



Organización  
de las Naciones Unidas  
para la Educación,  
la Ciencia y la Cultura



Programa  
Hidrológico  
Intergubernamental

Aqua-LAC

Revista del Programa Hidrológico Intergubernamental  
para América Latina y el Caribe

## Evaluación de humedales construidos con plantas ornamentales para el tratamiento de aguas residuales rurales en la Región del Maule: análisis del potencial de reutilización de sus efluentes en riego

*Evaluation of constructed wetlands planted with ornamental plants for rural wastewater treatment in Maule Region: analysis of potential effluent reuse in irrigation*

Ismael L. Vera-Puerto<sup>1\*</sup>, Luis Rojas<sup>1</sup>, Claudio Contreras<sup>1</sup>, Franklin Zuñiga<sup>1</sup>, José López<sup>1</sup>, Claudia Sangüesa<sup>2</sup>, Christian Correa<sup>1</sup>, Carlos A. Arias<sup>3,4</sup>, Mariela Valenzuela<sup>5</sup>

Recibido: 19/09/2021

Aceptado: 01/11/2021

\*Autor de correspondencia

### Resumen

El concepto de economía circular implica que las zonas rurales de Chile incrementen el tratamiento de sus aguas servidas con tecnologías sostenibles y reutilicen sus efluentes para tener una fuente de agua alternativa para riego. Así, este trabajo evaluó el potencial de reutilización en riego, de los efluentes a dos humedales construidos (HC) aplicados al tratamiento de aguas servidas de una zona rural en la Región del Maule. Para esto, por 10 meses, se operó a escala piloto dos HC de flujo subsuperficial: horizontal y vertical. Los HC se plantaron con la especie ornamental *Zantedeschia aethiopica*. Se evaluó la calidad del agua en el afluente y efluentes, y se comparó con normativas de reutilización. Los resultados mostraron similitud en el comportamiento de los efluentes a los HC, con diferencias sólo para DQO y NT. Además, para que los efluentes a los HC se clasifiquen en una categoría de reutilización, es necesario adicionar un sistema de desinfección. Los efluentes al HC horizontal presentaron mayor grado de cumplimiento para categorías de reutilización en riego. Para la normativa chilena, los efluentes a los dos HC presentaron un grado de clasificación similar, pero por la falta de experiencia en Chile reutilizando efluentes, se recomienda una primera etapa, enmarcarlos en categorías que no consideren riego de alimentos. Finalmente, este trabajo logró demostrar el potencial de los HC para el tratamiento de aguas servidas en zonas rurales y la reutilización de sus efluentes como agua de riego, contribuyendo a reducir la presión sobre los recursos hídricos.

**Palabras clave:** aguas servidas, humedal construido, reutilización, Región del Maule, *Zantedeschia aethiopica*

### Abstract

The circular economy concept requires in rural areas of Chile to increase the treated wastewater with sustainable technologies and reuse its effluents to ensure a new water source for irrigation. Therefore, this work evaluated the potential for effluents reuse from two constructed wetlands (CWs) applied to the treatment of wastewater in a rural area in the Maule Region. For this, two subsurface flow CWs were operated for 10 months on a pilot scale: horizontal and vertical. The CWs were planted with *Zantedeschia aethiopica*. The water quality was measured in influent and effluents, and compared with reuse regulations. The results showed similarity in the behavior of the effluents from the two CWs, presenting only differences in COD and TN. In addition, for the effluents from the two CWs can be classified in a reuse category, a complementary disinfection system is necessary. The effluents from the horizontal CW showed a higher degree of compliance for various categories of reuse for irrigation. For Chilean regulations, the effluents from the two CWs presented a similar degree of classification, but due to the lack of greater experience in Chile with the reuse of treated wastewater, it is recommended in a first stage, to frame them in categories that do not consider food production. Finally, this work demonstrates the potential of applying CWs in the treatment of wastewater from rural areas and reuse its effluents as irrigation water, contributing to reduce the pressure over water resources.

**Keywords:** wastewater; constructed wetland; reuse; Maule Region, *Zantedeschia aethiopica*

- 1 Centro de Innovación en Ingeniería Aplicada (CIIA), Departamento de Obras Civiles, Facultad de Ciencias de la Ingeniería, Universidad Católica del Maule, Av. San Miguel 3605, Talca, Chile. ivera@ucm.cl - leovera82@gmail.com
- 2 Centro Tecnológico de Hidrología Ambiental (CTHA), Universidad de Talca, Casilla 747, Avenida Lircay s/n, Talca, Chile
- 3 Department of Biology-Aquatic Biology, Aarhus University, Ole Worms Allé 1, 8000 Aarhus C, Denmark
- 4 WATEC Aarhus University Centre for Water Technology, NyMunkegade, Bldg. 1521, 8000 Aarhus C, Denmark
- 5 Superintendencia del Medio Ambiente, Oficina Regional del Maule, Calle Uno Norte 801, piso 11, Edificio Plaza Centro, Talca, Chile.

## 1. INTRODUCCIÓN

En Chile se han documentado poco más de 550 plantas de tratamiento de aguas servidas (PTAS) instaladas en zonas descentralizadas, que incluyen a las zonas rurales (Subdere, 2015). Estas PTAS en más del 70% están basadas en tratamiento secundario mediante la tecnología de lodos activados, tendencia similar a las de las zonas urbanas del país (Vera et al., 2016). Además, existe un 9% que únicamente emplea tecnología de sedimentación como son las fosas sépticas, con la necesidad de incorporar más etapas para completar su proceso de tratamiento (Vera et al., 2016). Pese a la gran cantidad de PTAS, en las zonas rurales se ha documentado una cobertura máxima de alcantarillado de sólo 25%, por lo que la cobertura de tratamiento, no definida con claridad, sería aún menor y estimada en alrededor del 10% (MOP, 2021; Mena et al., 2020). Además, no existe información oficial de su funcionamiento. Rodríguez (2012), evaluando PTAS de las zonas rurales de la Región de Coquimbo, Valparaíso, Maule y Metropolitana, concluyó que la mayoría funciona de manera inadecuada desde el punto de vista de la sostenibilidad económica y del cumplimiento de la normativa vigente, y plantea la necesidad de explorar tecnologías más sostenibles. De este modo, las zonas rurales de Chile deben integrar el concepto de economía circular para aumentar cobertura y garantizar la sostenibilidad de sus PTAS en el largo plazo.

Por otro lado, el país atraviesa una prolongada sequía que se ha extendido por más de 10 años (Garreud et al., 2019), lo que ha motivado la discusión nacional a encontrar nuevas fuentes hídricas, especialmente para riego en la agricultura (Vera-Puerto et al., 2021a; Donoso y Rivera, 2020). En esta discusión, la reutilización de los efluentes a PTAS, sería una alternativa aún en evaluación en Chile. A nivel mundial, la preocupación por una reutilización segura de efluentes ha llevado a la promulgación de diversas guías y normativas, que definen estándares de calidad del agua enfocados a preservar la salud de las personas, los cultivos y el medio ambiente (Vera et al., 2016; Vera-Puerto et al., 2021a). Así, esta alternativa hídrica presenta un gran potencial para las zonas rurales, dado que estaría en línea con la visión de economía circular necesaria para incrementar la cobertura a este sector de la población (Villamar et al., 2018; Vera-Puerto et al., 2019; Vera-Puerto et al., 2020). En este sentido, para la Región del Maule, que presenta un 27% de población viviendo en la

ruralidad (INE, 2021), y donde la agricultura, juega un papel importante en su economía (ODEPA, 2021), se hace necesario estudiar alternativas tecnológicas para mejorar la cobertura de tratamiento de aguas servidas en las zonas rurales, con tecnologías más sostenibles, y tener una nueva fuente de agua para riego. Tomando en cuenta lo anterior, las soluciones basadas en la naturaleza, y en particular, la tecnología de humedales construidos ha demostrado internacionalmente que presenta el potencial de integrar estos dos tópicos (Vera et al., 2011; Avellán et al., 2019; Nan et al., 2020).

