

## Contribuciones para el tratamiento de aguas residuales con sistemas alternativos de bajo coste, en España.

Araceli Lozano Pulido\*  
Rosario Torralba\*\*  
José Antonio Mancebo Piqueras\*\*\*

\**Canal de Isabel II.*

*araceli.lozano.pulido@gmail.com*

\*\**Escuela Técnica Superior de Ingeniería Civil. Universidad Politécnica de Madrid, España.*

*rosario.torralba@upm.es*

\*\*\**Grupo de Cooperación Sistemas de Agua y Saneamiento para el Desarrollo.*

*Universidad Politécnica Madrid, España.*

*ja.mancebo@upm.es*

### *Contributions for the treatment of waste water by means of low-cost alternativa systems in Spain.*

Recibido: 3 de diciembre de 2018

Aceptado: 6 de noviembre de 2019

#### Resumen

La ausencia de tratamiento adecuado de las aguas residuales constituye un problema global que afecta a todos los territorios según su realidad geográfica, demográfica y socioeconómica, y al mar. Sólo un 20% de las aguas residuales son tratadas previamente a su vertido al cauce (UNESCO, 2017). Los problemas asociados son reconocidos e inciden directamente sobre la salud de las personas y del medioambiente, contaminando acuíferos y destruyendo ecosistemas. Situación que se agrava por la incidencia del cambio climático.

Son diversas las técnicas utilizadas en el tratamiento de aguas residuales y su éxito o fracaso se visibiliza en la continuidad de uso y requiere del análisis particular de la instalación. Las principales causas de fallo son: la pérdida de funcionalidad, los errores de diseño, el rápido deterioro de los materiales, la falta de adaptabilidad, la imprevisión de controles y mantenimiento, especialmente por el coste económico que suponen.

Es por ello que la propuesta de solución va más allá de la tecnología y ha de adaptarse a la realidad social y territorial en donde va a ser implantada, especialmente en pequeñas poblaciones, caso de referencia en este artículo. Por tanto, la innovación en saneamiento y depuración requiere de sinergias que favorezcan la adaptación de las instalaciones a las diferentes coyunturas de su ciclo de vida, garantizando su continuidad sostenible de uso.

Estas propuestas están recogidas como tecnologías "no convencionales" y se caracterizan por ser soluciones económicas y sostenibles a una realidad territorial. Mientras que a nivel internacional estas propuestas están ampliamente implantadas, en España, y pese a la crisis económica, estas han caído en desuso. El objeto de este artículo es plantear de nuevo un debate que ha sido relegado y pospuesto, pese a los importantes incumplimientos de España con respecto a la UE en pequeñas poblaciones.

Palabras clave: tecnología no convencional, depuración, depuradora ecológica, sostenibilidad, resiliencia, humedales artificiales.

*The lack of adequate wastewater treatment is a global problem that affects all territories depending on their geographical, demographic and socio-economic reality, and also the sea. Only 20% of wastewater is treated before the discharge into rivers (UNESCO, 2017). The associated problems are widely recognized and affect the health of people and the environment, contaminating aquifers and destroying ecosystems; moreover, this situation is aggravated by the impact of climate change.*

*Various techniques are used in wastewater treatment and their success or failure is visible in the continuity of use and requires the particular analysis of the installation. The main causes of failure are: loss of functionality, design errors, early deterioration of materials, lack of adaptability, and unforeseen control and maintenance especially due to their economic cost.*

*That is why the proposed solution goes beyond technology and has to be adapted to the social and territorial reality where it is going to be implemented; especially in small towns, the case of reference in this article. Therefore, innovation in sewerage and wastewater treatment requires synergies that favour the adaptation of the facilities to the different junctures of their life cycle, making sure their sustainable continuity of use. These proposals are included as "non-conventional" technologies and are characterised by being ecological and sustainable solutions to a territorial reality. While at an international level these proposals are widely implemented, in Spain, and despite the economic crisis, they have fallen into disuse. The purpose of this article is to once again raise a debate that has been neglected and postponed, in spite of Spain's important failures to comply with the EU in small towns.*

*Keywords: "non-conventional" technologies, depuration, ecological treatment plant, sustainability, resilience, humedales artificiales.*

## 1. Introducción

Entre un 60% y un 85% del agua utilizada se emplea para el transporte de residuos, principalmente de naturaleza orgánica, además de aumentar la demanda. Mientras que en los últimos cien años se ha triplicado la población mundial, la cantidad

de agua consumida se ha sextuplicado, el 80% del volumen de aguas residuales sigue vertiéndose al mar sin depurar (UNESCO, 2017). Mientras que la capacidad media de depuración de los países de ingresos altos es del 70%, en los países con ingresos medios es de un 38% y des-

ciende en los de bajos ingresos a un 8% (UNESCO, 2017; Sato *et al.*, 2013; Metcalf&Eddy, 2002). Este exponencial aumento de las aguas residuales y su enriquecimiento con nutrientes es ya uno de los principales problemas medioambientales, repercutiendo en la calidad y minimizando la potencialidad del uso de acuíferos y manantiales (WWAP, 2009, UNESCO, 2017). La llegada masiva de un recurso nutritivo, contaminantes no biodegradables, de nuevas especies o la destrucción de biomasa preexistente provoca un desequilibrio en el ecosistema receptor, y la incapacidad del ecosistema para degradarlo se materializa en la eutrofización y putrefacción de las aguas y daños y patologías a organismos que las habitan.

