = 1.3 USD, basados en valores de diciembre de 2012.

costos también serían similares. Pese a ello, es importante indicar que los costos de Vera *et al.* (2013) son de PTAS centralizadas (> 2 000 hab.), donde se sabe que existe una reducción por economía de escala. Al respecto, Subdere (2012) muestra que los costos de construcción y operación promedio para PTAS descentralizadas basadas en lodos activados varían entre 66 y 10 000 USD/hab., y de 9 a 142 USD/hab.-año, respectivamente. Por tanto, se puede indicar que los sistemas de HC instalados han sido en algunos casos más económicos de construir que sistemas de lodos activados, presentando también en algunos casos costos de operación inferiores a los lodos activados. Esto reafirma la necesidad planteada por Rodríguez (2012) de buscar alternativas de tratamiento para PTAS descentralizadas, y mostraría a otros países en vías de desarrollo que desde el punto de vista económico existe la necesidad de implementar tecnologías más simples de tratamiento en PTAS descentralizadas.

En cuanto a su funcionamiento depurativo (eliminación de materia orgánica, nutrientes y patógenos), no existe información bibliográfica al respecto ni sobre reutilización de sus efluentes. Subdere (2012) indica en su catastro que cerca de 50% de las PTAS basadas en HC presentan un funcionamiento calificado como "Bueno", y

que más de 90% cumple la normativa vigente (cuadro 4). Pese a esto, Subdere (2012) también especifica que las PTAS basadas en HC que presentan problemas se relacionan principalmente con el establecimiento de la vegetación, sistemas de bombeo de cabecera, y fallas en lámparas de los sistemas de desinfección ultravioleta.

En el nivel de investigación, la mayoría de estudios de HC tratando aguas servidas se ha desarrollado en la zona centro del país (Zúñiga, Schiappacasse, Chamy, Sánchez, & Cerda, 2004; Pérez, 2010; Mancilla, Zúñiga, Salgado, Schiappacasse, & Chamy, 2013; Rojas, Vera, & Vidal, 2013; Vera, Araya, Andrés, Sáez, & Vidal, 2014). Sin embargo, en estos estudios no se ha tratado el tema del reúso. El tipo de HC que se ha estudiado principalmente corresponde al HSS. En este sentido, Rojas *et al.* (2013) presentan resultados de la puesta en marcha de una unidad experimental basada en HSS, operada con una carga hidráulica (CH) de entre 10 y 40 mm/d, donde se elimina cerca de 50% de la DBO<sub>5</sub>, entre 74 y 84% de los SST, y debajo de 35% de NT y PT. La carga hidráulica representa un parámetro de diseño y operación importante en HC (García *et al.*, 2005). De manera complementaria, Vidal, López, Vera, Chamorro y Baeza (2013), para este mismo sistema, resumen los resultados de operación

por un año, donde la eliminación de  $\text{DBO}_5$  varía entre 50 y 80%, mientras que para SST supera el 80%, y para los nutrientes NT y PT se obtiene un rango similar al reportado por Rojas *et al.* (2013). Mancilla *et al.* (2013) evaluaron también el funcionamiento por 280 días de HSS operados a una CH de 114 mm/d en la zona centro. Los resultados muestran una eliminación de materia orgánica evaluada como demanda química de oxígeno (DQO), que varió entre un 20 y 80%. No se reporta eliminación de SST ni de NT y PT, pero se indican eliminaciones de nitrógeno del amonio ( $\text{N-NH}_4^+$ ) y fósforo del fosfato ( $\text{P-PO}_4^{3-}$ ), variando entre 10 y 60%. Estos resultados de eficiencias de eliminación son similares a los reportados para HC aplicados como tratamiento secundario de PTAS descentralizadas en otros lugares de clima mediterráneo, como el de la zona centro (Vera, García, Sáez, & Vidal, 2011).

En el caso de la zona norte, no se encuentra información de HC experimentales en la literatura. Para esta área, resultados del Centro de Investigación y Desarrollo en Recursos Hídricos (CIDERH) en la región de Tarapacá, respecto a aguas servidas crudas y tratadas, evidencian que uno de los problemas con el reúso de efluentes de PTAS es la conductividad eléctrica (CE), que sobrepasa los 2 000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Estos valores ya habían sido reportados en estudios de reúso para la zona norte (Cáceres, Delatorre, De la Riva, & Monardes, 2003). Además, de acuerdo con el cuadro 3, las aguas servidas tratadas con CE por sobre los 1.500  $\mu\text{S}/\text{cm}$  originarían problemas en la mayoría de cultivos, al reutilizarse para riego agrícola (INN, 1987). Respecto a la zona sur, tampoco se encuentra información de HC en la literatura.

Para los casos documentados en la literatura (aplicación en PTAS y propuestas de desarrollo e investigación), en su mayoría se ha usado o propuesto tres especies de planta (por orden alfabético): a) *Phragmites australis*, b) *Schoenoplectus californicus*, y c) *Typha spp.* La aplicación de estas especies de plantas ha sido ampliamente documentada en la literatura especializada (Tsihrintzis & Gikas, 2010; Vymazal, 2005).