Los humedales construidos (HC) se definen como un sistema de ingeniería diseñado y construido para embalsar el agua bajo diferentes condiciones operativas, aprovechando así los procesos naturales que involucran vegetación, suelos, bacterias y energía solar, para mejorar su calidad (Vera et al., 2016). De acuerdo a la dirección de flujo y a la posición del nivel de agua, los humedales construidos se clasifican en los tres tipos que se conocen principalmente: a) flujo superficial horizontal, b) flujo subsuperficial horizontal (HC-FH), y c) flujo subsuperficial vertical (HC-FV) (Fonder & Headly, 2013). De estos tres tipos de HC, los de flujo subsuperficial han sido más aplicados al tratamiento de aguas servidas (Zhang et al., 2014; Rodríguez-Domínguez et al., 2020). Comparativamente, en Latinoamérica se ha utilizado más el HC-FH (Rodríguez-Domínguez et al., 2020). Sin embargo, se requiere avanzar en el estudio de HC-FV en la realidad Latinoamericana y chilena, ya que presentan ventajas como su capacidad para tratar mayores cargas orgánicas ( $>6 \text{ gDBO}_5/(\text{m}^2\text{-d})$ ), lo que trae consigo una reducción de la necesidad de área (HC-FV, 2–4  $\text{m}^2/\text{hab.}$ ; HC-FH, 5  $\text{m}^2/\text{hab.}$ ) y una mayor capacidad de nitrificación (reducción del amonio en más del 80%) (Vera-Puerto et al., 2021b). En este sentido, recientemente se ha documentado la aplicación de HC-FV a escala laboratorio en la Región del Maule (Vera-Puerto et al., 2021b; Vera-Puerto et al., 2021c), pero sin un enfoque específico en la reutilización de sus efluentes, faltando también, una comparación respecto a su comportamiento con un HC-FH, que como se comentó, es el tipo de HC más utilizado en Latinoamérica.

Tomando en cuenta lo anterior, este trabajo evalúa el potencial de reutilización de los efluentes a dos tipos de humedales construidos de flujo subsuperficial aplicados al tratamiento de aguas servidas de una zona rural, bajo las condiciones climáticas de la Región del Maule.

## 2. METODOLOGÍA

A continuación, en esta sección, se presentan los diferentes elementos considerados en los 10 meses de operación de este trabajo, que incluye las estaciones de invierno y primavera. Los elementos que se describen son las características del afluente con que se alimentó el sistema experimental, las características técnicas y la configuración de los dos tipos de HC evaluados, la estrategia de operación y monitoreo, junto con los métodos analíticos que se siguieron, y finalmente, los métodos estadísticos utilizados para comparación.

### 2.1 Afluente

Para alimentar el sistema experimental se trabajó con agua residual (aguas servidas) originadas por una comunidad rural. Para esto fue necesario construir el sistema experimental dentro de la PTAS que da cobertura a esta comunidad. Además, se hizo un pre-tratamiento para la reducción de los sólidos del afluente que finalmente fue aplicado a los HC. El pre-tratamiento del afluente incluyó un pre-tratamiento por tamizado a través de una cámara de rejillas que se localiza en la estación de bombeo que alimenta a la PTAS. En el tubo de ingreso a la PTAS, se tomó parte del afluente, y a esta porción, se le sometió a un proceso de decantación de sólidos. La Tabla 1 resume las características físicas y químicas del afluente general, agua cruda, y del agua decantada, siendo esta última, la aplicada a los HC experimentales, y cuyas características fueron divididas por las estaciones de invierno y primavera, que fueron las estaciones principales de monitoreo.

La Tabla 1 presenta los valores de concentración para los parámetros de calidad del agua monitoreados, que pueden ser categorizados como típicos para aguas servidas en Chile (Vera et al., 2016; Villamar et al., 2018). En cuanto al efecto del uso del sistema de decantación, se observa un incremento de la DQO para la época de invierno, que se explica por un par de valores elevados al inicio (por sobre 1000 mg/l), relacionados con la presencia de material orgánico efluente por accidente del sistema de decantación, dado que aún se encontraba en período de aclimatación. Por su parte, en el caso de los SST, se observa un efecto positivo del sistema de decantación: reduce en más de un 50% la concentración del agua cruda. El resto de parámetros, en general, no sufre modificación por la implementación del sistema de decantación.

### 2.2 Configuración del sistema

Se construyó un sistema de tratamiento de aguas residuales para la evaluación comparativa de dos tipos de HC de flujo subsuperficial: a) horizontal (HC-FH) y b) vertical (HC-FV). La Figura 1 presenta el sistema de tratamiento propuesto. El sistema fue implementado a un costado de la PTAS que da cobertura a la localidad rural de La Obra (aprox. 2100 habitantes), cercana a la ciudad de Curicó (Región del Maule, Valle central, Chile, 35°01'29'' S, 71°13'09'' E). El clima de la zona es templado de tipo Mediterráneo, con precipitaciones medias anuales de 658 mm, concentradas en el invierno, y temperaturas medias de alrededor de los 8°C en esta estación, con veranos calurosos, de temperaturas máximas por sobre los 30°C y ausencia de precipitaciones (Sarricolea et al., 2017; MeteoChile, 2021).

El HC-FH fue construido con un área superficial experimental de 3.51 m<sup>2</sup> (Ancho: 1.3 m; Largo: 2.7 m), siguiendo valores similares reportados por Vera et al. (2011) para un habitante equivalente en clima mediterráneo. La profundidad total fue de 0.62 m, compuesta por 0.1 m de borde libre y 0.52 m por el medio de soporte. La altura de lámina de agua fue mantenida alrededor de 0.4 m, siguiendo las recomendaciones de reducción de altura de García et al. (2005). El HC-FH fue construido en base a hormigón armado. El medio de soporte utilizado fue grava de dos tamaños: a) 40 a 60 mm, aplicada en la zona de entrada y salida (0.5 m en longitud desde los extremos del HC), y b) 10 a 20 mm para el resto del lecho de humedal. Estas características de tamaño del medio de soporte son las comúnmente utilizadas en sistemas de HC-FH (Dotro et al., 2017). La alimentación fue realizada con tubería de PVC de 32 mm instalada de forma superficial en uno de los extremos del HC. La impermeabilización fue realizada con pintura asfáltica altamente impermeabilizante y anticorrosiva.

Por su parte, para el HC-FV se definió un área superficial experimental de 1.06 m<sup>2</sup> por habitante equivalente siguiendo valores similares previos reportados en clima Mediterráneo por Vera et al. (2013). La estructura del HC-FV fue constituida con un tanque plástico prefabricado que proporciona el área superficial experimental. La profundidad total del tanque fue de 1.0 m, con una profundidad del lecho de 0.9 m y con un borde libre de 0.1 m. Como material granular se utilizó grava de 10 a 20 mm instalada a una altura 0.15 m en la parte superior e

inferior, y arena clasificada como gruesa para el resto del lecho. Los materiales de relleno siguieron la recomendación de diseño usada en Dinamarca (Brix & Arias, 2005). La alimentación se realizó enterrada

en la capa superficial de grava, a través de un sistema de distribución en tuberías de PVC de 32 mm perforadas cada 0.1 m.

Tabla 1. Características del agua servida afluente (n=5 por cada estación)

Parámetro	Unidad	Estación	Agua Cruda		Agua Decantada	
			Media $\pm$ desviación estándar	Rango (Min-Max)	Media $\pm$ desviación estándar	Rango (Min-Max)
pH	Unidad	Invierno	7.6 $\pm$ 0.5	7.1 - 8.3	7.5 $\pm$ 0.2	7.3 - 7.8
		Primavera	7.5 $\pm$ 0.3	7.2 - 7.9	7.3 $\pm$ 0.2	7.13 - 7.47
T	°C	Invierno	14.7 $\pm$ 2.7	10.5 - 17.5	14.3 $\pm$ 2.8	10.2 - 17.5
		Primavera	20.4 $\pm$ 1.4	18.8 - 22.0	19.4 $\pm$ 2.1	17.0 - 22.0
CE	$\mu$ s/cm	Invierno	793 $\pm$ 147	559 - 928	785 $\pm$ 25	773 - 825
		Primavera	830 $\pm$ 146	733 - 1002	840 $\pm$ 135	738 - 1039
ORP	mV	Invierno	-44.5 $\pm$ 76.4	-152.4 - -46.1	-106.2 $\pm$ 116.3	-212.17 - +77.7
		Primavera	-78.7 $\pm$ 49.9	-120.4 - +79.9	-202.3 $\pm$ 42.6	-240.5 -143.3
DQO	mg/l	Invierno	226.0 $\pm$ 65.5	130.0 - 304.0	665.0 $\pm$ 432.5	142.0 - 1001.0
		Primavera	159.3 $\pm$ 44.5	101.0 - 209.0	150.3 $\pm$ 23.2	121.0 - 177.0
SST	mg/l	Invierno	166.5 $\pm$ 75.0	41.4 - 239.2	88.9 $\pm$ 57.3	30.7 - 194.1
		Primavera	117.5 $\pm$ 13.2	101.4 - 137.8	41.7 $\pm$ 11.9	34.0 - 70.0
PT	mg/l	Invierno	4.1 $\pm$ 1.2	2.4 - 5.2	3.5 $\pm$ 1.0	2.0 - 4.1
		Primavera	3.6 $\pm$ 0.9	3.4 - 4.5	4.1 $\pm$ 0.4	3.8 - 4.6
NT	mg/l	Invierno	45.6 $\pm$ 17.0	24 - 68	41.0 $\pm$ 4.9	34.0 - 48.0
		Primavera	28.5 $\pm$ 17.8	4.7 - 47.2	36.5 $\pm$ 6.6	29.0 - 45.0
Coliformes totales	Log <sub>10</sub> (NMP/100 ml)	Invierno	7.6 $\pm$ 0.1	7.44 - 7.74	7.1 $\pm$ 0.4	6.7 - 7.5
		Primavera	7.5 $\pm$ 0.2	7.32 - 7.81	6.8 $\pm$ 0.4	6.5 - 7.4
<i>E. Coli</i>	Log <sub>10</sub> (NMP/100 ml)	Invierno	6.9 $\pm$ 0.2	6.75 - 7.07	6.6 $\pm$ 0.4	6.2 - 7.2
		Primavera	7.0 $\pm$ 0.1	6.92 - 7.04	6.4 $\pm$ 0.2	6.3 - 6.7