La multiplicidad de condicionantes y relaciones de interdependencia hacen que sus consecuencias se multipliquen llegando a afectar a la totalidad del ecosistema. Además, el cambio climático está imponiendo presiones adicionales al contexto actual, siendo la disponibilidad y la calidad del agua uno de los principales problemas para la sociedad y el medio ambiente (Bates *et al.*, 2008; Landeros-Sánchez *et al.*, 2012; UNESCO, 2017). España se sitúa en el trigésimo segundo lugar respecto a los países con mayor riesgo de estrés hídrico previsto para el 2040 (*World Resource Institute*). Con estos datos es urgente disminuir el efecto contaminante a partir de la reducción de la demanda, del volumen de residuos y el aumento del tratamiento previo al vertido. La recuperación sanitaria de las aguas residuales, junto con la higiene, constituyen dos de los tres pilares básicos de cualquier estrategia destinada a mejorar la salud pública (PNUD, 2006).

Para ello, los vertidos son interferidos y encauzados a infraestructuras construidas con el objeto de reducir la carga de contaminación y transformar los parámetros de calidad para minimizar el impacto en el entorno tras el vertido, de acuerdo con las exigencias legislativas a nivel europeo de la Directiva 91/271/CEE, actualmente en revisión. El cumplimiento de ésta tiene importantes costos en ejecución o adecuación de infraestructuras y la explotación y mantenimiento a lo largo de su ciclo de vida, que dependen principalmente de la tecnología utilizada.

El nivel actual de conocimientos permite asegurar que cualquier tipo de agua residual urbana puede ser depurada para alcanzar los niveles requeridos si se utilizan las tecnologías adecuadas y se diseñan los sistemas correctamente (CEDEX, 2010).

Además, las importantes oportunidades que plantea explotar las aguas residuales como recurso (UNESCO, 2017). Los avances más significativos en las últimas tres décadas se resumen en la mayor eficiencia de la transferencia de oxígeno en el proceso biológico por la mejora de los sistemas de aireación, tratamientos avanzados para la eliminación de nutrientes, nuevos diseños más compactados, tratamiento y gestión de los fangos y su puesta en valor, y mayor preocupación por los impactos ambientales como ruidos y olores (Cajigas, 2012).

El caso de España, en el año 1995 solamente disponía de algún tratamiento el 40% de la población española, alcanzando en 2018 el 63,6%. Pese a los representativos avances, España no alcanza los objetivos propuestos por la UE. Todavía existen puntos negros en la depuración de aguas y la Comisión Europea ha multado

con 50 millones de euros más 171.217,2 euros más al día mientras persista el incumplimiento por 17 casos de depuración insuficiente en municipios hasta 150.000 habitantes equivalentes (El país, 2018). Tampoco en los municipios menores de 2.000 habitantes, que suponen el 75% y contribuyen con una carga contaminante de un 14%, estos avances son representativos o de interés al ser la cobertura de servicios básica al habitar una población con baja capacidad económica y técnica. Sin embargo, los impactos de los vertidos son importantes por localizarse en entornos sensibles de afección significativa, por ejemplo, en la cabecera de la cuenca.

España dispone de una importante legislación que ampara y responsabiliza a las Administraciones locales en el tratamiento de las aguas residuales, una administración hidráulica para el control y capacidad científica, tecnológica y financiera que acumula importantes logros en el área de la depuración. Capacitada legislativamente, el análisis de la documentación profesional existente resume la problemática del saneamiento y la depuración en pequeñas y medianas poblaciones de entorno rural, como:

- Un problema económico, al no disponer de los medios municipales de inversión para la construcción de las instalaciones de depuración y su posterior mantenimiento y operación. Estos se suponen a cargo de los presupuestos municipales.
- Un problema técnico, por la incapacidad de operar y mantener las instalaciones debido a su complejidad.
- Un problema social, por la carga económica que supone el hacer frente a una nueva infraestructura.

- Un problema ambiental, dado el impacto que supone la gestión inadecuada de los residuos.

En pequeñas poblaciones y entornos rurales, la elección tecnológica y los patrones económicos, sociales y culturales condicionarán la vida del proyecto, adquiriendo el proceso en la toma de decisiones una dimensión trascendental y un tejido y calado más amplio, requiriendo soluciones diferentes que en el caso de poblaciones más grandes (Collado y Vargas, 1991).