### Propuestas de aplicación de HC

En el país se han desarrollado propuestas de uso de HC en PTAS concebidas para reutilizar sus efluentes (Piérart & Chiang, 2013; Fundación Chile, 2013). En el caso de Piérart y Chiang (2013), el modelo de PTAS descentralizada propuesto integra el tratamiento y reúso de aguas servidas, aplicable a comunidades periurbanas de la zona centro. Este modelo está planteado para cinco habitantes (una familia tipo), con consumos de agua de entre 150 y 200 l/hab.-d. La PTAS contempla (en forma consecutiva): a) fosa séptica, para eliminación de sólidos; b) lombrifiltro de 1  $\text{m}^2$  y un HSS de 12  $\text{m}^2$ , para eliminación de materia orgánica; c) HC del tipo HS de 6  $\text{m}^2$ , para desinfección. Posterior al tratamiento, se plantean áreas de cultivo de 30  $\text{m}^2$ , con recolección del exceso del agua riego y recirculación al sistema de tratamiento.

Si bien es una propuesta interesante, dos aspectos son importantes a tener en cuenta para su implementación. El primero de ellos se relaciona con las áreas propuestas. En sistemas como los HSS se usan reglas de relación de área por habitante ( $\text{m}^2/\text{hab.}$ ) para diseño y evaluación, complementarias al valor de CH (Vymazal, 2011). Piérart y Chiang (2013) proponen un valor de CH entre 60 y 85 mm/d, con un área unitaria de 2.4  $\text{m}^2/\text{hab.}$ , muy por debajo de la recomendación internacional de 5  $\text{m}^2/\text{hab.}$  (Vymazal, 2005). Si bien la reducción de área unitaria parece fundamentada en la existencia de un lombrifiltro preliminar, también para climas mediterráneos (como el de la zona centro), había sido sugerida una reducción a valores alrededor de 3  $\text{m}^2/\text{hab.}$  (Vera *et al.*, 2011). Por tanto, este aspecto, junto con la CH, debe evaluarse con sumo cuidado en la implementación de dicho modelo (se recomienda un seguimiento de al menos dos años). El otro aspecto importante a considerar es la propuesta de usar un HS como sistema de desinfección. Ello no parece adecuado, pues un HS no elimina patógenos y, por tanto, debería eliminarse o integrarse, posterior a esta etapa, un sistema de desinfección, donde la radiación UV o la cloración, implementadas

en las pocas PTAS documentadas, serían dos opciones viables de usar.

Otro sistema propuesto es el de Fundación Chile (2013). Este sistema se recomienda para tratar aguas servidas rurales en PTAS descentralizadas y RILes agroindustriales, con generación de efluentes aptos para reúso. La PTAS propuesta está compuesta de (en orden secuencial): a) estanque de sedimentación (RILes) o fosa séptica (aguas servidas), para eliminación de sólidos; b) HC del tipo HSS con un sistema de regulación y acumulación, para la eliminación del material orgánico; c) un sistema de desinfección, para eliminación de patógenos; d) estanque de acumulación.

En este sistema, los HSS propuestos son unidades de  $2.25 \times 3.75$  m ( $8.44$  m<sup>2</sup>) recomendadas para un flujo de 1 000 l/d. Esto representa una CH de 118 mm/d y un área unitaria de 1.69 m<sup>2</sup>/hab., suponiendo un uso del HSS por parte de cinco habitantes (sugerido por Fundación Chile). Este valor de CH calculado supera entre 1.5 y 10 veces el valor reportado por Rojas *et al.* (2013), y el sugerido por Piérart y Chiang (2013), pero es similar al empleado por Mancilla *et al.* (2013). Además, la CH es mayor entre 20 y 70 mm/d a CH reportadas para otros HC operados en clima mediterráneo (Caselles-Osorio *et al.*, 2007). En cuanto a su funcionamiento, aunque no se especifica el tiempo de seguimiento y monitoreo de la unidad de HSS, se habla de eliminaciones de: a)  $DBO_5 = 80$  a 95%, b) SST = 40 a 97%, c) NT = 75 a 95%, y d) coliformes: una unidad logarítmica. Estos resultados, para los parámetros  $DBO_5$  y NT, superan entre 10 y 40% los resultados reportados por Rojas *et al.* (2013), Vidal *et al.* (2013) y Mancilla *et al.* (2013).

Aunque en los estudios realizados en la zona centro no se ha reportado el comportamiento respecto a organismos patógenos (excepto Fundación Chile, 2013), es sabido que los HC eliminan hasta tres unidades logarítmicas de coliformes fecales (CF) (Headly *et al.*, 2013). Este parámetro resulta importante para reúso en riego agrícola (cuadro 3). Por tanto, el agua servida, que presenta niveles de entre  $10^6$  y  $10^9$  NMP/100 ml de CF (Headly *et al.*, 2013) a ser

tratada en PTAS basadas en HC necesitarían una desinfección final, tal como es propuesto por Fundación Chile (2013) y ha sido aplicado en las pocas PTAS que poseen HC.

Teniendo en cuenta todo lo discutido previamente, podría indicarse que una PTAS descentralizada basada en HC con objetivo de reúso de sus efluentes en la zona centro debería contener al menos (en orden secuencial): a) sistema de sedimentación (fosa séptica o similar), para eliminación de sólidos; b) HSS, para eliminación de materia orgánica, con factibilidad de operación a CH de alrededor de 100 mm/d, lo que llevaría a usos de área unitarias de entre 2 y 3 m<sup>2</sup>/hab., valores que reducen hasta 66% el valor internacional aceptado de 5 m<sup>2</sup>/hab. (Vymazal, 2005); c) sistema de desinfección (radiación UV o cloración), para la eliminación de organismos patógenos. En el caso de la aplicación del punto b), para la zona centro faltaría estudio y desarrollo de sistemas subsuperficiales de flujo vertical, a fin de poder realizar recomendaciones de su aplicación.