T: temperatura, CE: conductividad eléctrica, ORP: potencial de oxido reducción, DQO: demanda química de oxígeno, SST: sólidos suspendidos totales, PT: fósforo total, NT: nitrógeno total, CT: coliformes totales (NMP/100 ml) y E. Coli: Escherichia Coli (NMP/100 ml).

*Zantedeschia aethiopica* (conocida como Cala, Alcazaz, Cartucho, Lirio de agua) fue la especie de planta utilizada en las dos unidades experimentales de HC con una densidad de plantación de 4 individuos por metro cuadrado. Esta especie ha sido reportada previamente para uso en HC incluso en la Región del Maule (Sandoval et al., 2019; Vera-Puerto et al., 2021b), y se trata de una especie de tipo ornamental, con producción de flores, con el potencial de mejorar la estética de los HC evaluados.

### 2.3 Operación y estrategia de monitoreo

El sistema fue operado por 10 meses en total. Durante el primer mes (mayo), se realizaron pruebas hidráulicas y de funcionamiento del sistema. Las pruebas hidráulicas fueron llevadas a cabo para regular la entrada del flujo a 150 l/d a cada HC. Este caudal fue definido considerando un caudal medio de aguas residuales producido por un habitante equivalente para poblaciones inferiores a 2,000 habitantes en la zona sur del país (Vera, 2012). Dadas

las limitaciones de funcionamiento de la PTAS, donde el caudal de ingreso se entrega por bombeo, el sistema fue ajustado a una operación por pulsos, dividiendo el caudal de ingreso en seis pulsos por día, aplicados en jornada diurna. El segundo mes (junio), fue empleado como período de puesta en marcha. Este segundo mes (junio) se consideró como el inicio de operación real y estable del sistema. A partir del tercer mes (julio, semana cinco de operación), se empezó el período de monitoreo tomando muestras cada 20 días por un espacio de ocho meses, que incluyó las estaciones de invierno y primavera. Las muestras se tomaron en cuatro puntos del sistema

(Figura 1): a) punto de muestreo 1, afluente general, b) punto de muestreo 2, efluente del estanque regulador de flujo (posterior al sistema de decantación), y c) punto de muestreo 3 y 4, efluentes a las unidades de HC-FH y HC-FV. Para evaluar la calidad del agua se midieron los parámetros: pH, temperatura (T), conductividad eléctrica (CE), potencial de oxido reducción (ORP), demanda química de oxígeno (DQO), sólidos suspendidos totales (SST), fósforo total (PT), nitrógeno total (NT), coliformes totales (CT) (NMP/100 ml) y Escherichia Coli (E. Coli) (NMP/100 ml).

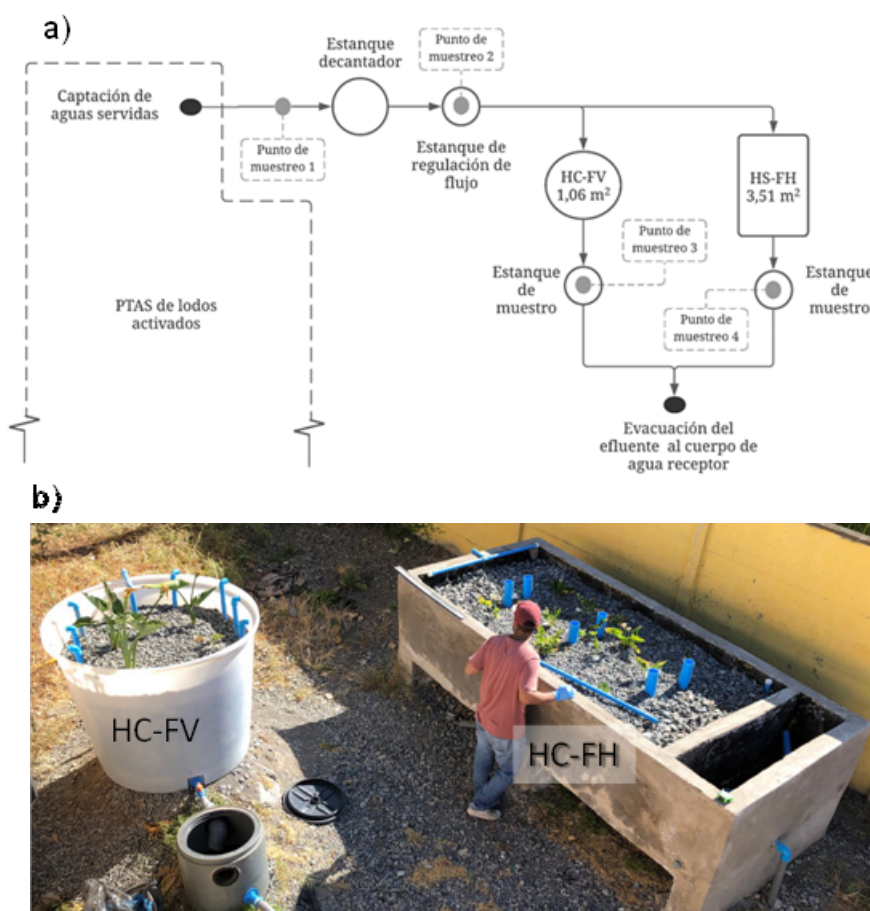


Figura 1. Sistema de tratamiento propuesto y localización de puntos de muestreo. a) Esquema del sistema experimental; b) vista de los humedales construidos: HC-FH, flujo horizontal, HC-FV, flujo vertical, a siete meses de su construcción

#### 2.4 Métodos analíticos

Los parámetros pH, T, CE, y ORP fueron medidos con electrodos calibrados, empleando el multiparamétrico HANNA modelo HI 98194. El parámetro SST fue determinado gravimétricamente mediante filtración por membranas de fibra de vidrio

fina, tamaño de poro 0.6  $\mu\text{m}$ , siguiendo el protocolo establecido en APHA-AWWA-WEF (2018). Por su parte, los parámetros DQO, PT y NT fueron medidos fotométricamente utilizando kits analíticos en el multiparamétrico HANNA modelo HI 83399. Los parámetros microbiológicos, CT y E. Coli fueron analizados utilizando el método Colilert (Dichter,

2011). Estos protocolos de monitoreo han sido empleados por Vera-Puerto et al. (2021b) y Vera-Puerto et al. (2021c).

### 2.5 Análisis estadístico

Para los análisis estadísticos de comparación de la calidad de los efluentes (HC-FH vs HC-FV) se utilizó el software estadístico INFOSTAT y un nivel de significancia de 0,05 (Di Rienzo et al., 2018). Se analizaron las concentraciones de SST, DQO, NT, PT, CT y E. Coli. Se realizó la prueba de normalidad de Shapiro-Wilk para determinar el tipo de test de comparación: a) datos con distribución normal, prueba t, y b) datos sin distribución normal, prueba de Wilcoxon (Vera et al. 2014; Araya et al., 2016).