El objeto es, tras recopilar y sintetizar las propuestas tecnológicas no convencionales en uso y el análisis de la situación de estas, centrar el estudio en un caso de uso, la depuradora ecológica de Fabara, A partir de la recopilación de los datos de todas las fases, desde la planificación hasta la implementación y explotación, se acomete el análisis de la efectividad de la instalación para el cumplimiento de los objetivos para los que fue diseñada. Este análisis pretende relanzar el abandonado debate acerca de las tecnologías no convencionales con aportaciones concretas al reto que plantean las pequeñas poblaciones en el actual contexto de profunda crisis ecosocial.

Esta contribución es también extrapolable para poblaciones reducidas en el contexto de cooperación al desarrollo.

## 2. Evaluación de las tecnologías de tratamiento de aguas residuales

El proceso de la biodegradación forma parte de un proceso mucho más amplio y complejo, la autodepuración, y sobre el que se basa la tecnología depuradora. Los ecosistemas acuáticos son grandes reac-

tores biogeoquímicos donde el agua que entra se expone y sufre múltiples transformaciones en función de una gran diversidad de variables de tipo físico (luz, temperatura, velocidad del agua, conductividad), de tipo químico (pH, presencia de nutrientes y efectos tóxicos) y biológico (composición de la comunidad o biocenosis y su actividad metabólica) evolucionado hacia nuevos compuestos. En la compleja actividad metabólica, cualquier variación de las comunidades en términos de número de especies y proporciones, pueden ser indicador de cambios, ya sea por modificaciones en las condiciones ambientales o de los procesos.

A continuación (figura 1) se representa un resumen del proceso biológico.

La depuración supone la concentración y aceleración de la acción de las fuerzas autodepuradoras presentes en la naturaleza en espacios controlados para eliminar las sustancias biodegradables bajo condiciones reguladas por procesos secuenciales, organizados, concentrados y estructurados para reducir el tamaño de la instalación y el tiempo de permanencia del agua en los distintos procesos o etapas

interviniendo sobre las condiciones del proceso.

A partir del conocimiento del influente y, estableciendo las características del efluente, definido en la legislación vigente, se plantea las limitaciones en los parámetros a tratar. Los más habituales son la demanda biológica de oxígeno (DBO) y demanda química de oxígeno (DQO), el pH, nitrógeno y fósforo y los sólidos totales debido a que resultan ser vehículo de transporte de otros contaminantes (Tessier *et al.*, 1992) y otros organismos como virus, bacterias...

El referente convencional es una instalación industrial cerrada, concentradora de maquinaria y equipos que intervienen en las distintas etapas.

Para su funcionamiento precisa de aportes adicionales, *inputs*: energía eléctrica, reactivos químicos y personal especializado. Como referencia, la necesidad energética para depurar 1m<sup>3</sup> de agua es de 1Kwh.

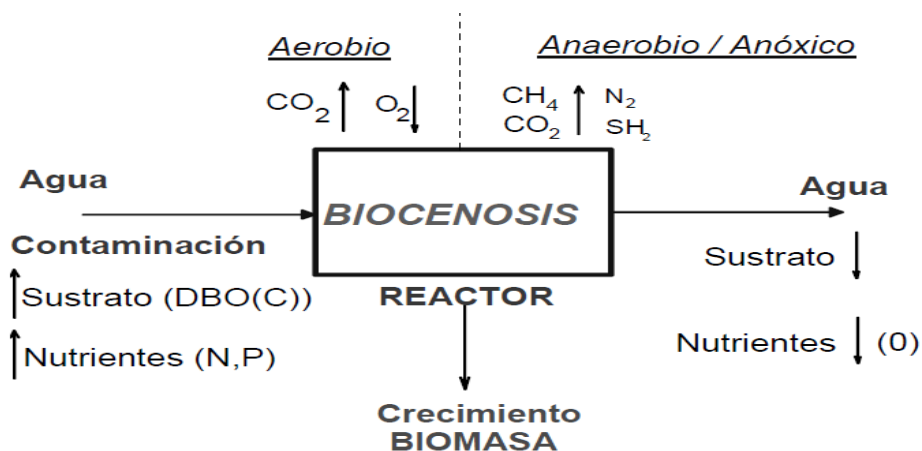


Figura 1. Entradas y salidas en un proceso biológico básico (CEDEX, 2010)

El suministro eléctrico supone alrededor del 30% del coste en explotación de la planta, similar al necesario para cubrir el coste del personal, mientras que los reactivos para acelerar los procesos conllevan aproximadamente un 8% y la gestión de los residuos un 16% (CEDEX, 2010). Este modelo actual genera *outputs* o residuos adicionales: cada persona produce una cantidad aproximada de 15kg a 20kg de fango al año.

La horquilla de costes de ejecución y mantenimiento de las tecnologías convencionales varía dependiendo de las tecnologías que se apliquen y la operatividad, recomendando para poblaciones menores de 10.000 habitantes equivalentes los procesos de aireación prolongada o de lechos bacterianos (CEDEX, 2010), que bien operados suelen tener unos rendimientos de reducción del 85-95% de la DBO5 y SS. Sin embargo, en los costes de implantación repercute el factor escala, aumentando este al disminuir la población (figura 2).

