



UNIVERSIDAD DE CONCEPCION



CENTRO DE CIENCIAS AMBIENTALES  
EULA-CHILE

**Puesta en marcha de un sistema piloto de humedales construidos de  
flujo subsuperficial para la depuración de aguas servidas rurales:**

**Consideración de indicadores de sustentabilidad**

Habilitación presentada para optar al título de

**Ingeniero Ambiental**

**KAREN JOHANNA ROJAS ESCALONA**

CONCEPCION (Chile), 2012



UNIVERSIDAD DE CONCEPCION



CENTRO DE CIENCIAS AMBIENTALES  
EULA-CHILE

**Puesta en marcha de un sistema piloto de humedales construidos de  
flujo subsuperficial para la depuración de aguas servidas rurales:**

**Consideración de indicadores de sustentabilidad**

Habilitación presentada para optar al título de

**Ingeniero Ambiental**

**Alumno: Karen Johanna Rojas Escalona**

**Profesor guía: Dra. Gladys Cecilia Vidal Sáez**

CONCEPCION (Chile), 2012

## INDICE

|  |    |
|--|----|
| AGRADECIMENTOS .....   | 8  |
| RESUMEN .....  | 9  |
| 1 INTRODUCCION .....   | 11 |
| 2 HIPOTESIS .....  | 14 |
| 3 OBJETIVOS .....  | 14 |
| 3.1 Objetivo general .....   | 14 |
| 3.2 Objetivos específicos .....  | 14 |
| 4 ANTECEDENTES .....   | 15 |
| 4.1 Características de aguas servidas .....                                  | 15 |
| 4.2 Tratamiento de las aguas servidas en Chile .....                         | 16 |
| 4.3 Aguas servidas en sectores rurales .....                                 | 20 |
| 4.3.1 Tecnologías utilizadas en PTAS rurales .....                           | 22 |
| 4.3.2 Tratamiento y disposición de aguas servidas de localidades rurales ..  | 24 |
| 4.4 Tecnologías naturales para el tratamiento de aguas servidas rurales .... | 26 |
| 4.5 Humedales de flujo subsuperficial.....                                   | 31 |
| 4.5.1 Humedales de flujo horizontal subsuperficial.....                      | 32 |
| 4.5.2 Puesta en marcha de HFHSS .....  | 33 |
| 4.5.3 Vegetación.....  | 34 |
| 4.5.4 Clogging .....   | 35 |
| 4.5.5 Mecanismos de eliminación de contaminantes .....                       | 37 |
| 4.6 Indicadores de sustentabilidad.....                                      | 40 |
| 4.6.1 Definición desarrollo sustentable.....                                 | 40 |
| 4.6.2 Definición de indicadores de sustentabilidad.....                      | 40 |
| 4.6.3 Características de indicadores de sustentabilidad.....                 | 41 |
| 4.7 Indicadores de sustentabilidad aplicables a PTAS.....                    | 42 |

|       |  |    |
|-------|--|----|
| 4.7.1 | Indicadores ambientales.....                                     | 42 |
| 4.7.2 | Indicadores económicos.....                                      | 44 |
| 4.7.3 | Indicadores sociales.....  | 45 |
| 5     | METODOLOGIA.....   | 46 |
| 5.1   | Características de la planta piloto HFHSS.....                   | 46 |
| 5.1.1 | Ubicación.....   | 46 |
| 5.1.2 | Obtención del influente.....                                     | 46 |
| 5.1.3 | Características del humedal.....                                 | 48 |
| 5.2   | Estrategia de operación.....                                     | 49 |
| 5.2.1 | Parámetros hidráulicos.....                                      | 49 |
| 5.3   | Estrategia de monitoreo.....                                     | 50 |
| 5.3.1 | Parámetros de campo.....   | 50 |
| 5.3.2 | Parámetros fisicoquímicos.....                                   | 51 |
| 5.4   | Métodos analíticos.....  | 52 |
| 5.5   | Metodología de aplicación de indicadores de sustentabilidad..... | 53 |
| 5.5.1 | Población considerada en cada PTAS.....                          | 54 |
| 5.5.2 | Indicadores ambientales.....                                     | 55 |
| 5.5.3 | Indicadores económicos.....                                      | 59 |
| 5.5.4 | Indicadores sociales.....  | 60 |
| 6     | RESULTADOS Y DISCUSION.....                                      | 61 |
| 6.1   | Parámetros hidráulicos de operación.....                         | 61 |
| 6.2   | Comportamiento evolutivo de las celdas.....                      | 63 |
| 6.2.1 | Parámetros in-situ.....  | 63 |
| 6.2.2 | Crecimiento de la vegetación.....                                | 68 |
| 6.3   | Caracterización fisicoquímica del influente.....                 | 70 |
| 6.4   | Eliminación de la carga contaminante.....                        | 71 |

|       |  |     |
|-------|--|-----|
| 6.4.1 | Eliminación de materia orgánica y sólidos..... | 72  |
| 6.4.2 | Eliminación de nutrientes .....                | 76  |
| 6.5   | Indicadores de sustentabilidad.....            | 82  |
| 6.5.1 | Indicadores ambientales.....                   | 82  |
| 6.5.2 | Indicadores económicos.....                    | 86  |
| 6.5.3 | Indicadores sociales .....                     | 88  |
| 7     | CONCLUSIONES.....                              | 90  |
| 8     | RECOMENDACIONES .....                          | 92  |
| 9     | BIBLIOGRAFIA .....                             | 93  |
|       | ANEXOS .....                                   | 105 |

## INDICE DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| Figura 1. Clasificación de humedales construidos (Plaza de los Reyes <i>et al.</i> , 2011).....  | 27 |
| Figura 2. Corte de los diferentes tipos de humedales construidos: (a) HFHS; (b) HFHSS; (c) HFVSS (Plaza de los Reyes <i>et al.</i> , 2011). ....                           | 32 |
| Figura 3. Etapas de clogging en HFHSS (Adaptado de Vymazal and Kröpfelová, 2008a).....   | 37 |
| Figura 4. Ubicación planta piloto HFHSS en PTAS Hualqui.....   | 46 |
| Figura 5. Punto de extracción del agua servida. ....   | 47 |
| Figura 6. Punto de extracción, recorrido del influente y del efluente. ....  | 47 |
| Figura 7. Distribución de las celdas en la Planta piloto de HFHSS. ....  | 48 |
| Figura 8. Abertura de las llaves.....  | 50 |
| Figura 9. Puntos de muestreo para parámetros in-situ.....  | 50 |
| Figura 10. Áreas de división para el seguimiento de las plantas.....   | 51 |
| Figura 11: Cargas hidráulicas aplicadas a cada una de las celdas.....  | 61 |
| Figura 12: Obstrucción a la entrada de la celda (Clogging).....  | 62 |
| Figura 13: Tiempos de retención hidráulico de cada una de las celdas.....  | 62 |
| Figura 14. pH en los puntos de medición de cada celda. A2 (■), B2 (□), C2 (□); I (invierno), P (primavera); a) Celda 1, b) Celda 2, c) Celda 3, d) Celda 4.....            | 63 |
| Figura 15. Oxígeno disuelto. Celda 1 (■), Celda 2 (□), Celda 3 (■), Celda 4 (□).....   | 64 |
| Figura 16. Potencial Óxido-Reducción. A2 (■), B2 (□), C2 (□); I (invierno), P (primavera); a) Celda 1, b) Celda 2, c) Celda 3, d) Celda 4.....                             | 65 |
| Figura 17. Temperatura en los puntos de medición para las celdas. A2 (■), B2 (□), C2 (□); I (invierno), P (primavera); a) Celda 1, b) Celda 2, c) Celda 3, d) Celda 4..... | 67 |
| Figura 18. Supervivencia de plantas y número de plantas brotadas. a) Celda 1, b) Celda 2, c) Celda 3, d) Celda 4. (+) Brotes, (o) Plantas.....                             | 68 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 19. Eliminación de DBO <sub>5</sub> y concentración a la salida de cada celda.<br>Concentración (□), eficiencias (■); I (invierno), P (primavera); plantadas con:<br><sup>a</sup> <i>Phragmites australis</i> (subrayados), <sup>b</sup> <i>Scirpus californicus</i> .....              | 72 |
| Figura 20. Eliminación de DQO y concentración a la salida de cada celda.<br>Concentración (□), eficiencias (■); I (invierno), P (primavera); plantadas con:<br><sup>a</sup> <i>Phragmites australis</i> (subrayados), <sup>b</sup> <i>Scirpus californicus</i> .....                           | 73 |
| Figura 21. Eliminación de SST y concentración a la salida de cada celda.<br>Concentración (□), eficiencias (■); I (invierno), P (primavera); plantadas con:<br><sup>a</sup> <i>Phragmites australis</i> (subrayados), <sup>b</sup> <i>Scirpus californicus</i> .....                           | 75 |
| Figura 22. Eliminación de SSV y concentración a la salida de cada celda<br>Concentración (□), eficiencias (■); I (invierno), P (primavera); plantadas con:<br><sup>a</sup> <i>Phragmites australis</i> (subrayados), <sup>b</sup> <i>Scirpus californicus</i> .....                            | 76 |
| Figura 23. Eliminación de NT y concentración a la salida de cada celda.<br>Concentración (□), eficiencias (■); I (invierno), P (primavera); plantadas con:<br><sup>a</sup> <i>Phragmites australis</i> (subrayados), <sup>b</sup> <i>Scirpus californicus</i> .....                            | 77 |
| Figura 24. Eliminación de NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> y concentración a la salida de cada celda.<br>Concentración (□), eficiencias (■); I (invierno), P (primavera); plantadas con:<br><sup>a</sup> <i>Phragmites australis</i> (subrayados), <sup>b</sup> <i>Scirpus californicus</i> .....  | 78 |
| Figura 25.. Eliminación de PT y concentración a la salida de cada celda.<br>Concentración (□), eficiencias (■); I (invierno), P (primavera); plantadas con:<br><sup>a</sup> <i>Phragmites australis</i> (subrayados), <sup>b</sup> <i>Scirpus californicus</i> .....                           | 80 |
| Figura 26. Eliminación de PO <sub>4</sub> <sup>-3</sup> y concentración a la salida de cada celda.<br>Concentración (□), eficiencias (■); I (invierno), P (primavera); plantadas con:<br><sup>a</sup> <i>Phragmites australis</i> (subrayados), <sup>b</sup> <i>Scirpus californicus</i> ..... | 81 |

## INDICE DE TABLAS

|   |     |
|---|-----|
| Tabla 1. Caracterización fisicoquímica de las aguas servidas. ....  | 16  |
| Tabla 2. Características de las PTAS de la Región del Biobío, Chile.....  | 18  |
| Tabla 3. Características físicas e hidráulicas de los humedales construidos. ....   | 28  |
| Tabla 4. Caracterización y eliminación de contaminantes en humedales<br>construidos. ....                                       | 29  |
| Tabla 5. Parámetros hidráulicos de operación. ....  | 49  |
| Tabla 6. Frecuencia de medición de parámetros fisicoquímicos. ....  | 51  |
| Tabla 7. Caracterización de las PTAS seleccionadas. ....  | 53  |
| Tabla 8. Población considerada para cada una de las PTAS.....   | 54  |
| Tabla 9: Caracterización del influente con que se abasteció el HFHSS.....   | 70  |
| Tabla 10. Eficiencias de celdas plantadas con <i>Phragmites australis</i> y <i>Scirpus<br/>californicus</i> . ....              | 71  |
| Tabla 11. Indicadores ambientales.....  | 85  |
| Tabla 12. Características de las PTAS, consideraciones para la elaboración de<br>los indicadores ambientales y económicos ..... | 85  |
| Tabla 13. Indicadores económicos.....   | 88  |
| Tabla 14: Indicadores sociales.....   | 89  |
| Tabla 15. Detalle de los costos de inversión del HFHSS. ....  | 108 |

## **AGRADECIMENTOS**

Primero quisiera darle las gracias a Dios por ayudarme y darme día a día las fuerzas para recorrer nuevos caminos.

Agradezco a mi familia principalmente a mis padres Oscar y María por enseñarme que la peor carrera en la vida es aquella que no nos atrevemos a recorrer, que con pocas cosas se pueden hacer maravillas y que lo importante es lo que está dentro de nuestros corazones. A mis hermanos Oscar y Grace por darme alegría, apoyo y comprensión.

A mis familiares, en especial a mi tía Mónica y a Martita por la importante ayuda que me brindaron que nunca olvidare. A mis amigas, Marianela, Viviana, Yanny y Johana por su confianza, compañía y apoyo.

A mis compañeras del hogar universitario perteneciente a la Universidad de Concepción por los buenos momentos pasados y por ser mi segunda familia durante mi vida universitaria.

También agradezco al Grupo de Ingeniería y Biotecnología Ambiental (GIBA) del Centro de Ciencias Ambientales EULA-Chile por haber sido una ayuda fundamental para el fortalecimiento de mis capacidades y en especial a la Dra. Gladys Vidal, quien lo lidera y está en permanente preocupación por el crecimiento de cada uno de sus integrantes. Al candidato a Doctor en Ciencias Ambientales, Leonardo Vera por su ayuda, apoyo y por estar siempre dispuesto a resolver cualquier duda surgida durante el desarrollo de esta tesis.

A la empresa sanitaria ESSBIO S.A. por facilitar el ingreso a la PTAS de Hualqui para el monitoreo de la planta piloto de HFHSS para el desarrollo de esta tesis.

## RESUMEN

Desde hace más de treinta años, los humedales construidos se han utilizado en Europa, para tratar aguas servidas de pequeños municipios. En la actualidad estos sistemas se están aplicando en todo el mundo. Los humedales construidos se clasifican en: a) flujo horizontal superficial (HFHS); b) flujo horizontal subsuperficial (HFHSS); c) flujo vertical subsuperficial (HFVSS). Los HFHSS utilizados para tratar aguas servidas logran eliminaciones para la Demanda Bioquímica de Oxígeno ( $DBO_5$ ) y Demanda Química de Oxígeno (DQO) superiores al 75%, mientras que la eliminación de nutrientes, nitrógeno total (NT) y fósforo total (PT) varía entre un 10% y 20%.

En Chile actualmente, no se utilizan humedales construidos para tratar aguas servidas, a pesar que estos constituyen una alternativa al problema del saneamiento de las zonas rurales. Por esto, es importante evaluar el funcionamiento de un HFHSS para la depuración de aguas servidas rurales en la Región del Biobío, y analizar con indicadores de sustentabilidad la potencialidad de implementación, en comparación a los sistemas convencionales instalados, para este segmento de la población. Para esto, se dispuso en la Planta de Tratamiento de Aguas Servidas (PTAS) de la comuna de Hualqui un sistema de HFHSS a escala piloto, constituido por cuatro celdas paralelas de 4,5 m<sup>2</sup> con medio de soporte grava. Dos celdas fueron plantadas con *Phragmites australis*, y las otras dos celdas con *Scirpus californicus*. La operación se llevó a cabo por los primeros 193 días de funcionamiento, abarcando las estaciones de invierno y primavera.

Durante el monitoreo, el HFHSS presentó eficiencias de eliminación para los parámetros DQO,  $DBO_5$ , Sólidos Suspendidos Totales (SST), Amonio ( $NH_4^+$ ) y NT hasta de un 79%, 68%, 96%, 91% y 45% en primavera y 61%, 76%, 92%, 60%, 63,8% en invierno para cada uno de los parámetros respectivamente, siendo las celdas plantadas con *Phragmites australis* superiores en promedio de 14,2% en

invierno y de 10,8% en primavera respecto a las plantadas con *Scirpus californicus*.

Para la consideración de los indicadores de sustentabilidad se seleccionaron 3 PTAS: dos sistemas convencionales de lodos activados y un sistema de lagunas facultativas, además de una PTAS que tratara una población rural (<2.000 habitantes). A éstas PTAS y al HFHSS, se les aplicaron una serie de indicadores tanto ambientales, económicos y sociales que constituyen los indicadores de sustentabilidad.

Finalmente, los indicadores ambientales del HFHSS presentaron un menor consumo de energía con 18,23 Kw-hr/hab·año y una mayor potencia instalada 0,78 Kw/hab. Además, no presentó, consumo de productos químicos, ni insumos. Respecto a los niveles de cumplimiento del Decreto Supremo (DS) 90, para el HFHSS son inferiores al 40%, esto se explica por ser esta una etapa de puesta en marcha del sistema. Respecto a los indicadores económicos, esta planta presenta un costo de inversión de 2,32 millones de pesos por habitante, lo que representa que es hasta 12 veces más que un sistema convencional. Sin embargo por economía de escala puede ser reducido hasta 0,035 millones de pesos por habitante.

## 1 INTRODUCCION

Actualmente, se emplean para el adecuado saneamiento ambiental del agua diferentes procesos de tratamiento, ya sean físicos, químicos y/o biológicos que se adoptan de acuerdo a las características del agua residual a tratar considerándose nuevas tecnologías, nuevos procesos y en general nuevas líneas de tratamiento, así como modificación a los tratamientos ya existentes (Ramalho, 1993).

Las normativas ambientales son cada vez más exigentes. La sensibilidad de los límites ambientales se reducen y algunos de estos procesos de tratamiento son insuficientes, ya sea por las altas concentraciones de los contaminantes en el agua, o por la resistencia de algunos compuestos a los procesos de tratamiento (Zaror, 2000).

Chile ha puesto cada vez más énfasis al tratamiento de las aguas residuales, esto debido a que el país avanza a mayores grados de desarrollo. En este sentido, se aplican a la industria y a los centros urbanos en general, sofisticados sistemas de tratamientos que combinan procesos físicos, químicos y biológicos para tratar los efluentes (Hidalgo *et al.*, 2005).

El tratamiento de aguas servidas es de gran importancia, debido a las características que estas poseen en cuanto a su carga orgánica, microorganismos y nutrientes, es por esto que la construcción de PTAS permite recuperar los recursos de agua dulce.

Durante la década de los 90, comenzó en Chile la construcción de PTAS, esto debido a la promulgación de la norma de emisión de residuos líquidos a aguas marinas y continentales superficiales, DS 90/2000 que regula las descargas de efluentes (Baraño y Tapia, 2004). En Chile el sector sanitario urbano está compuesto por 58 empresas entre las que se encuentran ESSBIO y Aguas Andinas, existiendo en el país un total de 265 PTAS que atienden áreas de concesión exclusivas en las 15 regiones, incluyendo a 4,5 millones de clientes y a más de 15 millones de personas, representando un 86,9% de cobertura de tratamiento en zonas urbanas (SISS, 2011). Una realidad totalmente distinta es lo

que se vive en las zonas rurales. En la Región del Biobío el 16,5% de la población vive en zonas rurales (INE, 2002); de esta población solo el 7,6% de los hogares están conectados a alcantarillado utilizándose como sistema de tratamiento lodos activados y lagunas aireadas (SISS, 2011), mientras que 92,4% de los hogares no están conectados a alcantarillado, utilizando como mecanismo de tratamiento y disposición: fosas séptica (54,6%) y letrinas sanitarias (35,6 %) (CASEN, 2009).

Como alternativa a los sistemas convencionales de tratamiento de aguas servidas rurales se han desarrollado una serie de sistemas basados en los mecanismos de depuración existentes en la naturaleza, denominados sistemas de tratamiento naturales (Vymazal, 2007). En los sistemas de tratamiento natural encontramos los humedales construidos que se han convertido, a escala mundial, en una alternativa a los sistemas convencionales de depuración de aguas servidas. Éstos son sistemas pasivos de depuración en los que se imitan los procesos físicos, químicos y biológicos típicos de un humedal natural, pero confinado con alguna lámina impermeable. Constan de una excavación en el terreno, una impermeabilización, un relleno y alguna especie de planta acuática plantada (García y Corzo, 2008).

Los HFHSS construidos son una alternativa para el tratamiento de aguas servidas de pequeñas comunidades, logrando concentraciones de  $\text{DBO}_5$  por debajo de 25 mg/L y eficiencias de eliminación de SST entre el 78-96%, mientras que para NT y PT se encontraron en el rango de 48-66% y 39-58%, respectivamente (Vera *et al.*, 2010). Brix (1999) comparó el consumo energético de los humedales construidos y los sistemas convencionales demostrando que los humedales construidos requieren menos de 0,1 Kw-hr/m<sup>3</sup> en comparación con sistemas de aireación extendida de 2,39 Kw-hr/m<sup>3</sup> (Vymazal and Krofelova, 2008), considerándose sistemas sustentables en zonas rurales principalmente por los bajos consumos de energía que presentan.

Para poder llevar a cabo estos sistemas a escala industrial, es necesario realizar estudios previos, a escala laboratorio y pilotos, que permitan dar conocimiento y entender cómo se comportan estos sistemas bajo las condiciones climáticas de

nuestro país. También resulta importante conocer características hidráulicas, parámetros in-situ, parámetros fisicoquímicos y tipos de vegetación.

La consideración de indicadores de sustentabilidad (ambientales, económicos y sociales), ayuda a comparar los sistemas convencionales utilizados y la planta piloto del tipo HFHSS, ya que estos sistemas operan bajo características similares en la Región del Biobío, permitiendo así identificar tecnologías sustentables para el tratamiento de aguas servidas rurales.

## **2 HIPOTESIS**

Los HFHSS contruidos (etapa de puesta en marcha) son sistemas sustentables que logran disminuir la carga contaminante, convirtiéndose en una alternativa a los sistemas de tratamiento y disposición de las aguas servidas rurales actualmente utilizados en la Región del Biobío.

## **3 OBJETIVOS**

### **3.1 Objetivo general**

Analizar la puesta en marcha de un HFHSS construido para la depuración de aguas servidas rurales, evaluando con indicadores de sustentabilidad la potencialidad de implementación, en comparación con los sistemas convencionales instalados en la Región del Biobío.

### **3.2 Objetivos específicos**

- Analizar los parámetros de operación hidráulicos y comportamiento evolutivo de las celdas de HFHSS, mediante parámetros in-situ y crecimiento de la vegetación, para la etapa inicial de operación.
- Evaluar la eficiencia de eliminación de carga contaminante presente en las aguas servidas rurales, al utilizar como tratamiento un HFHSS, en base a parámetros físico-químicos, para la etapa inicial de operación.
- Valorar a través de indicadores de sustentabilidad la potencialidad de implementación de HFHSS para la depuración de aguas servidas rurales, comparándolo con PTAS instaladas en la Región del Biobío.

## **4 ANTECEDENTES**

### **4.1 Características de aguas servidas**

Las aguas servidas son los residuos líquidos derivados de la actividad doméstica, constituidos principalmente por las aguas generadas por las actividades de lavado (ropa, utensilios, alimentos, personas) y las aguas sanitarias (fecales). La tasa de generación diaria de residuos líquidos domésticos está en el rango 100 - 400 l/hab/d (Zaror, 2000). Según el DS 609/98, se generan unos 160 l/hab/d que llegan como descarga a los sistemas de alcantarillado (SINIA, 2011).

Las aguas servidas presentan una serie de características físicas, químicas y biológicas, además de una serie de contaminantes tales como sólidos en suspensión, materia orgánica biodegradable, patógenos, nutrientes (nitrógeno, fósforo), contaminantes prioritarios, materia orgánica refractaria, metales pesados y sólidos inorgánicos disueltos.

La temperatura puede variar entre 10,0-21,0°C tomándose como valor aproximado 15,6°C (Metcalf & Eddy. 1995.).

Para poder determinar el contenido orgánico existen ensayos de laboratorio entre los que se encuentran: DBO<sub>5</sub>, DQO y carbono orgánico total (COT).

Para aguas domésticas brutas típicas el cociente DBO<sub>5</sub>/DQO se halla entre 0,4 y 0,8 (Metcalf & Eddy. 1995). En la Tabla 1 se muestra la caracterización de las aguas servidas para diferentes tipos de dilución.

**Tabla 1.** Caracterización fisicoquímica de las aguas servidas.

| Parámetros   | Tipos de agua                     |                                  |                                  |                   |
|--|-----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|-------------------|
|  | Concentrada                       | Moderada                         | Diluida                          | Muy diluida       |
| DBO <sub>5</sub> (mg/l)  | 530                               | 380(400)                         | 220(230)                         | 110(150)          |
| DQO(mg/l)  | 740(1.000) <sup>a</sup>           | 500(530)                         | 320                              | 210(250)          |
| NT (g N/m <sup>3</sup> )   | 80                                | 50                               | 30-40                            | 20                |
| NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> (g N/m <sup>3</sup> )               | 50                                | 30                               | 18                               | 12                |
| NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> <sup>b</sup> (g N/m <sup>3</sup> )  | 0(0,5)                            | 0(0,5)                           | 0(0,5)                           | 0(0,5)            |
| PT (g P/m <sup>3</sup> )   | 14(23)                            | 10(16)                           | 6(10)                            | 4(6)              |
| PO <sub>4</sub> <sup>-3</sup> <sup>c</sup> (g P/m <sup>3</sup> ) | 10(14)                            | 7(10)                            | 4(6)                             | 3(4)              |
| Fosfato Orgánico (g P/m <sup>3</sup> )                           | 4(4)                              | 3(3)                             | 2(2)                             | 1(1)              |
| SST (g/m <sup>3</sup> )  | 450                               | 300(350)                         | 190(200)                         | 100(120)          |
| SSV <sup>d</sup> (g/m <sup>3</sup> )                             | 320                               | 210(275)                         | 165(140)                         | 80                |
| Coliformes (N°/100 ml)   | 10 <sup>7</sup> -10 <sup>10</sup> | 10 <sup>7</sup> -10 <sup>9</sup> | 10 <sup>6</sup> -10 <sup>8</sup> | < 10 <sup>6</sup> |
| Grasas (mg/l)  | -                                 | 300                              | 200                              | 50(100)           |

Fuente: Henze *et al.* (2002); Metcalf & Eddy (1995).

<sup>a</sup> Desviación estándar de las concentraciones, <sup>b</sup> Nitrato, <sup>c</sup> Fosfato, <sup>d</sup> Sólidos suspendidos volátiles.

## 4.2 Tratamiento de las aguas servidas en Chile

A nivel nacional, el tratamiento de las aguas servidas es cada vez mas importante (Barañaño y Tapia, 2004), llegando a una cobertura del 83% de la población urbana nacional, existiendo unas 58 empresas que operan servicios sanitarios. Este aumento en la cobertura ha posibilitado paulatinamente la descontaminación de los cursos de aguas superficiales y marítimos (SISS, 2011).

Las principales tecnologías disponibles en Chile son los lodos activados, lagunas aireadas, sistemas de medio fijo y los lombrifiltros. La tecnología de lodos activados es la más común, siendo utilizada en el 61% de las PTAS en sus diferentes variaciones: lodos activados convencionales, aeración extendida, zanjas de oxidación y reactores batch secuenciales (SBR). Dentro de las tecnologías de

lodos activados, la más utilizada es la aeración extendida (62%), seguida de los lodos activados convencionales (20%), las zanjas oxidativas (10%) y los reactores secuenciales batch (8%) (Baraño y Tapia, 2004).

En la Región del Biobío las PTAS alcanzan una cobertura de aproximadamente 1.184.200 habitantes, dirigidas a satisfacer las necesidades de poblaciones urbanas. Se espera que la cobertura sea de 94,3% en Diciembre del 2011 (SISS, 2011). La tecnología más utilizada es la de lodos activados que corresponde a un 72% del total de las PTAS existentes.

Las cargas y caudales de diseño de cada una de las PTAS de la Región del Biobío, se encuentran especificadas en la Tabla 2.