## 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 3.1 Macro parámetros de calidad del agua efluente

La Tabla 2 resume los macro parámetros pH, T, CE, ORP para los efluentes a los dos humedales evaluados (HC-FH y HC-FV) dividido por estación climática. Respecto al pH, los efluentes a los dos

sistemas, presentan valores medios que oscilan entre 6.0 y 8.0, para las dos estaciones, sin mayores modificaciones respecto al afluente (Tabla 1). Estos valores de pH, se encuentran cercanos al valor intermedio de 7.0, y no deberían afectar los procesos de degradación de materia orgánica y nutrientes (Vera-Puerto et al., 2021b). Valores similares de pH han sido reportados tanto para HC-FH como HC-FV (Rojas et al., 2013; Zurita et al., 2009). Por su parte, para la temperatura, los valores medios se correlacionan con la estación, siendo en invierno alrededor de 13°C, mientras que los valores medios de primavera se encuentran alrededor de los 20°C. Al igual que con el pH, estos valores de temperatura no deberían afectar la eliminación de materia orgánica y nutrientes. En el caso de la CE, los valores medios son similares a los valores del afluente (Tabla 1), excepto para el HC-FV en la estación de primavera, donde la CE efluente, aumenta en más de un 50%. Una posible explicación para ello es la ocurrencia de un proceso de lixiviación o acumulación de compuestos en el estanque efluente de muestras al HC-FV.

Tabla 2. pH, Temperatura, Conductividad Eléctrica (CE) y Potencial de Oxido-Reducción (ORP) por tipo de humedal y estación. (n=5 para cada estación)

Parámetro	Unidad	Estación	HC-FH		HC-FV	
			Promedio ± desviación estándar	Rango (Min-Max)	Promedio ± desviación estándar	Rango (Min-Max)
pH	Unidad	Invierno	7.8 ± 0.1	7.7 – 7.9	6.8 ± 0.3	6.4 - 7.1
		Primavera	7.9 ± 0.1	7.8 - 8.1	6.4 ± 0.4	6.0 – 7.0
T	°C	Invierno	12.9 ± 2.9	8.5 - 15.6	13.7 ± 2.6	10.3 - 15.8
		Primavera	20.1 ± 2.5	17.1 - 23.7	20.5 ± 2.9	17.0 - 24.6
CE	µs/cm	Invierno	621 ± 353	704 – 917	768 ± 371	159 – 1109
		Primavera	962 ± 308	775 – 1496	1558 ± 650	888 – 2511
ORP	mV	Invierno	+57.2 ± 72.4	-57.2 – +109.3	+153.5 ± 63.8	+40.9 - +192.7
		Primavera	+93.6 ± 44.6	+49.8 – +145.6	+230.4 ± 27.5	+191.0 – +262.7

HC-FH: flujo horizontal; HC-FV: flujo vertical

Finalmente, los valores de ORP muestran que ambos sistemas presentan valores medios por sobre +50 mV, aunque con mayor variabilidad en el caso de HC-FH. Este valor de ORP por el HC-FH, muestra que si bien puede considerarse un sistema anóxico (-100mV<ORP<+100mV) (Von Sperling, 2007; Faulwetter et al., 2009), han sido también reportados

como sistemas anaerobios (ORP<-200mV) (Rojas et al., 2013; López et al., 2015). Una posible explicación de esta mejora en las condiciones oxidativas, se relaciona con la reducción de la altura de operación en el HC-FH (0.4 m), ya que como lo explicó García et al. (2005), las condiciones bioquímicas pueden mejorar al reducir la altura típica

de 0.5 m. De otro lado, existe una diferencia de +100 mV en favor del HC-FV, resultado esperable, ya que este sistema en general, por su forma de operación y configuración, se considera más de tipo aerobio (ORP > +100 mV) (Brix & Arias, 2005; Vera-Puerto et al., 2021b).

### 3.2 Parámetros específicos de calidad del agua efluente

#### 3.2.1 Sólidos y materia orgánica

La Figura 2 presenta los valores medios y desviaciones estándar para los SST y la DQO para los dos tipos de HC evaluados (FH y FV). La Figura 2 muestra que los valores de SST siempre (incluida la variabilidad) se encuentran bajo los 20 mg/l. Sólo para la temporada de primavera fueron significativamente ( $p < 0.05$ ) mejores los valores medios efluentes al HC-FH. Además, se observa que existe una reducción en los valores medios efluentes a los dos sistemas de tratamiento en la estación de primavera, lo que se asocia, a una reducción del 50% en la concentración media afluente (Tabla 1). Pese a esto, el comportamiento obtenido para los sólidos, es el esperado para estos dos tipos de humedales, los que se han indicado, son efectivos en la eliminación de este parámetro (Brix & Arias, 2005; Rojas et al., 2013; Vera-Puerto et al., 2021b).

Respecto a la eliminación de materia orgánica medida como DQO, los valores medios no presentan diferencias significativas ( $p > 0.05$ ) entre los dos sistemas de tratamiento, para ninguna de las dos estaciones evaluadas. Para la estación de invierno, los valores medios de DQO se ubican alrededor de los 80 mg/l para los dos sistemas. Sin embargo, para la estación de primavera, se observa una reducción en las concentraciones efluentes al HC-FH con valores medios bajo los 60 mg/l, mientras que, en el sistema HC-FV, mantiene el valor medio del invierno. Este hecho puede explicarse en que para el HC-FH, después de la primera estación evaluada, se presenta un mayor desarrollo microbiano, responsable de la degradación de materia orgánica, y que puede asociarse, con que estos sistemas presentan un mayor tiempo de retención hidráulico ( $> 1d$ ) en comparación con el sistema de HC-FV ( $< 1d$ ). Además, puede explicarse en el hecho que el área unitaria considerada para el HC-FV de 1 m<sup>2</sup>/Hab. sea considerada baja, ya que en general, se ha documentado el uso de entre 3 y 5 m<sup>2</sup>/Hab-Equi. (Habitante-Equivalente) para este tipo de sistema en otras zonas geográficas como Dinamarca, Austria o Alemania (Dotro et al., 2017). Pese a lo anterior, ambos sistemas presentan concentraciones efluentes similares a valores reportados en la literatura (Rojas et al., 2013; Vera-Puerto et al., 2021b,c).

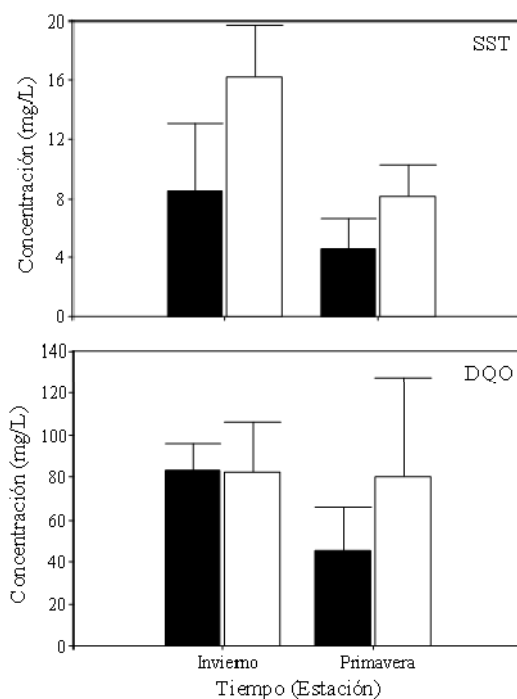


Figura 2. Concentración media efluente de SST y DQO por tipo de humedal y estación. HC-FH (■); HC-FV (□)

### 3.2.2 Macronutrientes

La Figura 3 presenta los valores medios y desviaciones estándar para el NT y PT para los dos tipos de HC evaluados (FH y FV). En el caso del NT tanto para la estación de invierno como de primavera existen diferencias significativas ( $p < 0.05$ ) entre el HC-FH y HC-FV. Además, en el caso de las concentraciones efluentes del HC-FH, los valores medios de alrededor de 30 mg/l, se mantienen uniformes entre las dos estaciones, mostrando similitud con los valores del afluente (Tabla 1). Esto

indica que el HC-FH no posee condiciones para la eliminación de NT, lo que se explica, porque es un sistema principalmente de tipo anóxico (Tabla 2), donde no se produce nitrificación (transformación de amonio a nitrato) y no presenta condiciones para desnitrificación (transformación de nitrato en nitrógeno gas) (Brix et al., 2007; Dotro et al., 2017). Otros trabajos han llegado a la misma conclusión, mostrando que los HC-FH presentan limitación en el procesamiento del NT (Rojas et al., 2013; Leiva et al., 2018).