Para la zona norte, una PTAS basada en HC con fines de reúso agrícola debe considerar incluir alternativas tecnológicas para reducir la conductividad eléctrica (CE). En este sentido, el esquema de tratamiento mínimo que debe proponerse para una PTAS en la zona norte basada en HC estaría compuesto por: a) sistema de sedimentación (fosa séptica o similar); b) sistema de HC, superficial, subsuperficial horizontal o vertical, para eliminación de materia orgánica y sólidos; c) sistema para eliminación de sales (filtración, intercambiadores iónicos, osmosis); d) sistema de desinfección (radiación UV o cloración).

Las propuestas de aplicación de HC para la zona sur presentan un escenario más complejo. Para analizar su aplicación, es importante considerar dos aspectos importantes: a) la abundancia de recursos hídricos, con una disponibilidad de agua por sobre los 100 000 m<sup>3</sup>/hab.-año, superando en más de dos veces el promedio nacional ( $53\,953$  m<sup>3</sup>/hab.-año) y en más de 15 veces el promedio mundial ( $6\,600$  m<sup>3</sup>/hab.-año) (MOP, 2013); b) clima, presentando

inviernos extensos con temperaturas cercanas a las de congelamiento (DGAC, 2014).

En el caso de la abundancia de recursos hídricos, esta situación limita el desarrollo del reúso de efluentes. Por otro lado, si los HC se plantean sólo como sistema de tratamiento, un aspecto importante de la descarga es la presencia de sistemas lacustres. Para estos sistemas hídricos, la normativa (cuadro 4) presenta como principal parámetro limitante el fósforo total (PT), con un valor máximo de 2 mg/l. Este límite de descarga podría suponer problemas de aplicación de las diferentes configuraciones de HC.

Al respecto, Vera et al. (2014) propusieron un sistema de HC con modificaciones para mejorar su comportamiento en la eliminación de nutrientes: a) medio de soporte especial (zeolita), y b) un sistema de aireación adicional. Sus resultados mostraron concentraciones de fosfato de entre 2 y 4 mg/l, mientras que el amonio fue inferior a 10 mg/l. Por tanto, el valor de PT sobrepasaría lo indicado en la norma.

Una opción de descarga sería la infiltración a aguas subterráneas. Al respecto, el DS 46 limita principalmente el valor de descarga a formas de nitrógeno, con límites de 10 mg/l para nitrito y nitrato, y de 10 y 15 mg/l para el nitrógeno total Kjeldahl (NTK) (cuadro 4). Para estos valores, el sistema propuesto por Vera et al. (2014) requeriría de mejoras para mantener las concentraciones de las formas de nitrógeno solicitadas por la norma. Sin embargo, existen en la literatura propuestas de mejora para aumentar la eficiencia de eliminación de nitrógeno, descritas con detalle en Wu, Kuschik, Brix, Vymazal, & Dong (2014).

Teniendo en cuenta además el factor climático, para la zona sur del país se podría recomendar también el uso de sistemas como el propuesto por Wallace (2001), que corresponde a un HC del tipo HSS, que emplea mejoras representadas en: a) un sistema de aireación, y b) un manto superficial aislante para mantener estable la temperatura interna de la unidad de HSS. Por consiguiente, las mejoras en forma conjunta ayudan a mantener eliminaciones sobre 70% de nitrógeno total durante los meses

más fríos del invierno (Wallace, 2001). Tomando en cuenta lo anterior, una PTAS basada en HC para la zona sur con fines de descarga debería incluir al menos (en orden secuencial): a) sistema de sedimentación (fosa séptica o similar), para eliminación de sólidos; b) sistema de HC de tipo subsuperficial, posiblemente con medios especiales y/o aireación, junto a un manto superficial aislante de temperatura, para la eliminación de materia orgánica y nutrientes; c) sistema de desinfección (radiación UV o cloración).

#### *Potencial de aplicación de HC*

Se ha definido que la participación de HC en el esquema de tratamiento de aguas servidas actual es muy baja. Pese esto, existe un potencial de aplicación interesante a futuro. Este potencial de aplicación sería el mismo que se presenta para otros países en vías de desarrollo. Tomando en cuenta que Chile tiene una población urbana total de poco más de 14 millones de habitantes, un 4% de esta población urbana, esto es, unos 500 000 habitantes, localizados en zonas periurbanas, necesita ser cubierta por PTAS descentralizadas, donde los HC podrían constituirse en una alternativa de tratamiento, dado que: a) la eficiencia de eliminación documentada para los sistemas evaluados a nivel de investigación en la zona centro son comparables con sistemas de lodos activados (Vera et al., 2011); b) presentan simplicidad de operación, lo que facilita la sostenibilidad futura de la PTAS, esto porque presentan una escasa necesidad de personal (0.6 horas/día de operario) y bajo consumo energético (entre 0 y 17.7 kWh/hab.-año), que por lo general es entre 50 y 60% inferior al de una PTAS basada en lodos activados (Fábregas, 2006); d) costos de construcción y operación competitivos respecto a sistemas de lodos activados (Subdere, 2012); c) realce estético, al emplear componentes del medio natural como las plantas (figura 1), lo que aportará en el mejoramiento del entorno (García, Morató, & Bayona, 2004).