**Tabla 2.** Características de las PTAS de la Región del Biobío, Chile.

| PTAS         | Tecnología  | Área Total<br>(m <sup>2</sup> ) | Población<br>abastecida | Caudal de diseño (l/s) |                | Cargas de diseño (kg/d) |        |                  |       |
|--------------|---|---------------------------------|-------------------------|------------------------|----------------|-------------------------|--------|------------------|-------|
|              |   |                                 |                         | Máximo<br>horario      | Medio<br>anual | DBO <sub>5</sub>        | SST    | NTK <sup>a</sup> | PT    |
| Arauco       | Lodos Activados - Aireación extendida                   | 8.500                           | 15.920                  | 85,8                   | 46,2           | 1.559                   | 1.871  | 359,0            | 94,0  |
| Bulnes       | Lodos Activados - Aireación<br>Extendida-Patente BIOLAK | 10.000                          | 12.057                  | 33,9                   | 17,4           | 730,0                   | 675,0  | 161,0            | 36,0  |
| Cabrero      | Lodos Activados - Aireación extendida                   | 5.200                           | 13.985                  | 66,7                   | 35,7           | 525,0                   | 473,0  | 131,0            | 26,0  |
| Cañete       | Lodos Activados-Aireación extendida                     | 10.243                          | 15.539                  | 74,9                   | 37,4           | 1.300                   | 903,0  | 250,0            | 36,0  |
| Coelemu      | Lodos Activados   | 10.500                          | 8.002                   | 45,6                   | 22,3           | 455,0                   | 455,0  | 114,0            | 23,0  |
| Coihueco     | Lodos Activados-Aireación extendida                     | 10.000                          | 7.561                   | 39,4                   | 21,3           | 471,0                   | 377,0  | 108,0            | 18,0  |
| Concepción   | Lodos Activados - convencional                          | 80.000                          | 566.332                 | 1.648,0                | 1.185          | 27.890                  | 25.101 | 16.136           | 1.116 |
| Contulmo     | Lodos Activados - Aireación extendida                   | -                               | 2.386                   | -                      | -              | 210,0                   | -      | -                | -     |
| Dichato      | Lodos activados - convencional                          | 16.000                          | 2.368                   | 86,5                   | 34,2           | 743,0                   | 743,0  | 185,7            | 37,1  |
| El Carmen    | Lagunas aireadas  | 46.000                          | 4.735                   | 23,2                   | 40,9           | 212,0                   | 159,0  | 64,0             | 10,6  |
| Florida      | Lagunas aireadas  | 45.000                          | 4.042                   | 11,5                   | 27,3           | 201,0                   | 150,0  | 60,0             | 10,0  |
| Hualqui      | Lodos Activados- Aireación extendida                    | 6.000                           | 14.274                  | 61,3                   | 25,6           | 672,0                   | 604,8  | 161,3            | 33,6  |
| Huepil       | Lodos Activados - Aireación extendida                   | -                               | 6.747                   | 38,5                   | 28,5           | 468,0                   | 463,0  | 169,0            | 468,0 |
| Los Álamos   | Lodos Activados   | 11.300                          | 6.414                   | 25,1                   | 55,8           | -                       | -      | -                | -     |
| Los Ángeles  | Lodos Activados - convencional                          | -                               | 126.198                 | 429,0                  | 240,0          | 7.708                   | 6.166  | 1.542            | 308,0 |
| Monte Águila | Lodos Activados- SBR                                    | 5.015                           |                         | 33,2                   | 9,0            | 227                     | 227    | 52,0             | -     |
| Mulchén      | Lodos Activados - Aireación extendida                   | 10.000                          | 19.531                  | 77,4                   | 53,9           | 1.379                   | 1.103  | 276,0            | 58,0  |

Continuación Tabla 2.

| PTAS               | Tecnología                            | Área Total<br>(m <sup>2</sup> ) | Población<br>abastecida | Caudal de diseño (l/s) |                | Cargas de diseño (kg/d) |         |                  |      |
|--------------------|---------------------------------------|---------------------------------|-------------------------|------------------------|----------------|-------------------------|---------|------------------|------|
|                    |                                       |                                 |                         | Máximo<br>horario      | Medio<br>anual | DBO <sub>5</sub>        | SST     | NTK <sup>a</sup> | PT   |
| Nacimiento         | Lodos Activados - Aireación extendida | 9.000                           | 21.966                  | 53,6                   | 76,9           | 1.180                   | 1.180   | 295,0            | 59,0 |
| Negrete            | Laguna facultativa                    | 20.000                          | 4.104                   | 41,6                   | 28,3           | 272,0                   | 272,0   | 122,0            | 16,0 |
| Pinto              | Lodos Activados                       | 10.000                          | 4.079                   | 22,8                   | 10,7           | 215,0                   | 155,0   | 56,0             | 11,0 |
| Quilaco            | Lodos Activados - Aireación extendida | 1.100                           | 1.558                   | 4,1                    | 2,5            | 42,0                    | 40,0    | 10,5             | 1,6  |
| Quilleco           | Lodos Activados - Aireación extendida |                                 | 1.767                   | 12,0                   | 4,5            | 73,8                    | 74,0    | 16,8             | 4,2  |
| San Carlos         | Lodos Activados                       | 16.000                          | 31.012                  | 119,9                  | 69,7           | 1.752                   | 1.752,0 | 385,0            | 77,0 |
| San Rosendo y Laja | Lodos Activados- SBR                  | 5.000                           | 19.561                  | -                      | 117,5          | 58,0                    | 828,0   | 189,0            | -    |
| Santa Bárbara      | Lodos Activados - Aireación extendida | 15.000                          | 7.743                   | 58,1                   | 25,6           | 533,0                   | 409,0   | 182,0            | 27,0 |
| Santa Juana        | Lodos Activados - Aireación extendida | 5.000                           | 7.554                   | 43,6                   | 23,0           | 376,0                   | -       | -                | -    |
| Yumbel             | Lodos Activados - Aireación extendida | 11.054                          | 12.719                  | 42,1                   | 25,6           | 658,0                   | 526,0   | 145,0            | 26,0 |
| Yungay             | Lodos Activado - Aireación extendida  | -                               | 8.021                   | 70,2                   | 25,9           | 711,2                   | 711,0   | -                | -    |

Fuente: SISS (2011); ESSBIO (2010); SEIA (2011). <sup>a</sup> Nitrógeno total Kjeldahl.

Las PTAS de Chillán, Cobquecura, Curanilahue, Ninhue, Ñipas, Pemuco, Quillón, Quirihue, San Ignacio, Santa Clara y Parque Industrial Coronel no hay datos disponibles.

### **4.3 Aguas servidas en sectores rurales**

Sector Rural, se considera al asentamiento humano concentrado o disperso que posee 1.000 o menos habitantes, o entre, 1.001 y 2.000 habitantes con menos del 50% de su población económicamente activa dedicada a actividades secundarias y/o terciarias (INE, 2002). El porcentaje de población que vive en zonas urbanas, según el censo 2002 es de 86,6%. En tanto que, en las zonas rurales, vive el 13,4% de la población total (INE, 2002).

Para el saneamiento de sectores rurales, el gobierno de Chile posee el Programa de Saneamiento Rural que tiene como objetivo específico, reducir el déficit de cobertura de servicios de abastecimiento de agua potable y disposición adecuada de aguas servidas con soluciones costo eficientes y sustentables.

Este Programa incluye: la construcción de proyectos de provisión de agua potable y saneamiento rural; reparación, rehabilitación y reemplazo de las PTAS existentes, y actividades para apoyar la ejecución y la participación de la comunidad. Con el propósito de asegurar la sustentabilidad de los proyectos, todos estos puntos están especificados en la resolución exenta N° 518 del Ministerio Del Interior, que aprueba la guía operativa del Programa de Saneamiento Rural (SUBDERE, 2009).

Las concesionarias de servicios sanitarios pueden entregar asesoría a los sistemas rurales, como una actividad relacionada y no obligatoria. Adicionalmente, las concesionarias pueden, en virtud del artículo 52 bis del Decreto con Fuerza de Ley (DFL) del Ministerio de Obras Públicas (MOP) N°382/88, establecer, construir, mantener y explotar sistemas de agua potable, alcantarillado y tratamiento de aguas servidas en el ámbito rural, bajo la condición de no afectar o comprometer la calidad y continuidad de los servicios públicos sanitarios que son de su responsabilidad (SISS, 2011).

El obstáculo que se presenta el brindar un tratamiento adecuado a las aguas servidas rurales reside en el costo económico que representa un sistema de alcantarillado que incluya red de colectores, PTAS y disposición final, con un valor

cercano a 2 millones de pesos por vivienda. Este valor referencial, puede variar dependiendo de las condiciones de cada caso y complejidad tecnológica asociada (Cárcamo, 2007).

Las intervenciones que realiza el Gobierno de Chile en saneamiento rural (alcantarillado y tratamiento de aguas servidas) son desarrolladas por el Programa de Mejoramiento de Barrios de la Subsecretaría de Desarrollo Regional (SUBDERE); el Ministerio de Vivienda y Urbanismos (MINVU), a través del finalizado programa Chile Barrio y la política de viviendas sociales; y el Ministerio de Planificación por medio del Fondo de Inversión Social (FOSIS). Estas instituciones han impulsado el equipamiento en agua potable, alcantarillado y tratamiento de aguas servidas. Los municipios también han desarrollado algunas iniciativas de infraestructura, financiadas por medio del Sistema Nacional de Inversiones, para procurar abastecimiento de servicios sanitarios básicos a las localidades rurales (Fuenzalida, 2011). En efecto, ninguna institución del Estado tiene dentro de sus funciones normadas por ley la competencia en el tema de los Servicios Sanitarios del sector rural. La Superintendencia de Servicios Sanitarios (SISS) sólo tiene competencia para regular el sector urbano, quedando actualmente inhabilitada en todo el territorio rural (Gentes y Yáñez, 2006).

Según la encuesta de Caracterización Socioeconómico Nacional 2009 (CASEN) en la Región del Biobío el 7,6% de hogares rurales está conectado al alcantarillado, el 54,6% posee fosa séptica, el 8,2% posee letrina sanitaria conectada a pozo negro, el 27,3% tiene cajón sobre pozo negro, el 0,1% cajón conectado a otro sistema, mientras que 2,2% no dispone de sistemas eliminación de excretas, por lo que más del 37% de los hogares rurales no posee tratamiento de sus aguas servidas (CASEN, 2009).

Los sectores rurales poseen diferentes formas de tratamiento o disposición de sus aguas servidas, diferenciándose en que aquellas localidades que están conectadas al alcantarillado cuyas aguas servidas son tratadas en PTAS, mientras que aquellos que no poseen alcantarillado utilizan otros sistemas de tratamiento y/o disposición.

### 4.3.1 Tecnologías utilizadas en PTAS rurales

En la Región del Bio Bio, las PTAS que prestan servicios a poblaciones rurales son aquellas situadas en las localidades de: Cobquecura abasteciendo una población de 969 habitantes, Ninhue a 1.291 habitantes, Ñipas a 1.075 habitantes, Pinto a 14 habitantes, Quilaco a 1.558 habitantes, Quilleco a 1.767 habitantes y Santa Clara a 1658. En estas PTAS, las tecnologías utilizadas corresponden a lodos activados y lagunas aireadas las que se definen a continuación (ESSBIO, 2010).

- *Lodos Activados*: Los sistemas de lodos activados son un tratamiento biológico de cultivo suspendido, donde el agua servida se estabiliza biológicamente en un reactor bajo condiciones aeróbicas. Durante el crecimiento y mezcla los organismos flocculan formando una masa activa denominada lodos o biomasa (Di Marzio, 2004). El ambiente aeróbico se logra mediante el uso de aireación por medio de difusores o sistemas mecánicos. De forma directa se obtiene una reducción de DBO<sub>5</sub>, DQO, NT, PT, SST y Sólidos Sedimentables, mientras que indirectamente se regula el pH, temperatura y en algunos casos además remueve coliformes fecales, color e índice de fenol. Las eficiencias de eliminación son de 80-95% de DBO<sub>5</sub>, 80 - 85% de DQO, 80 - 90% de los SST, y entre un 10 - 25% de NT y PT (Metcalf & Eddy, 1995).

Entre las ventajas que presenta este tratamiento se encuentran: a) flexibilidad de operación a través de un control racional de la biomasa presente en el proceso; b) minimización de olores y ausencia de insectos; c) puede incorporar desnitrificación al proceso; d) posibilidades de regular energía consumida para variaciones de carga orgánica; e) generación de lodos secundarios que pueden ser aprovechados como fertilizantes; f) mejoradores de suelo y g) obtención de biogás, entre otras. Entre las desventajas se encuentran: requiere mayor sofisticación y mantenimiento,

dependencia con la temperatura del efluente a tratar y condiciones de entrada como pH y presencia de compuestos tóxicos; requieren de un control permanente, tanto operativo como de análisis de laboratorio; altos costos de operación, asociados fundamentalmente a los requerimientos de oxígeno que se refleja en gastos de energía superiores a 889.000 Kw-hr/año (Crites *et al.*, 2006); bajo abatimiento bacteriológico logrando en general abatir no más allá de un ciclo logarítmico en términos de coliformes fecales, con la consecuente necesidad de efectuar desinfección final al efluente. Se recomienda su uso para el tratamiento de aguas servidas para poblaciones superiores a 15.000 habitantes (Fundación Chile, 2011).

- *Lagunas aireadas:* Las lagunas aireadas constituyen un proceso de tratamiento biológico simple. Contemplan el uso de componentes unitarias similares a otros sistemas convencionales e incorporan elementos mecanizados para la transferencia de oxígeno. La tecnología de lagunas aireadas corresponde al proceso de transición entre los sistemas naturales y convencionales, ya que operan con oxigenación mecánica, pero su infraestructura es simple del tipo piscinas impermeabilizadas. La aireación generalmente es entregada por equipos de aireación superficial, opera en flujo continuo, sin recirculación de lodos. No utiliza sedimentación primaria, puede o no utilizar laguna de sedimentación secundaria. El efluente generalmente se somete a clarificación en lagunas de sedimentación (Sánchez, 2005). Existen al menos tres tipos de lagunas aireadas: Laguna aireada a mezcla completa, laguna aireada multicelular y laguna aireada facultativa. Alcanzando eficiencias de eliminación de un 90% para DBO<sub>5</sub>, hasta 95% de SST, 50 - 75% de NT y eliminación de bacterias, parásitos y virus, si los tiempos de retención son mayores a 20 días (Fundación Chile, 2011). Su uso se recomienda para tratamiento de aguas servidas en poblaciones superiores a 2.000 habitantes (García, 2009).

#### 4.3.2 Tratamiento y disposición de aguas servidas de localidades rurales

Aquellos hogares que no están conectados al alcantarillado están regulados por el DS 236/26, Reglamento General de Alcantarillados Particulares, Destinado a regular el tratamiento y disposición de aguas servidas en lugares poblados en que no exista una red de alcantarillado público, y en general todo edificio público o particular, urbano o rural, destinado o destinable a la habitación, que no puedan descargar sus aguas servidas en alguna red de alcantarillado existente. Esta norma exige que: *“toda construcción se dote de un alcantarillado particular o cualquier otro sistema de disposición, ya sea de carácter individual o colectivo para disponer de las aguas servidas, en algún cuerpo o curso de agua, o incorporarlo al suelo”*. Este tratamiento puede efectuarse por medio de fosas sépticas aparejadas a cámara filtrantes o a cámara de contacto simple, doble o múltiple acción (MINSAL, 2010).

La solución entregada para la disposición de las aguas servidas, deja obligados a los habitantes de viviendas rurales a recurrir a la solución particular que aparece en el DS 236/26, es decir la fosa séptica, lo que en la actualidad no se cumple (Berland, 2005).

A continuación se describen los métodos de tratamiento y disposición de aguas servidas que se utilizan en zonas rurales.

- *Fosa séptica*: La fosa séptica es uno de los más útiles y satisfactorios procedimientos hidráulicos de evacuación de aguas servidas de zonas rurales donde no llegan los sistemas de alcantarillado. Este sistema consiste en un depósito de sedimentación cubierto, en el que la alcantarilla de la vivienda o edificio vierte directamente las aguas servidas (Castro y Pérez, 2009).

Según el DS 239/26, fosa séptica se entiende como *“cámara estancada capaz de retener por un período determinado de tiempo, las aguas servidas; producir su decantación; disolver, licuar y volatizar parcialmente,*

*por un proceso de fermentación biológica, la materia orgánica contenida en suspensión, y dejar las aguas servidas en condiciones favorables para ser sometidas a algún proceso de oxidación”* (MINSAL, 2010). La reducción promedio de DBO<sub>5</sub> y SST están dentro de los rangos del 30-50% y del 50-70% respectivamente, con concentración promedio en el efluente de DBO<sub>5</sub> para tanques sépticos de dos compartimentos entre 93-166 mg/l, mientras que para un tanque es de 160-278 mg/l (Mendez *et al.*, 2007).

- *Letrina sanitaria:* El uso de letrinas sanitarias conectadas a un pozo negro, es uno de los mecanismos usados para la disposición de aguas servidas rurales. Según el DS 239/26, éstas consisten en una “*fosa cubierta, convenientemente ventilada, excavada en el terreno natural, de más de 2 m de altura útil, por 1 m<sup>2</sup> de superficie mínima por asiento*” ( MINSAL, 2010), esta destinada a recibir directamente las aguas servidas a través de un tubo de arcilla vidriada, de cemento comprimido afinado interiormente con cemento puro, o de fierro fundido, de no menos de 40 cm de diámetro, sobre el cual se coloca un cajón de asiento de no más de 50 cm de altura, provisto de tapa de cierre automático a prueba de insectos. Deben ser instaladas en zonas libres de inundación, manteniéndose a una distancia mínima de 15 m de las fuentes de agua ya sea pozo, puntera para extracción de agua, manantial u otra fuente destinada o destinable al suministro de agua para consumo u otro uso.

#### 4.4 Tecnologías naturales para el tratamiento de aguas servidas rurales

Las tecnologías naturales para el tratamiento de aguas servidas se han venido utilizando de forma creciente gracias a sus características de construcción y funcionamiento. Su coste de inversión suele ser competitivo, requieren de poco personal (con poca capacitación) sin requerimientos de tiempo completo (Kadlec and Wallace, 2009). Además, presenta consumos de energía de aproximadamente  $0,1 \text{ Kw-hr/m}^3$ , y no generan grandes cantidades de lodos de forma continuada (Vymazal and Kröpfelová, 2008a), ya que los lodos generados se relacionan con tratamientos primarios efectuados previamente los cuales tienen una eficiencia en la eliminación sólidos (lodo) entre un 4-12% (Metcalf & Eddy, 1995).

Entre las tecnologías naturales para tratar aguas servidas en zonas rurales, están los humedales construidos que además de tratar las aguas ofrecen beneficios ambientales agregados tales como: mejorar la calidad ambiental, restaurar nichos ecológicos, mejoramiento paisajístico y zonas de amortiguamiento, que resultan particularmente atractivas, en estos casos de aplicación (Arias y Brix, 2003).

Los humedales construidos son sistemas pasivos de depuración constituidos por lagunas o canales poco profundos (normalmente de menos de 1 m) plantados con plantas propias de zonas húmedas (macrófitos acuáticos) y en los que los procesos de descontaminación son ejecutados simultáneamente por componentes físicos, químicos y biológicos (García *et al.*, 2004).

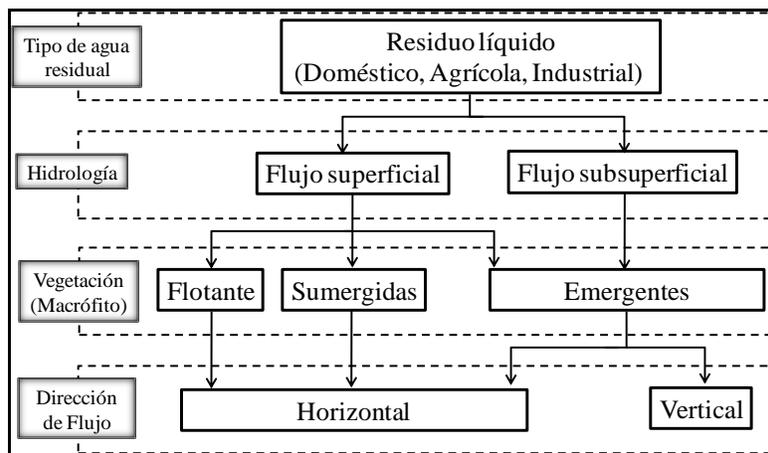
Poseen las siguientes características:

- No requieren aporte extra de reactivos químicos.
- En lo que respecta a su funcionamiento como tratamiento biológico, se opera en condiciones anaerobias, facultativas y/o aerobias en las que el oxígeno se aporta de forma espontánea por transporte desde la atmósfera.

- Se requieren extensión de terreno de aproximadamente 5 m<sup>2</sup> por persona equivalente (PE) (Vera *et al.*, 2010). Representando superficies entre 20 y 80 veces superior a tecnologías convencionales (García *et al.*, 2004).

Los primeros experimentos en los que se ocupan humedales para el tratamiento de aguas residuales se llevaron a cabo en Alemania en 1950. Desde entonces, los humedales se han convertido en una tecnología de tratamiento de aguas confiable para los distintos tipos de aguas residuales (Vymazal, 2010).

Como se aprecia en la Figura 1 los humedales construidos pueden clasificarse según el régimen hídrico, pudiendo distinguir dos tipos de sistemas: 1) Humedal construido de flujo horizontal superficial (HFHS) y 2) Humedal construido de flujo subsuperficial (HFSS), dentro del cual se pueden encontrar HFHSS y HFVSS. Además, pueden existir combinaciones entre estos para formar sistemas híbridos. Así mismo pueden diferenciarse según el tipo de vegetación (emergentes, sumergidas, flotantes hojas, de libre flotación) (Plaza de los Reyes *et al.*, 2011).



**Figura 1.** Clasificación de humedales construidos (Plaza de los Reyes *et al.*, 2011).

En la Tabla 3 se presentan las características tanto físicas e hidráulicas de los diferentes tipos de humedales construidos que se utilizan para el tratamiento de las aguas. En las características hidráulicas se encuentran las cargas hidráulicas (CH) (profundidad del agua distribuida a través de la superficie del humedal en un periodo de tiempo determinado), siendo éste un factor a tener en cuenta para la eliminación de la DQO, DBO<sub>5</sub> y PT. En HFHSS las CH pueden variar entre 20 - 45 mm/d, lográndose mayor eficiencia con cargas de 45 mm/d, mientras que los tiempos de retención hidráulico (TRH) varían entre 2,0-10,0 d (García *et al.*, 2004; García *et al.*, 2005).

**Tabla 3.** Características físicas e hidráulicas de los humedales construidos.

| Tipo de humedal | Características físicas           |                                      | Características Hidráulicas |                        | Referencias           |
|-----------------|-----------------------------------|--------------------------------------|-----------------------------|------------------------|-----------------------|
|                 | Profundidad (m)                   | Áreas unitarias (m <sup>2</sup> /PE) | TRH (d)                     | CH (mm/d)              |                       |
| HFHS            | 0,2 – >1,2<br>(-0,6) <sup>a</sup> | 5,0 – 20,0                           | 0,1 – 15,0                  | 12 – 160               | [6, 8, 9]             |
| HFHSS           | 0,3 – 1,0<br>(0,5)                | 2,5 – 10,0<br>(0,5)                  | 2,0 – 10,0<br>(>5,0)        | 23 – 138<br>(40)       | [1, 2, 3, 4, 6, 8, 9] |
| HFVSS           | 0,8 – 1,0<br>(0,9)                | 0,9 – 5,5<br>(2,0 – 3,0)             | 1,0-2,0                     | 27 – 1500<br>(35 - 38) | [5, 6, 8, 9]          |

Fuente: 1. Curia *et al.* (2010); 2. Vymazal (2005); 3. Vymazal (2010); 4. García *et al.* (2004a); 5. Zhao *et al.* (2010); 6. Vymazal and Kröpfelová (2008b); 7. Vymazal and Kröpfelová (2009); 8. Arias y Brix (2003); 9. Plaza de los Reyes *et al.* (2011). <sup>a</sup> Valor más común.

Para poder decidir el humedal más apropiado, se debe tener en cuenta las características del influente y la calidad del efluente que se desea obtener, ya que las eficiencias de eliminación de los diferentes parámetros están directamente relacionadas con el tipo de humedal. Las características del influente, y las eficiencias para cada tipo de humedal se encuentran especificadas en la Tabla 4.

**Tabla 4.** Caracterización y eliminación de contaminantes en humedales construidos.

| Tipo de humedal | Parámetros                   | Influyente (mg/l) | Efluente (mg/l) | Eficiencia (%) | Referencias     |
|-----------------|------------------------------|-------------------|-----------------|----------------|-----------------|
| HFHS            | DBO <sub>5</sub>             | 3,6 - 300,0       | 0,7 - 20,0      | 4,6 - 84,0     | [6, 9, 10]      |
|                 | DQO                          | 758,0             | 142,0           | 92,0           |                 |
|                 | NT                           | 1,7 - 49,0        | 0,9 - 27,3      | 20,0 - 60,0    |                 |
|                 | NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> | ---               | ---             | 84,0 - 88,0    |                 |
|                 | PT                           | 0,3 - 14,9        | 0,1 - 12,0      | 60,0           |                 |
|                 | SST                          | 5,0 - 274,0       | 0,3 - 81,0      | 93,2           |                 |
| HFHSS           | DBO <sub>5</sub>             | 19,5 - 373,0      | ---             | 60,7 - 97,0    | [1, 2, 3, 4, 6] |
|                 | DQO                          | 260,0 - 580,0     | 26,1 - 98,0     | 70,0 - 97,0    |                 |
|                 | NT                           | 53,0 - 85,0       | <10,0 - 126,0   | 30,0 - 75,0    |                 |
|                 | NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> | 59,0 - 61,0       | 47,0 - 51,0     | 14,0 - 25,0    |                 |
|                 | PT                           | 0,6 - 17,0        | 0,6 - 6,4       | 10,0 - 40,9    |                 |
|                 | SST                          | 113,0 - 310,0     | 2,0 - 22,3      | 68,1 - 99,0    |                 |
| HFVSS           | DBO <sub>5</sub>             | 309,0             | 21,0            | 87,9           | [5, 6, 8]       |
|                 | DQO                          | 547,0             | 78,6            | 73,0-93,0      |                 |
|                 | NT                           | 70,0              | 10,0 - 16,0     | 44,0 - 90,0    |                 |
|                 | NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> | 56,4              | 10,6            | 78,0           |                 |
|                 | PT                           | 10,5              | 8,2             | 10,0 - 48,3    |                 |
|                 | SST                          | 188,0             | 18,0            | 77,1           |                 |

Fuente: 1. Curia *et al.* (2010); 2. Vymazal (2005); 3. Vymazal (2009); 4. García *et al.* (2004a); 5. Zhao *et al.* (2010); 6. Vymazal and Kröpfelová (2008a); 7. Vymazal and Kröpfelová (2009); 8. Cooper (2005); 9. Weedon (2003); 10. Akratos *et al.* (2007).

En los HFHS el agua está expuesta directamente a la atmósfera y circula preferentemente a través de los tallos y hojas de las plantas. Estos tipos de humedales se pueden entender como una modificación del lagunaje natural con lámina de agua y plantas. Se suelen aplicar para mejorar la calidad de efluentes que ya han sido previamente tratados. Se recomienda que las zonas plantadas no tengan profundidades totales superiores a los 0,75 m, mientras las zonas determinadas a presentar espejos de agua, se recomiendan con profundidades

superiores a los 1,20 m. Inicialmente, una capa de suelo de 0,20 a 0,30 m es utilizada como zona de enraizamiento (Vymazal and Kröpfelová, 2008a). Sobre esta capa de suelo, sigue la profundidad de lámina de agua variable de acuerdo a la zona deseada. Es importante tener en cuenta, que la vegetación emergente raramente tolera profundidades de agua superiores a los 0,60 m (Kadlec and wallace, 2009). Debe esperarse que este tipo de vegetación pueda cubrir más del 50% del área total del humedal (Vymazal and Kröpfelová, 2008a).