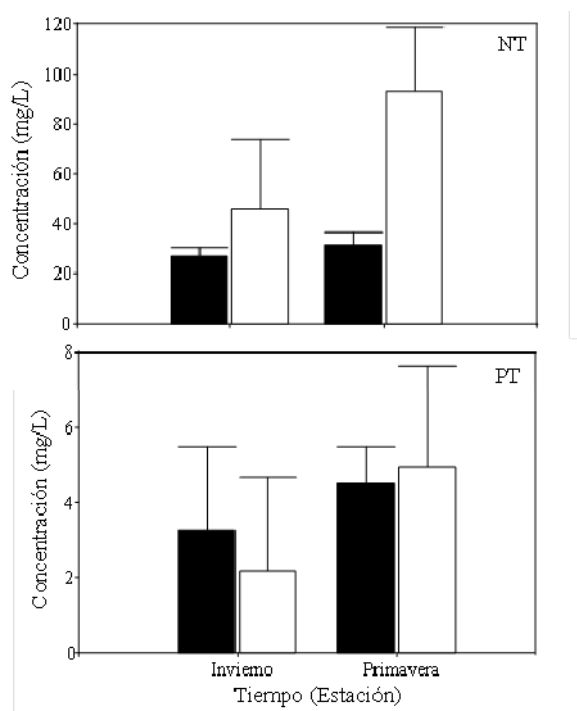


Figura 3. Concentración media efluente de NT y PT por tipo de humedal y estación. HC-FH (■); HC-FV (□)

Por su parte, el HC-FV presenta valores de concentración más altos que los valores medios del afluente (Tabla 1), lo que explica las diferencias significativas ( $p < 0.05$ ) con el HC-FH. El incremento en las concentraciones efluentes al HC-FV se puede explicar en la acumulación de nitrato en el estanque de muestreo efluente. Los HC-FV han sido reconocidos como sistemas que poseen una buena capacidad de nitrificación, lo que en este caso se evidencia por los valores de ORP mayores a +100 mV (Brix & Arias, 2005; Vera-Puerto et al., 2021b).

Respecto al PT, no existen diferencias significativas ( $p > 0,05$ ) entre los dos HC evaluados para las dos

estaciones evaluadas. Además, las concentraciones medias efluentes que varían entre 2 y 6 mg/l, son similares a los valores del afluente, lo que indica poca capacidad de procesamiento y eliminación por parte de los HC evaluados. Este resultado coincide con lo obtenido por Pandey et al. (2013), quienes evaluaron de forma comparativa el funcionamiento de HC-FH y HC-FV a diferentes cargas hidráulicas, que incluye el rango empleado en este estudio. En un HC el fósforo es eliminado principalmente por adsorción al medio de soporte (Vera et al., 2014).

Dado que los dos HC emplearon medios de soporte convencionales como grava en el HC-FH, y arena en



el HC-FV, que no poseen características especiales por ser inertes y con baja o nula capacidad de adsorción de fósforo, los resultados obtenidos fueron los esperables.

### 3.2.3 Microbiológicos

La Figura 4 presenta los valores medios y desviaciones estándar para los Coliformes Totales y *E. Coli* para los dos tipos de HC evaluados (FH y FV). Tanto para Coliformes Totales como *E. Coli*, se presentan diferencias significativas ( $p < 0.05$ ) entre los dos HC únicamente durante la estación de invierno. En primavera, el HC-FV mejora su comportamiento medio, lo que permite que para esta estación no exista diferencia significativa ( $p > 0.05$ ) con el HC-FH. En HC la eliminación de Coliformes Totales y los *E. Coli*, indicadores de presencia de organismos patógenos, se realiza por diferentes procesos como la muerte natural a causa de la inanición, la predación, la sedimentación, la filtración, el atrapamiento y adsorción, pero la filtración sería el principal mecanismo (Odinga et al., 2013). En este sentido, el HC-FV al usar arena como medio de soporte principal, necesita un mayor período de adaptación para el desarrollo de este

mecanismo de filtración y, además, los resultados mostrarían que un HC-FH, a pesar de usar medios de soporte de mayor tamaño que la arena (grava), el mayor tiempo de retención hidráulica ( $>1$  d), mostraría que en el mediano plazo de 6 meses, las concentraciones efluentes de los indicadores de presencia de organismos patógenos entre ambos sistemas sería similar.

Adrados et al. (2018) al estudiar la eliminación de *E. Coli* de forma comparativa entre HC-FH y HC-FV con más de 20 años y 2 años de operación, respectivamente, encontraron que los valores medios de los efluentes al HC-FV se encontrarían siempre bajo 3 Log<sub>10</sub> NMP/100 ml, mientras que, el HC-FH presentaría valores medios por sobre 4 Log<sub>10</sub> NMP/100 ml, correspondiéndose con lo descrito previamente. Finalmente, es importante señalar que, en el período de estudio, ambos sistemas presentan valores medios por sobre 4 Log<sub>10</sub> NMP/100 ml y, en consecuencia, necesitan incorporar sistemas de desinfección para cumplir con las regulaciones de descarga en Chile y las normativas de reutilización, que en general, exigen valores bajo las 3 Log<sub>10</sub> NMP/100 ml (Vera et al., 2016).

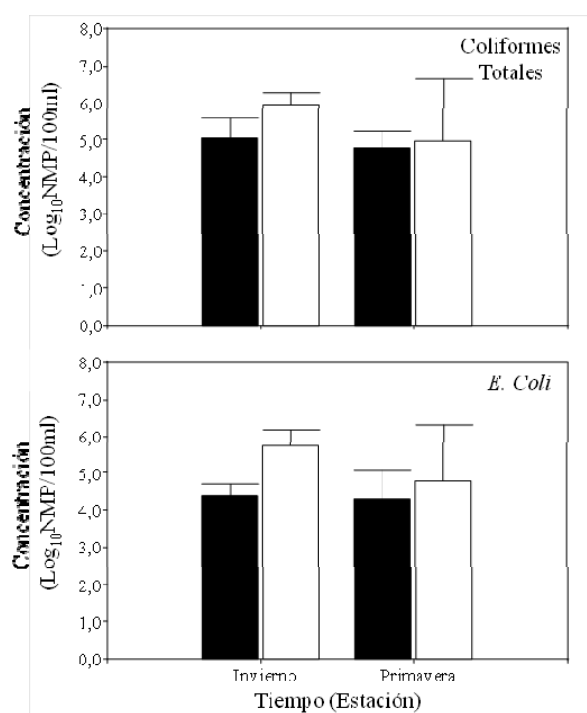


Figura 4. Concentración media efluente para Coliformes Totales y *E. Coli* por tipo de humedal y estación. HC-FH (■); HC-FV (□)

### 3.3 Evaluación del potencial de reutilización

La Figura 5 presenta la evolución temporal del pH y la CE en comparación con la normativa de reutilización italiana (Kalavrouziotis et al., 2015) y la normativa para agua de riego chilena NCh 1333 (INN, 1987). Es importante recalcar que la norma NCh 1333 es una norma que no considera el origen residual del agua como agua de riego, sin embargo, en la actualidad, es la normativa aplicada por el ente regulador en Chile para proyectos de riego con aguas residuales tratadas (Vera et al., 2016). Además, cabe señalar que esta normativa aplica si el efluente de los HC va directamente a riego. En caso que el efluente del HC no se reutilice en riego y, por el contrario, considere descargas a un cauce superficial, el efluente se deberá evaluar en función de la norma de emisión para la regulación de contaminantes

asociados a las descargas de residuos líquidos a aguas marinas y continentales superficiales DS 90/2000 (BCN, 2000). El pH en general se comporta estable a lo largo del tiempo en los dos HC. De los dos tipos de HC, el HC-FH presenta mejor estabilidad y comportamiento en el tiempo respecto al cumplimiento de las dos normativas utilizadas para comparación. En el caso del HC-FV, se observan valores inferiores a los del HC-FH, e incluso, un par de valores en el límite de 6 de la normativa italiana. Esto se explica por la capacidad de nitrificación de este sistema, lo que origina bajas en el pH. Por tanto, ambos HC presentan un comportamiento adecuado para reutilización en riego respecto al pH, pero en el caso de los efluentes al HC-FV, será necesario realizar seguimiento más exhaustivo para control de este parámetro.