Se confirma que cuanto menor es la población, mayor son los costes de cons-

trucción, de operación y mantenimiento por habitante equivalente (CENTA, 2012) pero también suelen ser las que disponen de menor capacidad económica para afrontarlos, generándose importantes modelos de desigualdad. En consecuencia, los modelos convencionales de depuración mediante los procesos de aireación prolongada o de lechos bacterianos no son viables en pequeñas poblaciones. A continuación, se enumeran los factores genéricos que han contribuido al fracaso de su implantación en estas (Ferrer, *et al.* 2012, Gebrezgabher *et al.*, 2015):

- Errores en el diseño y la configuración de las cargas.
- Las dificultades a la hora de la caracterización de los vertidos y la extrema variabilidad espacial y temporal de los mismos.
- Los altos costes por habitante de implantación y explotación.
- La falta de recursos económicos y técnicos de los pequeños municipios, que suelen desbordar la capacidad financiera y técnica de los Ayuntamientos.

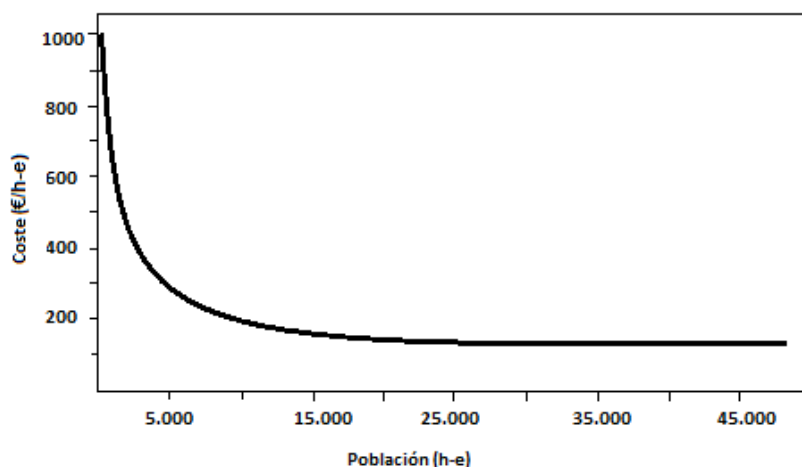


Figura 2. Costes de implantación de la aireación prolongada (€/h-e) (CENTA, 2012)

El análisis de estos aspectos enunciados resume las necesidades de la depuración en (Cajigas, 2012):

- La aplicación de nuevas tecnologías que impliquen menos costes energéticos, que sean más amigables con el entorno y que generen menos residuos.
- La necesidad de un cambio en el modelo de financiación que cumpla con los principios de recuperación de costes.

También, en los últimos cincuenta años la actitud hacia el medio ambiente ha cambiado al añadir conceptos como la sostenibilidad para adaptarse a las demandas sociales (Davidson *et al.*, 2007) amplificándose en nuevas propuestas tecnológicas como proveedoras de bienes ecosistémicos y servicios (Wu, 2013) y la economía circular.

Con un amplio recorrido, estas tecnologías están ampliamente documentadas en la bibliografía actual presentándose con multitud de nombres dependiendo del enfoque desde el que se proyecta: *tecnologías blandas*, *tecnologías pasivas* o *tecnologías de bajo costo*, *tecnologías apropiadas* y *tecnologías sociales*, *tecnologías ecológicas*, *tecnologías no convencionales*, siendo este último el utilizado por el centro de referencia Centro de Estudios de Nuevas Tecnologías del Agua (CENTA) y que se recoge en este trabajo.

Las tecnologías no convencionales se basan en replicar y concentrar los ecosistemas, aprovechando al máximo su capacidad autoorganizativa y su actividad metabólica a través del flujo inagotable de energía. La vegetación, la cama del sustrato y la biocenosis asociada continúan siendo los responsables de los procesos

de biofiltración, degradación aerobia, degradación anaerobia y tratamiento de lodos. Un ejemplo son los humedales artificiales, zonas construidas por el hombre en las que, de forma controlada, se reproducen mecanismos de eliminación de contaminantes presentes en aguas residuales, que se dan en los humedales naturales mediante procesos físicos, biológicos y químicos. A continuación (figura 3) se presenta la descripción de forma simplificada y sin escala de esta interacción en humedales con flujo horizontal subsuperficial, y que es extrapolable a cualquier propuesta tecnológica. Son intervenciones conscientes para la creación y conservación de espacios ecológicamente activos, de bajo coste y alto impacto para la eliminación de contaminantes y con un largo período de funcionamiento.

En la actualidad, el diseño y dimensionamiento está basado en requerimientos de área de superficie específica (Brix, 2005; ÖNORM B 2505, 2005; DWA-A 262, 2006) y tiempo de retención con parámetros basados en la experimentación o la experiencia previa. En la tabla 1 se resumen las tecnologías no convencionales más frecuentes y sus rendimientos.