Por otro lado, en el caso de la población rural, existe el potencial de aplicación de sistemas

de HC, porque: a) más de 50% de esta población (más de un millón de habitantes) necesita soluciones de tratamiento; b) un 9% de sistemas instalados (cerca de 50 PTAS) posee sólo tratamiento basado en fosas sépticas, requiriendo a futuro complementar su proceso de tratamiento (Subdere, 2012).

Pese a esta posibilidad de aplicación de HC, existen factores que limitan su proyección y, por ende, mayor participación en el esquema de tratamiento. Algunos de estos factores coinciden con lo discutido por Zurita *et al.* (2012): a) falta de legislación específica para las PTAS de zonas descentralizadas, que defina responsabilidades de financiamiento y operación, las cuales deben ser cubiertas bien sea por un organismo del estado o uno designado por éste, con competencias técnicas para tal fin, ello porque actualmente la gestión de PTAS descentralizadas es desarrollada por la misma comunidad; b) un mercado establecido de sistemas de lodos activados, que si bien son sistemas de tratamiento con buen desempeño en PTAS centralizadas, presentan problemas de operación, principalmente cuando se trata de PTAS descentralizadas; c) falta de conocimiento de la tecnología de HC por parte de empresas sanitarias y autoridades, siendo especialmente poco conocidos los potenciales beneficios y desempeño que se puede lograr con los HC; d) falta de manuales de diseño en idioma local, que permitan una mayor difusión del conocimiento, esto porque es conocida la barrera lingüística respecto al inglés de algunos países en vías de desarrollo; e) mayor difusión a la población en general por parte de la comunidad académica y científica, con el fin de que la sociedad tenga un mayor empoderamiento y participación cuando se definan opciones de tratamiento de aguas servidas para ellos.

#### *Reflexiones para mejorar el reúso de aguas servidas en Chile y en países en vías de desarrollo en general*

La reutilización de aguas servidas, al igual que ocurre en muchos países en vía de desarrollo, es un tema poco discutido y estudiado científica-

mente en Chile. La figura 3 muestra la distribución porcentual expresada a partir del total de PTAS centralizadas, y no en términos de caudal, para las descargas de las PTAS centralizadas de zonas urbanas. Sólo 4% de estas PTAS reutiliza sus efluentes, principalmente en actividades de riego. Si se considera que se emplean unos 32 m<sup>3</sup>/s para suministro de agua de las zonas urbanas, la producción estimada de aguas servidas sería de 24 m<sup>3</sup>/s (considerando un coeficiente de retorno de 0.75), por tanto, el 4% reusado representa como máximo un 1 m<sup>3</sup>/s (MISP, 2015). Este valor es menos de 0.3% del total de agua que se emplea para riego en agricultura en Chile (unos 350 m<sup>3</sup>/s; MISP, 2015). Por tanto, si se llega a porcentajes de reutilización como el de Israel, cercano a 80%, el potencial aporte que el reúso haría al emplearse en riego agrícola sería de entre 5 y 10%, aproximadamente. Esta cifra representa un valor importante, sobre todo para la zona centro, porque: a) concentra más de 50% de la cantidad de agua para abastecer la población urbana del país (MISP, 2015); b) presenta la mayor actividad agrícola; c) registra una reducción de hasta 40% en las precipitaciones en los últimos años (DGAC, 2014).

También es importante recalcar que este valor de reutilización de 4% es bastante bajo, si se considera que: a) existe una cobertura cercana a 100% para el tratamiento de aguas servidas en zonas urbanas; b) los criterios requeridos en más de 30% de las PTAS centralizadas se relacionan con descargas a cuerpos fluviales con capacidad dilutiva, efluentes que poseen características similares a las solicitadas por la normativas de reutilización para riego agrícola (cuadro 3); y c) la zona norte es un gran desierto, con baja disponibilidad de recursos hídricos (< 1 050 m<sup>3</sup>/hab.-año) (MOP, 2013).

Este limitado desarrollo se podría explicar de modo parcial por la inexistencia de normativa específica de reutilización que regule el tema y permita un mayor desarrollo. Si bien existe la NCh 1333 (INN, 1987), tal norma se considera como indicativa para valores de calidad del agua en actividades o categorías de uso, pero