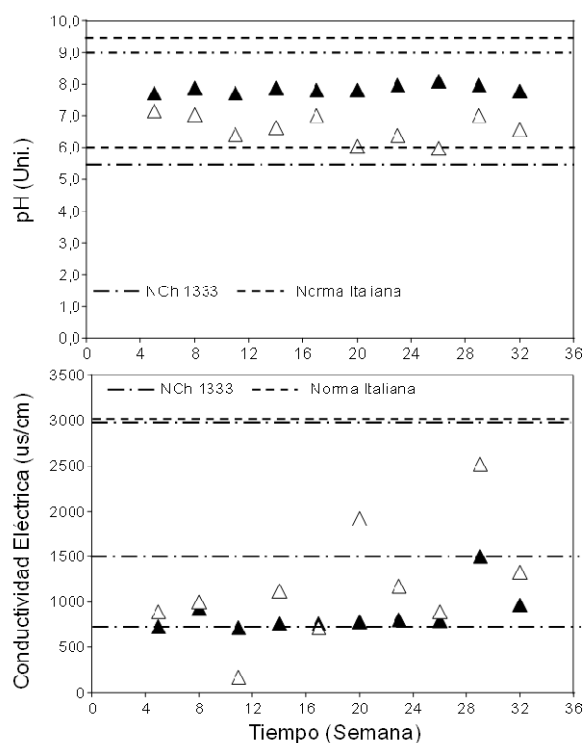


Figura 5. Evolución temporal del pH y la CE y comparativo con NCh 1333 (INN, 1987) y Norma Italiana (Kalavrouziotis et al., 2015). HC-FH (▲); HC-FV (Δ)

Respecto a la CE, los límites indicados en la Figura 5 se relacionan con restricciones al agua de riego señalando el tipo de cultivo que se vaya a regar. Las normativas, tal como lo señala Pedrero et al. (2010), normalmente coinciden en que valores de CE superiores a 3,000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , consideren el agua con un

grado de restricción severo aplicable únicamente a cultivos tolerantes a la salinidad. La CE de ninguno de los dos sistemas de HC presenta valores por sobre ese límite.

Tabla 3. Comparativo de algunos parámetros de calidad de agua evaluados en efluentes para reutilización en Europa y Chile (Adaptado de Lavrnic et al., 2017).

Lugar / Clasificación	Parámetro de Calidad del agua					
	DBO <sub>5</sub>	DQO	SST	NT	PT	<i>E. Coli</i>
<i>Unión Europea (EU 2020/741) (CEC,2020)</i>						
A – Cultivos alimenticios que se consumen crudos donde la parte comestibles está en contacto con el agua y tubérculos	10	-	10	-	-	10
B - Cultivos alimentarios que se consumen crudos donde la parte comestible se produce por encima del suelo y no está en contacto con el agua, cultivos alimentarios procesados y cultivos no alimentarios, incluidos los utilizados para alimentar animales productores de leche o carne <sup>a</sup>	25	-	35	-	-	100
C – Cultivos alimentarios que se consumen crudos donde la parte comestible se produce por encima del suelo y no está en contacto con el agua, cultivos alimentarios procesados y cultivos no alimentarios, incluidos los utilizados para alimentar animales productores de leche o carne <sup>b</sup>	25	-	35	-	-	1000
D – Cultivos de carácter industriales, energéticos y para producción de semillas	25	-	35	-	-	10000
<i>Italia (Lavrnic et al., 2017)</i>						
I – Para riego excepto cuando los cultivos que van a ser consumidos crudos estarán en contacto con el agua y áreas con acceso al público	20	100	10	35	10	100 <sup>c</sup>
<i>Portugal (Lavrnic et al., 2017)</i>						
I – Cultivos que se consumen en estado crudo (sin cocción)	-	-	20-60	50 <sup>d</sup>	-	100
II – Áreas verdes con libre acceso al público	-	-	20-60	50 <sup>d</sup>	-	200
III – Cultivos alimenticios procesados, pastos, huertos y viñedos	-	-	20-60	50 <sup>d</sup>	-	1000
IV – Cultivos industriales, cereales, bosques y áreas verdes con control de acceso al público	-	-	-	-	-	10000
<i>Chile (INN, 2021)</i>						
A – Riego urbano sin restricciones y riego agrícola de cultivos alimenticios consumidos crudos	10	-	10	-	-	10 <sup>e</sup>
B – Riego urbano restringido y riego agrícola de cultivos alimenticios procesados	20	-	25	-	-	200 <sup>e</sup>
C – Riego agrícola de cultivos no alimentarios	35	-	50	-	-	1000 <sup>e</sup>
D – Riego restringido de cultivos industriales y sembrados	35	-	80	-	-	1000 <sup>e</sup>

A. Cualquier método de riego; B. Riego por goteo u otro método que evite el contacto directo con la parte comestible del cultivo; C. 80% de las muestras; D. Medido como N-NO<sub>3</sub>; E. 95% de las muestras

En el caso del HC-FH, los valores de CE serían más estable y se encontrarían entre los 750  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (límite para no causar ningún efecto en los cultivos) y los 1500  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , lo que lleva a clasificarla como agua con un grado de restricción moderado (Pedrero et al., 2010), y ser considerada como un “agua que puede tener efectos perjudiciales en cultivos sensibles” a la salinidad (INN, 1987). Para el HC-FV, existe una mayor dispersión en el comportamiento del CE, presentando un par de valores por sobre los 1500  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , aunque acorde a Pedrero et al. (2010), se puede clasificar aún como agua con un grado de restricción moderado, pero sobre la cual al igual que el pH, requiere un mayor grado de control. Un punto específico es señalar que la diferencia presentada por el HC-FV se podría relacionar con la acumulación de nitrato señalada previamente, lo que indicaría que, en futuras operaciones de reutilización, se deben controlar los tiempos de retención del agua en los tanques de almacenamiento para riego.

La Tabla 3 presenta un resumen comparativo de diferentes normativas de reutilización. Incluye la directriz marco europea EU 2020/741 (CEC, 2020), las normativas de países con clima mediterráneo (similar al de la zona de implementación de los HC) y, además, incluye la NCh 3456 Parte 2 (INN, 2021), que se trataría de la reciente y primera normativa en Chile enfocada en la reutilización de aguas residuales para riego. Adicionalmente, muestra que la normativa promulgada en Europa, Portugal y Chile, otorga categorías al agua a reutilizar acorde al tipo de cultivo que se quiera regar. Además, la Tabla 3 muestra que todas las regulaciones coinciden en limitar contenidos de materia orgánica (aunque variando entre DBO5 y DQO), sólidos (SST) e

indicadores de organismos patógenos (E. Coli), pero no coinciden en la regulación de nutrientes.

La Tabla 4 resume la clasificación para reutilización en riego que puede ser entregada al agua efluente al HC-FH y HC-FV caracterizada en las Figuras 2, 3, 4 y 5, y tomando en cuenta para su clasificación, los valores definidos en la Tabla 3. La Tabla 4 incluye, en caso de no cumplir un parámetro o considerarse que se puede llegar a cumplir para una categoría, las necesidades tecnológicas que se requieren para tal fin. Puede notarse que en general se necesita incorporar un sistema de desinfección, que se debe ajustar a los valores máximos de concentración para indicadores de organismos patógenos que requiera cada categoría en la respectiva legislación. Además, dado que el parámetro evaluado para materia orgánica fue DQO y la mayoría de las legislaciones incluye la DBO5, se consideró que cuando la DQO media efluente al HC-FH o HC-FV fuera superior a 50 mg/l, sería necesario acoplar un segundo sistema de HC (horizontal o vertical) para poder alcanzar al menos valores de DBO5 por debajo de 20 mg/l.

Al respecto es importante señalar dos cosas: 1) en el caso del HC-FV probablemente con un aumento de área unitaria pasando de 1  $\text{m}^2/\text{Hab}$  a 3  $\text{m}^2/\text{Hab}$ , permita alcanzar los valores necesarios para cumplimiento de concentración en el efluente en cuanto a materia orgánica; 2) en caso de acoplamiento de un segundo sistema de HC, se hace necesario evaluar especialmente los valores de NT, ya que si se utiliza un HC-FV, este es un sistema con muy buena capacidad de nitrificación, con la consecuente formación de nitrato, la que como se argumentó previamente, puede acumularse en los depósitos definidos para almacenamiento del agua de riego.