Dada su adecuación al territorio y su apuesta de mínima intervención en el proceso, donde la utilización de materiales de construcción es mínima, y la maquinaria es la propia vegetación, es imprescindible para su diseño conocer en profundidad el territorio donde se va a emplazar y las características de éste, lo que amplifica la integración vertebradora de estas infraestructuras en los ecosistemas existentes, naturalizan el entorno, regulan ciclos naturales de distintos elementos y son creadoras de una relación de simbiosis que inciden en los regímenes hidrológi-

cos, por lo que tienen un importante valor añadido. En su diseño, pueden implementarse de forma autónoma o combinada junto con otras tecnologías, y para la

reconversión de instalaciones que funcionan deficientemente o en estado de abandono.

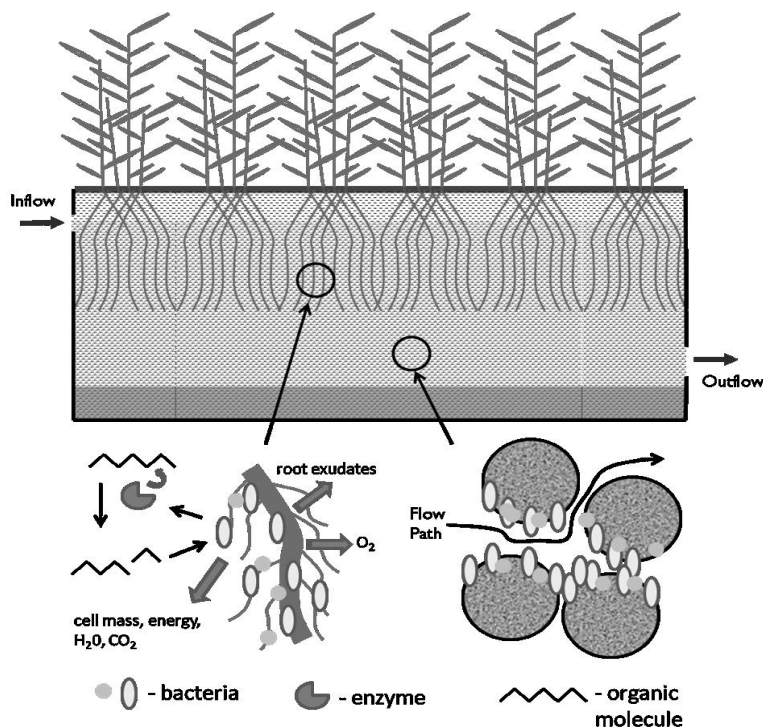


Figura 2. Descripción simplificada y no a escala de las interacciones en los humedales con flujo horizontal subsuperficial (Weber, 2013).

Tabla 1.- Tecnologías no convencionales más frecuentes y sus rendimientos de depuración.  
(CENTA, 2012)

	Superficie Unitaria (m <sup>2</sup> /h.e)	Tiempo de retención	% reducción DBO	% reducción DQO	% reducción SS
Filtro de arena	2-5	-	90-95	80-90	90-95
Infiltración-percolación	7-10	-	-	85	98
Lechos de turba	4-10	-	90-95	80-90	85-95
Lagunaje Anaerobio	7-13	>2	50-60	40-50	50-60
Laguna facultativa	7-13	-	60-80	55-75	0-70
Lagunas de maduración	7-13	>5	25-40	20-35	35-40
Humedal artificial	4-15	6-8	90-95	80-90	90-95



En la tabla 2 se presenta un resumen de las propuestas de humedales artificiales y sus características de diseño.

Pese a la relación estrecha entre los rendimientos y las condiciones climáticas locales, se han conseguido resultados interesantes en países fríos como Inglaterra, Canadá, Suecia, Noruega, Dinamarca, Bélgica, Letonia y Lituania. Mientras que en el Reino Unido, en la actualidad hay más de 1.000 sistemas de humedales artificiales documentados y recogidos en la base de datos diseñada por el *Centro de Investigación del Agua (WRC)* y *Severn Trent Water Ltd*, además de existir la asociación *Constructed Wetland Association (CWA)*, en España no existe un sistema o base de datos para el análisis de la situación a nivel nacional que recoja la

información de estas propuestas, y pese a existir un centro de estudios de estas tecnologías, el CENTA, este está al borde de su desaparición por falta de financiación. Mientras que en la bibliografía más reciente se recogen multitud de propuestas de implantación en diversidad de territorios. En España el uso de tecnologías de bajo coste ha ido decayendo, así como las instalaciones existentes se han ido reconvirtiendo a las tipologías convencionales.

Esta realidad dificulta el objeto del trabajo y lo reduce a la elección de un único caso de estudio local, la depuradora ecológica de Fabara (Zaragoza), donde por su casuística nos permite profundizar en las particularidades y las interrelaciones que sustentan el ciclo del proyecto.