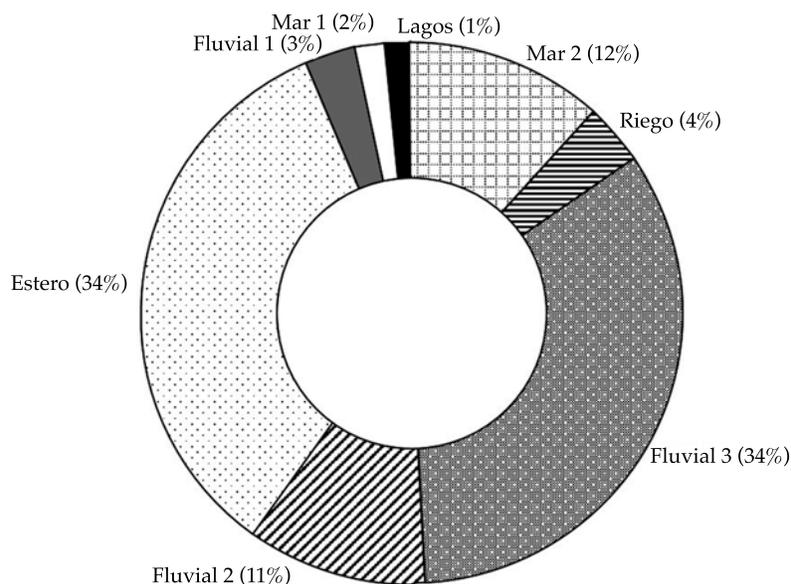


Figura 3. Participación porcentual de destino de efluentes de PTAS aplicadas en zonas urbanas de Chile. A partir de SISS (2013a). Fluvial 1: con o sin capacidad de dilución; fluvial 2: con capacidad de dilución; fluvial 3: sin capacidad de dilución; mar 1: dentro de la zona de protección litoral; mar 2: fuera de la zona de protección litoral.

no es específica para reúso de aguas servidas (o para todos los tipos de aguas residuales; cuadro 3). Esto sugiere la necesidad de normar el tema, incluyendo no sólo criterios de calidad para el agua tratada, sino de manejo y protección ambiental. Otro aspecto importante, abordado de manera parcial por la NCh 1333, son las categorías de reúso. De las siete categorías de reúso propuestas en el cuadro 2, tres de ellas no están consideradas actualmente por la NCh 1333: categorías 3, 4 y 6. La categoría 4, aunque no se aborde en la NCh 1333, se puede enmarcar dentro del DS 46 (BCN, 2002). Sin embargo, las categorías 3 y 6 no tienen hoy día indicación normativa.

También existen limitantes relacionadas con aspectos jurídicos. Uno de ellos es la definición de los derechos del agua. El decreto con fuerza ley 1122 de 1981 (BCN, 1981), conocido por lo común como "código de aguas", establece el marco jurídico para el aprovechamiento de las aguas de origen natural en Chile. Sin embargo, en la actualidad, para la reutilización de aguas

servidas, el tema no está definido por normativa alguna, y así existe la necesidad de su definición. Tal definición es importante, pues permite establecer quiénes serán los encargados de los proyectos de reutilización. Otro aspecto jurídico importante a tratar es generar incentivos de tipo económico, tributario, a fin de aumentar la reutilización. En la actualidad, en el caso de las empresas sanitarias que operan las PTAS centralizadas en Chile, no existe ningún beneficio económico para invertir en proyectos y/o estudios para el reúso de sus efluentes. Además, en el caso de particulares cubiertos por los sistemas de acueducto administrados por las empresas sanitarias, los cobros por alcantarillado se basan en factores. Si bien ésta es una forma de cobro aceptada en el ámbito internacional, al parecer no existe la posibilidad de negociación con la empresa sanitaria al momento de reducir las descargas por reutilización. El único ahorro económico actual que un particular puede tener se relaciona con la reducción por consumo que se genera por reúso.

Otro punto importante para un mayor desarrollo del reúso de aguas servidas tratadas guarda relación con las estrategias de desarrollo del país. En el caso de Chile, la Estrategia Nacional de Recursos Hídricos (ENRH) 2012-2025 (MOP, 2013) consigna dos ejes estratégicos relacionados con la temática del reúso: a) mejor institucionalidad ambiental y b) enfrentar la escasez. En el caso de mejor institucionalidad ambiental, en la actualidad se permite la intervención en temas hídricos por más de 15 organismos repartidos en ocho ministerios. Esto genera una dispersión de criterios que afecta el desarrollo de proyectos de tratamiento y reúso de aguas servidas. Al respecto, ya ha habido avances con propuestas de modificación de la institucionalidad relacionada con los recursos hídricos (MOP-DGA-BM, 2013). Asimismo, el eje estratégico "Enfrentar la escasez" no menciona el tema de la reutilización de aguas servidas tratadas (MOP, 2013). Esto daría señales del poco valor dado al reúso de aguas servidas como fuente hídrica alternativa, tal vez por la falta de conocimiento. Estas reflexiones en materia de reutilización de aguas servidas tratadas basadas en la experiencia chilena resultan discusiones transversales abordables para otros países en vías de desarrollo.

## Conclusiones

Chile, como país en vía de desarrollo, presenta coberturas de tratamiento para las zonas urbanas cercana a 100%, considerada alta, comparada con otros países en vías de desarrollo. Pese a esto, la realidad de las zonas rurales es diferente, donde se estima una cobertura máxima de 20%, siendo una realidad similar a la de países en vías de desarrollo. Estas coberturas de tratamiento se han logrado con la implementación de más de 250 PTAS centralizadas y 550 PTAS descentralizadas. Pese al gran número de PTAS existentes, los humedales construidos tienen una participación minoritaria, inferior a 2%, aplicados sólo en PTAS descentralizadas de la zona centro. Su principal empleo ha sido como

tratamiento secundario para la eliminación de materia orgánica. Además, los costos de construcción y operación de la tecnología de HC son competitivos frente a la tecnología de lodos activados, dominante en el país en la actualidad.