Los humedales construidos se pueden combinar para lograr mayores efectos en el tratamiento de aguas residuales, sobre todo en la eliminación de nitrógeno, estos son llamados sistemas híbridos (Vymazal, 2007). Los sistemas híbridos más utilizados son los HFHSS y HFVSS. Por lo tanto, los tipos de construcción de humedales pueden ser como sistemas HFVSS - HFHSS o HFHSS - HFVSS. La combinación de humedales HFHSS - HFVSS puede lograr una mejor eliminación de nitrógeno del amonio ( $\text{NH}_4^+\text{-N}$ ) logrando eliminación de esta un 99% (Vymazal, 2005).

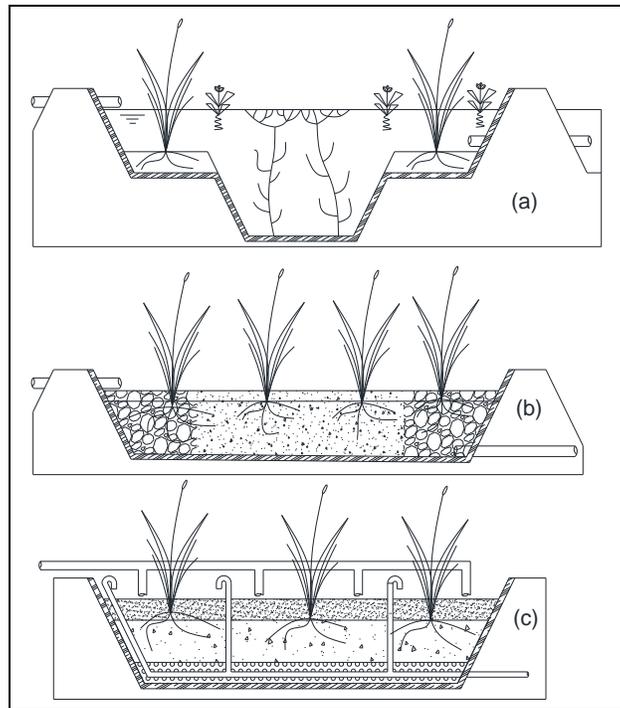
#### 4.5 Humedales de flujo subsuperficial

En los HFSS la circulación del agua es de tipo subterráneo, a través de un medio granular y en contacto con las raíces y rizomas de las plantas. La profundidad de la lámina de agua suele ser entre 0,3 y 0,9 m (García y Corzo, 2008). La biopelícula que crece adherida al medio granular, raíces y rizomas de las plantas a presentando un papel fundamental en los procesos de descontaminación del agua.

La terminología utilizada para designar a los HFSS es particularmente confusa, frecuentemente se utilizan términos como filtros de plantas, filtros verdes, biofiltros, lechos de plantas y lechos de juncos, entre otros.

Las principales diferencias de los HFSS respecto a los HFHS son: mayor capacidad de tratamiento (carga orgánica  $< 4-6 \text{ g DBO}_5 / \text{m}^2 \cdot \text{d}$  (Vymazal and Kröpfelová, 2008a), y menor utilidad para proyectos de restauración ambiental debido a la falta de lámina de agua accesible (García y Corzo, 2008). Entre las ventajas de este tipo de humedales esta la menor incidencia de olores, bajo riesgo de exposición directa de las personas y reduce la posible estratificación térmica. Entre los inconvenientes encontramos el alto costo de construcción debido principalmente a los costos asociados a la grava, representan aproximadamente el 50% de los costos totales (Vymazal and Kröpfelová, 2008a) y poseen además un menor valor como ecosistema (García *et al.*, 2004).

Como se aprecia en la Figura 2 (b) y (c), los HFSS pueden tener diferente tipo flujo pudiendo ser horizontal o vertical. En los de flujo vertical, Figura 2 (c) el agua servida se aplica de manera uniforme en la parte superior de una celda en forma de riego, percolando de forma vertical a través de la misma, y recolectada mediante tuberías tendidas en el fondo y paralelas al eje longitudinal. La profundidad media suele variar entre 0,8 y 1,0 m (Plaza de los reyes *et al.*, 2011).



**Figura 2.** Corte de los diferentes tipos de humedales construidos: (a) HFHS; (b) HFHSS; (c) HFVSS (Plaza de los Reyes *et al.*, 2011).

#### 4.5.1 Humedales de flujo horizontal subsuperficial

En estos sistemas el agua servida, fluye lentamente a través de un medio poroso bajo la superficie de la celda, de forma horizontal, hasta ser recogida en la zona de salida, y descargada por una estructura reguladora de nivel. La profundidad puede variar entre 0,3 y 1,0 m, aunque un valor de 0,5 m resulta más común. Como material granular permeable suele emplearse desde arena gruesa ( $D_{10} = 2 \text{ mm}$ ) hasta grava gruesa ( $D_{10} = 128 \text{ mm}$ ), siendo empleados los tamaños mayores para una mejor distribución en las zonas de entrada y salida (Plaza de los Reyes *et al.*, 2011).

Uno de los puntos más discutidos sobre el funcionamiento de estos sistemas ha sido su eficiencia a largo plazo. Estudios realizados en Cataluña (España) para evaluar el desempeño de humedales construidos como alternativa de tratamiento para pequeñas comunidades (>8 años de funcionamiento), indican un rendimiento

para la DBO<sub>5</sub> y SST entre el 78-96%, para NT y PT eficiencia entre 48-66% y 39-58%, respectivamente, por lo que pueden considerarse una alternativa para el tratamiento de aguas servidas de pequeñas localidades (Vera *et al.*, 2010).

Existe una serie de características y factores importantes de considerar al momento de operar HFHSS, tales como puesta en marcha, tipo de vegetación, aparición de clogging y mecanismos de remoción de la carga contaminante, factores que son especificados a continuación:

#### **4.5.2 Puesta en marcha de HFHSS**

La puesta en marcha es importante si se quieren obtener buenos resultados, se debe enfocar en factores que son importantes para la eficiencia del tratamiento, tales como el crecimiento de las plantas, densidad de la plantación, cantidad de plantas vivas (Kadlec y Wallace, 2009). La plantación se recomienda que sea antes de la llegada de la primavera, si durante el inicio de la primavera no hay brotes se debe realizar la replantación.

La puesta en marcha puede demorar en los mejores de los casos 2 años y en el peor de ellos, de 3 a 4 años (Reed *et al.*, 2010). El óptimo de eficiencia se alcanza cuando la vegetación está completamente desarrollada, dependiendo esto último de la densidad de plantación y la estación.

En esta etapa se debe inspeccionar el crecimiento y el estado de las plantas, además del adecuado funcionamiento hidráulico. Este seguimiento proporciona datos para mejorar la eficiencia del tratamiento e identificar problemas operacionales (García y Corzo, 2008).

Para poder evaluar la eficiencia del humedal se evalúan las cargas hidráulicas, volúmenes y variaciones en la calidad del agua en entrada y salida. La efectividad de eliminación de contaminantes se determina mediante la diferencia entre la carga a la entrada y a la salida (Lara, 1999).

### 4.5.3 Vegetación

La vegetación utilizada en HFSS debe tener ciertas características, tales como ser tolerantes a una alta carga orgánica y de nutrientes, contar con una abundante cantidad de raíces y rizomas con el fin de proveer sustrato para bacterias adheridas y oxigenación, aunque muy limitada, por ejemplo la tasa de liberación de oxígeno de las raíces de *Phragmites australis* es de hasta 4,3 gO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>·d (Vymazal and Kröpfelová, 2008a), además deben poseer una biomasa aérea para el aislamiento en invierno en regiones frías y templadas, y una eliminación de nutrientes a través de la cosecha la cual no supera el 20% (Kadlec and Wallace, 2009).

Las especies utilizadas son macrófitos emergentes típicos de las zonas húmedas como el carrizo (*Phragmites*), la espadaña (*Typha*) o los juncos (*Scirpus*). En Europa la planta más utilizada es el carrizo, con densidades de plantación de 3 ejemplares por m<sup>2</sup> (García y Corzo, 2008).

La planta *Phragmites australis*, ha sido la más utilizada para el tratamiento de aguas servidas en HFSS (Vymazal, 2011). Esta planta es una hierba perenne de inundaciones y tolerante a las aguas servidas, con un extenso sistema de rizomas, que generalmente penetra a profundidades de alrededor de 0,6 a 1,0 m, con temperatura deseable para su crecimiento entre 13-23°C y la temperatura para la germinación de sus semillas van desde 10-30°C (Lara, 1999). Esta especie se considera exótica e invasora en Norteamérica.

El porcentaje de eliminación de DBO<sub>5</sub>, DQO y SST en HFSS plantados con *Phragmites australis* para el tratamiento de aguas servidas son de 60-88%, 70-90% y 88%, respectivamente y las concentraciones en el efluente de DBO<sub>5</sub>, DQO y SST son de aproximadamente 16,5 mg/l, 78,3 mg/l y 19,2 mg/l, mientras que la eliminación de NT y PT son de aproximadamente 45% y 40% (Vymazal, 2007). Lo que respecta a la eliminación del nitrógeno del NH<sub>4</sub><sup>+</sup> van desde 5,6-30 mg N/l (García *et al.*, 2005).

Otra planta usada con menos frecuencia en este tipo de humedales es la *Scirpus californicus*, con nombre común totora (Vymazal, 2011). Esta es una hierba helófito que puede superar los 2 m de altura y que posee un robusto rizoma del cual nacen culmos aéreos que sólo viven una temporada (Hauenstein *et al.*, 2002). Esta especie está dentro de las más habituales que se puede encontrar en los humedales en la zona central de Chile (Figueroa *et al.*, 2009).

Se ha encontrado que en HFHSS plantados con *Scirpus* las concentraciones en el efluente para DBO<sub>5</sub> son de 18 mg/l con eficiencias de 85%, y concentraciones de SST de 4mg/l (Vymazal and Kröpfelová, 2008a).

#### **4.5.4 Clogging**

El clogging es la colmatación que produce una obstrucción gradual del medio poroso impidiendo la correcta circulación del agua. Esto ocurre en HFSS, presentando este problema durante la operación y mantención, si no se aborda en una etapa temprana, puede conducir a una falla hidráulica (Samsó *et al.*, 2011). La obstrucción avanzada puede llegar a requerir la remediación del medio poroso; lo que limita la vida útil del sistema.

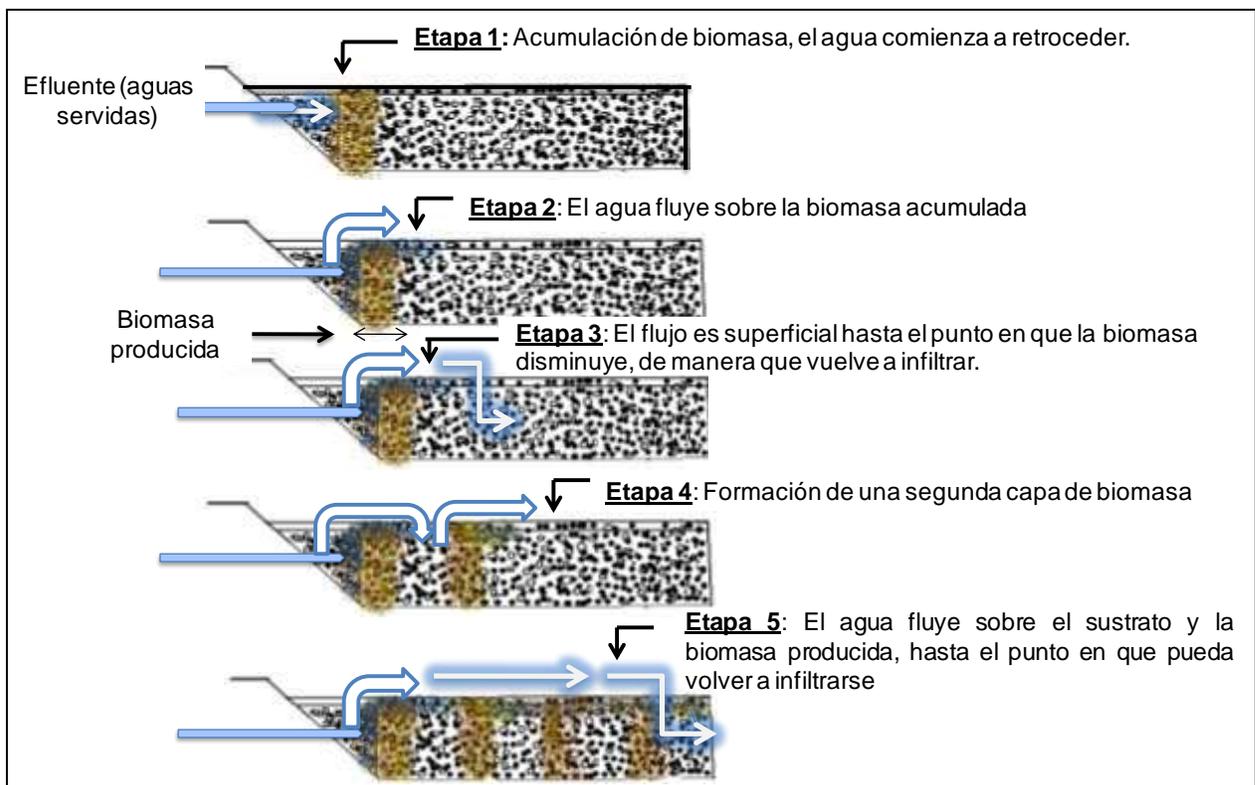
La aparición del clogging depende de varios factores tales como los parámetros de funcionamiento, características de las aguas a tratar, tratamiento de los procesos anteriores, forma de operación ya sea intermitente o continua, la forma de distribuirse el efluente, el tipo de medio granular, diseño de la entrada del sistema, tubería de salida, estimación inexacta de la disminución de la conductividad hidráulica. La obstrucción se produce debido al crecimiento de las raíces de las plantas, la acumulación de sólidos y la formación de biomasa microbiana (fangos y sedimentos) (Knowles *et al.*, 2011). La aparición de este fenómeno se puede prevenir mediante la eficiente eliminación de los sólidos en suspensión con unidades de pre-tratamiento o tratamientos primarios y con la selección de materiales gruesos que son utilizados como medio filtrante (Vymazal, 2011; Samsó *et al.*, 2011). Generalmente, los tratamientos primarios suelen tener eficiencias de eliminación de sólidos en suspensión entre un 50 a 70% (Metcalf &

Eddy, 1995). Con la implementación de pre-tratamiento (fosa séptica) se puede llegar a obtener eficiencias de hasta un 99% de SST. En HFHSS, los tanques Imhoff y las fosas sépticas son los tratamientos primarios comúnmente empleados (Pedescoll *et al.*, 2011).

Al evaluarse la acumulación de sólidos, se encontró que es mayor en humedales plantados que sin plantar, esto se debe principalmente a la acumulación en las raíces representando el 35-50% de los sólidos totales. Al analizar la porosidad de drenaje se encontró una reducción de un 30% (Pedescoll *et al.*, 2011).

Estudios concluyen que el mayor desarrollo de la biopelícula se produce en la región de entrada, donde la concentración de materia orgánica es mayor, además se ha encontrado que se reduce la conductividad hidráulica del medio granular de la entrada al 64% de la conductividad hidráulica de salida debido a la pérdida del volumen de poros (García *et al.*, 2007). Además disminuye el TRH de diseño necesario para mantener las eficiencias de eliminación de contaminantes.

En la Figura 3 se puede apreciar las diferentes etapas del clogging desde sus inicios hasta que se produce la colmatación total.



**Figura 3.** Etapas de clogging en HFHSS (Adaptado de Vymazal and Kröpfelová, 2008a).

#### 4.5.5 Mecanismos de eliminación de contaminantes

- *Materia orgánica:* La materia orgánica particulada es retenida por filtración cerca de la entrada. Esta fracción particulada, por fragmentación abiótica, se convierte en partículas más pequeñas que pueden ser hidrolizadas por enzimas extracelulares (García y Corzo, 2008). Las enzimas son excretadas por bacterias heterótrofas aeróbicas y fermentativas facultativas. El resultado de la hidrólisis es la formación de sustratos sencillos (glucosa o aminoácidos) que pueden ser asimilados por las bacterias heterótrofas aeróbicas o fermentativas facultativas. Los ácidos a su vez pueden ser asimilados por bacterias sulfato reductoras, metanogénicas y también, por supuesto, por las heterótrofas aeróbicas (Vymazal and Kröpfelová, 2008a). La degradación de la materia orgánica por vía aeróbica en los HFHSS sucede cerca de la superficie del agua (en los primeros 0,05 m de

profundidad) y en las zonas cercanas a las raíces. El oxígeno liberado por las raíces no es suficiente para degradar completamente de forma aeróbica la materia orgánica (Bécares, 2004).

Estimaciones realizadas a través de balances de masa y emisiones de gases indican que la degradación aeróbica es una vía poco importante con respecto a vías anaeróbicas en HFHSS (García *et al.*, 2004). En el lecho las bacterias fermentativas facultativas crecen originando ácidos grasos como el acético y el láctico, alcoholes como el etanol y gases como el H<sub>2</sub>. Estos compuestos representan substratos para las bacterias sulfato reductoras y metanogénicas, todas ellas anaeróbicas (Vymazal *et al.*, 1998).

- *Sólidos suspendidos:* Los principales procesos responsables de la eliminación de sólidos en suspensión son la sedimentación y filtración. En todos los tipos de humedales construidos la mayoría de los sólidos se filtran, principalmente en los primeros metros cercanos a la zona de entrada, en general en 1/4 - 1/3 de la longitud total del sistema (Vymazal and Kröpfelová, 2008a). La acumulación de sólidos en suspensión atrapados es una gran amenaza para el buen desempeño de algunos sistemas, especialmente aquellos con HFSS, lo que puede generar la obstrucción con sólidos en suspensión (García y Corzo, 2008).
- *Eliminación de nitrógeno:* Los mecanismos de eliminación de nitrógeno incluyen: la desnitrificación, la volatilización de amonio, la incorporación a tejidos vegetales, la adsorción de amonio, los procesos de Anamox y la mineralización de nitrógeno orgánico (Vymazal *et al.*, 1998). La nitrificación es un mecanismo microbiano limitante en la eliminación de nitrógeno, puesto que las mayores eliminaciones se hallan dadas por procesos de desnitrificación. La desnitrificación (proceso anóxico) se halla limitada a procesos óxicos de formación de nitratos conducida por la nitrificación (Plaza de los Reyes *et al.*, 2011).

El porcentaje de eliminación de NT en sistemas de HFHSS oscila entre un 40-50%. Esta baja eliminación de nitrógeno se debe a que los HFHSS son sistemas que no poseen condiciones óxicas necesarias para la nitrificación, lo que conlleva eliminaciones de  $\text{NH}_4^+$  cercanas al 40% (Vymazal, 2007). Son necesarios 4,6 mg de  $\text{O}_2$  para oxidar un mg de nitrógeno amoniacal a nitrato, en los HFHSS la disponibilidad de oxígeno (< 2mg/l) reduce su capacidad de eliminar el  $\text{NH}_4^+$  por nitrificación biológica (Vymazal and Kröpfelová, 2008b).

Las plantas asimilan aproximadamente el 10-15% de la carga de nitrógeno aplicada cuando se tratan aguas residuales urbanas de tipo medio (García *et al.*, 2004).

- *Eliminación de fósforo:* La eliminación de fósforo en los humedales no suele ser más del 10-20%, lograda principalmente en humedales por la acumulación en el lecho. Fenómenos como la adsorción, precipitación, asimilación por parte de las plantas y microorganismos, son considerados como mecanismos de eliminación (Vymazal, 2007). No obstante, la eliminación del fósforo es difícil en cualquiera de los sistemas de depuración normalmente utilizados, y los HFHSS no son una excepción. Su eliminación resulta complicada debido a la escasa movilidad que presentan los compuestos que contienen el fósforo (García *et al.*, 2004).

De la eliminación de fósforo sólo el 13-19% se almacenan en los brotes, mientras que 86-96% se almacena en la biomasa subterránea (García *et al.*, 2004). En revisiones realizadas a estos tipos de humedal en República Checa, Vymazal (2002) confirmó que la cosecha elimina menos del 10% o incluso el 5% del fósforo (García *et al.*, 2010).

## **4.6 Indicadores de sustentabilidad**

### **4.6.1 Definición desarrollo sustentable**

La definición de desarrollo sustentable más utilizada es la definida en el Informe Brundtland. Según ésta, el Desarrollo Sustentable es “el desarrollo que satisface las necesidades de la generación presente sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer sus propias necesidades (CMMAD, 1988).

En Chile la definición más aceptada es la especificada en la ley N°19.300 de Bases del Medio Ambiente la cual especifica que el Desarrollo Sustentable es un *“proceso de mejoramiento sustentable y equitativo de la calidad de vida, fundado en la conservación y protección del medio ambiente, de manera de no comprometer las expectativas de las generaciones futuras”* (SINIA, 2007).

### **4.6.2 Definición de indicadores de sustentabilidad**

Un indicador es una medida de la parte observable de un fenómeno que permite valorar otra porción no observable de dicho fenómeno” (Fernández, 2006). A menudo resultan de procesar series estadísticas en formas de agregación, proporción, tasas de crecimiento (entre otras), para poder mostrar el estado, la evolución y las tendencias de un fenómeno que interesa monitorear. Los indicadores se diseñan y producen con el propósito de seguir y monitorear algunos fenómenos o conjuntos de dinámicas que requieren algún tipo de intervención o programa (Quiroga, 2009).

Los indicadores de desarrollo sustentable son aquellos que proporcionan información, directa o indirecta, acerca del futuro de la sustentabilidad con respecto a objetivos sociales o económicos específicos, tales como bienestar material o ambiental permitiendo diseñar políticas con base en objetivos que reorienten las acciones y respuestas para la implementación de un desarrollo sustentable, y ayudar a los encargados de la toma de decisiones a evaluar las

oportunidades desperdiciadas y los beneficios obtenidos en relación con las necesidades socioeconómicas, ambientales y políticas (Barrantes, 2006).

Sin embargo, es conveniente diferenciar los indicadores ambientales de los indicadores de sustentabilidad. Mientras que los indicadores ambientales señalan el estado y variación del medio ambiente, los indicadores de sustentabilidad han de indicar, además, el estado y variación del sistema humano en relación con el sistema natural (Fernández, 2006).

#### **4.6.3 Características de indicadores de sustentabilidad**

Las características que deben poseer los indicadores de sustentabilidad son las siguientes:

- Deben ser sensibles a cambios en el tiempo y el espacio.
- Deben reflejar el modo en que la sociedad utiliza sus recursos.
- Deben evaluar tendencias con respecto a un estado estacionario.
- Deben ser predictivos.
- Deben ser útiles para la toma de decisiones, trascendiendo el ámbito académico.
- Deben ser fáciles de recolectar y aplicar.
- La selección de los elementos cuantitativos y cualitativos a considerar.
- La fijación de estándares, objetivos y niveles críticos aceptables.

Por lo tanto, el desarrollo de indicadores de sustentabilidad depende en gran parte de los objetivos trazados. En particular de cómo se percibe la problemática ambiental y de la definición implícita de desarrollo sustentable (Barrantes, 2006).

## 4.7 Indicadores de sustentabilidad aplicables a PTAS

En el contexto de un desarrollo sustentable, este trabajo presenta a continuación un listado de indicadores de sustentabilidad aplicables a PTAS. La evaluación de la sustentabilidad de los sistemas de tratamiento de aguas servidas debe ser capaz de asesorar y guiar el progreso en el campo del saneamiento hacia la sustentabilidad. Para ello se deben analizar indicadores ambientales, económicos y sociales.

### 4.7.1 Indicadores ambientales

Un indicador ambiental es un elemento que describe, analiza y presenta información científicamente sustentada sobre las condiciones y tendencias ambientales y su significado (OECD, 1998). El conjunto de indicadores que se presentan a continuación se encuentra asociado a la componente ambiental, reflejando las presiones sobre el ambiente, considerando tanto la línea de agua como la línea de lodos:

- El uso y consumo de recursos (energéticos, productos químicos e insumos).
- Resultado de la operación y residuos (calidad del agua tratada y lodos producidos, entre otros).

Se presenta a continuación un listado de indicadores ambientales aplicables a PTAS:

- *Potencia instalada en la PTAS por habitante (Kw/hab):* Este indicador tiene como objetivo transmitir la cantidad de energía que la PTAS necesita para su funcionamiento por habitante servido.
- *Energía consumida en la PTAS por habitante al año (Kw-hr/hab·año):* Este indicador tiene como finalidad transmitir la cantidad de energía

eléctrica que efectivamente consume en su funcionamiento la PTAS por habitante servido al año.

- *Porcentaje de energía consumida en la PTAS respecto al consumo total de energía de la población servida (%)*: Representa al nivel territorial el efecto del consumo de energía de una instalación de tratamiento.
- *Productos químicos (polímeros y gas cloro) e insumos (combustible) consumidos en la PTAS por habitante al año (kg/hab·año, l/hab·año)*: Determina la cantidad de producto químico e insumos consumido por la PTAS en su tratamiento. El interés de este indicador se debe a que el consumo de estos productos es nocivo para el medio ambiente aunque se emita en pequeñas concentraciones y al mismo tiempo eleva el costo de operación y mantenimiento de las PTAS.
- *Calidad del aguas según DS 90 tabla 1, en términos del número de resultados que cumplen la legislación respecto al número total de resultados*: Este indicador tiene como objetivo constatar la eficiencia de la PTAS, teniendo en cuenta la legislación sobre vertido de aguas servidas y por tanto la capacidad de los medios hídricos de recibir el efluente sin ningún tipo de problema ambiental. Este indicador depende por tanto del funcionamiento del tratamiento aplicado en la PTAS, así como de la calidad del efluente (CEPAL, 2001).
- *Cantidad de lodos producido por habitante al año (m<sup>3</sup>/hab·año)*: tiene como finalidad transmitir la cantidad de lodos generados como resultado del tratamiento secundario en las PTAS.

#### **4.7.2 Indicadores económicos**

El conjunto de indicadores que se presentan a continuación se encuentra asociado a la componente económica del desarrollo sustentable. Se trata de indicadores que pretenden cuantificar los costos tanto de inversión como los de operación y mantención. Los indicadores que se presentan son los siguientes:

- *Costo de inversión de la PTAS por habitante (\$/hab).*
- *Costo de operación y mantención por habitante al año (\$/hab·año):* Este indicador refleja los costos necesarios para garantizar un buen funcionamiento de la PTAS. Los costos de operación se refieren al costo que representan los trabajos que realiza el personal, los consumos de productos químicos, el transporte y disposición de lodos. Los costos de mantención se refieren a los costos que se derivan de la preservación, reparación y sustitución de equipamiento.

### 4.7.3 Indicadores sociales

Los indicadores que se presentan a continuación se encuentran asociados a la componente social del desarrollo sustentable que permite satisfacer las necesidades individuales de bienestar. En concreto, se pretende traducir el efecto que tiene la PTAS en la sociedad.

- *Porcentaje de población residente servida respecto a la población total (%)*: Poder lograr servicios sustentables que posibiliten el saneamiento para todos y en todo momento, más aún en los momentos que más se requieren, como en situaciones de desastre, con el propósito de mejorar la calidad de vida, reduciendo vulnerabilidades (Carrasco, 2011).
- *Densidad de población en términos de habitantes por área (hab/km<sup>2</sup>)*: Entre más concentrada se encuentren los habitantes existen mayores posibilidades para que se les construya un sistema de alcantarillados, mientras que si la densidad es baja (menos de 15 hab/km<sup>2</sup>) se necesitara soluciones sanitarias individuales ya que no es factible la incorporación de sistema colectivo (CEPAL, 2001).