Tabla 2.- Resumen de tecnologías no convencionales: humedales artificiales y sus características de diseño y explotación. (CENTA, 2012)

	H.A. flujo superficial	H.A.F.S.S horizontal	H.A.F.S.S vertical	Filtro macrofitas flotación	F.helofitas semisumergidas
Superficie de plantación (m <sup>2</sup> /he)	4-8	5	3	1-3	1,5-2,5
Tiempo de retención (día)	4-15	4-8	Horas	7,5-10	>5
Geometría	Balsas	Plantación	Plantación	Balsas	Canales
Profundidad lámina (m)	<0,4	0,4-0,6	-	0,5-5	>0,5
Densidad plantas/m <sup>2</sup>	4-6	4-6	4-6	11-41	10
Mantenimiento	Segado	Segado	Segado	Tratamiento fitosanitario	2-3 segados anuales
Tiempo de entrada en funcionamiento	Inicio	Un periodo	Un periodo	Un periodo	Un periodo

### 3. Análisis del ciclo de vida de la instalación de una depuradora ecológica: el caso de Fabara (Zaragoza)

La Depuradora ecológica de Fabara (Zaragoza) dispone de una instalación de tecnologías no convencionales innovadora el momento de su construcción en 2006. La elección ha sido motivada porque desde entonces está en funcionamiento y posee y facilita el acceso a la información, además de su representatividad con respecto al 75% de los pequeños municipios españoles. El municipio dispone de una superficie de 101,63km<sup>2</sup> donde habitan 1.231 personas (IAEST 2014), siendo el Ayuntamiento responsable de la gestión integral de los servicios de abastecimiento y saneamiento conforme la Ley 7/1999 de la administración local aragonesa y sin delegar el ejercicio de sus competencias a la Comunidad Autónoma. Esta situación facilita el seguimiento de toma de decisiones en un marco de participación y transparencia en lo relativo al proyecto. Como incentivo, el diseño y proyecto fue realizado por el estudio del Grupo de Agroenergética de Universidad Politécnica de Madrid en un marco de colaboración, tecnología posteriormente patentada en donde la novedad con respecto a los humedales es que no precisa de sustrato filtrante, con el consiguiente ahorro de costes. El seguimiento ha sido facilitado por disponer de datos de los parámetros de estudio desde el año 2007, que supone un tercio del ciclo de vida. Considerando el mínimo ciclo de vida para el diseño de una instalación de 20 años, este período

es representativo para la obtención de un patrón de funcionamiento.

La propuesta considerada consta de una línea de aguas con pretratamiento, tratamiento primario consistente en un tanque *imhoff* con un posterior tratamiento secundario de humedal artificial conformado por un filtro de Helófitas Semisumergidas (FHS) siendo el funcionamiento de la instalación en canales por gravedad, lo que facilita la adaptación a las características topográficas del terreno (Fernández, J. et al; 2017).

Se trata de una tecnología extensiva cuyos parámetros de diseño y cinéticas no están intensificados al no ser el tiempo y el espacio variables del proyecto, por lo que para su implementación requiere de mayor superficie y de mayores tiempos de retención.

Esta planta depuradora es la alternativa a la propuesta por el Instituto Aragonés del Agua, (IAA), Organismo Autónomo adscrito a la Consejería de Medio Ambiente. Esta entidad tiene como objeto atender a los municipios que no disponen de capacidad para resolver el problema de tratamiento de aguas residuales y recogida en el Plan Aragonés de Saneamiento y Depuración. El IIAA propuso la construcción de una planta de depuración formada por la línea de pretratamiento, el tratamiento biológico por aireación prolongada y la línea de fangos. A continuación, en las figuras 4 y 5, se presentan croquis resumen sin escala de la que sería el FHS construido en comparación con la futura planta de depuración para el municipio de Fabara.