Por otro lado, no existen datos del desempeño depurativo de PTAS basadas en humedales construidos en el país ni tampoco información de reutilización de sus efluentes. Los únicos resultados de funcionamiento existentes corresponden a sistemas experimentales de humedales construidos de flujo horizontal subsuperficial (HSS), instalados sólo en la zona centro. El desempeño depurativo alcanzado por estos sistemas fue similar al obtenido por la tecnología de lodos activados y por sistemas de HC de otros lugares. Estos argumentos económicos y técnicos demuestran que los humedales construidos son una alternativa viable para usar en PTAS descentralizadas a futuro. Para esto, las propuestas de PTAS planteadas generan un marco general de aplicación de HC, pero para mayor masificación de los HC. Se deben vencer limitaciones principalmente relacionadas con difusión y conocimiento de la tecnología.

Por último, el tema de la reutilización de efluentes provenientes de PTAS basadas en humedales construidos o de cualquier tecnología requiere de mayor estudio e investigación, así como de un marco regulatorio específico. Junto con ello, también es necesaria la definición de temas jurídicos, de propuestas económicas y tributarias, que generen un marco para el desarrollo e incremento de la reutilización de aguas servidas tratadas. Estos puntos serían muy similares a lo necesario para incrementar el reúso de aguas servidas tratadas en países en vías de desarrollo.

## Agradecimientos

Proyecto Innova Bío Bío núm. 13.3327-IN.IIP "Recuperación de agua mediante jardines depuradores a partir de aguas servidas rurales: Aplicaciones innovadoras con impacto para la comunidad rural", CONICYT/FONDAP/15130015 y CONICYT/REGIONAL/CIDERH/R09I1001.

## Referencias

- Asano, T. (2005). Urban Water Recycling. *Water Science and Technology*, 51(8), 83-89.
- BCN (1981). *Decreto con Fuerza Ley 1122-Fija Texto del Código de Aguas*. Biblioteca del Congreso Nacional de Chile. Recuperado de <http://www.leychile.cl/Navegar?idNorma=5605>.
- BCN (2000). *Decreto Supremo 90 de 2000. Establece norma de emisión para la regulación de contaminantes asociados a las descargas de residuos líquidos a aguas marinas y continentales superficiales*. Biblioteca del Congreso Nacional de Chile. Recuperado de <http://www.leychile.cl/Navegar?idNorma=182637>.
- BCN (2002). *Decreto Supremo 46 de 2002. Establece norma de emisión de residuos líquidos a aguas subterráneas*. Biblioteca del Congreso Nacional de Chile. Recuperado de <http://www.leychile.cl/Navegar?idNorma=206883>
- Cáceres, L., Delatorre, J., De La Riva, F., & Monardes, V. (2003). Greening of Arid Cities by Residual Water Reuse: A Multidisciplinary Project in Northern Chile. *Ambio*, 32(4), 264-268.
- Casen (2009). *Encuesta de caracterización socioeconómica nacional, vivienda, hogares por zona según región y eliminación de excretas*. Caracterización Socioeconómica Nacional. Ministerio de Planificación, Gobierno de Chile. Recuperado de <http://www.mideplan.gob.cl/casen/Estadisticas/vivienda.html>.
- Caselles-Osorio, A., Puigagut, J., Segú, E., Vaello, N., Granés, F., García, D., & García, J. (2007). Solids Accumulation in Six Full-Scale Subsurface Flow Constructed Wetlands. *Water Research*, 41(6), 1388-1398, doi: 10.1016/j.watres.2006.12.019.
- DGAC (2014). *Dirección Meteorológica de Chile*. Dirección General de Aeronáutica Civil. Recuperado de <http://www.meteochile.gob.cl/>.
- Fábregas, A. (2006). *Aplicación de indicadores de sostenibilidad a estaciones depuradoras de aguas residuales de poblaciones rurales de Portugal*. Tesis para optar al grado de Ingeniero Ambiental. Barcelona: Universidad Politécnica de Catalunya.
- Fonder, N. & Headly, T. (2013). The Taxonomy of treatment Wetlands: A Proposed Classification and Nomenclature System. *Ecological Engineering*, 51(2), 203-211, doi: 10.1016/j.ecoleng.2012.12.011.
- Fundación Chile (2013). *Patente 705-13. Celda de biotratamiento modular para tratamiento de aguas domiciliarias rurales y efluentes agroindustriales*. Santiago de Chile: Instituto Nacional de Propiedad Intelectual (INAPI).
- García, J., Morató, J., & Bayona, J. (2004). *Nuevos criterios para el diseño y operación de humedales contruidos*. Barcelona: Ediciones CPET, Centro de Publicaciones, Campus Nord.
- García, J., Aguirre, P., Barragan, J., Mujeriego, R., Matamoros, V., & Bayona, J. (2005). Effect of Key Design Parameters on the Efficiency of Horizontal Subsurface Flow Constructed Wetlands. *Ecological Engineering*, 25(4), 405-418, doi: 10.1016/j.ecoleng.2005.06.010.
- Headly, T., Nivala, J., Kassa, J., Olsson, L., Wallace, S., Brix, H., Van Afferden, M., & Muller, R. (2013). *Escherichia coli* Removal and Internal Dynamics in Subsurface Flow Ecotechnologies: Effects of Design and Plants. *Ecological Engineering*, 61B, 564-574, doi: 10.1016/j.ecoleng.2013.07.062.
- INN (1987). *Norma Chilena (NCh) 1333 Of. 78 Modificada 1987. Requisitos de calidad del agua para diferentes usos*. Santiago de Chile: Instituto Nacional de Normalización.
- Libralato, G., Volpi, A., & Avezzù, F. (2012). To Centralise or to Decentralise: An Overview of the Most Recent Trends in Wastewater Treatment Management. *Journal of Environmental Management*, 94(1), 61-68, doi: 10.1016/j.jenvman.2011.07.010.
- Mancilla, R., Zúñiga, J., Salgado, E., Schiappacasse, M., & Chamy, R. (2013). Constructed Wetlands for Domestic Wastewater Treatment in a Mediterranean Climate Region in Chile. *Electronic Journal of Biotechnology*, 16(4), 1-13, doi: 10.1016/j.jenvman.2011.07.010.
- Massoud, M., Tarhini, A., & Nasr, J. (2009). Decentralized Approaches to Wastewater Treatment and Management: Applicability in Developing Countries. *Journal of Environmental Management*, 90(1), 652-659, doi: 10.1016/j.jenvman.2008.07.001.
- Metcalf and Eddy (2007). *Water Reuse-Issue, Technologies, and Applications*. New York: McGraw Hill International.
- MOP (2013). *Estrategia Nacional de Recursos Hídricos*. Ministerio de Obras Públicas. Recuperado de [http://www.mop.cl/Documents/ENRH\\_2013\\_OK.pdf](http://www.mop.cl/Documents/ENRH_2013_OK.pdf).
- MOP-DGA-BM (2013). *Estudio para el mejoramiento del marco institucional para la gestión del agua*. Ministerio de Obras Públicas-Dirección General de Aguas-Banco Mundial. Recuperado de <http://www.dga.cl/Documents/Chile%20DGA%20Estudio%20para%20e1%20Mejoramiento%20del%20Marco%20Institucional%20para%20la%20Gestion%20del%20Agua.pdf>.
- MISP (2015). *Política Nacional para los Recursos Hídricos*. Ministerio del Interior y Seguridad Pública. Recuperado de: [http://www.interior.gob.cl/media/2015/04/recursos\\_hidricos.pdf](http://www.interior.gob.cl/media/2015/04/recursos_hidricos.pdf)
- Norton-Brandao, D., Scherrenberg, S., & Van Lier, J. (2013). Reclamation of Used Urban Waters for Irrigation Purposes – A Review of Treatment Technologies. *Journal of Environmental Management*, 122(6), 85-98, doi: 10.1016/j.jenvman.2013.03.012.
- Pérez, M. (2010). *Análisis del establecimiento de Typha y Phragmites en humedales artificiales de flujo superficial y subsuperficial*. Tesis para optar al título de Ingeniero Agrícola. Concepción, Chile: Universidad de Concepción.
- Pierart, I., & Chiang, G. (2013). Modelo integrado de un sistema de biodepuración en origen de aguas residuales