## 5 METODOLOGIA

### 5.1 Características de la planta piloto HFHSS

#### 5.1.1 Ubicación

Para la realización de este proyecto se dispuso de una planta piloto, constituida por 4 HFHSS (celdas paralelas), ubicada dentro del terreno de la PTAS de la comuna de Hualqui, provincia de Concepción, Región del Biobío (Figura 4), perteneciente a la Empresa de Servicios Sanitarios del Biobío, ESSBIO S.A.

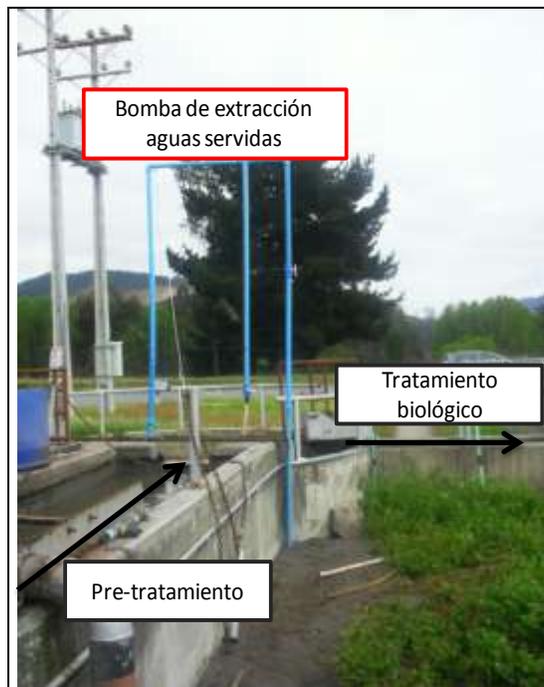


Figura 4. Ubicación planta piloto HFHSS en PTAS Hualqui.

#### 5.1.2 Obtención del influente

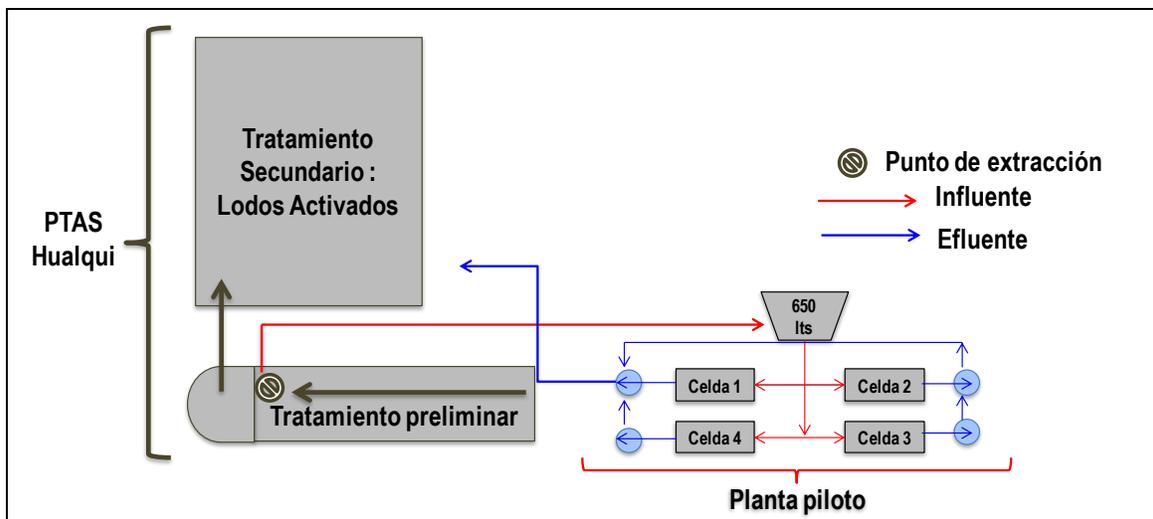
Para la alimentación del humedal se utilizó el agua servida que llega a la PTAS. El agua fue extraída por una bomba para aguas negras modelo VXm8/35,1 después del pre-tratamiento (cámara de rejillas, desarenador) y antes de que esta ingrese a tratamiento biológico (Figura 5).

El agua servida es llevada a un estanque de 650 l, este a su vez alimenta por presión cada una de las celdas del HFHSS.



**Figura 5.** Punto de extracción del agua servida.

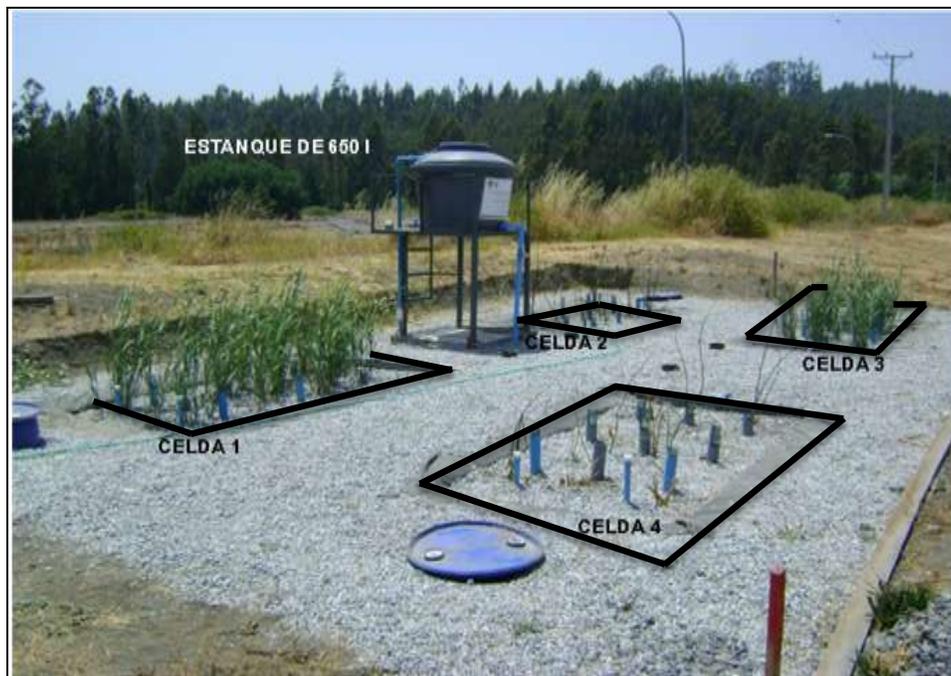
El detalle de cómo circula la línea de agua desde que es extraída hasta que es vertida en el estanque de lodos activados (lodos biológicos) se observan en la Figura 6.



**Figura 6.** Punto de extracción, recorrido del influente y del efluente.

### 5.1.3 Características del humedal

El humedal consta de 4 celdas paralelas de 4,5 m<sup>2</sup> cada una, con medio de soporte de grava (3/4"-1"), y un TRH (teórico) igual a 3,4 d, con un volumen total aproximado de 1 m<sup>3</sup>. La distribución de las celdas se encuentra especificado en la Figura 7.



**Figura 7.** Distribución de las celdas en la Planta piloto de HFSS.

Cada celda está plantada con un total de 18 ejemplares, las celdas 1 y 3 fueron plantadas con *Phragmites australis* mientras que las celdas 2 y 4 fueron plantadas con *Scirpus californicus*.

## 5.2 Estrategia de operación

### 5.2.1 Parámetros hidráulicos

La operación se llevó a cabo por 6 meses (193 días de operación). El primer mes se alimentó por un tiempo promedio de 300 minutos diarios, 3 días a la semana. Los meses siguientes se disminuyó a aproximadamente 180 minutos diarios, 2 veces a la semana. En cada uno de estos días se midió: Tiempo de operación (t), caudales (Q), altura de la columna de agua en cada celda (l), volumen de agua aplicado (v), con estos datos se calcularon los parámetros hidráulicos de operación para cada una de las celdas (Tabla 5).

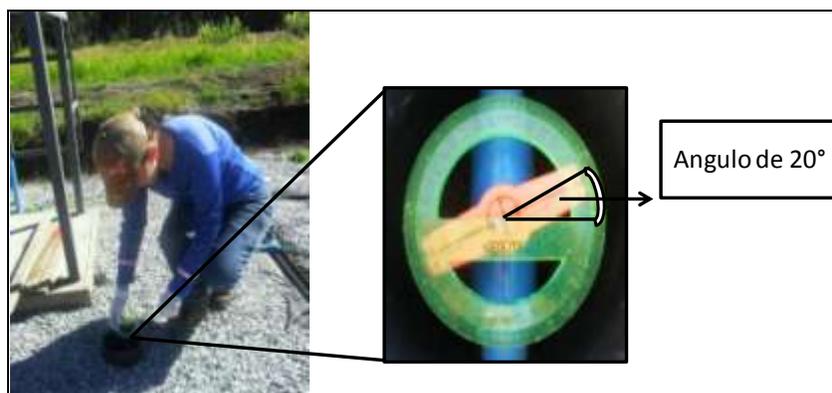
**Tabla 5.** Parámetros hidráulicos de operación.

| Parámetros de operación        | Unidad               | Ecuación                              |
|--------------------------------|----------------------|---------------------------------------|
| Caudal (Q)                     | l/s                  | $Q=v/t$                               |
| Carga hidráulica               | mm/d                 | $CH=Q/A$                              |
| Tiempo de retención hidráulico | d                    | $TRH=L \cdot W \cdot l \cdot n_0 / Q$ |
| Cargas orgánica (VCO)          | kg/m <sup>3</sup> ·d | $VCO=Q \cdot C/A$                     |

A: Área superficial; L: Largo del HFHSS; W: Ancho del HFHSS;  $n_0$ : Porosidad de la grava; C: Concentración DBO<sub>5</sub>.

En cuanto a los caudales, se trató de mantenerlos cercanos a 1 l/min, para ello se abrieron las llaves de cada una de las celdas en un ángulo de 20° como se aprecia en la

Figura 8.

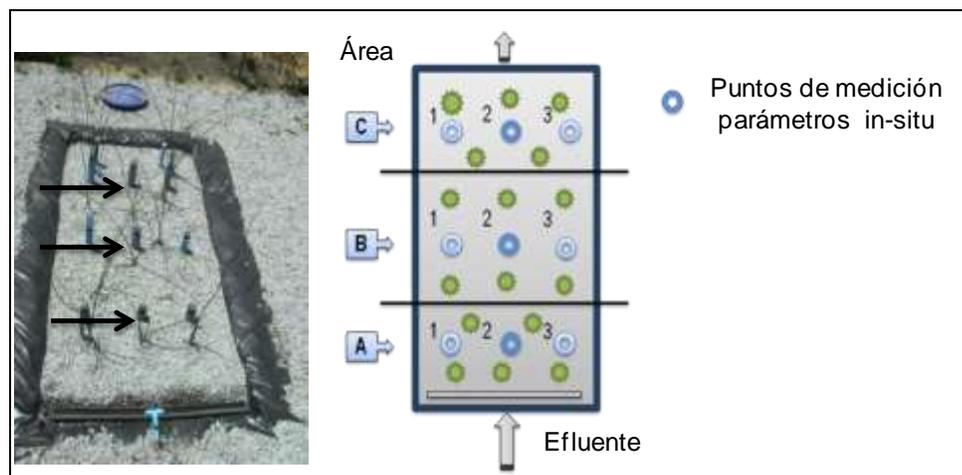


**Figura 8.** Abertura de las llaves.

### 5.3 Estrategia de monitoreo

#### 5.3.1 Parámetros de campo

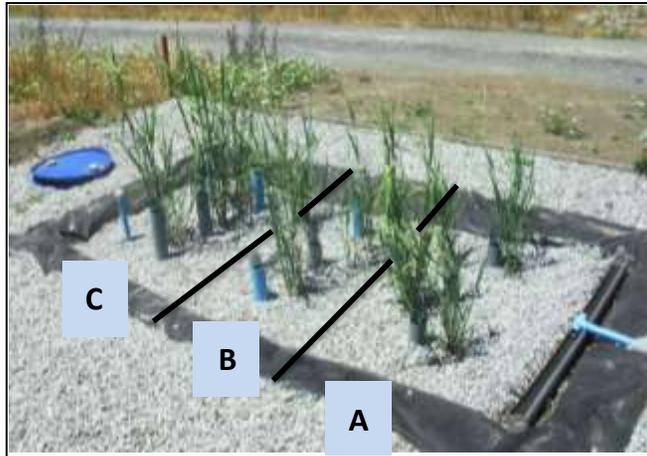
- *Parámetros in-situ:* Los parámetros in-situ medidos fueron: temperatura (°C), Potencial de Oxido Reducción (POR) (mV), Oxígeno Disuelto (OD) (ppm) y pH, se midieron quincenalmente en los muestreadores A2, B2 y C2 a excepción del OD el cual se monitoreo solo en B2, siendo A, B y C las áreas en las que se dividió cada unas de las celdas y los números 1, 2 y 3 los muestreadores de estas áreas, tan como se aprecia en la Figura 9. La medición de estos parámetros se realizó mediante un multiparamétrico portátil OAKTON (PC650–480485) y un medidor oxígeno disuelto portátil (Hanna oxi 330i/set HI 9146-04).



**Figura 9.** Puntos de muestreo para parámetros in-situ.

- *Crecimiento de la vegetación:* Para facilitar el monitoreo de las plantas en cada una de las celdas, se mantuvo la división de áreas efectuada para la medición de parámetros in-situ (A, B y C), tal como se muestra en la Figura 10. De las plantas se monitoreo en primera instancia sobrevivencia. De las que sobrevivieron, se hizo un seguimiento del número de brotes, fecha en

que comenzaron a brotar, y luego se midió semanalmente la altura. Además, se realizó un registro fotográfico del crecimiento de las plantas.



**Figura 10.** Áreas de división para el seguimiento de las plantas.

### 5.3.2 Parámetros fisicoquímicos

Se tomaron muestras a la salida de cada una de las celdas, y de la entrada general, cada 15 d. Las muestras fueron filtradas por membranas Wathman de 0,45  $\mu\text{m}$  de tamaño de poro y luego almacenadas en un refrigerador a 6°C, para su posterior análisis. Los parámetros físico-químicos analizados fueron: DQO, DBO<sub>5</sub>, SST, SSV, PO<sub>4</sub><sup>-3</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, NT y PT (Tabla 6).

**Tabla 6.** Frecuencia de medición de parámetros fisicoquímicos.

| Parámetro (mg/l)              | Frecuencia |
|-------------------------------|------------|
| DQO                           | Quincenal  |
| DBO <sub>5</sub>              | Mensual    |
| SST                           | Mensual    |
| SSV                           | Mensual    |
| NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>  | Quincenal  |
| NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>  | Quincenal  |
| NT                            | Mensual    |
| PO <sub>4</sub> <sup>-3</sup> | Quincenal  |
| PT                            | Mensual    |

#### 5.4 Métodos analíticos

Para la caracterización de los parámetros fisicoquímicos, las muestras se llevaron a laboratorio para su análisis de acuerdo con los protocolos establecidos en Standard Methods (APHA, AWWA, WPCF, 1985), la  $DBO_5$  se determinó por la metodología Winkler, luego de 5 días de incubación a  $20^{\circ}C$ . La DQO se determinó espectroscópicamente (660 nm) mediante el equipo (Spectronic unicam-Genesis 10 UV), después de 2 horas de digestión a temperatura  $150^{\circ}C$ . El contenido de  $NH_4^+$  fue determinado mediante la reacción del amonio, hipoclorito y fenol catalizado por el nitroprusiato de sodio y medido espectroscópicamente (640 nm). El  $NO_3^-$  fue determinado mediante reducción de nitrato a nitrito en presencia de cadmio y fue medido espectroscópicamente (540 nm), y el  $PO_4^{-3}$  mediante el método del fósforo total modificado para determinar fosfato y medido espectroscópicamente (890 nm).

En cuanto a la determinación de las concentraciones de NT y PT, se realizaron mediante kits específicos de Spectroquant NOVA-60, de Merck. Para las concentraciones de NT se usó el kit de código 1.00613.0001 que detecta concentraciones entre 0,5 y 15,0 (mg N/l). Para determinar las concentraciones de PT se empleó el kit de código 1.14729.0001, que registra valores entre 0,5 y 25,0 (mg P/l).

## 5.5 Metodología de aplicación de indicadores de sustentabilidad

Se seleccionaron 3 PTAS dependiendo de los objetivos que persigue este trabajo, para la aplicación de los indicadores de sustentabilidad descritos en el apartado 4.7:

- Tipo de tecnología:
  - Convencionales:
    - Lodos activados (PTAS Hualqui, PTAS Quilleco)
    - Lagunas facultativas (PTAS Negrete)
  - Planta piloto del tipo HFHSS.
- Población abastecida representativa de zonas rurales, menos a 2.000 habitantes (PTAS Negrete)
- Ubicación (Región del Biobío) e información disponible.

En la Tabla 7 se encuentra la caracterización de cada una de las PTAS a las cuales se les aplicaron los indicadores de sustentabilidad, en esta se especifica su ubicación, el total de la población comunal, tipo de tecnología y población abastecida para el año 2010.

**Tabla 7.** Caracterización de las PTAS seleccionadas.

| <b>PTAS</b> | <b>Ubicación</b>                              | <b>Población comunal (hab)</b> | <b>Tipo de tecnología</b>               | <b>Población abastecida (2010)</b> |
|-------------|---|--------------------------------|---|------------------------------------|
| Hualqui     | Comuna de Hualqui,<br>Provincia de Concepción | 18.768                         | Lodos activados,<br>aireación extendida | 14.274                             |
| Negrete     | Comuna de Negrete,<br>Provincia del Biobío    | 8.579                          | Lagunas facultativas                    | 4.104                              |
| Quilleco    | Comuna de Quilleco,<br>Provincia del Biobío   | 10.428                         | Lodos activados                         | 1.767                              |

Fuente: INE (2002); SSIS (2011); ESSBIO (2010).

### 5.5.1 Población considerada en cada PTAS

En la Tabla 8 se encuentra la población considerada en cada PTAS para la elaboración de los indicadores, en el caso de las PTAS de Hualqui y Negrete se consideró la población horizonte estimada en las Declaraciones de Impacto Ambiental (DIA) para los años en los que se disponía información (2007, 2008, 2009). En el caso de la PTAS de Quilleco no se obtuvo información para esos años, por lo que se utilizó la población que actualmente es servida según los datos de la empresa sanitaria responsable de esta PTAS, ESSBIO S.A. En cuanto a la consideración de población abastecida con el HFHSS se calculó de la forma que especifica la Ecuación 1: Primero se calculó el volumen aplicado por día (volumen total aplicado dividido por los días de operación) este volumen se dividió por el volumen de descarga de aguas servidas por habitante que se indica en el DS 609 (160 l/hab/d).

$$\frac{V \text{ total (l)}}{\text{tiempo operación (d)}} = \frac{v \left( \frac{1}{d} \right)}{160 \left( \frac{1}{\text{hab} \cdot d} \right)} = \text{Población servida hab} \quad \text{Ecuación 1}$$

Por lo tanto la población abastecida en total por el HFHSS fue de 1,24 habitantes (ver Anexo 1).

**Tabla 8.** Población considerada para cada una de las PTAS.

| PTAS     | Año  | Población considerada |
|----------|------|-----------------------|
| Hualqui  | 2007 | 14.588,00             |
|          | 2008 | 15.617,00             |
|          | 2009 | 16.682,00             |
| Negrete  | 2007 | 5.691,00              |
|          | 2008 | 5.777,00              |
|          | 2009 | 5.863,00              |
| Quilleco | 2010 | 1.767,00              |
| HFHSS    | 2011 | 1,24                  |

Fuente: SEA (2011); ESSBIO (2010).

A continuación se describe la metodología de aplicación de cada uno de los indicadores:

### 5.5.2 Indicadores ambientales

*Potencia instalada en la PTAS por habitante (Kw/hab).*

- *PTAS convencionales:* La potencia instalada de las PTAS se obtuvo de la SISS (2007) en el Estudio tarifario de las PTAS de la empresa ESSBIO S.A., válido para el periodo 2007-2011, en el cual se detallan la potencia instalada de cada una de las PTAS.
- *Planta piloto HFHSS:* En la potencia instalada del HFHSS se consideró la potencia de las bombas del influente y del efluente, tal como se especifica en la ecuación 2.

$$P_t = P_1 + P_2$$

Ecuación 2

$P_t$ : Potencia instalada del HFHSS (Kw)

$P_1$ : Potencia de la bomba influente (Kw)

$P_2$ : Potencia de la bomba efluente (Kw)

El indicador se obtiene como el cociente de cada una de las potencias instaladas entre la población considerada para cada proyecto al año.

*Energía consumida en la PTAS por habitante y por año (Kw-hr/hab·año).*

- *PTAS convencionales:* Total de energía consumida por las PTAS, se obtuvo de la SISS (2007) en el Estudio tarifario de las PTAS de la empresa ESSBIO S.A., válido para el periodo 2007-2011 en el cual se detallan los consumos de energía eléctrica de cada una de las PTAS.

- *Planta piloto del tipo HFHSS*: En la energía total consumida por el HFHSS, se consideró la energía consumida por la bomba del influente y del efluente, tal como se especifica en la ecuación 3.

$$E_{\text{total}} = E_{\text{bomba del influente}} + E_{\text{bomba del efluente}} \quad \text{Ecuación 3}$$

En el cálculo de la energía consumida por cada una de las bombas se obtuvo un valor mensual que luego se multiplicó por un factor de 12 para llevarlo a un valor de energía consumida al año, para ello se obtuvo la potencia de cada bomba la cual se multiplicó por sus horas de funcionamiento, tal como se especifica en la ecuación 4.

$$E_{\text{consumida}} = (P \times t) \times 12 \quad \text{Ecuación 4}$$

$P_1$ : Potencia de la bomba (Kw)

$t_1$ : Tiempo mensual de funcionamiento de la bomba (h/mes)

$E_{\text{consumida}}$ : Energía consumida por bomba (Kw-hr/año)

El indicador se obtiene como el cociente de cada una de las energías consumidas entre la población considerada para cada proyecto y el año.

*Porcentaje de energía consumida en la PTAS respecto al consumo total de energía de la población servida (%).*

Este indicador considera al indicador anterior y la energía total que consume un habitante durante un año que es servido por la PTAS.

Para el cálculo de la energía total que consume un habitante durante un año que es servido, se utilizaron los datos de la encuesta CASEN del año 2006, la cual especifica que el consumo eléctrico para zonas rurales es de 125 Kw-hr/mes por hogar mientras que para zonas urbanas es de 159 Kw-hr/mes por hogar, además se utilizó un valor de 3,6 personas por hogar (INE, 2002), el cálculo se especifica en la ecuación 5.

$$E = \left( \frac{\text{E consumida por hogar}}{3,6} \right) \times 12 \quad \text{Ecuación 5}$$

E: Energía consumida por persona en un año (Kw-hr/hab·año)

E Consumida por hogar: consumo de energía por zona (Kw-hr/mes·hogar)

Este indicador se obtiene como el cociente de ambas energías: la consumida en la PTAS por habitante al año, y el total de energía consumida por habitante al año.

*Productos químicos (polímeros y gas cloro) e insumos (combustible) consumidos en la PTAS por habitante al año (l/hab·año, Kg/hab·año).*

Los productos químicos considerados fueron el gas cloro, polímeros y en el caso de los insumos se considero el consumo de petróleo.

- *PTAS convencionales*: Se solicitó esta información a la empresa responsable. Las unidades son en kilogramos (gas cloro, polímeros) y en litros (petróleo), información disponible para los años 2007, 2008 y 2009.
- *Planta piloto del tipo HFHSS*: No existe consumo de insumos, y el único producto químico utilizado es cloro, para el cual se considera un consumo teórico de cloro, cuyo consumo está relacionado con la dosis de cloro necesaria para la inactivación de coliformes fecales (ver Anexo 2).

El indicador se obtiene como el cociente de la cantidad del producto químico e insumos entre la población considerada de cada proyecto al año.

*Calidad del aguas según DS 90 tabla 1, legislación que hay en vigor en términos del número de resultados que cumplen la legislación respecto al número total de resultados.*

Se consideraron como valores límites de emisión de los parámetros fisicoquímicos DBO<sub>5</sub> (35 mgO<sub>2</sub>/l) y SST (80 mg/l) los estipulados en el DS 90/2000, tabla N°1.

- *PTAS convencionales*: Se utilizan los registros operacionales proporcionados por la empresa responsable. La longitud de los registros utilizados fue:

PTAS Hualqui: Mayo 2006 a Diciembre 2009.

PTAS Negrete: Septiembre 2006 a Diciembre de 2009.

PTAS Quilleco: Enero 2005 a Diciembre de 2009.

- *Planta piloto del tipo HFHSS*: Se utilizaron los resultados de los análisis fisicoquímicos realizados en los primeros 193 días de operación.

El indicador se obtiene como cociente entre los resultados que cumplen la legislación y los resultados totales. Para que el resultado sea más comprensible, puede expresarse entonces el resultado del indicador en porcentaje.

*Cantidad de lodos producido por habitante al año (m<sup>3</sup>/hab·año).*

- *PTAS convencionales*: Cantidad de lodos producidos en el proceso, datos obtenidos en las plantas para los años 2007,2008 y 2009 (Hualqui y Quilleco). En el caso de la PTAS de Negrete se consideraron los datos que se encuentran en la DIA de esta (1300m<sup>3</sup> cada 2 años).
- *Planta piloto del tipo HFHSS*: No existe producción de lodos.

### 5.5.3 Indicadores económicos

*Costo de inversión de la PTAS por habitante (\$/hab).*

- *PTAS convencionales:* Costos de inversión (\$) obtenido de la memoria de la empresa del año 2007 (ESSBIO, 2007).
- *Planta piloto del tipo HFHSS:* Costos de inversión del HFHSS (año 2011), especificados en el Anexo 3. No se consideró el costo por adquisición del terreno.

*Costo de operación y mantención por habitante al año (\$/hab·año).*

Se consideraron los costos: Energía eléctrica, cloro, polímeros, transporte y disposición de lodos, pagos a operarios y costos de mantención.

- *PTAS convencionales:* Información disponible en SISS (2007), en el Estudio tarifario de la PTAS pertenecientes a la empresa ESSBIO S.A., válido para el periodo 2007-2011.
- *Planta piloto del tipo HFHSS:* No existe costos por polímeros, transporte y disposición de lodos, ni costos de mantención. Para el costo en energía eléctrica se consideró el precio publicado por Comisión Nacional de Energía (CNE) para el año 2011 (55,38 \$/Kw-hr) (CNE, 2012) mientras que para el costo en consumo de cloro se considero un valor de 439,1 \$/kg cloro utilizado (ESSBIO, 2007), El cálculo del costo de operación y mantención se encuentra especificado en el Anexo 4.

Para realizar los indicadores económicos, los costos obtenidos en el año 2007 se realizó la conversión de precios al año 2011 para poder compararlos, a través de la ecuación 6 (Sapag y Sapag, 2007):

$$\text{Precio } (\$t) = \left( \frac{\text{Precio } (\$0)}{\text{IPCo}} \right) \times \text{IPCt} \quad \text{Ecuación 6}$$

Dónde:

Precio (\$<sub>0</sub>): Cifra en moneda del tiempo “0” de referencia

Precio (\$<sub>t</sub>): Cifra en moneda del tiempo “t”

IPCo: Índice de precio al consumidor al tiempo “0” de referencia

IPCt: Índice de precio al consumidor al tiempo “t”

#### **5.5.4 Indicadores sociales**

*Calidad del servicio:* Porcentaje de población residente servida respecto al total de la población (%) y densidad de población en términos de habitantes por área (hab/km<sup>2</sup>).