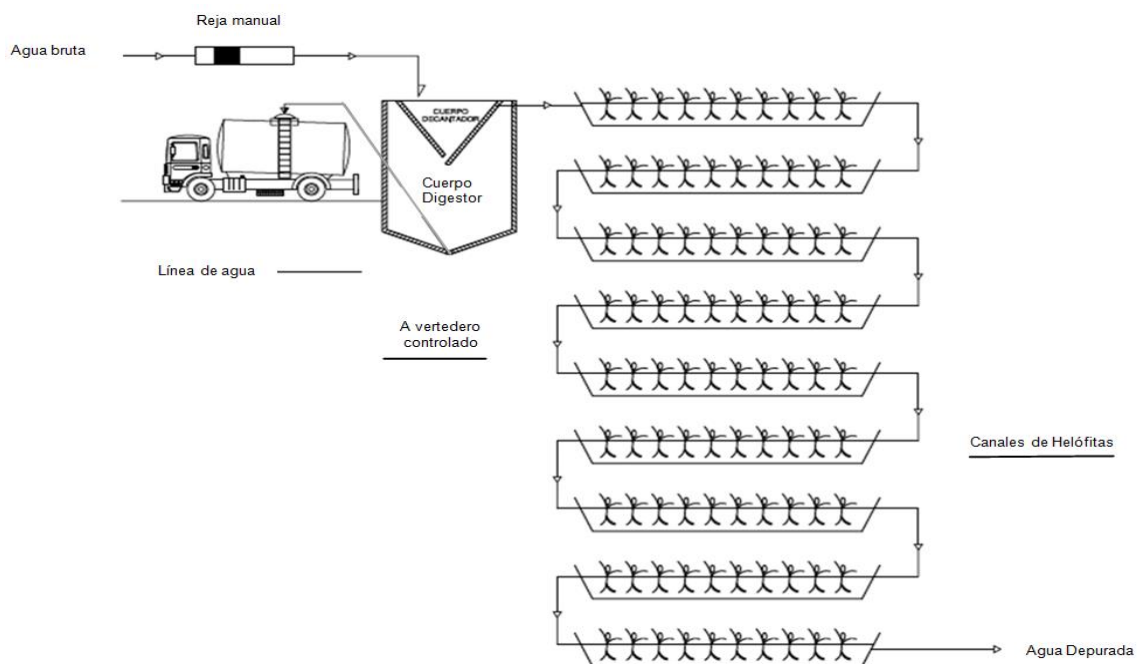


Figura 3. Croquis resumen sin escala del FHS construído: tanque *imhoff* y canales de heliofitas.

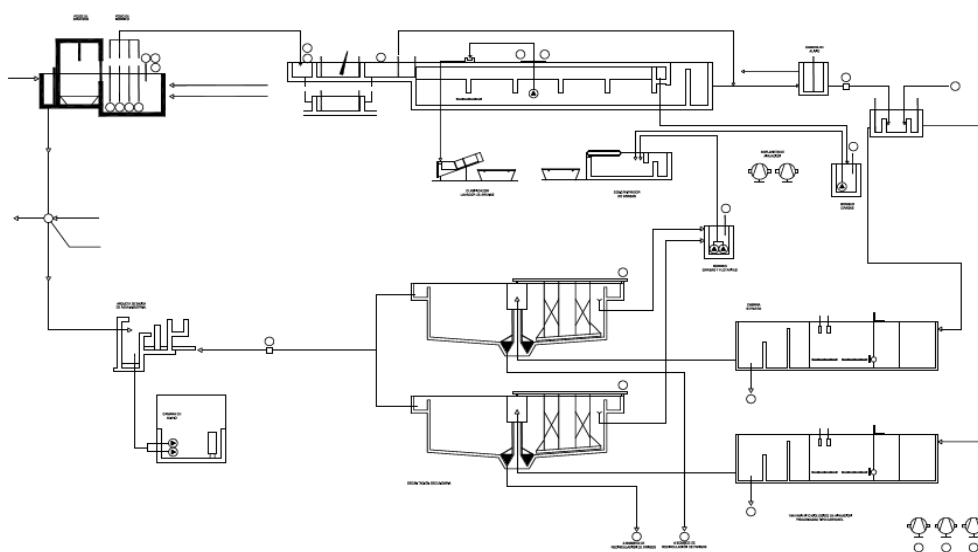


Figura 4. Croquis resumen sin escala de la planta de depuración, constituida por una línea de pretratamiento y tratamiento secundario de aireación prolongada propuesta y la línea de fangos.

En la siguiente tabla se comparan los costes económicos en las distintas fases del ciclo de vida del proyecto en

condiciones idóneas de funcionamiento. Un sencillo análisis que clarifica la toma de decisión por parte del Consistorio.

Tabla 3. Tabla comparativo entre las propuestas tecnológicas.

	Depuradora con tratamiento de aireación prolongada	Depuradora con F.helofitas semisumergidas
Ejecución	1430 €/h-e	176 €/h-e
Explotación (anual)	127 €/h-e	10 €/h-e
Plazo de ejecución	18 meses	3 meses
Puesta en marcha	1 mes	12 meses

Respecto a los costes de ejecución, la planta de FHS es menor por la mayor sencillez constructiva, que facilitó la ejecución por el propio Ayuntamiento con los mismos albañiles municipales y personal contratado para ciertas tareas, en un plazo de ejecución menor. La instalación se realizó a cargo de los presupuestos del Ayuntamiento, con un crédito mínimo y casi sin período de amortización. Dado los bajos costes de construcción y de explotación, se trata de una propuesta que se enfrenta a menores tasas impositivas y a menos variaciones del IPC.

Se trata de dos tipologías constructivas opuestas, mientras que en la aireación es necesario el control de los parámetros de operación en todo el ciclo, en el FHS el proceso es autorregulado por la propia biota. El funcionamiento ocurre de forma natural a través de la fotosíntesis y fotooxidación a partir del flujo inagotable de energía solar y la aportación de oxígeno de forma espontánea gracias a las plantas, lo que además elimina un punto crítico en la vida de la instalación, convirtiéndose en autónoma respecto a la provisión de suministro, siendo éste el principal ahorro para la explotación.

Además, es una instalación de mayor sencillez constructiva con menor subdivisión de procesos y menor mecanización, lo que minimiza el aumento de costes futuros por el deterioro de la instalación y el porcentaje de penalizaciones por error de las etapas y posibilidad de accidentes, porque los riesgos de operación suelen ser proporcionales a las dimensiones como a la dificultad de la instalación. Tampoco precisa de personal especializado para su reparación, lo que garantiza la sostenibilidad del proyecto.