- domiciliarias. Una propuesta para comunidades periurbanas del centro sur de Chile. *Revista Gestión y Ambiente*, 16(3), 39-51.
- Puigagut, J., Villasenor, J., Salas, J., Becares, E., García, J. (2007). Subsurface-Flow Constructed Wetlands in Spain for the Sanitation of Small Communities: A Comparative Study. *Ecological Engineering*, 30(4), 312-319, doi: 10.1016/j.ecoleng.2007.04.005.
- Rodríguez, P. (2012). Saneamiento en el sector rural: en busca de opciones sostenibles. *Revista AIDIS Chile*, 42, 11-16.
- Rojas, K., Vera, I., & Vidal, G. (2013). Influencia de la estación y de las especies *Phragmites australis* y *Schoenoplectus californicus* en la eliminación de materia orgánica y nutrientes contenidos en aguas servidas durante la operación de puesta en marcha de humedales construidos de flujo horizontal subsuperficial. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, 69, 289-299.
- Romero, J. (2004). Tratamiento de Aguas Residuales (3ª ed.). Bogotá: Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería.
- Subdere (2012). *Resumen catastro plantas de tratamiento de aguas servidas - Sector rural*. Subsecretaría de Desarrollo Rural. Recuperado de [http://www.subdere.gov.cl/sites/default/files/documentos/catastro\\_plantas\\_tratamiento\\_aguas\\_servidas\\_sector\\_rural\\_ano\\_20121.pdf](http://www.subdere.gov.cl/sites/default/files/documentos/catastro_plantas_tratamiento_aguas_servidas_sector_rural_ano_20121.pdf)
- SISS (2013a). *Plantas de tratamiento de aguas servidas en operación en Chile año 2013*. Superintendencia de Servicios Sanitarios. Recuperado de <http://www.siss.gob.cl/577/w3-propertyvalue-3544.html>.
- SISS (2013b). *Informe anual de cobertura de servicios sanitarios en Chile año 2013*. Superintendencia de Servicios Sanitarios. Recuperado de <http://www.siss.gob.cl/577/w3-propertyvalue-3445.html>.
- Tsihrintzis, V., & Gikas, G. (2010). Constructed Wetlands for Wastewater and Activated Sludge Treatment in North Greece: A Review. *Water Science and Technology*, 61(10), 2653-2672, doi: 10.2166/wst.2010.188.
- Vera, I., García, J., Sáez, K., Moragas, L., & Vidal, G. (2011). Performance Evaluation of Eight Years of Experience of Constructed Wetland Systems in Catalonia as Alternative Treatment for Small Communities. *Ecological Engineering*, 37(2), 364-371, doi: 10.1016/j.ecoleng.2010.11.031.
- Vera, I., Sáez, K., & Vidal, G. (2013). Performance of 14 Full-Scale Sewage Treatment Plants: Comparison between Four Aerobic Technologies Regarding Effluent Quality, Sludge Production and Energy Consumption. *Environmental Technology*, 34(15), 2267-2275, doi: 10.1080/09593330.2013.765921.
- Vera, I., Araya, F., Andrés, E., Sáez, K., & Vidal, G. (2014). Enhanced Phosphorus Removal from Sewage in Mesocosm-Scale Constructed Wetland Using Zeolite as Medium and Artificial Aeration. *Environmental Technology*, 35(13), 1639-1649, doi: 10.1080/09593330.2013.877984.
- Vidal, G., López, D., Vera, I., Chamorro, S., & Baeza, C. (2013). Control de la contaminación de aguas servidas en áreas rurales de alta sensibilidad sísmica a través de humedales construidos. *Revista Seguridad y Medio Ambiente*, Fundación Mapfre, 33(131), 52-60.
- Vymazal, J. (2005). Horizontal Sub-Surface Flow and Hybrid Constructed Wetlands Systems for Wastewater Treatment. *Ecological Engineering*, 25(5), 478-490, doi: 10.1016/j.ecoleng.2005.07.010.
- Vymazal, J. (2007). Removal of nutrients in various types of constructed wetlands. *Science of the Total Environment*, 380(1-3), 48-65, doi: 10.1016/j.scitotenv.2006.09.014.
- Vymazal, J. (2011). Constructed Wetlands for Wastewater Treatment: Five Decades of Experience. *Environmental Science and Technology*, 45(1), 61-69, doi: 10.1021/es101403q.
- Wallace, S. (2001). Patent No. US 6200469B1. System for Removing Pollutants from Water. Recuperado de [https://www.google.com/patents/US6200469?qd=US6200469B1&hl=es&sa=X&ei=rcbDU57\\_K8bLsQSAloFA&ved=0CBwQ6AEwAA](https://www.google.com/patents/US6200469?qd=US6200469B1&hl=es&sa=X&ei=rcbDU57_K8bLsQSAloFA&ved=0CBwQ6AEwAA).
- Wu, S., Kusch, P., Brix, H., Vymazal, J., Dong, R. (2014). Development of Constructed Wetlands in Performance Intensifications for Wastewater Treatment: A Nitrogen and Organic Matter Targeted Review. *Water Research*, 57, 40-55, doi: 10.1016/j.watres.2014.03.020.
- Zúñiga, J., Schiappacasse, M., Chamy, R., Sánchez, O., & Cerda, M. (2004). Evaluación de humedales construidos para el postratamiento de aguas residuales industriales tratadas en reactores anaerobios. *Memorias. XXIX Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental AIDIS*, San Juan, Puerto Rico, del 22 al 25 de agosto de 2004.
- Zurita, F., Belmont, M., De Anda, J., & White, R. (2011). Seeking a Way to Promote the Use of Constructed Wetland for Domestic Wastewater Treatment in Developing Countries. *Water Science and Technology*, 63(4), 654-659, doi: 10.2166/wst.2011.229.
- Zurita, F., Roy, E., & White, J. (2012). Municipal Wastewater Treatment in Mexico: Current Status and Opportunities for Employing Ecological Treatment Systems. *Environmental Technology*, 33(10), 1151-1158, doi: 10.1080/09593330.2011.610364.