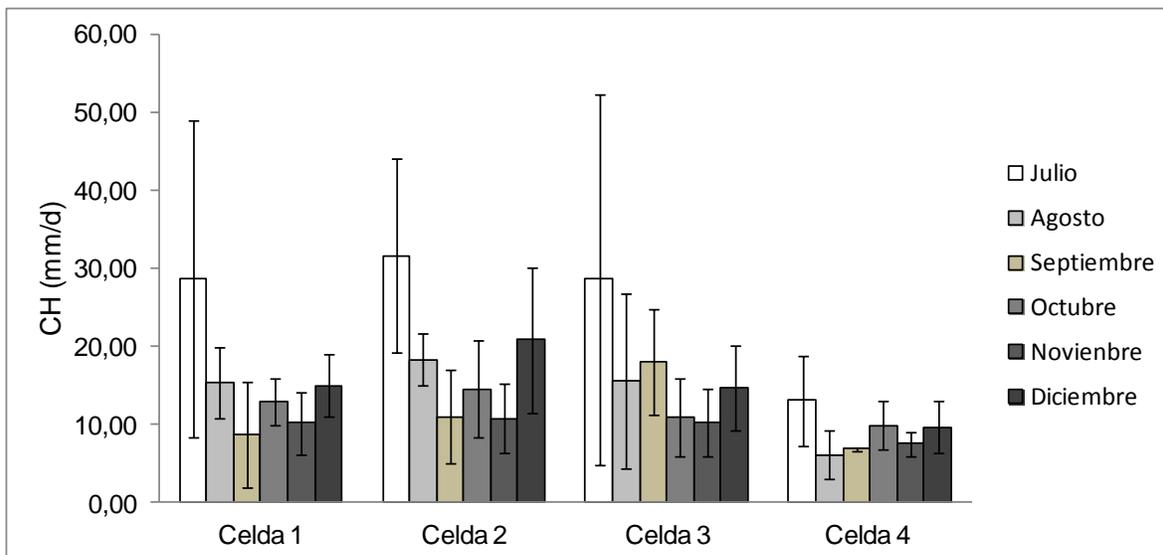
- Para este indicador se utilizó la población cuyas aguas son actualmente tratadas v/s el total de la población urbana según el censo 2002, ya que las plantas están dirigidas a esta población. En el caso del HFHSS, se consideró para la misma el total de población tratada por la PTAS de Hualqui ya que este sistema está dirigido a esta población.
- La densidad de población en términos de habitantes por área se obtuvo del censo 2002 (INE, 2002).

## 6 RESULTADOS Y DISCUSION

### 6.1 Parámetros hidráulicos de operación

La Figura 11 muestra las cargas hidráulicas (CH) de las cuatro celdas (C1, C2, C3 y C4) durante los meses de operación. En el mes de Julio se aplicaron CH sobre 35 mm/d llegando hasta 55 mm/d, lo que provocó la aparición de clogging, debido a la gran cantidad de sólidos y grasas que llegaron al sistema (Figura 12). Para intentar mitigar el problema, se tomó la decisión de reducir para los meses siguientes (Agosto-Diciembre) las CH variando entre 10 y 25 mm/d. Específicamente en el mes de Septiembre, las CH fueron cercanas a 15 mm/d, debido a problemas en los equipos de bombeo.

De acuerdo a Tanner (2001), las CH pueden variar en el rango de 10-100 mm/d, además indica que la reducción mejora la eficiencia. Vymazal *et al.* (1998), recomienda CH < 50 mm/d mientras que Marecos y Albuquerque (2010) recomiendan que sean inferiores a 40 mm/d, por lo que las CH aplicadas a la planta piloto están dentro del rango recomendado por estos autores para alcanzar mejores eficiencias.

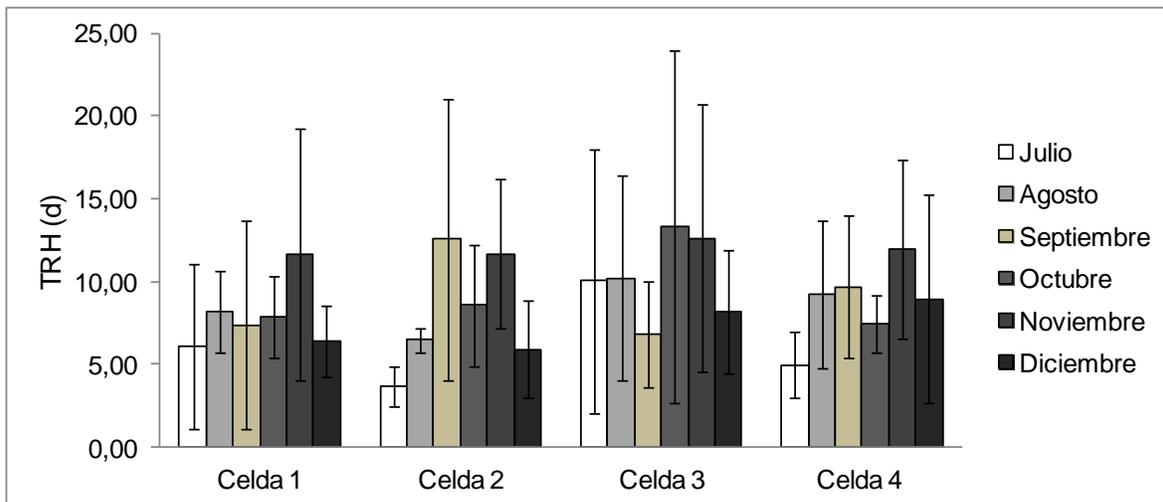


**Figura 11:** Cargas hidráulicas aplicadas a cada una de las celdas



**Figura 12:** Obstrucción a la entrada de la celda (Clogging).

La Figura 13 muestra los TRH para las cuatro celdas, durante los meses de operación. El TRH se comporta de manera inversa a las CH. En el mes de Julio fueron entre 5-6 d, y en los meses siguientes variaron entre 6-12 d. Vymazal y Kröpfelová (2008) indicaron que los TRH debieran estar entre 2-10 d (preferentemente mayores a 5 d), mientras que Marecos y Albuquerque (2010) indicaron en su estudio que deberían estar entre 3-9 d. Por esto, los TRH de este estudio se ajustan a los valores recomendados.



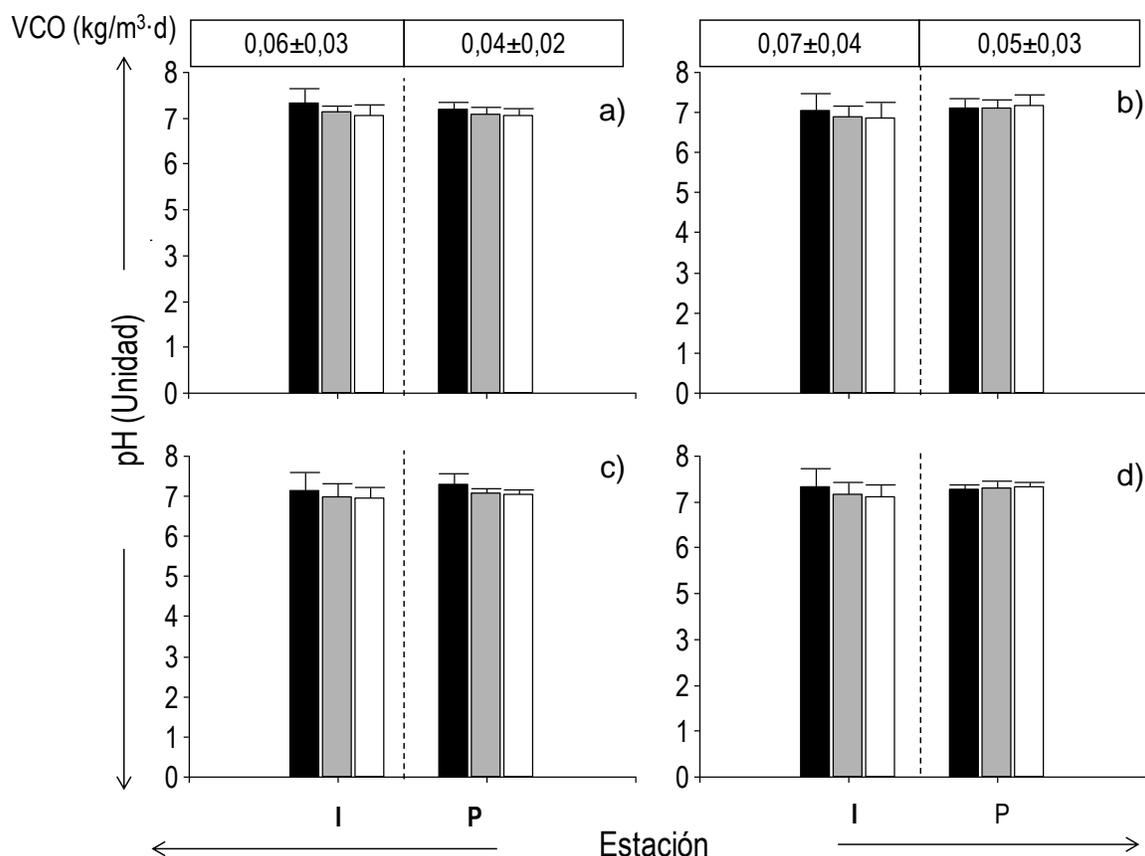
**Figura 13:** Tiempos de retención hidráulico de cada una de las celdas

## 6.2 Comportamiento evolutivo de las celdas

### 6.2.1 Parámetros in-situ

En la Figura 14 se presenta el pH medido en las estaciones de invierno y primavera, para cada uno de los puntos de medición realizados en cada una de las celdas. El pH en las celdas varió entre 6,5 - 7,5, sin modificación de este rango para las distintas estaciones ni en los diferentes puntos de medición.

Según estudios realizados por Marecos y Albuquerque (2010), el pH en el efluente puede variar entre 7,0 - 7,4. En la planta piloto de HFHSS existieron mediciones en el rango que evidencia estos autores, pero también existieron mediciones inferiores a estas.

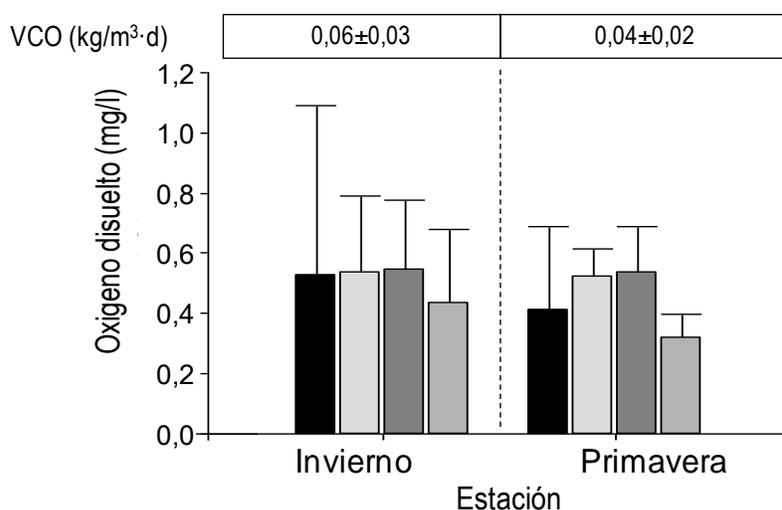


**Figura 14.** pH en los puntos de medición de cada celda. A2 (■), B2 (■), C2 (□); I (invierno), P (primavera); a) Celda 1, b) Celda 2, c) Celda 3, d) Celda 4.

En la Figura 15 se presenta el OD medido en las estaciones de invierno y primavera, para el punto de medición B2 realizado en cada una de las celdas. La celda 4 varió entre 0,08-1,65 mg/l, menor que la variación de la celda 1 que fue de 0,1-0,74 mg/l. Para el análisis de los datos obtenidos, se debe considerar que la desviación estándar del equipo es de  $\pm 0,3$  mg/l, lo que indicaría que las concentraciones de oxígeno encontradas, son cercanas a cero, generando condiciones predominante anóxicas y/o anaeróbicas.

Según estudios realizados por García *et al.* (2004) durante la puesta en marcha de un HFHSS utilizado para tratar aguas servidas, se encontró que durante el primer año de funcionamiento, las concentraciones de OD fueron extremadamente bajas variando entre 0,09-0,17 mg/l, similares a las registradas en las celdas de la planta piloto estudiada en este trabajo de investigación.

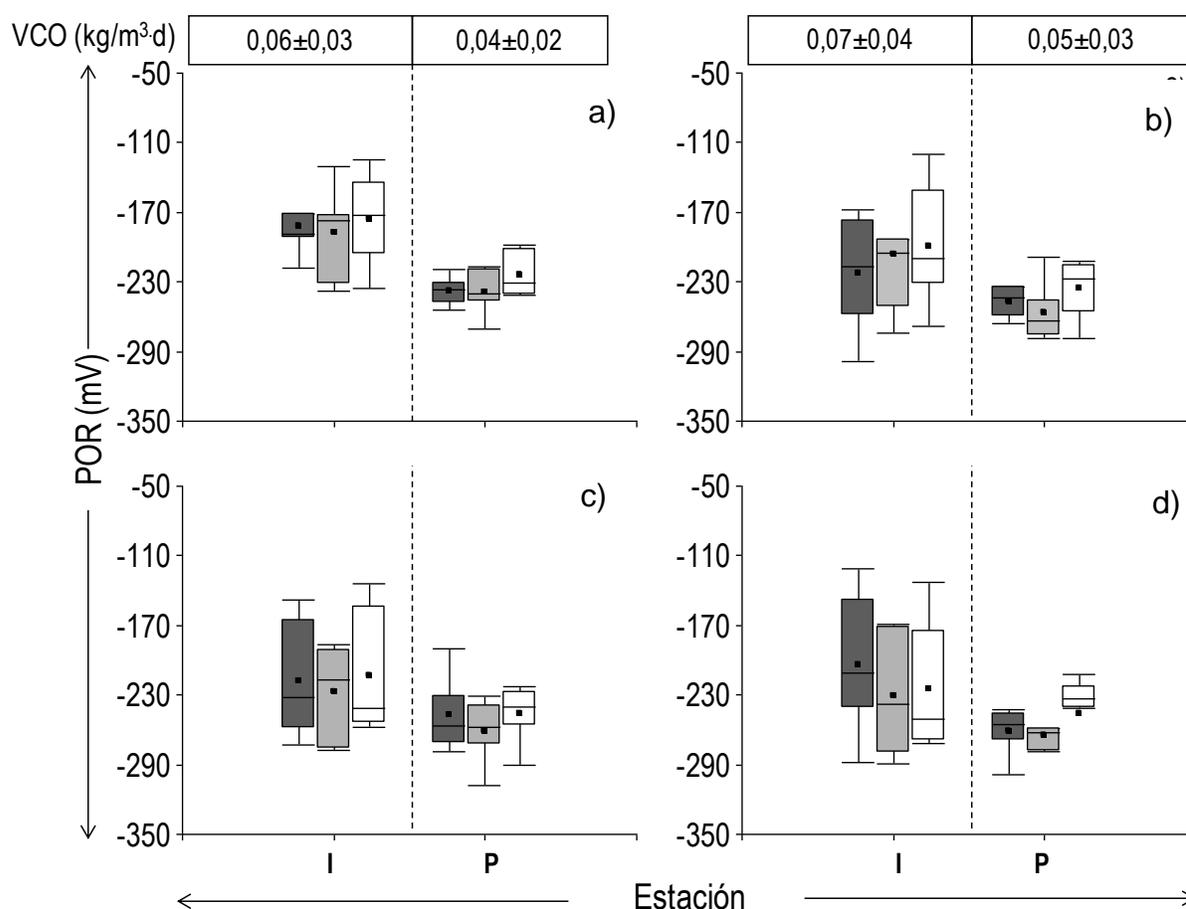
Según Vymazal y Kröpfelová (2008b) en sustrato de HFHSS las concentraciones de salida de OD son generalmente muy bajas, encontrando concentraciones de salida  $< 2$  mg/l por lo que se consideran generalmente como anóxico o anaeróbico, como es el caso de la planta piloto cuyas concentraciones fueron inferiores a 1,65 mg/l.



**Figura 15.** Oxígeno disuelto. Celda 1 (■), Celda 2 (□), Celda 3 (■), Celda 4 (□).

En la Figura 16 muestra el POR medido en las estaciones de invierno y primavera para cada uno de los puntos de medición de cada una de las celdas. El POR varió entre -130,7 y -299,2 mV, rango similar al obtenido por García *et al.* (2004) en el monitoreo de los primeros meses de funcionamiento de un HFHSS para tratar aguas servidas, el cual muestra que el POR varió entre -250 y -387 mV (García *et al.*, 2004a).

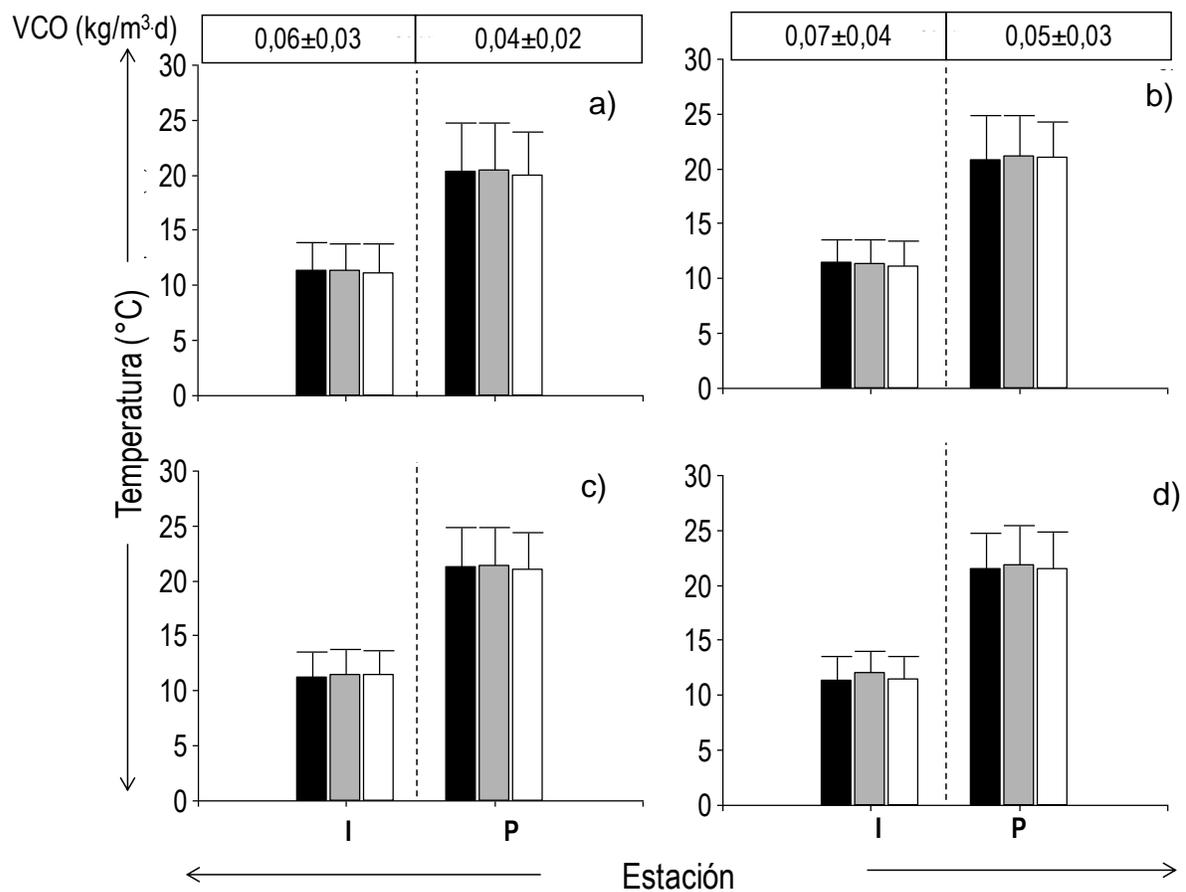
Cuando el POR varía entre  $-50 - 200$  mV se considera que el sistema opera bajo condiciones anaeróbicas (WEF, 2008). Las mediciones realizadas en la planta piloto son menores a  $-50$  mV, por lo que junto a los valores de OD muestran que el sistema en esta etapa inicial de operación ha trabajado bajo condiciones anaeróbicas.



**Figura 16.** Potencial Óxido-Reducción. A2 (■), B2 (■), C2 (□); I (invierno), P (primavera); a) Celda 1, b) Celda 2, c) Celda 3, d) Celda 4.

En la Figura 17 se presenta la temperatura medida en las estaciones de invierno y primavera, para cada uno de los puntos de medición realizados en cada una de las celdas. Como era de esperarse, hay un aumento de la temperatura en la estación de primavera llegando a un máximo de 25,13 °C, mientras que en invierno las máximas de temperatura fueron de 15,50 °C, llegando a mínimas de 9,15 °C en promedio para las cuatro celdas. Al estudiar el comportamiento de la temperatura a lo largo de todas las celdas, no existen mayores diferencias longitudinales, siendo no superiores a 2°C para cada estación.

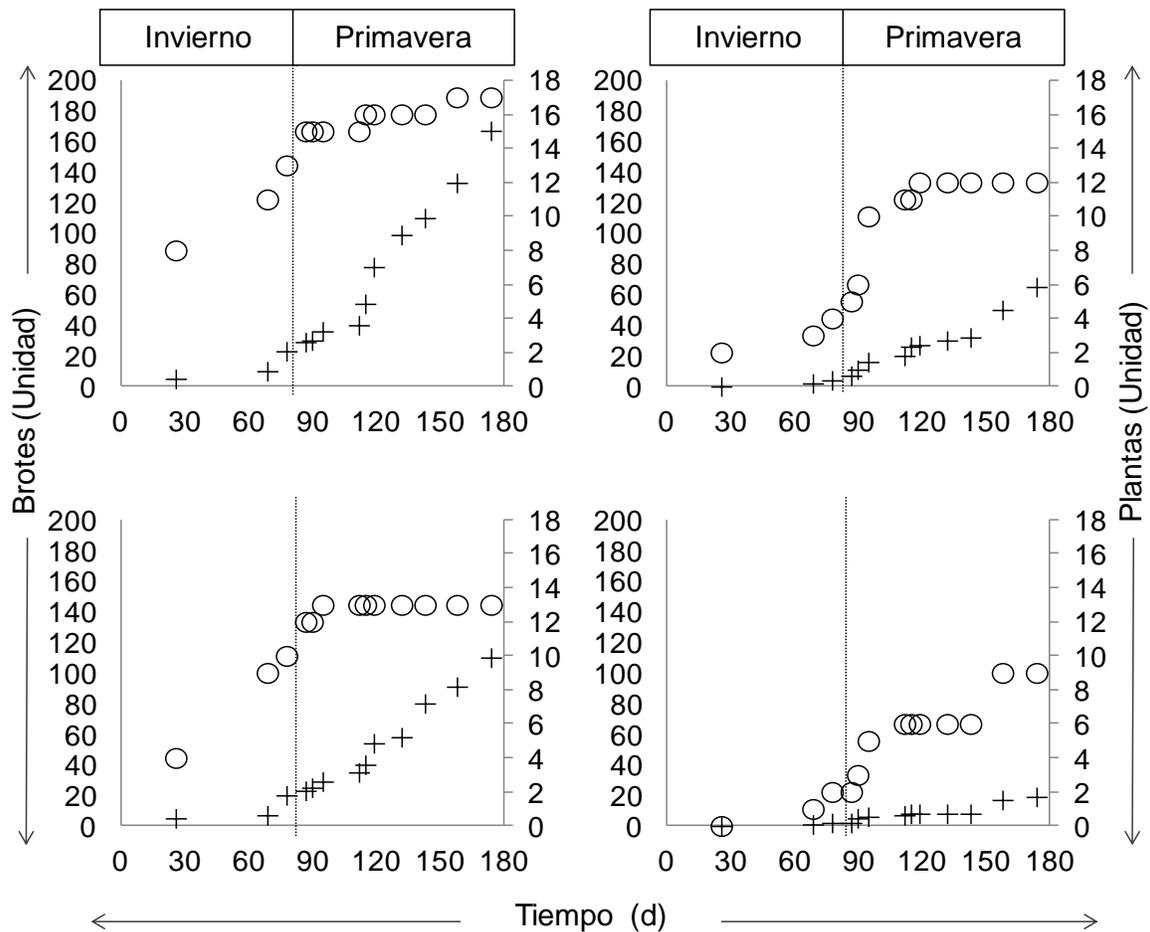
La temperatura afecta la solubilidad del oxígeno en el agua. En zonas frías (temperatura media del agua < 9 °C) la concentración de saturación en equilibrio del oxígeno será igual a 11,6 mg O<sub>2</sub>/l, mientras que en zonas cálidas (temperatura media >18 °C) será igual a 9,6 mg O<sub>2</sub>/l. Sin embargo, en humedales de tipo subsuperficial, la aireación superficial no es el principal mecanismo de introducción de oxígeno al sistema, por lo que los cambios de temperatura no mejoran la eficiencia (García *et al.*, 2004).



**Figura 17.** Temperatura en los puntos de medición para las celdas. A2 (■), B2 (◐), C2 (◑); I (invierno), P (primavera); a) Celda 1, b) Celda 2, c) Celda 3, d) Celda 4.

## 6.2.2 Crecimiento de la vegetación

Las plantas comenzaron a brotar el 02-Agosto (día 26 de operación) aumentando con la llegada de la primavera, día 77 de operación. En la Figura 18 se muestra el número de brotes y plantas que presentaron brotes en las diferentes celdas a lo largo de los días de operación. La Figura 18 muestra claramente que las celdas plantadas con *Phragmites australis* presentaron la mayor cantidad de brotes con un máximo de 190, mientras que las plantadas con *Scirpus californicus* presentaron un máximo de 110 brotes.



**Figura 18.** Supervivencia de plantas y número de plantas brotadas. a) Celda 1, b) Celda 2, c) Celda 3, d) Celda 4. (+) Brotos, (o) Plantas.

En las celdas 1 y 3 (plantadas con *Phragmites australis*) brotaron 17 y 13 plantas respectivamente. Mientras que la celda 2 y 4 (plantadas con *Scirpus californicus*) brotaron una menor cantidad (celda 2 brotaron 12 y celda 4 brotaron 9 plantas). Este aumento se puede observar en el registro fotográfico que se encuentra en el Anexo 5.

Debido a la baja sobrevivencia que alcanzó la celda 4 (33%), se replantó esta celda en el día 136 de operación, de las cuales brotaron 3 de las 6 replantadas, por lo que esta celda alcanzó al día 193 de operación una sobrevivencia de un 50%.

Kadlec y Wallace (2009) señalan que el crecimiento y la cobertura que alcanzan las plantas dependen de varios factores: la hidrología, los nutrientes, la competencia y la limitación de su crecimiento. Humedales plantados con cobertura inferiores al 5% pueden llegar a alcanzar una cobertura del 100% en menos de tres años. Además, se recomiendan plantar al inicio de la primavera o principios del verano, proporcionando tiempo suficiente para el desarrollo de la planta completa y una cobertura vegetal adecuada antes del comienzo de las bajas temperaturas y disminución de la tasa de crecimiento. Los humedales pueden comenzar su fase de operación cuando la cubierta vegetal alcanza el 60-80%, cobertura vegetal que aún no es alcanzada por la planta piloto estudiada, ya que el estudio se realizó por los primeros 6 meses y estas coberturas se alcanzan después de 2 años de operación.

De acuerdo a Quipuzco (2002), *Phragmites australis* a presentado adaptabilidad y una propagación rápida en 3 a 4 meses en HFHSS, alcanzando alturas en promedio de 2,1- 2,5 m, demostrando un aspecto vigoroso (tallos resistentes y hojas verdes). Esto se ve reflejado en las celdas plantadas con esta especie de planta en el HFHSS estudiado (celdas plantadas con *Phragmites australis*) pues presentan una sobrevivencia de un 83%, con alturas promedio mayores a 1 m después de 5 meses de siembra. Debido al crecimiento, adaptación y propagación de *Phragmites australis*, se considera que esta especie califica como una especie adecuada para ser usada en HFHSS.