Tabla 4. Clasificación otorgada al agua efluente a cada sistema de HC evaluado por cada una de las estaciones evaluadas

Tipo de Humedal	Estación	Lugar de Legislación			
		Unión Europea	Italia	Portugal	Chile
HC-FH	Invierno	B, C y D <sup>a,b</sup>	I <sup>a</sup>	I, II, III y IV <sup>a,c</sup>	B, C y D <sup>a,b</sup>
	Primavera	B, C y D <sup>a</sup>	I <sup>a</sup>	I, II, III y IV <sup>a,c</sup>	B, C y D <sup>a</sup>
HC-FV	Invierno	B, C y D <sup>a,b</sup>	-	I, II, III y IV <sup>a,d</sup>	B, C y D <sup>a,b</sup>
	Primavera	B, C y D <sup>a,b</sup>	-	IV	B, C y D <sup>a,b</sup>

A Debe incorporarse un sistema de desinfección. b Por el valor de DQO obtenido es probable que se necesite acoplar un segundo HC. c Se considera cumplimiento de NT, ya que se midió efectivamente el NT que incluye al N-NO3. d Importante evaluar los tiempos de almacenamiento para evitar el incremento del valor de NT

Los resultados de la Tabla 4 muestran que los efluentes al HC-FH tienen un mayor potencial de cumplimiento para clasificación con fines de reutilización tomando en cuenta las diferentes

normativas evaluadas. Si se toma específicamente la reciente norma aprobada en Chile para reutilización en riego de productos agrícolas (NCh 3456 Parte 2), tanto los efluentes al HC-FH como al HC-FV,

presentan una clasificación bastante similar. Pese a lo anterior, y dada la poca experiencia en el país reutilizando aguas tratadas, una recomendación general es ser cautelosos en una primera instancia, es decir, emplear los efluentes provenientes de los HC evaluados, y en general de cualquier sistema de tratamiento, tomando en cuenta las categorías C y D, las que no incluyen la producción de productos alimenticios. Una vez estudiados en mayor profundidad por parte de Universidades y Centros de Investigación, los efectos que se tiene sobre cultivos, suelos, y mayores detalles sobre otros elementos en el agua, como, por ejemplo, micro contaminantes, se debe avanzar en una segunda fase, a reutilizar los efluentes tomando en cuenta las categorías A y B, las que incluyen producción de alimentos. Esta segunda fase ayudará a aumentar la oferta de agua para satisfacer las necesidades alimentarias de la creciente población del país y del comercio agropecuario internacional, pero principalmente los sistemas de tratamiento como los HC evaluados en este trabajo, de mayor aplicación en zonas rurales, permitirían obtener una mayor seguridad de suministro de agua de riego, para el fomento de la agricultura familiar campesina.

#### **4. CONCLUSIONES**

Los dos sistemas de humedales construidos de tipo subsuperficial, horizontal y vertical, operados bajo el clima mediterráneo de la Región del Maule en Chile, mostraron similitud en el comportamiento de sus efluentes, presentando únicamente diferencias a medida que avanzó la estación de primavera para los parámetros DQO y NT. Esto significó que los efluentes del sistema horizontal, para los parámetros de calidad de agua evaluados en este trabajo, presentarán mayor grado de cumplimiento para ser clasificados en categorías de reutilización para riego. Pese a lo anterior, es claro que cualquiera sea la categoría de reutilización en que se enmarquen los efluentes tanto del sistema horizontal como vertical,

se deben acoplar sistemas de desinfección, los que se deben operar, tomando en cuenta el límite establecido para los organismos indicadores de patógenos en la categoría final de reutilización en que se vayan a utilizar los efluentes. En el caso específico de la reciente normativa chilena, los efluentes de ambos sistemas presentan un grado de clasificación similar, pero se recomienda en una primera etapa, dada la poca experiencia del país trabajando con aguas reutilizadas, ser enmarcados en categorías que no consideren la producción de alimentos. Finalmente, los resultados de este trabajo logran mostrar que los sistemas de humedales construidos subsuperficiales, horizontal o vertical, representan una solución tecnológica alternativa al tratamiento de las aguas servidas en las zonas rurales de clima mediterráneo en Chile, y que sus efluentes, tienen un alto potencial de ser reutilizados en actividades de riego, en un marco de economía circular, que contribuirá con la necesidad país de encontrar fuentes hídricas alternativas para desarrollar la agricultura, lo que es especialmente crítico, en zonas rurales como la Región del Maule.

#### **AGRADECIMIENTOS**

Los autores de este trabajo agradecen a la Vicerrectoría de Investigación y Postgrado de la Universidad Católica del Maule, por su línea de financiamiento “Apoyo a la realización de tesis de postgrado”, y así mismo, al convenio de colaboración entre la Universidad de Talca (ejecutado por el Centro Tecnológico de Hidrología Ambiental, CTHA) y las organizaciones de usuarios del agua Río Claro, Río Lontué y Estero Carretón, quienes financiaron la realización de este proyecto.

Además, se agradece al apoyo en la analítica de calidad de agua entregado por el Proyecto ANID/FONDECYT/11180672.

#### **REFERENCIAS**

- Adrados, B., Arias, C., Pérez, L., Codony, F., Bécares, E., Brix, H., & Morató, J. (2018). Comparison of removal efficiency of pathogenic microbes in four types of wastewater treatment systems in Denmark. *Ecological Engineering*, 124(September), 1–6. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2018.09.013>
- American Public Health Association; American Water Works Association; Water Environment Federation (APHA-AWWA-WEF) (2018). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 23th ed.; APHA-AWWA-WEF. Washington, DC, USA; Denver, CO, USA; Alexandria, VA, USA. ISBN 978-0875532875.

- Araya, F., Vera, I., Sáez, K., & Vidal, G. (2016). Effects of aeration and natural zeolite on ammonium removal during the treatment of sewage by mesocosm-scale constructed wetlands. *Environmental Technology*, 37(14), 1811–1820. <https://doi.org/10.1080/09593330.2015.1133715>
- Avellán, T., & Gremillion, P. (2019). Constructed wetlands for resource recovery in developing countries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 99, 42–57. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.09.024>
- Biblioteca del Congreso Nacional de Chile (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. Santiago de Chile.
- Brix, H., & Arias, C. (2005). The use of vertical flow constructed wetlands for on-site treatment of domestic wastewater: New Danish guidelines. *Ecological Engineering*, 25(5), 491–500. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2005.07.009>
- Brix, H., Schierup, H., & Arias, C. (2007). Twenty years experience with constructed wetland systems in Denmark – what did we learn? *Water Science & Technology*, 56(3), 63–68. <https://doi.org/10.2166/wst.2007.522>
- Commission of European Communities (CEC) (2020). Regulation (EU) 2020/741 of the European parliament and of the council of 25 May 2020 on minimum requirements for water reuse. Bruselas.
- Dirección Meteorológica de Chile (MeteoChile). Productos históricos, Temperatura histórica anual de la estación General Freire (Curicó) (340031). [Consultado el 31 de agosto de 2021]. Disponible en: <https://climatologia.meteochile.gob.cl/application/historico/temperaturaHistoricaAnual/340031>
- Di Rienzo, J.; Casanoves, F.; Balzarini, M.; Gonzalez, L.; Tablada, M.; Robledo, C. (2018) InfoStat [programa de cómputo]. Universidad Nacional de Córdoba. Córdoba, Argentina.
- Dichter, G. (2011) IDEXX Colilert\*-18 and Quanti-Tray\* Test Method for the Detection of Fecal Coliforms in Wastewater. IDEXX Laboratories, Inc.. Westbrook, ME, USA.
- Donoso, G., Rivera, D. (2019). Desafíos del reúso de aguas residuales tratadas en Chile, 71-88. En *Gestión de aguas residuales: vertimiento, tratamiento y reutilización*. Séptimas Jornadas de Derecho de Aguas. Pontificia Universidad Católica del Perú.
- Dotro, G., Langergraber, O., Molle, P., Nivala, J., Puigagut, J., Stein, O., Von Sperling, M. (Carlos Arias e Ismael L. Vera-Puerto Editores versión castellana) (2017). *Humedales para tratamiento*. IWA Publishing. Londres, Inglaterra. eISBN 9781789062526.
- Faulwetter, J., Gagnon, V., Sundberg, C., Chazarenc, F., Burr, M., Brisson, J., Stein, O. (2009). Microbial processes influencing performance of treatment wetlands: A review. *Ecological Engineering*, 35(6), 987–1004. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2008.12.030>
- Fonder, N., & Headley, T. (2013). The taxonomy of treatment wetlands: A proposed classification and nomenclature system. *Ecological Engineering*, 51(2), 203–211. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2012.12.011>
- García, J., Aguirre, P., Barragán, 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. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2005.06.010>
- Garreaud, R., Boisier, J., Rondanelli, R., Montecinos, A., Sepúlveda, H., & Veloso Aguila, D. (2020). The Central Chile Mega Drought (2010–2018): A climate dynamics perspective. *International Journal of Climatology*, 40(1), 421–439. <https://doi.org/10.1002/joc.6219>
- Instituto Nacional de Estadística de Chile (INE). Síntesis de resultados, Censo 2017. [Consultado el 31 de agosto de 2021]. Disponible en: <https://www.censo2017.cl/descargas/home/sintesisde-resultados-censo2017.pdf>.
- Instituto Nacional de Normalización (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 (INN) (2021). Norma Chilena (NCh) 3456 Directrices para el uso de aguas residuales tratadas en proyectos de riego. Parte 2. Santiago de Chile.