## Dirección institucional de los autores

Dr. Ismael Leonardo Vera Puerto

Universidad Arturo Prat  
 Investigador en Tecnologías Ambientales  
 Centro de Investigación y Desarrollo en Recursos Hídricos (CIDERH)  
 Vivar 493, tercer piso, Iquique, CHILE  
 Teléfono: +56 (57) 2530 800  
[leonardo.vera@ciderh.cl](mailto:leonardo.vera@ciderh.cl)  
[leovera82@gmail.com](mailto:leovera82@gmail.com)

Ing. Camila Alondra Jorquera Arancibia

Universidad Arturo Prat  
Pasante  
Centro de Investigación y Desarrollo en Recursos Hídricos  
(CIDERH)  
Vivar 493, tercer piso, Iquique, CHILE  
Teléfono: +56 (57) 2530 800  
kami.jorquera@gmail.com

M.C. Daniela López

Universidad de Concepción  
Estudiante de doctorado en Ciencias Ambientales con  
mención en sistemas acuáticos continentales  
Facultad de Ciencias Ambientales y Centro EULA-Chile  
Barrio Universitario s/n, Concepción, CHILE  
Teléfono: +56 (41) 2661 033  
dlopez@udec.cl

Dra. Gladys Vidal

Universidad de Concepción  
Profesor Titular  
Facultad de Ciencias Ambientales y Centro EULA-CHILE  
Directora Grupo de Ingeniería y Biotecnología Ambiental  
(GIBA-UDEC)  
Barrio Universitario s/n, Concepción, CHILE  
Teléfono: +56 (41) 2204067  
glvidal@udec.cl