En cuanto al crecimiento, adaptabilidad y propagación de *Scirpus californicus* no se encontró esta información en literatura.

### 6.3 Caracterización fisicoquímica del influente

En la Tabla 9 se encuentra la caracterización fisicoquímica del influente para las estaciones de invierno y primavera. En ésta se aprecia que las concentraciones de los parámetros DBO<sub>5</sub>, DQO, SST, SSV, NT y NH<sub>4</sub><sup>+</sup> aumentaron más de 40% en la estación de primavera en comparación con la estación de Invierno; mientras que PT y PO<sub>4</sub><sup>-3</sup> aumentaron en promedio 2 mg/l. No existieron concentraciones detectables de NO<sub>3</sub><sup>-</sup> en el influente, resultado que coincide con lo presentado por Metcalf & Eddy (1995), que indica nulas concentraciones de NO<sub>3</sub><sup>-</sup> en la caracterización típica de aguas servidas.

El influente presenta desviaciones estándar que varían entre un 10-40% en invierno y un 20-60% en primavera (respecto a la media) para todos los parámetros, lo que demuestra la fluctuación de la calidad del agua influente para cada estación.

**Tabla 9:** Caracterización del influente con que se abasteció el HFHSS.

| Parámetro                     | Concentración (mg/l) |                 |
|-------------------------------|----------------------|-----------------|
|                               | Invierno             | Primavera       |
| pH                            | 7,61 ± 0,48          | 7,45 ± 0,48     |
| DBO <sub>5</sub>              | 184,00 ± 38,57       | 236,00 ± 43,79  |
| DQO                           | 287,59 ± 24,98       | 425,17 ± 350,59 |
| SST                           | 216,57 ± 87,66       | 449,17 ± 272,33 |
| SSV                           | 123,75 ± 85,87       | 297,50 ± 142,56 |
| NT                            | 54,57 ± 17,33        | 117,67 ± 15,37  |
| NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>  | 39,45 ± 13,15        | 100,25 ± 38,61  |
| NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>  | ND                   | ND              |
| PT                            | 14,07 ± 3,18         | 16,43 ± 4,33    |
| PO <sub>4</sub> <sup>-3</sup> | 8,18 ± 2,47          | 10,68 ± 0,75    |

ND: No detectable.

## 6.4 Eliminación de la carga contaminante

En la Tabla 10 se presenta el promedio de las eficiencias obtenidas de eliminación de los parámetros fisicoquímicos monitoreados para las estaciones de invierno y primavera. La eliminación de la DQO aumentó en primavera pasando de 29,5% a un 53,9% (*Phragmites australis*), y de 23,2% a 48,15% (*Scirpus californicus*); lo mismo sucedió para SST cuya variación fue de 77,18% a un 82,83 % (*Phragmites australis*), 73,1% a 76,6% (*Scirpus californicus*).

Si comparamos las eficiencias de eliminación de las celdas plantadas con *Phragmites australis* versus las plantadas con *Scirpus californicus*, encontramos que las eficiencias de las primeras para los parámetros DQO, DBO, SST, NH<sub>4</sub><sup>+</sup> y NT superan en promedio 14,2% (invierno) y 10,8% (primavera), las segundas.

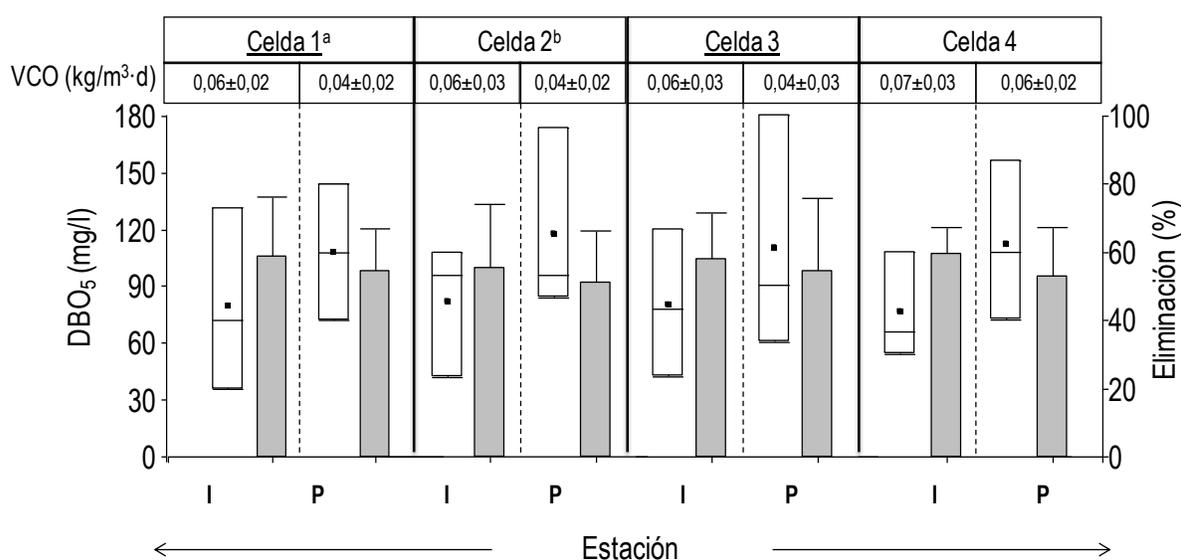
**Tabla 10.** Eficiencias de celdas plantadas con *Phragmites australis* y *Scirpus californicus*.

| Parámetro                     | Eficiencia (%)              |               |                             |               |
|-------------------------------|-----------------------------|---------------|-----------------------------|---------------|
|                               | <i>Phragmites australis</i> |               | <i>Scirpus californicus</i> |               |
|                               | Invierno                    | Primavera     | Invierno                    | Primavera     |
| DBO <sub>5</sub>              | 58,36 ± 15,44               | 54,61 ± 13,09 | 57,37 ± 16,67               | 52,02 ± 14,55 |
| DQO                           | 29,50 ± 18,74               | 53,90 ± 15,99 | 23,21 ± 20,61               | 48,15 ± 22,07 |
| SST                           | 77,18 ± 16,14               | 82,83 ± 22,33 | 73,08 ± 12,05               | 76,70 ± 16,79 |
| SSV                           | 84,58 ± 21,10               | 81,71 ± 15,17 | 72,61 ± 21,67               | 72,80 ± 26,69 |
| NT                            | 47,03 ± 17,19               | 30,30 ± 21,79 | 45,67 ± 11,31               | 26,67 ± 11,97 |
| NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>  | 43,77 ± 17,70               | 31,47 ± 14,22 | 30,19 ± 12,28               | 25,44 ± 15,17 |
| NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>  | ND                          | ND            | ND                          | ND            |
| PT                            | 27,77±19,65                 | 10,86 ± 5,38  | 9,38 ± 5,38                 | 12,63 ± 7,79  |
| PO <sub>4</sub> <sup>-3</sup> | 18,91±13,81                 | 11,60 ± 7,41  | 9,96 ± 10,03                | 10,35 ± 8,64  |

ND: No detectable.

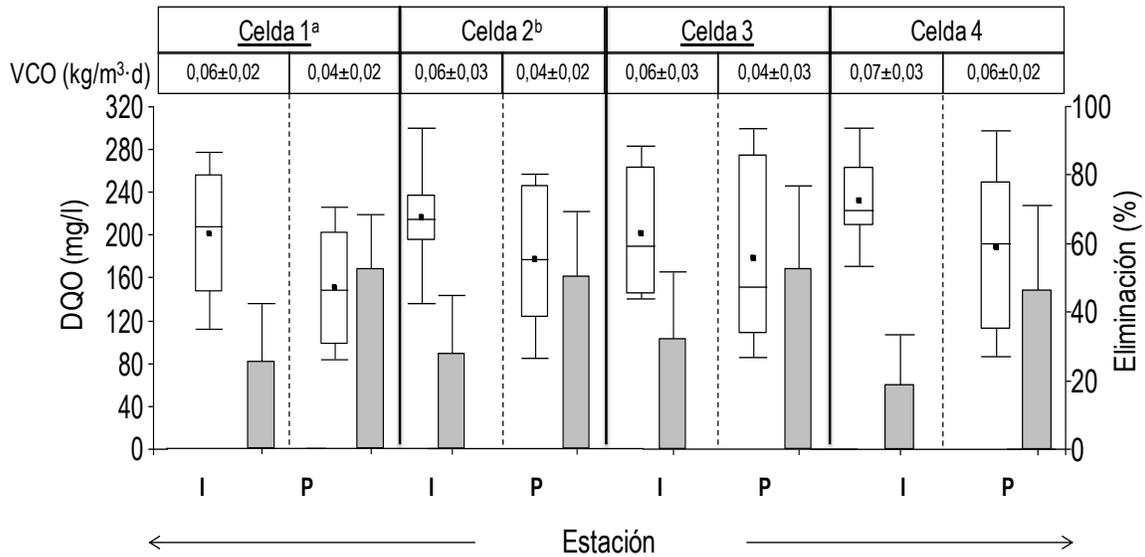
### 6.4.1 Eliminación de materia orgánica y sólidos

En la Figura 19 se presentan las concentraciones de los efluentes y eficiencias de eliminación de DBO<sub>5</sub> registradas en las estaciones en estudio, para cada una de las celdas. Las eficiencias son en promedio para las estaciones de invierno y primavera de 57% y 53% respectivamente, variando entre 30 y 75%. La diferencia de eliminación entre las celdas plantadas con *Phragmites australis* y *Scirpus californicus* es de un 2% mayor en las plantados con *Phragmites australis*.



**Figura 19.** Eliminación de DBO<sub>5</sub> y concentración a la salida de cada celda. Concentración (□), eficiencias (■); I (invierno), P (primavera); plantadas con: <sup>a</sup>*Phragmites australis* (subrayados), <sup>b</sup>*Scirpus californicus*

En la Figura 20 se presentan las concentraciones de los efluentes y eliminación de DQO registradas en las estaciones en estudio, para cada una de las celdas. Las celdas plantadas con *Phragmites australis* presentaron eficiencias de 29,3% en invierno y de un 53% en primavera, mientras que las plantadas con *Scirpus californicus*, presentaron eficiencias en invierno de 23,2% y en primavera de 48,2%. Las eficiencias de eliminación fueron mayores en primavera para todas las celdas, y variaron entre un 10 y 80%, a lo largo del experimento.



**Figura 20.** Eliminación de DQO y concentración a la salida de cada celda. Concentración ( $\square$ ), eficiencias ( $\blacksquare$ ); I (invierno), P (primavera); plantadas con: <sup>a</sup>*Phragmites australis* (subrayados), <sup>b</sup>*Scirpus californicus*

Estudios realizados han demostrado que la eliminación de la materia orgánica en sistemas de HFHSS es óptimo si están bien diseñados, construidos y operados, tanto para la DQO como para la DBO<sub>5</sub>. Respecto a la eliminación de DBO<sub>5</sub>, se han encontrado eficiencias superiores al 75% (Puigagut *et al.*, 2007), mientras que Vymazal (2002) registra un promedio de 88% en estudios realizados en la República Checa. Otros estudios registran eficiencias de DQO hasta un 86% (García *et al.*, 2004; García *et al.*, 2005). Pese a esto reportes, la eliminación de materia orgánica (DBO<sub>5</sub> y DQO) obtenida en la planta piloto fue menor a la registrada por estos autores, pues alcanzó eficiencias menores al 60% en todas las celdas.

En cuanto a las concentraciones, García y Corzo (2008) obtuvieron efluentes con valores de DQO menores a 60 mg/l y para DBO<sub>5</sub> menores a 20 mg/l, mientras que las registradas por cada una de las celdas de la planta piloto fueron superiores a 36 mg/l en el caso de la DBO<sub>5</sub> y a 80 mg/l para la DQO. Esto puede explicarse porque el sistema se encuentra en su puesta marcha, donde gran parte de las poblaciones bacterianas responsables de la eliminación de los contaminantes, se

desarrollan en un periodo que va de 3 a 6 meses, y además con un pleno desarrollo de la vegetación (García y Corzo, 2008). Otro factor determinante es la falta de un pre-tratamiento que logra eficiencias de un 40,1 % en DBO<sub>5</sub> y de un 37 % en DQO (Vymazal and Kröpfelová, 2008), disminuyendo las concentraciones influentes al humedal, y así obtener resultados para la planta piloto más acordes con la literatura científica.

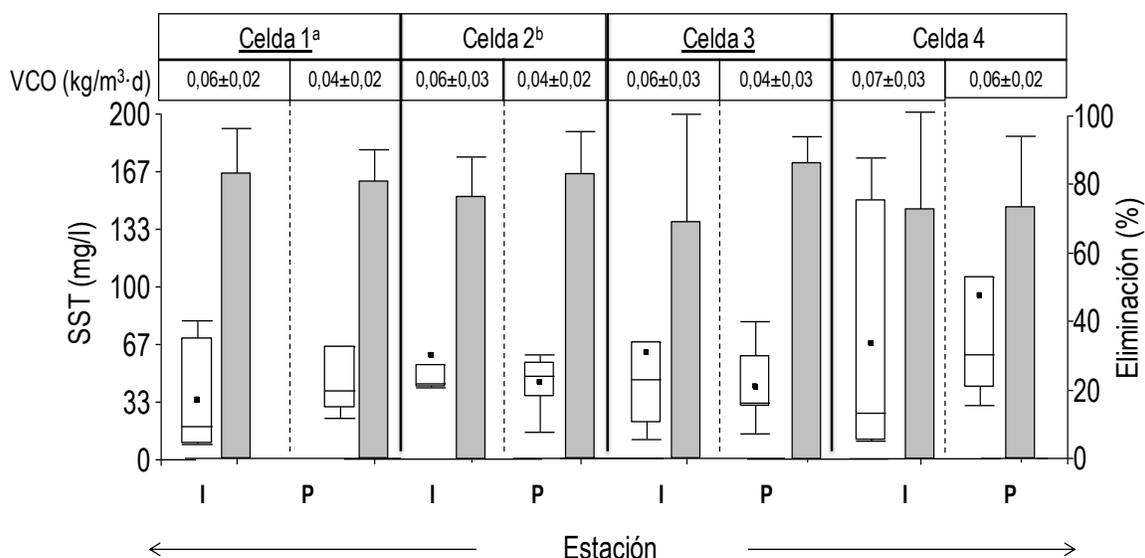
En la Figura 21 se presentan las concentraciones de los efluentes y eliminación de SST registradas en las estaciones en estudio, para cada una de las celdas. Las celdas 1 y 3 presentaron eficiencias de un 76 % en invierno y de 83,6% en primavera, mientras que celdas 2 y 4 presentaron eficiencias de un 74% en invierno y de 78% en primavera.

En la celda 4 las eficiencias son de 72% y las concentraciones a la salida se encuentran en un rango de 10 a 270 mg/l, lo que representa diferencias en comparación a la celda 2 donde las eficiencias son de un 82% en primavera y las concentraciones variaron entre 10 y 167 mg/l, a pesar de estar plantadas con la misma especie (*Scirpus*). Sin embargo, las diferencias pueden deberse a la colonización y sobrevivencia que alcanzó esta especie en las diferentes celdas, ya que en la celda 2 la sobrevivencia de las plantas fue de un 61%, en comparación a la celda 4 donde fue de un 50% (con replantación incluida).

Según Vymazal y Kröpfelová (2008) las eficiencias alcanzadas para SST son de 65 a 85%, con concentraciones inferiores a 22,3 mg/l. Si bien la planta piloto registró eficiencias sobre el 75%, las concentraciones fueron entre 10-80 mg/l para las celdas 1,2 y 3, y de 33-110 mg/l para la celda 4, por lo tanto, inferiores a las registradas por este autor.

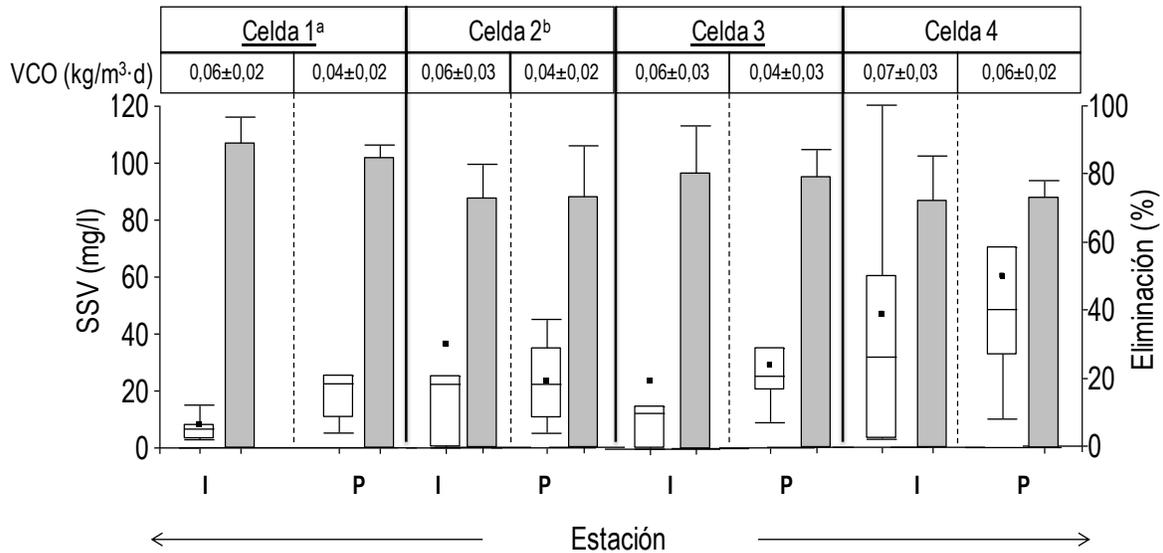
Las diferencias entre los resultados obtenidos en este estudio con los datos de literatura se deben principalmente por la falta de un pre-tratamiento. Según Vymazal y Kröpfelová (2008) la utilización de un pre-tratamiento logra eficiencias de un 45%, mientras que Vymazal (2005) menciona un 95% de eficiencia a la salida de este, logrando así eficiencias de un 99% a la salida del HFHSS. Un pre-tratamiento logra una disminución de la carga de sólidos que ingresa al humedal lo

que genera que las concentraciones de salida del sistema sean de  $9,5\pm 8,0$  mg/l (humedales plantados con las mismas especies de plantas que la planta piloto HFHSS). Las concentraciones efluentes para este trabajo variaron entre 10-110 mg/l, lo que indica la necesidad de pre-tratamiento, y explicaría las diferencias con estudios de HFHSS para el tratamiento de aguas servidas.



**Figura 21.** Eliminación de SST y concentración a la salida de cada celda. Concentración ( $\square$ ), eficiencias ( $\blacksquare$ ); I (invierno), P (primavera); plantadas con: <sup>a</sup>*Phragmites australis* (subrayados), <sup>b</sup>*Scirpus californicus*

En la Figura 22 se presentan las concentraciones de los efluentes y eliminación de SSV registradas en las estaciones en estudio, para cada una de las celdas, alcanzando en todas eficiencias sobre el 75% independientemente de la estación.



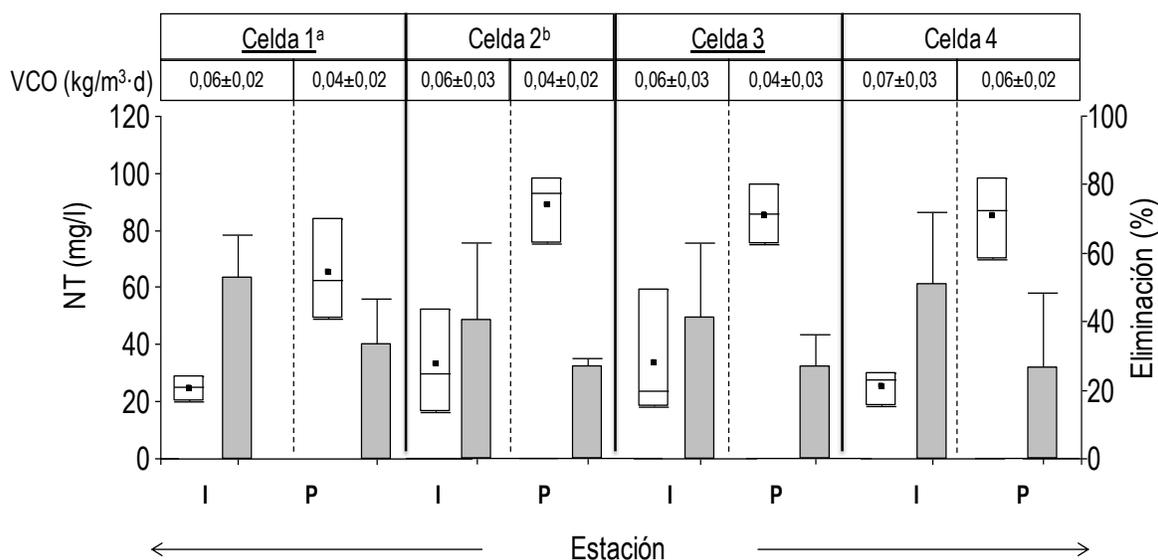
**Figura 22.** Eliminación de SSV y concentración a la salida de cada celda Concentración ( $\square$ ), eficiencias ( $\blacksquare$ ); I (invierno), P (primavera); plantadas con: <sup>a</sup>*Phragmites australis* (subrayados), <sup>b</sup>*Scirpus californicus*.

#### 6.4.2 Eliminación de nutrientes

En la Figura 23 se presentan las concentraciones de los efluentes y eliminación de NT registradas en las estaciones en estudio, para cada una de las celdas. Las celdas 1 y 3 presentaron en promedio eliminaciones de un 38,7%, mientras que en las celdas 2 y 4 fueron de 36,2%, con concentraciones inferiores a 96 mg/l en todas las celdas. Existiendo una disminución en las eficiencias en la primavera, las celdas 1 y 3 disminuyeron su eficiencia de 47% (invierno) a un 30% (primavera), por su parte las celdas 2 y 4 disminuyeron de 45% (invierno) a un 27% (primavera).

En la planta piloto estudiada se registraron en invierno eficiencias entre un 20-50%, mientras que en primavera las eficiencias disminuyeron variando entre un 20-30% en todas las celdas. Por otra parte, estudios realizados en HFSS muestran porcentajes medios de eliminación de NT basados en concentraciones para aguas domesticas de 39,4% (Plaza de los Reyes *et al.*, 2011), similares a las obtenidas en invierno en la planta piloto estudiada.

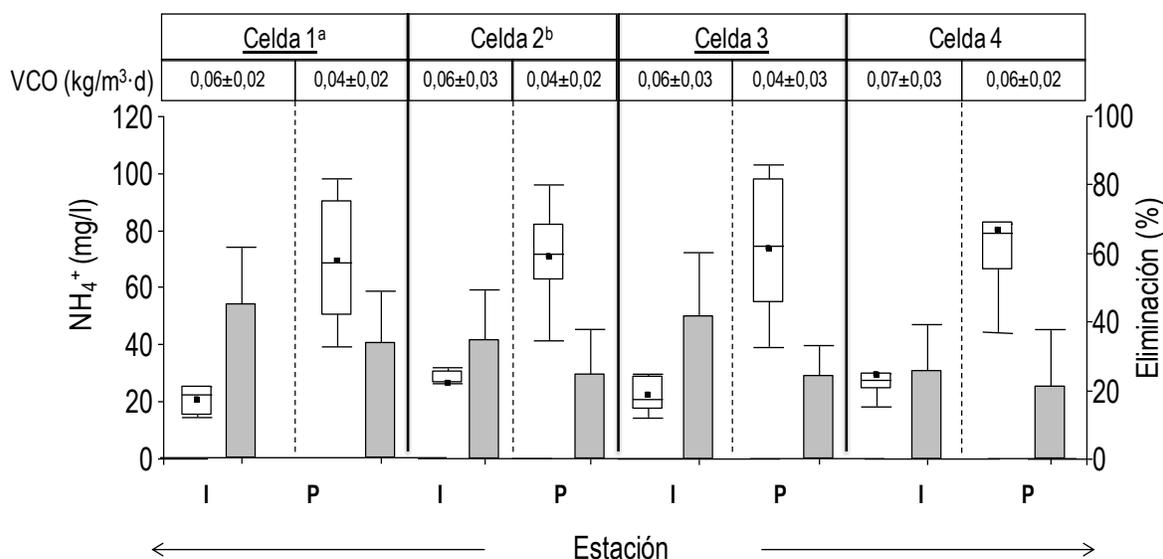
Los sistemas plantados con *Scirpus spp.* captan alrededor de un 12-16% de la eliminación de nitrógeno (Tanner, 2001). Otros estudios han demostrado que mediante la asimilación de macrófitos se elimina como máximo entre un 15 y un 20% del nitrógeno (Stottmeister *et al.*, 2003). Éste porcentaje de asimilación por parte de las plantas, parece representar el total de eliminación logrado por las celdas. Sin embargo, resulta contradictorio que la eliminación de nitrógeno resulte un 10% menor en primavera, dado el crecimiento de las plantas, lo que debió haber provocado una mayor asimilación de nitrógeno por de éstas, además de una mejora en la translocación de oxígeno a las raíces, aportando al otro mecanismo de remoción de nitrógeno en este tipo de humedal, y que está relacionado con la nitrificación/desnitrificación (aunque los estudios muestran que las cantidades de oxígeno en los rizomas limitan la nitrificación completa) (Plaza de los Reyes *et al.*, 2011).



**Figura 23.** Eliminación de NT y concentración a la salida de cada celda. Concentración ( $\square$ ), eficiencias ( $\blacksquare$ ); I (invierno), P (primavera); plantadas con: <sup>a</sup>*Phragmites australis* (subrayados), <sup>b</sup>*Scirpus californicus*

En la Figura 24 se presentan las concentraciones de los efluentes y eliminación de  $\text{NH}_4^+$  registradas en las estaciones en estudio, para cada una de las celdas. La eliminación de  $\text{NH}_4^+$  en las celdas 1 y 3 fue de 35,8%, en las celdas 2 y 4 fue de 26,1% en promedio.

La nitrificación es el proceso de transformación principal para la reducción de  $\text{NH}_4^+$  en los humedales construidos, transformación que resulta en la transformación de nitrógeno amoniacal en nitratos por oxidación, necesitando 4,6 mg de  $\text{O}_2$  para oxidar 1 mg de nitrógeno amoniacal a nitrato (García *et al.*, 2004). En las celdas de la planta piloto la disponibilidad de oxígeno es limitada (menor a 1mg/l) y el POR es menor a -50 mV, mostrando condiciones anoxicas y anaeróbicas (WEF, 2008) que reducen la capacidad de eliminar el  $\text{NH}_4^+$  por nitrificación en el sistema. Esto explica las eficiencias obtenidas en este estudio de 25-40% en invierno y 20-30% en primavera, eficiencias que se corresponden con las obtenidas en otros trabajos que generalmente son del 30% (Vymazal, 2010).



**Figura 24.** Eliminación de  $\text{NH}_4^+$  y concentración a la salida de cada celda. Concentración ( $\square$ ), eficiencias ( $\blacksquare$ ); I (invierno), P (primavera); plantadas con: <sup>a</sup>*Phragmites australis* (subrayados), <sup>b</sup>*Scirpus californicus*.