- Kalavrouziotis, I., Kokkinos, P., Oron, G., Fatone, F., Bolzonella, D., Vatyliotou, M., Varnavas, S. (2015). Current status in wastewater treatment, reuse and research in some mediterranean countries. *Desalination and Water Treatment*, 53(8), 2015–2030. <https://doi.org/10.1080/19443994.2013.860632>
- Lavrnic, S., Zapater-Pereyra, M., & Mancini, M. (2017). Water Scarcity and Wastewater Reuse Standards in Southern Europe: Focus on Agriculture. *Water, Air, & Soil Pollution*, 228(7), 2–12. <https://doi.org/10.1007/s11270-017-3425-2>
- Leiva, A., Núñez, R., Gómez, G., López, D., & Vidal, G. (2018). Performance of ornamental plants in monoculture and polyculture horizontal subsurface flow constructed wetlands for treating wastewater. *Ecological Engineering*, 120(May), 116–125. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2018.05.023>
- López, D., Fuenzalida, D., Vera, I., Rojas, K., & Vidal, G. (2015). Relationship between the removal of organic matter and the production of methane in subsurface flow constructed wetlands designed for wastewater treatment. *Ecological Engineering*, 83, 296–304. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2015.06.037>
- Mena, M., Rojas, N., Zamorano, G., Peralta, F., Díaz, G., Aldunate, G., Recabarren, A. (2020). Informe Final, Mesa Eficiencia Hídrica, Sub-mesa reúso de aguas servidas tratadas y aguas grises tratadas. Ministerio de Obras Públicas de Chile.
- Ministerio de Obras Públicas de Chile (MOP). Mesa Nacional del Agua: Primer Informe. [Consultado 31 de agosto de 2021]. Disponible en: [https://www.mop.cl/Prensa/Documents/Mesa\\_Nacional\\_del\\_Agua\\_2020\\_Primer\\_Informe\\_Enero.pdf](https://www.mop.cl/Prensa/Documents/Mesa_Nacional_del_Agua_2020_Primer_Informe_Enero.pdf).
- Nan, X., Lavrnić, S., & Toscano, A. (2020). Potential of constructed wetland treatment systems for agricultural wastewater reuse under the EU framework. *Journal of Environmental Management*, 275(February), 111219. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111219>
- Odinga, C., Swalaha, F., Otieno, F., Ranjith, K., & Bux, F. (2013). Investigating the efficiency of constructed wetlands in the removal of heavy metals and enteric pathogens from wastewater. *Environmental Technology Reviews*, 2(1), 1–16. <https://doi.org/10.1080/21622515.2013.865086>
- Oficina de estudios y políticas agrarias (ODEPA). Panorama de la agricultura chilena. Ministerio de Agricultura. [Consultado el 31 de agosto de 2021]. Disponible en: <https://www.odepa.gob.cl/wp-content/uploads/2019/09/panorama2019Final.pdf>.
- Pandey, M., Jenssen, P., Krogstad, T., & Jonasson, S. (2013). Comparison of vertical and horizontal flow planted and unplanted subsurface flow wetlands treating municipal wastewater. *Water Science and Technology*, 68(1), 117–123. <https://doi.org/10.2166/wst.2013.220>
- Pedrero, F., Kalavrouziotis, I., Alarcón, J., Koukoulakis, P., & Asano, T. (2010). Use of treated municipal wastewater in irrigated agriculture-Review of some practices in Spain and Greece. *Agricultural Water Management*, Vol. 97, pp. 1233–1241. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2010.03.003>
- 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 horiz. *Rev. Fac. Ing. Univ. Antioquia*, 69, 289–299.
- Rodríguez, P. (2012). Saneamiento en el sector rural: en busca de opciones sostenibles. *Revista AIDIS Chile*, 42, 11-16.
- Rodriguez-Dominguez, M., Konnerup, D., Brix, H., & Arias, C. (2020). Constructed Wetlands in Latin America and the Caribbean: A Review of Experiences during the Last Decade. *Water*, 12(6), 1744. <https://doi.org/10.3390/w12061744>
- Sarricolea, P., Herrera-Ossandon, M., & Meseguer-Ruiz, Ó. (2017). Climatic regionalisation of continental Chile. *Journal of Maps*, 13(2), 66–73. <https://doi.org/10.1080/17445647.2016.1259592>
- Sandoval, L., Zamora-Castro, S., Vidal-Álvarez, M., & Marín-Muñiz, J. (2019). Role of Wetland Plants and Use of Ornamental Flowering Plants in Constructed Wetlands for Wastewater Treatment: A Review. *Applied Sciences*, 9(4), 685. <https://doi.org/10.3390/app9040685>
- Subsecretaría de Desarrollo Rural de Chile (Subdere). Resumen catastro plantas de tratamiento de aguas servidas - Sector rural. [Consultado 30 de abril de 2015]. Disponible en:

[https://bibliotecadigital.subdere.gov.cl/?\\_%20ga=2.15711862.1716703321.%201627500562-215413543.1627500562](https://bibliotecadigital.subdere.gov.cl/?_%20ga=2.15711862.1716703321.%201627500562-215413543.1627500562)

- Vera, I., García, J., Sáez, K., Moragas, L., & Vidal, G. (2011). Performance evaluation of eight years experience of constructed wetland systems in Catalonia as alternative treatment for small communities. *Ecological Engineering*, 37(2), 364–371. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2010.11.031>
- Vera, I. (2012). Análisis de funcionamiento y patrones asociativos de sistemas de tratamiento convencionales y naturales de aguas servidas para la eliminación de materia orgánica y nutrientes. Tesis Doctoral, Universidad de Concepción, Concepción, Región del Biobío, Chile.
- Vera, L., Martel, G., & Márquez, M. (2013). Two years monitoring of the natural system for wastewater reclamation in Santa Lucía, Gran Canaria Island. *Ecological Engineering*, 50, 21–30. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2012.08.001>
- 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. <https://doi.org/10.1080/09593330.2013.877984>
- Vera, I., Jorquera, C., López, D., & Vidal, G. (2016). Humedales construidos para tratamiento y reúso de aguas servidas en Chile: reflexiones. *Tecnología y Ciencias Del Agua*, 7(3), 19–35.
- Vera-Puerto, I., Olave, J., Tapia, S., & Chávez, W. (2019). Atacama Desert: water resources and reuse of municipal wastewater in irrigation of cut flower aeroponic cultivation system (first laboratory experiments). *Desalination and water treatment*, 150, 73–83. <https://doi.org/10.5004/dwt.2019.23612>
- Vera-Puerto, I., Olave-Vera, J., Tapia, S., Chávez, W., & Arias, C. (2020). Reuse of Treated Municipal Wastewater from Constructed Wetlands for Cut Flowers Irrigation in Aeroponic Cultivation. *Ingeniería y Universidad*, 24. <https://doi.org/10.11144/Javeriana.iued24.tmwr>
- Vera-Puerto, I., Valdes, H., Bueno, M., Correa, C., Olave, J., Carrasco-Benavides, M., Schiappacasse, F., & Arias, C. (2021a). Reclamation of Treated Wastewater for Irrigation in Chile: Perspectives of the Current State, Opportunities, and Challenges. *Science of the Total Environment* (Submitted).
- Vera-Puerto, I., Escobar, J., Rebollo, F., Valenzuela, V., Olave, J., Tijero-Rojas, R., Arias, C. (2021b). Performance comparison of vertical flow treatment wetlands planted with the ornamental plant *Zantedeschia aethiopica* operated under arid and mediterranean climate conditions. *Water (Switzerland)*, 13(11), 1478. <https://doi.org/10.3390/w13111478>
- Vera-Puerto, I., Valdés, H., Correa, C., Perez, V., Gomez, R., Alarcon, E., & Arias, C. (2021c). Evaluation of Bed Depth Reduction, Media Change, and Partial Saturation as Combined Strategies to Modify in Vertical Treatment Wetlands. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(9), 4842. <https://doi.org/10.3390/ijerph18094842>
- Villamar, C.-A., Vera-Puerto, I., Rivera, D., & De la Hoz, F. (2018). Reuse and Recycling of Livestock and Municipal Wastewater in Chilean Agriculture: A Preliminary Assessment. *Water*, 10(6), 817. <https://doi.org/10.3390/w10060817>
- Von Sperling, M. (2007). *Basic Principles of wastewater treatment*. IWA Publishing. Londres, Inglaterra. eISBN 9781780402093.
- Zhang, D., Jinadasa, K., Gersberg, R., Liu, Y., Ng, W., & Tan, S. (2014). Application of constructed wetlands for wastewater treatment in developing countries – A review of recent developments (2000–2013). *Journal of Environmental Management*, 141, 116–131. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2014.03.015>
- Zurita, F., De Anda, J., & Belmont, M. (2009). Treatment of domestic wastewater and production of commercial flowers in vertical and horizontal subsurface-flow constructed wetlands. *Ecological Engineering*, 35(5), 861–869. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2008.12.026>



Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International  
CC BY-NC-SA 4.0 license