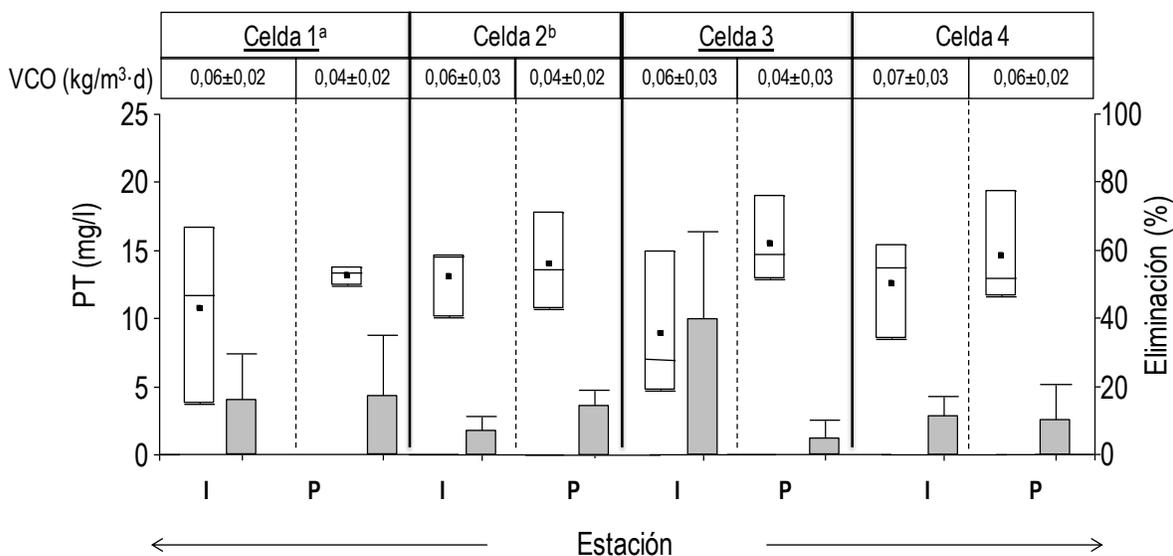
En los efluentes de cada una de las celdas no se detecta concentraciones de nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ), lo que corresponde con lo argumentado por García y Corzo (2008). Esto debido a que en el proceso de nitrificación, la oxidación de  $\text{NH}_4^+$  a  $\text{NO}_3^-$ , se lleva a cabo por bacterias nitrificantes que requieren de oxígeno (4,57 mg de  $\text{O}_2$  por cada mg de  $\text{NH}_4^+$ ) para llevar a cabo la reacción (Vymazal and Kröpfelová, 2008a).

En la Figura 25 se presentan las concentraciones de los efluentes y eliminación de PT registradas en las estaciones en estudio, para cada una de las celdas. Las concentraciones fueron mayores a 3,7 mg/l llegando a concentraciones de 17 mg/l. Las eficiencias de eliminación del PT para las celdas 1 y 3 fue de 27% y de un 11% para las estaciones de invierno y primavera respectivamente, las celdas 2 y 4 fue de 10% en invierno y de un 13% en primavera. Los resultados obtenidos en las celdas de la planta piloto muestran eficiencias inferiores a 30% en invierno y a un 15% en primavera.

Vymazal (2005) da a conocer tasas de eliminación de fósforo en HFHSS del 32%. Otros estudios señalan que los porcentajes de eliminación de fósforo obtenidos, no superan el 15% (García *et al.*, 2004), siendo acorde con lo obtenido en este trabajo. Según Vymazal y Kröpfelová (2008) la eliminación de PT en HFHSS plantados con *Scirpus spp.* alcanzan eficiencias de 61% mientras que humedales plantados con *Phragmites australis* son de 37%, que son superiores en más de 20% a las eficiencias obtenidas en este trabajo.

La eliminación del fósforo en HFSS se puede dar por procesos bióticos y abióticos. Los bióticos incluyen la asimilación por las plantas y microorganismos, y la mineralización de los restos de vegetación y del fósforo orgánico, debido a estos procesos se alcanzan en el mejor de los casos, una eliminación del 10% del fósforo (García *et al.*, 2004). Los procesos abióticos incluyen la sedimentación, la adsorción por el sustrato y los intercambios entre el suelo y el agua residual que circula (Kadlec y Wallace, 2009). Para la eliminación de fósforo de forma continuada por procesos abióticos, se requiere la utilización de sustratos específicos que lo retengan los cuales deben ser cambiados periódicamente. Los

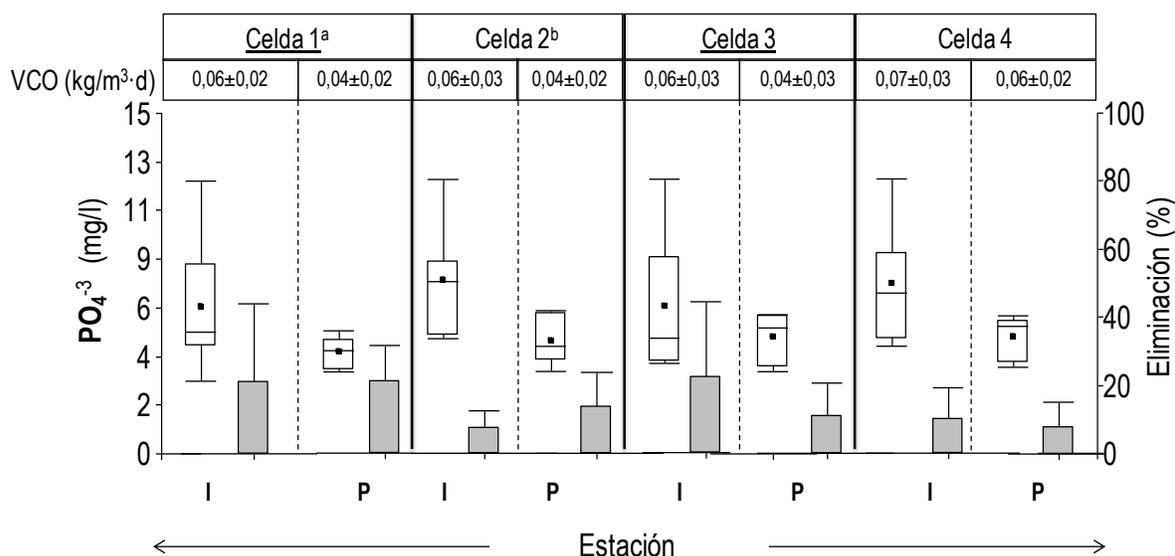
sustratos de grava no suelen contener grandes cantidades de Fe, Al y Ca por lo que no facilitan la precipitación y/o absorción de fósforo (Vymazal, 2007), esto explica además las bajas eficiencias alcanzadas en las celdas de la planta piloto, inferiores al 15% en primavera que correspondería principalmente a una asimilación por parte de las plantas (García *et al.*, 2004).



**Figura 25.** Eliminación de PT y concentración a la salida de cada celda. Concentración (□), eficiencias (■); I (invierno), P (primavera); plantadas con: <sup>a</sup>*Phragmites australis* (subrayados), <sup>b</sup>*Scirpus californicus*.

En la Figura 26 se presentan las concentraciones de los efluentes y eficiencias de eliminación de  $\text{PO}_4^{-3}$  registradas en las estaciones en estudio, para cada una de las celdas. Se registraron para las celdas 1 y 3 concentraciones entre 3-12 mg/l y eficiencias de 20% en invierno e inferiores al 16% en primavera, por otro lado las celdas 2 y 4 tuvieron concentraciones entre 4-12 mg/l y eficiencias de un 8,7% en invierno e inferiores al 11% en primavera.

El  $\text{PO}_4^{-3}$  es una de las formas en las que se encuentra el fósforo en los humedales. Se ha observado que después de la puesta en marcha se obtiene una buena eficiencia de eliminación del  $\text{PO}_4^{-3}$  para después reducirse rápidamente en poco tiempo. Esto es debido a que el medio granular limpio tiene capacidad de adsorción y favorece la precipitación química de contaminantes disueltos, pero estas características se van perdiendo rápidamente (García y Corzo, 2008), por lo que las eficiencias obtenidas en las celdas 1 y 3 del humedal estudiado tienden a disminuir en el tiempo. El fósforo, como fosfato ( $\text{PO}_4^{-3}$ ) es adsorbido del suelo rápidamente por las raíces de la planta, por lo que puede inferirse como el sistema de eliminación principal presentado en la planta piloto (Heldt and Heldt, 2005).



**Figura 26.** Eliminación de  $\text{PO}_4^{-3}$  y concentración a la salida de cada celda. Concentración ( $\square$ ), eficiencias ( $\blacksquare$ ); I (invierno), P (primavera); plantadas con: <sup>a</sup>*Phragmites australis* (subrayados), <sup>b</sup>*Scirpus californicus*.

## **6.5 Indicadores de sustentabilidad**

A continuación se presenta los resultados obtenidos para cada uno de los indicadores:

### **6.5.1 Indicadores ambientales**

En la Tabla 11 se presentan los indicadores ambientales: consumo de energía, porcentaje de energía consumida en la PTAS respecto al consumo total de energía de la población abastecida, lodos producidos y cumplimiento de los DS 90 tabla 1.

Las plantas convencionales tienen una potencia instalada entre 0,004-0,008 Kw/hab, un valor bastante menor que el presentado por el HFHSS con una potencia instalada de 0,782 Kw/hab, esto cambia al comparar el consumo de energía, pues el HFHSS presenta un consumo de 18,23 Kw-hr/hab·año menor que las plantas convencionales cuyos consumos van desde 27,24-73,37Kw-hr/hab·año. Estudios realizados a HFHSS con tratamiento primario obtuvieron consumos de energía de 6,2-17,7 Kw-hr/hab·año, valores cercanos a los obtenidos por este estudio (Fábregas, 2006). El sistema de tratamiento convencional que presenta un mayor consumo de energía eléctrica por habitante al año es Quilleco con 73,37 Kw-hr/hab·año, reflejando como el consumo de energía aumenta al utilizar un sistemas de lodos activados para una población reducida, ya que la PTAS de Hualqui con el mismo sistema de tratamiento pero con una población mayor tiene un consumo de 27,24 Kw-hr/hab·año.

En cuanto al indicador que representa la relación entre la energía consumida en la PTAS respecto al consumo total de energía que gasta la población abastecida, encontramos que las plantas convencionales dirigidas a pequeñas poblaciones (Quilleco y Negrete), varían entre 8-13%. Por otra parte, el HFHSS representa un 4% y la PTAS de Hualqui un 5,14%.

Al observar el indicador de productos químicos e insumos la PTAS de Quilleco tiene un mayor consumo, con 0,90 Kg/hab·año (gas cloro) y 0,15 l/hab·año

(petróleo), siendo ambos más de 4 veces los valores obtenidos para la PTAS de Hualqui, evidenciando una vez más (al igual que para la energía) el mayor consumo para poblaciones más pequeñas. Por otra parte, la planta piloto del tipo HFHSS no presenta consumos de cloro. Esto debido a que no se estudio la presencia de coliformes totales ni fecales que son utilizados como indicadores de calidad del agua. Tanto May *et al.* (1990) y Butler *et al.* (1993) encontraron que el número de bacterias aerobias y coliformes disminuye linealmente con la longitud del humedal con vegetación. De hecho, la primera mitad de los humedales elimina aproximadamente el 80% de coliformes fecales (García *et al.*, 2004). Según García y Corzo (2008) los HFHSS logran disminuciones de hasta 2 unidades logarítmicas/100 ml. Considerando esta disminución, y una cantidad aproximada de coliformes fecales en las aguas servidas de  $10^6$ - $10^8$  NMP/100ml (Metcalf & Eddy, 2003), se encontró que la dosis aproximada de cloro necesaria seria de 0,6-1,0 mg/L, para obtener un efluente menor a  $10^3$  NMP/100 ml de coliformes fecales, límite máximo requerido en el DS 90/tabla 1. Para mayores detalles ver anexo 2.

Para el indicador consumo de polímeros solo se obtuvieron datos de la PTAS Hualqui presentando un consumo de 0,027 Kg/hab·año.

Al comparar los parámetros que cumplen con los límites de la Tabla 1 del DS 90 respecto al total de muestras, los parámetros de  $DBO_5$  y SST, el HFHSS es el que presenta menor cumplimiento con solo un 7,17% ( $DBO_5$ ) y un 41,66% en SST, esto se debe a estar en su etapa de puesta marcha.

En cuanto al porcentaje de cumplimiento del parámetro físico-químico  $DBO_5$ , las que presentar un mayor cumplimiento son las PTAS de Hualqui (95,70%) y Negrete (98,17%). Respecto a SST es mayor a un 98% en todas plantas convencionales. Muga y Mihelcic (2008) utilizaron este indicador encontrando que para los sistemas de lodos activados y lagunas el nivel de cumplimiento para los parámetros  $DBO_5$  y SST están entre un 90-95%, similares a los encontrados por las PTAS convencionales relacionadas en este trabajo.

Los valores del indicador de lodos muestran que el HFHSS no generó lodos durante el tiempo de operación, mientras que la PTAS de Quilleco genera un total

de 0,25 m<sup>3</sup>/hab·año en comparación a los 0,49 m<sup>3</sup>/hab·año de la planta de Hualqui. Respecto a la planta de Negrete, en la DIA se especifica que la laguna será limpiada cada 2 años o cuando el volumen de lodos en ellas impida el buen funcionamiento del sistema, considerando esto se tiene que la cantidad lodo a generar podría ser de 0,37 m<sup>3</sup>/hab·año.

**Tabla 11.** Indicadores ambientales.

| PTAS     | Consumo de energía                |                             |  | Productos químicos e Insumos |                           |                         | Lodo                              | Cumplimiento DS 90<br>tabla 1 |         |
|----------|-----------------------------------|-----------------------------|--|------------------------------|---------------------------|-------------------------|-----------------------------------|-------------------------------|---------|
|          | Potencia<br>Instalada<br>(Kw/hab) | Energía (Kw-<br>hr/hab·año) | Consumo PTAS<br>respecto al<br>consumo total (%) | Gas cloro<br>(Kg/hab·año)    | Polímeros<br>(Kg/hab·año) | Petróleo<br>(l/hab·año) | Lodo<br>(m <sup>3</sup> /hab.año) | DBO <sub>5</sub> (%)          | SST (%) |
| Hualqui  | 0,004                             | 27,240                      | 5,140  | 0,181 ± 0,018                | 0,027 ± 0,003             | 0,012±0,005             | 0,490 ± 0,110                     | 95,700                        | 98,910  |
| Negrete  | 0,004                             | 34,330                      | 8,240  | 0,355 ± 0,033                | --                        | 0,079±0,005             | 0,370                             | 98,170                        | 99,070  |
| Quilleco | 0,008                             | 73,370                      | 13,840   | 0,901 ± 0,213                | --                        | 0,150±0,077             | 0,250± 0,070                      | 89,930                        | 100,000 |
| HFHSS    | 0,782                             | 18,230                      | 4,370  | 0,035 - 0,058 <sup>a</sup>   | 0,000                     | 0,000                   | 0,000                             | 7,170                         | 41,660  |

Fuente: ESSBIO (2010); SISS (2007); SEA (2011).<sup>a</sup>Rango originado por la dosificación de 0,6 – 1,0 mg/L

**Tabla 12.** Características de las PTAS, consideraciones para la elaboración de los indicadores ambientales y económicos.

| PTAS     | Vida<br>útil<br>(año) | Puesta<br>en<br>marcha<br>(meses) | Población<br>considerada<br>(hab) | Consumo<br>energía<br>(Kw-hr/año) | Potencia<br>instalada<br>(Kw) | Costo de operación y mantención (M\$/año) |       |          |   |           |            |
|----------|-----------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------|---|-------|----------|---|-----------|------------|
|          |                       |                                   |                                   |                                   |                               | Energía<br>eléctrica                      | Cloro | Polímero | Transporte y<br>disposición de<br>lodos | Operarios | Mantención |
| Hualqui  | 10 <sup>a</sup>       | 3                                 | 14.588,00                         | 397.425,84                        | 57,70                         | 15,42                                     | 1,32  | 1,38     | 15,52                                   | 11,34     | 7,29       |
| Negrete  | 15 <sup>b</sup>       | 3                                 | 5.691,00                          | 195.348,00                        | 22,40                         | 4,54                                      | 0,36  | 0,49     | 13,98                                   | 6,17      | 2,20       |
| Quilleco | --                    | --                                | 1.767,00                          | 129.648,00                        | 14,90                         | 5,76                                      | 0,19  | --       | 14,00                                   | 5,48      | 1,90       |
| HFHSS    | 20-30 <sup>c</sup>    | 12 - 48                           | 1,24                              | 22,60                             | 0,97                          | 0,00125                                   | <0,01 | 0,00     | 0,00                                    | 0,96      | 0,00       |

Fuente: ESSBIO (2010); SISS (2007); SEA (2011).

<sup>a, b</sup> Valores obtenidos de las DIA de estas PTAS, <sup>c</sup> Valor obtenido en literatura.

### 6.5.2 Indicadores económicos

En la Tabla 12 se presentan la especificación de los costos de operación y mantención para cada una de las PTAS.

La PTAS que genera mayores costos de mantención es la PTAS de Hualqui, relacionado con la cantidad de población que abastecen, donde sus costos alcanzan un total de 52,26 millones de pesos al año (M\$/año), mientras que el HFHSS genera costos de mantención y operación de 0,99 M\$/año, esto debido al nulo gasto en mantención y en polímeros y solo un mínimo de consumo en cloro (\$19.000 - 32.000/año) y energía (\$1.250/año). Tanto Vymazal (2010) como Kadlec y Wallace (2009) indican que los costos de mantención de un humedal debieran ser nulos, esto debido a que no hay compras de productos químicos.

En cuanto al indicador costo de operación y mantención, el HFHSS es de \$800.934 /hab·año, generados en un 99% por el pago del operador (un estimado de 12 h a la semana). Es importante aclarar que este valor de cálculo corresponde a la operación actual de la planta piloto que trata a 1,24 habitantes-equivalente, y que el pago de este operador puede ser aplicado hasta sistemas que operan hasta 2.000 habitantes, con lo que el valor obtenido sería de \$480/hab·año, más acordes a la realidad de los sistemas de humedales de no emplear personal altamente capacitado ni requerimientos de tiempo completo (Kadlec y Wallace, 2009). Según Tsihrintzis y Gikas (2010) consideran que el salario del operador es alrededor de un 86% del costo total de la operación de humedales construidos, mientras que en los sistemas convencionales los costos por el personal representan el 30%, la energía un 50%, productos químicos un 11%, mantenimiento y otros 8,1% (Tsagarakis *et al.*, 2002). A diferencia de los humedales construidos los sistemas convencionales requieren personal capacitado dividido en 3 tres categorías principales: científicos (con un título de educación superior), técnicos y no calificados.

Al comparar los costos de operación y mantención entre las plantas convencionales encontramos que la PTAS de Hualqui gasta \$3.582,61/hab·año

mientras que el gasto de la planta de Quilleco es de \$15.466,11/hab·año, esto representa un aumento de un 76,83%, donde ambas plantas poseen el mismo sistema de tratamiento (lodos activados), pero nuevamente las diferencias radican en el segmento de población a la cual abastecen, demostrando un incremento de los costos de operación y mantención al utilizar sistemas de lodos activados para abastecer a localidad rurales. La PTAS de Negrete con su sistema de lagunas facultativas presenta un costo de \$4.873,90/hab·año. Muga y Mihelcic (2008) encontraron que los costos de operación y mantención de sistemas de lodos activados son entre 4,0-5,5 veces mayor que los sistemas de lagunas.

Los detalles del cálculo del indicador costo de operación y mantención del HFHSS se encuentran especificados en el anexo 4.

En la Tabla 13 se presentan los valores obtenidos para los indicadores económicos: costos de inversión (\$/hab) y costos de operación y mantención (\$/hab·año)

En cuanto al indicador costos de inversión el HFHSS (detalles en el anexo 3) son superiores al resto de las PTAS siendo de 2,32 millones de pesos por habitante (M\$/hab) y de 2,00 M\$/hab sin considerar los costo debido a equipos de bombeo, en comparación a los 0,19 M\$/hab del sistema de lagunas y de los 0,07 M\$/hab de los lodos activados. A pesar que los costos de inversión son mayores en el HFHSS que en resto de las plantas convencionales, Vymazal y Kröpfelová (2008) especifican que estos costos deberían disminuir con el aumento en el tamaño (área) de los humedales construidos, especificando que los costos de inversión para HFHSS están dados por la Ecuación 7:

$$\text{Costos} \left( \frac{\text{€}}{\text{PE}} \right) = -297 \ln \text{PE} + 2103 \quad \text{Ecuación 7}$$

Si se considera esta ecuación, los costos de inversión para un máximo de 1.000 PE da como resultado 51,39 €, tomando como valor de un euro (\$690,24) da un costo de 0,035 (M\$/PE) este valor es 70 veces menor al costo de inversión ocupados en la planta piloto (2,32 M\$/hab), lo que demuestra que el costo de

inversión disminuye al aumentar la población abastecida, y resulta competitivo al compararlo con los sistemas convencionales. Se debe considerar que el costo de inversión puede variar hasta en un 50% dependiendo del lugar y condiciones geográficas en el que sea construido (Rousseau *et al.*, 2004).

**Tabla 13.** Indicadores económicos.

| PTAS     | Operación y mantención (\$/hab·año) <sup>a</sup> | Inversión (M\$/hab) <sup>b</sup>              |
|----------|--|---|
| Hualqui  | 3.582,61   | 0,07  |
| Negrete  | 4.873,90   | 0,19  |
| Quilleco | 15.466,11  | ---   |
| HFHSS    | 800.934,24 (480,62) <sup>c</sup>                 | 2,32 (2,00) <sup>d</sup> (0,035) <sup>e</sup> |

<sup>a,b</sup>Valores reales al año 2011 ajustado con el IPC del año 2007, <sup>c</sup>Indica el valor que puede alcanzarse para una población de 2.000 habitantes, <sup>d</sup>Costo de inversión sin considerar equipos de bombeo, <sup>e</sup>Indica el valor que puede alcanzarse para una población de 1.000 habitantes.

### 6.5.3 Indicadores sociales

En la Tabla 14 se encuentran los porcentajes de población a la cual prestan servicios cada una de las PTAS, junto a las densidades poblacionales de las localidades en las cuales se encuentran ubicadas. Aquellas poblaciones que presentan una mayor densidad poblacional presentan también mayores niveles de cobertura. Por ejemplo, la PTAS de Hualqui presenta una cobertura de 76,05% y una densidad poblacional de 35 hab/km<sup>2</sup>, mientras que la PTAS de Quilleco presenta una cobertura de 16,94% y una densidad poblacional de 9 hab/km<sup>2</sup>, reflejando una relación directa entre la cobertura que alcanzan las plantas de tratamiento y las densidades poblaciones. Por esto, se hace necesaria la implementación de soluciones individuales para poblaciones de baja densidad habitacional (Carrasco, 2011) menor a 2.000 habitantes. Según Muga y Mihelcic (2008) del tamaño de una comunidad depende el tipo de sistema de tratamiento seleccionado, su capacidad, y de ahí su sustentabilidad.

En cuanto a la calidad de vida no se pueden obtener conclusiones al no depender únicamente de la densidad de población y de la cobertura que alcanzan las PTAS, ya que influyen otros factores tales como número de interrupciones del servicio por año, número de reclamos, etc. (Fábregas, 2006), los cuales no fueron estudiados en este trabajo.

**Tabla 14:** Indicadores sociales.

| <b>PTAS</b> | <b>Población servida/Población total<br/>(%)</b> | <b>Densidad poblacional<br/>(Hab/km<sup>2</sup>)<sup>b</sup></b> |
|-------------|--|--|
| Hualqui     | 76,05  | 35,00  |
| Quilleco    | 16,94  | 9,00   |
| Negrete     | 47,84  | 43,00  |
| HFHSS       | 76,05 <sup>a</sup>                               | 35,00  |

<sup>a</sup>Se toma en el HFHSS la misma cobertura que para Hualqui; <sup>b</sup>INE (2002)

## 7 CONCLUSIONES

- Los parámetros hidráulicos operados están dentro de los recomendados para un buen funcionamiento del sistema.
- Tanto el OD ( $< 2$  mg/l) como POR ( $< -50$  mV) registrados en las celdas de la planta piloto, dan cuenta que el sistema opera bajo condiciones anaeróbicas, condiciones que no son favorables para las eliminaciones de NT y  $\text{NH}_4^+$ .
- La especie *Phragmites australis* presenta una mayor adaptabilidad y facilidad de crecimiento en sustrato de grava, lo que la hace ser un mejor candidato al momento de elegir el tipo de planta a utilizar en la construcción de HFHSS para tratar aguas servidas en sectores rurales a escala industrial.
- La planta piloto del tipo HFHSS en su puesta en marcha presenta eliminaciones inferiores al 70% para materia orgánica y sólidos, logrando mejores eficiencias la especie *Phragmites australis* con diferencias de hasta 15% respecto a la especie *Scirpus californicus*. Las eliminaciones de nutrientes son inferiores al 40% en el caso de NT y  $\text{NH}_4^+$  e inferiores al 30 % para el PT y  $\text{PO}_4^{-3}$ , eficiencias relacionadas principalmente al crecimiento de la vegetación.
- La elección de HFHSS para el tratamiento de aguas servidas rurales es sustentable ambientalmente, en la medida que presenta consumo energético 4 veces menor que un sistema convencional dirigido a poblaciones rurales, nulos consumos de productos químicos e insumos y no produce lodos. Si bien actualmente no cumple a cabalidad el DS 90, es de esperarse que mejore a medida que el sistema alcance su madurez.

- De acuerdo a lo descrito anteriormente, los HFHSS evaluados en la planta piloto durante su puesta en marcha, disminuyen la carga contaminante, y constituyen una alternativa viable (técnica y económicamente) a la búsqueda de soluciones para los problemas de tratamiento de aguas servidas en los sectores rurales de la Región del Biobío.

## **8 RECOMENDACIONES**

- Es necesaria la implementación de un tratamiento primario para evitar problemas operacionales relacionados con los equipos de bombeo, llaves de entrada de cada una de las celdas y aparición de clogging, así como también incrementar la eliminación de  $\text{DBO}_5$ , DQO, y SST.
- Se debe realizar un estudio económico más acabado y específico en cuanto a los costos de inversión, operación y mantención en el cual se puedan considerar los factores de vida útil y tiempo de puesta en marcha ya que estos influyen directamente en estos indicadores.

## 9 BIBLIOGRAFIA

Akratos, C., Gikas, G., and Tsihrinztis, V. 2007. Performance monitoring of a vertical flow constructed wetland treating municipal. Laboratory of Ecological Engineering and Technology. Department of Environmental Engineering, School of Engineering Democritus University of Thrace, 67100 Xanthi, Greece.8pp.

American Public Health Association (APHA). 1998. Standard methods for the examination of water and wastewater 20<sup>th</sup> Ed. (Clescerl, L.; Greenberg, A.; Eaton, A., ed) Washington, D.C,1325 pp.

Arias, C., y Brix, H. 2003. Humedales construidos para el tratamiento de aguas residuales. Revista Ciencia e Ingeniería Neogranadina 13 (4), 17-24.

Baraño, P., y Tapia, L. 2004. Tratamiento de las Aguas Servidas: Situación en Chile. Ciencia & Trabajo 6(13), 111-117.

Barrantes, 2006. Identificación y uso de variables e indicadores: Conceptos básicos y ejemplos. Instituto de Políticas para la Sustentabilidad (IPS), Costa Rica. 22pp.

Bécares, E. 2004. Función de la vegetación y procesos de diseño de humedales construidos de flujo subsuperficial horizontal y flujo superficial”. En: Nuevos Criterios para el Diseño y Operación de Humedales Construidos, (García, J., Morató, J. y Bayona, J., eds.), CPET-Centro de Publicaciones del Campus Nord, Universidad Politécnic de Catalunya, Barcelona, 51-62pp.

Berland, N. 2005. Evaluación del tratamiento de aguas servidas mediante la solución particular de fosa séptica- infiltración de aguas servidas en viviendas rurales de la región Metropolitana. Tesis para optar para optar al Título de Ingeniero de ejecución en ambiente, Universidad de Santiago de Chile, Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Geográfica. 128pp.

Butler, J., Ford, M., May, E. 1993. Gravel bed hydroponic sewage treatment: performance and potencial. In: Constructed Wetlands for Water Quality Improvement, G.A. Moshri (ed). Crc Press, Boca Raton, Florida, pp. 237-247.

Caracterización socioeconómica nacional (CASEN), 2009. Encuesta de Caracterización Socioeconómica Nacional, Vivienda, Hogares por Zona según Región y Eliminación de excretas, Ministerio de Panificación, Gobierno de Chile. Fijación Octubre del 2011. Adquirido desde: <http://www.mideplan.gob.cl/casen/Estadisticas/vivienda.html>.

Cárcamo, A. 2007. Alcantarillado de bajo costo en el sector rural Fijación Enero del 2012. Adquirido desde: [http://www.aprchile.cl/pdfs/ALC\\_RURAL\\_ACB\\_p.pdf](http://www.aprchile.cl/pdfs/ALC_RURAL_ACB_p.pdf).

Carrasco, W. 2011. Políticas públicas para la prestación de los servicios de agua potable y saneamiento en áreas rurales. Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), Naciones Unidas, Santiago de Chile. Fijación Marzo del 2012. Adquirido desde: <http://www.eclac.cl/publicaciones/xml/3/43003/Lcw388e.pdf>

Castro, R. y Pérez, R. 2009. Saneamiento rural y salud, Guía para acciones a nivel local Guatemala. Fijación Noviembre del 2011. Adquirido desde: <http://www.ops.org.bo/textocompleto/isa30732.pdf>.

CMMAD (Comisión Mundial del Medio Ambiente y del Desarrollo). 1988. Nuestro futuro común (Informe Brundtland), Madrid, Alianza Editorial. Fijación Enero del 2012. Adquirido desde: <http://redalyc.uaemex.mx/pdf/727/72715211.pdf>

Comisión económica para América latina y el Caribe (CEPAL). 2001. Indicadores de sustentabilidad ambiental y de desarrollo sostenible: estado del arte y perspectivas. 122 pp.

Comisión nacional de energía (CNE). 2012. Serie Precio Medio de Mercado Sistema Interconectado Central (PMM SIC). Fijación Enero del 2012. Adquirido

desde:

[http://www.cne.cl/cnewww/opencms/07\\_Tarificacion/01\\_Electricidad/OTros\\_1/Precios\\_nudo/PMM/pmm\\_sic.html](http://www.cne.cl/cnewww/opencms/07_Tarificacion/01_Electricidad/OTros_1/Precios_nudo/PMM/pmm_sic.html)

Cooper, P. 2005. The performance of vertical flow constructed wetland systems with special reference to the significance of oxygen transfer and hydraulic loading rates. *Water Air & Soil Pollution* 51 (9), 91-97.

Crites, R., Middlebrooks, J., Reed, S. 2006. *Natural Wastewater Treatment Systems*, CRC Press Taylor & Francis Group 6000 Broken Sound Parkway NW, Suite 300 Boca Raton, FL 33487-2742.

Curia, A., Koppe, J., Costa, J., Féris, L., and Gerber, W. 2010 Application of Pilot-Scale-Constructed Wetland as Tertiary Treatment System of Wastewater for Phosphorus and Nitrogen Removal. *Water Air & Soil Pollution* 218(1-4), 131-143.

Di Marzio, W. 2004. Microbiología de lodos activados: una herramienta retrospectiva y predictiva de la depuración de efluentes. *Revista Ingeniería sanitaria y ambiental* N° 73, Asociación internacional de ingeniería sanitaria (AIDIS). 2 pp.

ESSBIO. 2007. Memoria Anual, Empresa de servicios sanitarios de la Región del Biobío, ESSBIO S.A. | GRI 2007.

ESSBIO. 2010. Reconstruyendo nuestro servicio. Empresa de servicios sanitarios de la Región del Biobío, ESSBIO S.A. Fijación Julio del 2011. Adquirido desde: <http://www.eula.cl/doc/Presentacion%20essbio.pdf>.

Fábregas, A. 2006. Aplicación de indicadores de sustentabilidad a estaciones depuradoras de aguas residuales de poblaciones rurales de Portugal. Tesis para optar al título de ingeniero ambiental, Universidad Politécnica de Catalunya, España. 225pp.

Fernández, F. 2006. Indicadores de sustentabilidad y medio ambiente; método y escala. Sevilla, dirección de educación ambiental y sustentabilidad. España. 238pp.

Figueroa, R., Suarez, M., Andreu, A., Ruiz, V., and Vidal, M. 2009. Wetlands ecological characterization of central Chile semi-dry area *Gayana* 73(1), 1-9.

Fuenzalida, E. 2011. Sistemas socio-técnicos para el abastecimiento de aguas domiciliarias en el periurbano de la Región Metropolitana de Santiago. Tesis para optar al título de Magíster en Asentamientos Humanos y Medioambiente, Pontificia Universidad Católica de Chile, Instituto de Estudios Urbanos y Territoriales. 203 pp.

Fundación Chile. 2011. Tecnología de Lagunas Aireadas, Tecnología Convencional de tipo Biológico. Fijación Noviembre del 2011. Adquirido desde: [http://www.sinia.cl/1292/articles-49990\\_29.pdf](http://www.sinia.cl/1292/articles-49990_29.pdf).

Fundación Chile. 2011. Tecnología de Lodos Activados, Tecnología Convencional de tipo Biológico. Fijación Noviembre del 2011. Adquirido desde: [http://www.sinia.cl/1292/articles-49990\\_30.pdf](http://www.sinia.cl/1292/articles-49990_30.pdf).

García, J., Aguirre, P., Mujeriego, R., Huang, Y., Ortiz, L., and Bayona, J. 2004a. Initial contaminant removal performance factors in horizontal flow reed beds used for treating urban wastewater. *Water Research* 38(7), 1669-78.

García, J., Morató, J. y Bayona, M. 2004b. Nuevos criterios para el diseño y operación de humedales construidos: una alternativa de bajo coste para el tratamiento de aguas residuales. Barcelona: Universidad Politécnica de Catalunya, 7 pp.

García, J., Aguirre, P., Barragan, J., Mujeriego, R., Matamoros, V., and Bayona, J. 2005. Effect of key design parameters on the efficiency of horizontal subsurface flow constructed wetlands. *Ecological Engineering* 25(4), 405-418.

Garcia, J., Rousseau, D., Caselles-Osorio, A., Story, A., Pauw, N., and Vanrolleghem, P. 2007. Impact of Prior Physico-Chemical Treatment on the Clogging Process of Subsurface Flow Constructed Wetlands: Model-Based Evaluation. *Water Air & Soil Pollution* 185(1-4), 101-109.

García, J. y Corzo, A. 2008. *Depuración con Humedales artificiales: Guía Práctica de Diseño, Construcción y Explotación de Sistemas de Humedales de Flujo Subsuperficial*. Departamento de Ingeniería Hidráulica, Marítima y Ambiental de la Universidad Politécnica de Catalunya, España. 108pp.

García, E. 2009. *Manual práctico de saneamiento en poblaciones rurales*, Fondo Perú-Alemania, deuda por desarrollo, 50pp.

García, J., Rousseau, D., Morató, J., Lesage, E., Matamoros, V., and Bayona, J. 2010. Contaminant Removal Processes in Subsurface-Flow Constructed Wetlands: A Review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology* 40(7), 561-661.

Gentes, I. y Yáñez, N. 2006. *Derechos locales sobre las aguas en Chile: Análisis comparativo para una estrategia de gestión pertinente en territorios indígenas*. Informe final CEPAL, Naciones Unidas Santiago de Chile. 116pp.

Hauenstein, E., González, M., Peña, F. y Muñoz, A. 2002. Clasificación y caracterización de la flora y vegetación de los humedales de la costa de Tolten, IX Región, Chile, *Flora*, 59(2), 87-100.

Heldt, H. and Heldt, F. 2005. *Plant Biochemistry*. 3rd Edition. Editorial Elsevier Academic Press San Diego, California, USA. 656 pp.

Henze, M., Harremoës, P., La Cour Jansen, J., y Arvin, E. 2002. *Wastewater treatment: biological and chemical processes*. Heidelberg Springer, 430 pp.

Hidalgo, J., Junod J., Sandoval M. 2005. Recent applications of waste water by means of aquatic plants. *Theoria* 14 (1), 7-25.

Instituto nacional de estadística (INE). 2002. Glosario de términos de demografía y estadísticas vitales. Fijación Octubre del 2011. Adquirido desde: <http://palma.ine.cl/demografia/menu/glosario.pdf>.

Instituto nacional de estadística (INE). 2002. Síntesis de resultados censo 2002. Fijación Julio del 2011. Adquirido desde: <http://www.ine.cl/cd2002/sintesis censal.pdf>.

Kadlec, R. and Wallace S. 2009. Treatment Wetlands, (Kadlec R. and Wallace S. ed) Taylor & Francis Group, 1016 pp.

Knowles, P., Dotro, G., Nivala, J., and García, J. 2011. Clogging in subsurface-flow treatment wetlands: Occurrence and contributing factors. *Ecological Engineering* 37(2), 99-112.

Lara, J. 1999. Depuración de aguas residuales municipales con Humedales artificiales. Tesis para optar al Título de Máster en ingeniería y gestión ambiental, Universidad Politécnica de Cataluña, Instituto Catalán de Tecnología. 122 pp.

Marecos do Monte, H., and Albuquerque, A. 2010. Analysis of constructed wetland performance for irrigation reuse, *Water Science and Technology* ogy, 61 (7), 1699-1705.

May, E., Butler, J., Ford, M., Ashworth, R., Williams, J., Baghat, M. 1990. Chemical and microbiological processes in gravel-bed hydroponic systems for sewage treatment. In: *Constructed wetlands in water pollution control*. Pergamon Press, Oxford. 33-40.

Méndez, N., Gijón, Y., Quintal, F., y Osorio, R. 2007. Determinación de la tasa de acumulación de lodos en fosas sépticas de la ciudad de Mérida, Yucatán, *Ingeniería* 11 (3), 55-64

Metcalf & Eddy. 1995. Ingeniería de aguas residuales. Tratamiento, vertido y reutilización. Madrid, McGraw-Hill. 1485 pp.

Ministerio de salud (MINSAL). 2010. DS N°236/26, Reglamento general de alcantarillados particulares, fosas sépticas, cámaras filtrantes, cámaras de contacto, cámaras Absorbentes y letrinas domiciliarias del ex Ministerio de Higiene, Asistencia y Previsión Social, Ministerio de Salud. 14pp.

Muga, H. and Mihelci, J. 2008. Sustainability of wastewater treatment technologies. *Journal of Environmental Management* 88 (2), 437-447.

Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD). 1998. Recommendation of the Council on Environmental Information (Adopted by the Council at its 922nd Session on 3 April 1998). Organización para la Cooperación y Desarrollo Económico, París.

Pedescoll, A., Corzo, A., Alvarez, E., García, J., and Puigagut, J. 2011. The effect of primary treatment and flow regime on clogging development in horizontal subsurface flow constructed wetlands: An experimental evaluation. *Water Research* 45(12), 3579-89.

Pedescoll, A., Corzo, A., Álvarez, E., Puigagut, J., and García, J. 2011. Contaminant removal efficiency depending on primary treatment and operational strategy in horizontal subsurface flow treatment wetlands. *Ecological Engineering* 37(2), 372-380.

Plaza de los Reyes, C., Vera, I., Salvato, M., Borin, M. y Vidal, G. 2011. Consideraciones para la eliminación de nitrógeno en humedales artificiales. *Tecnología del Agua* 330 (31), 40-49.

Puigagut J., Villasenor J., Salas J., Becares E. and Garcia J. 2007. Subsurface-flow constructed wetlands in Spain for the sanitation of small communities: A comparative study. *Ecological Engineering* 30 (5), 312-319.

Quipuzco, L. 2002. Evaluación del comportamiento de dos pantanos artificiales instalados en serie con *Phragmites australis* para el tratamiento de aguas

residuales domesticas. Universidad Nacional Agraria La Molina. Instituto de Investigación de la FIGMMG–UNMSM. 6 pp.

Quiroga. 2009. Guía metodológica para desarrollar indicadores ambientales y de desarrollo sostenible en países de América Latina y el Caribe, CEPAL. 129pp.

Ramalho, R. 1993. Tratamiento de aguas residuales, Faculty of science and engineering, Laval University, Québec, Canada: Edit. Reverté. 705pp.

Rousseau, L., Vanrolleghem, P., and Pauw, N. 2004. Constructed wetlands in Flanders: a performance analysis. *Ecological Engineering* 23(3), 151-163.

Samsó, R., Pedescoll, A., y Garcia, J. 2011. Buenas prácticas en el diseño de humedales construidos, derivadas del estudio de la conductividad hidráulica, para retrasar el desarrollo de la colmatación, Departamento de ingeniería hidráulica, Marítima y Ambiental, Universidad Politécnica de Catalunya, Barcelona, 8pp.

Sánchez, F. 2005. Software para diseñar sistemas de lodos activados y lagunas aireadas. *Red de revistas científicas de América Latina y el Caribe, España y Portugal, Conciencia tecnológica* 27 (30), 1405-5597.

Sánchez, D. 2010. Depuración de aguas residuales de una población mediante humedales artificiales. Tesis para optar al Título de Máster en ingeniería y gestión ambiental, Universidad Politécnica de Catalunya, Departamento de Ingeniería Química. 102 pp.

Sapag y Sapag. 2007. Preparación y Evaluación de Proyectos, Mc Graw Hill, 3era edición. 445pp.

Servicio de evaluación ambiental (SEA), 2011. Declaración de Impacto Ambiental Planta de Tratamiento de Aguas Servidas de Hualqui. Fijación Septiembre del 2011. Adquirido desde: <http://seia.sea.gob.cl/documentos/documento.php?idDocumento=654711>.

Servicio de evaluación ambiental (SEA), 2011. Declaración de impacto ambiental, Planta de tratamiento de aguas servidas Negrete. Fijación Agosto del 2011. Adquirido desde:[http://seia.sea.gob.cl/expediente/ficha/fichaPrincipal.php?id\\_expediente=1152529&idExpediente=1152529&modo=ficha](http://seia.sea.gob.cl/expediente/ficha/fichaPrincipal.php?id_expediente=1152529&idExpediente=1152529&modo=ficha).

Servicio de evaluación ambiental (SEA). 2011. Declaración de impacto ambiental, Planta de tratamiento de aguas servidas Hualqui. Fijación Agosto del 2011. Adquirido desde:[http://seia.sea.gob.cl/expediente/ficha/fichaPrincipal.php?id\\_expediente=654708&idExpediente=654708&modo=ficha](http://seia.sea.gob.cl/expediente/ficha/fichaPrincipal.php?id_expediente=654708&idExpediente=654708&modo=ficha).

Servicio de evaluación ambiental (SEA). 2011. Declaración de impacto ambiental, Planta de tratamiento de aguas servidas Quilleco. Fijación Agosto del 2011. Adquirido desde:[http://seia.sea.gob.cl/seiaweb/ficha/fichaPrincipal.php?id\\_expediente=886297&idExpediente=886297&modo=ficha](http://seia.sea.gob.cl/seiaweb/ficha/fichaPrincipal.php?id_expediente=886297&idExpediente=886297&modo=ficha).

Servicio de evaluación ambiental (SEA). 2011. Declaración de impacto ambiental Planta de tratamiento de aguas servidas de Quilleco Fijación Septiembre del 2011. Adquirido desde:[http://seia.sea.gob.cl/expediente/expedientesEvaluacion.php?modo=ficha&id\\_expediente=886297](http://seia.sea.gob.cl/expediente/expedientesEvaluacion.php?modo=ficha&id_expediente=886297).

Sistema Nacional de Información Ambiental (SINIA). 2007. Ley 19.300, Ley sobre bases generales del medio ambiente. Ministerio Secretaria General de la Presidencia. Fijación Diciembre del 2011. Adquirido desde: [http://www.sinia.cl/1292/articles-26087\\_ley\\_bases.pdf](http://www.sinia.cl/1292/articles-26087_ley_bases.pdf).

SINIA. 2011. Decreto Supremo N°609/98, Norma de Emisión para la Regulación de Contaminantes asociados a las Descargas de Residuos Industriales Líquidos a Sistemas de Alcantarillado. Ministerio de Obras Públicas. 35pp.

SUBDERE. 2009. Resolución exenta N° 518 del Ministerio Del Interior, Gobierno de Chile, que Aprueba guía Operativa del programa de Saneamiento Rural. 47pp.

Superintendencia de servicios sanitarios (SISS). 2007 Estudio tarifario empresas de servicios sanitarios del Bío Bío S.A. Informe final Fijación Agosto del 2011. Adquirido desde: [//www.siss.gob.cl/577/articles-4586\\_estudiotarifario\\_parte2.pdf](http://www.siss.gob.cl/577/articles-4586_estudiotarifario_parte2.pdf).

Superintendencia de servicios sanitarios (SISS). 2011. Decreto con Fuerza de Ley MOP N° 382/88 - Publicado en el D.O. el 21-jun-1989. Fijación Septiembre del 2011. Adquirido desde <http://www.siss.gob.cl/577/w3-article-3692.html>.

Superintendencia de servicios sanitarios (SISS). 2011. Informe anual de coberturas urbanas de servicios sanitario año 2010. Fijación Septiembre del 2011. Adquirido desde: [http://www.siss.gob.cl/577/articles-8705\\_recurso\\_1.pdf](http://www.siss.gob.cl/577/articles-8705_recurso_1.pdf).

Superintendencia de servicios sanitarios (SISS). 2011. Plantas de tratamiento de aguas servidas – Región del Biobío. Fijación Julio del 2011. Adquirido desde: <http://www.siss.gob.cl/577/w3-propertyvalue-3445.html>.

Tanner, C. 2001. Plant as ecosystem engineers in subsurface-flow treatment wetlands. *Water Science and Technology* 44(11–12), 9–18.

Tsagarakis, K., Mara, D., Horan, N., and Angelakis, A. 2002. Small municipal wastewater treatment plants in Greece. *Distribution, Water Science and Technology* , 41 (1), 41-48.

Tsihrintzis, V. and Gikas, G. 2010. Constructed wetlands for wastewater and activated sludge treatment in north Greece: a review. *Water Science and Technology* 61 (10), 2653-2672.

Vera, I., García, J., Sáez, K., Moragas, L., and 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

Vymazal J. 2002. The use of sub-surface constructed wetlands for wastewater treatment in the Czech Republic: 10 years experience. *Ecological Engineering* 18 (5), 633-646.

Vymazal, J. 2005. Horizontal sub-surface flow and hybrid constructed wetlands systems for wastewater treatment. *Ecological Engineering* 25(5), 478-490.

Vymazal, J. 2007. *Wastewater Treatment, Plant Dynamics and Management in Constructed and Natural Wetlands*, 1 Ed. 347pp.

Vymazal, J. 2010. Constructed Wetlands for Wastewater Treatment. *Water* 2(3), 530-549.

Vymazal, J. 2011. Constructed wetlands for wastewater treatment: five decades of experience. *Environmental Science and Technology* 45(1), 61-9.

Vymazal, J. 2011. Long-term performance of constructed wetlands with horizontal sub-surface flow: Ten case studies from the Czech Republic. *Ecological Engineering* 37(1), 54-63.

Vymazal, J. 2011. Plants used in constructed wetlands with horizontal subsurface flow: a review. *Hydrobiology* 674 (20)133-156.

Vymazal, J. y Kröpfelová, L. 2008a. *Wastewater Treatment in Constructed Wetlands with Horizontal Sub-Surface Flow* (Alloway B. y Trevors, J., ed) Springer, 566 pp.

Vymazal, J. and Kröpfelová, L. 2008b. Is concentration of dissolved oxygen a good indicator of processes in filtration beds of horizontalflow constructed wetlands? In *Wastewater Treatment, Plant Dynamics and Management*; (Vymazal, J., ed.); Springer: Dordrecht, The Netherlands. 311-317pp.

Vymazal, J. and Kröpfelová, L. 2009. Removal of organics in constructed wetlands with horizontal sub-surface flow: a review of the field experience. *The Science of the Total Environment* 407(13), 3911-22.

Vymazal, J., Brix H., Cooper P., Haberl R., Perfler R. and Laber J. 1998. Removal mechanisms and types of constructed wetlands. Constructed wetlands for wastewater treatment in Europe, (Vymazal, J., Brix H., Cooper P., Green M. and Haberl R. eds.), Backhuys Publishers, Leiden, The Netherlands, 17-66 pp.

Water Environment Federation (WEF), 2008. Operation of municipal wastewater treatment plants, McGraw-Hill Professional, Virginia, 1296 pp.

Weedon, C. 2003. Compact vertical flow constructed wetland systems-first two year's performance. *Water Science and Technology* 48(5),15-23.

Zaror. C. 2000. Introducción a la ingeniería ambiental para la industria de procesos, Departamento de ingeniería química, Facultad de ingeniería, Universidad de Concepción. Chile, 75pp.

Zhao, Y., Hui, Z., Chao, X., Nie, E., Li, H., He, J., and Zheng, Z. 2011. Efficiency of two-stage combinations of subsurface vertical down-flow and up-flow constructed wetland systems for treating variation in influent C/N ratios of domestic wastewater. *Ecological Engineering* 37(10), 1546-1554.

## **ANEXOS**

## Anexo 1. Ejemplos de cálculo.

- *Población abastecida por la planta piloto HFHSS*

$$\frac{V \text{ total (l)}}{\text{tiempo operación (d)}} = \frac{38424,65 \text{ l}}{193 \text{ d}} = \frac{199,09 \text{ l/d}}{160 \text{ (l/hab/d)}} = 1,24 \text{ hab}$$

- *Energía consumida por HFHSS*

Energía consumida por la bomba del influente:

$$E_{\text{consumida}} = (P_{\text{bomba del influentes}} * t_{\text{bomba del influente}}) * 12$$

$$P_{\text{bomba influente}} = 0,60 \text{ Kw}$$

$$t = 2,60 \text{ hrs/mes}$$

$$E_{\text{consumida}}: 18,64 \text{ Kw-hr/año}$$

Energía consumida por la bomba del efluente:

$$E_{\text{consumida}} = (P_{\text{bomba del efluentes}} * t_{\text{bomba del efluente}}) * 12$$

$$P_{\text{bomba efluente}} = 0,37 \text{ Kw}$$

$$t = 0,9 \text{ hrs/mes}$$

$$E_{\text{consumida}}: 3,99 \text{ Kw-hr/año}$$

Por lo tanto la energía total consumida por el humedal está dada por la siguiente ecuación:

$$E_{\text{total}} = E_{\text{bomba del influente}} + E_{\text{bomba del efluente}}$$

$$E_{\text{bomba influente}} = 18,64 \text{ Kw-hr/año}$$

$$E_{\text{bomba del efluente}} = 3,99 \text{ Kw-hr/año}$$

$$E_{\text{total}} = 22,60 \text{ Kw-hr/año.}$$

**Anexo 2.** Calculo de la dosificación de cloro libre del efluente de un HFHSS para obtener una cantidad < 1000 NMP/100 ml de coliformes fecales.

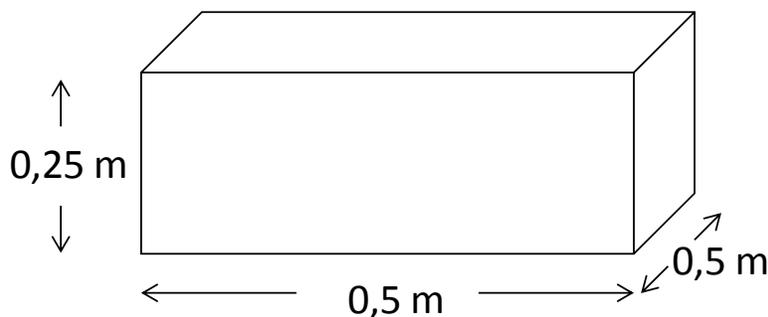
- Aguas domésticas poseen:  $10^6$ - $10^8$  NMP/100ml coliformes fecales
- Efluentes de HFHSS:  $10^4$ - $10^6$  NMP/100ml, considerando 2 log/100 ml de inactivación.
- Efluente exigido por el DS 90 Tabla 1:  $10^3$  NMP/100 ml

Para obtener el efluente exigido por el DS 90 se necesita una inactivación de 4 log/100 ml, según Metcalf & Eddy (2003) para lograr esta inactivación en bacterias de un efluente secundario a pH 7 y temperatura 20°C se necesita 10-12 mg·min/L ( $C_{Rt}$ ):

$$C_{Rt} = \text{Dosis de desinfectante} * \text{tiempo de contacto}$$

Considerando un tiempo de contacto mínimo de 15 min se tiene que la dosis de cloro necesaria es de 0,6-1,0 mg/L.

Considerando 3 horas al día de funcionamiento con un total de 199,09 l/d de efluente tratado y con un tiempo mínimo de 15 minutos de contacto para la cloración, se tiene que el volumen mínimo de un estanque de desinfección es de 6,2 l, por lo que un estanque de 62.5 l de dimensiones 0,25 alto, 0,5 largo, 0,5 ancho sería adecuado para efectuar este tratamiento.



**Anexo 3.** Indicador económico Costo de inversión del HFHSS por habitante al año.

$I_{inv}$ : Indicador costo de inversión del HFHSS por habitante servido al año.

$$I_{inv} = \frac{\text{Costo total de inversión}}{\text{Nº de habitantes servidos por el HFHSS}}$$

$$I_{inv} = \$ \frac{2.871.607,00}{1,24} = 2315812 \frac{\$}{hab.año}$$

Los detalles de los costos de inversión del HFHSS están especificados en la Tabla 15.

**Tabla 15.** Detalle de los costos de inversión del HFHSS.

| <b>División por Items</b>     | <b>Valor</b>     | <b>Total (%)</b> |
|-------------------------------|------------------|------------------|
| 1. Impermeabilización         | 600.000          | 35,89            |
| 2. Material petreo            | 153.010          | 9,15             |
| 3. Bombas                     | 391.410          | 23,42            |
| 4. Conexiones hidráulicas     | 318.601          | 19,06            |
| 5. Obra concreto              | 17.160           | 1,03             |
| 6. Estructura metálica        | 77.930           | 4,66             |
| 7. Conexiones eléctricas      | 55.042           | 3,29             |
| 8. Gastos menores             | 58.454           | 3,50             |
| <i>Total costos directos</i>  | <i>1.671.607</i> |                  |
| 9. Mano obra                  | 1.200.000        | 41,79            |
| <i>Total con mano de obra</i> | <i>2.871.607</i> |                  |

**Anexo 4.** Indicador económico Costo de operación y mantención del HFHSS por habitante al año.

Costos por energía eléctrica: \$1.250/año

Costos por operario: \$960.000/año

Costo por consumo de cloro: \$19.145 - 31.908/año.

$I_{com}$ : Indicador costo de operación y mantención del HFHSS por habitante al año.

$$I_{com} = \frac{\text{Costo (energía eléctrica + operario + consumo de cloro)}}{\text{N}^\circ \text{ de habitantes servidos por el HFHSS}}$$

$$I_{com} = \$ \frac{993158,45}{1,24} = 800.934,24 \frac{\$}{hab. año}$$

**Anexo 5.** Seguimiento fotográfico de las plantas por celdas

– 15- Septiembre (día de operación 69).

CELDA 1

CELDA 2

CELDA 3

CELDA 4



28- Octubre (día de operación 115).



- 25- Noviembre (día de operación 146).



- 28 Diciembre (día de operación 174).