Dado que la tecnología está analizada por el grupo creador (Fernández, *et al.*, 2017) este trabajo procede a examinar el comportamiento de la totalidad de la instalación a partir de la evaluación de los rendimientos de eliminación de los distintos parámetros conforme exige la normativa de vertidos y que determina el rendimiento de la planta. Por tanto, se procede a evaluar el rendimiento de funcionamiento de la planta a partir de los resultados de los análisis del influente y del efluente, calculando la línea de tendencia de los valores de DBO, DQO y SS, que son los parámetros de referencia recogidos en la legislación para pequeñas poblaciones.

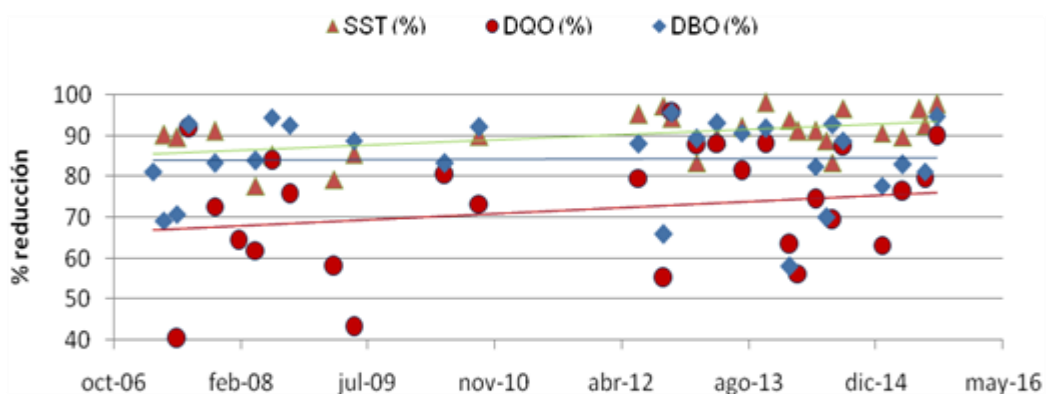


Figura 5. Rendimientos de disminución de SST, DQO y DBO.

Dada las pequeñas dimensiones de la planta, esta no dispone de laboratorio propio por lo que los análisis han sido contratados por parte del Consistorio a una empresa certificada.

Las tomas de las muestras se realizan en las arquetas tomamuestras previas al vertido al cauce, conforme exige la normativa. Las líneas de tendencia confirman que es un proceso de gran robustez e inercia frente a las variaciones de carga, resultando los efluentes bastante homogéneos, especialmen-

te en DBO y SST. Las tendencias de eliminación de SST es casi paralela a la DQO lo que confirma que la reducción del parámetro de DQO es proporcional a la reducción de SST.

Las líneas de tendencia también confirman que el paso del tiempo aumenta la capacidad depuradora de la planta. Además, los valores medios están contemplados dentro del rango próximo a la depuración exigida para sistemas de las zonas calificadas como *normales* conforme se observa en la tabla 4.

Tabla 4. Comparativa con los parámetros de vertido en la instalación.

Parámetros	Valores establecidos por la legislación		Valores obtenidos	
	Concentración	% mínimo de reducción	Concentración media	% medio de reducción
DBO <sub>5</sub>	25 mg/l	70-90 %	39	84,3 %
DQO	125 mg/l	75 %	119	72,2 %
SST	35 mg/l	90 %	17	90,5 %

Además, en la tabla 5 se resumen los porcentajes de valores que ha estado dentro de los límites legales de vertido. Respecto a estos valores, se aplicará el valor de concentración o el porcentaje de reducción según se disponga, por lo que todos los parámetros cumplen, siendo la DBO es el valor que menos ha estado en el rango. No se han realizado muestras alternativas que faciliten un análisis concluyente por estar el total de los resultados dentro del rango que exige la norma.

Con estos resultados se concluye que la instalación, en su análisis global, presenta una importante capacidad de eliminación de los parámetros exigidos. Por ello, la instalación de los FHS es

capaz de responder favorablemente a las cargas operadas y sus resultados cumplen con los límites de vertido. Además, las instalaciones de la depuradora ecológica de Fabara parecen adaptarse bien a las precipitaciones y a sus variaciones, tanto de cargas hidráulicas como de las concentraciones influentes, con respecto a las precipitaciones medias mensuales.

La instalación es más amable y cercana por la sencillez de los procesos, facilitando tanto su aceptación como cuidado. Ya en la definición se visibilizan las sinergias entre la instalación con su entorno social y ambiental, lo que se traduce en su importante capacidad resiliente con los siguientes resultados extrínsecos.

Tabla 5. Porcentajes de valores de la muestra dentro de los límites de concentración de vertido.

	DBO <sub>5</sub>	DQO	SST
Porcentaje (%)	60	79	75

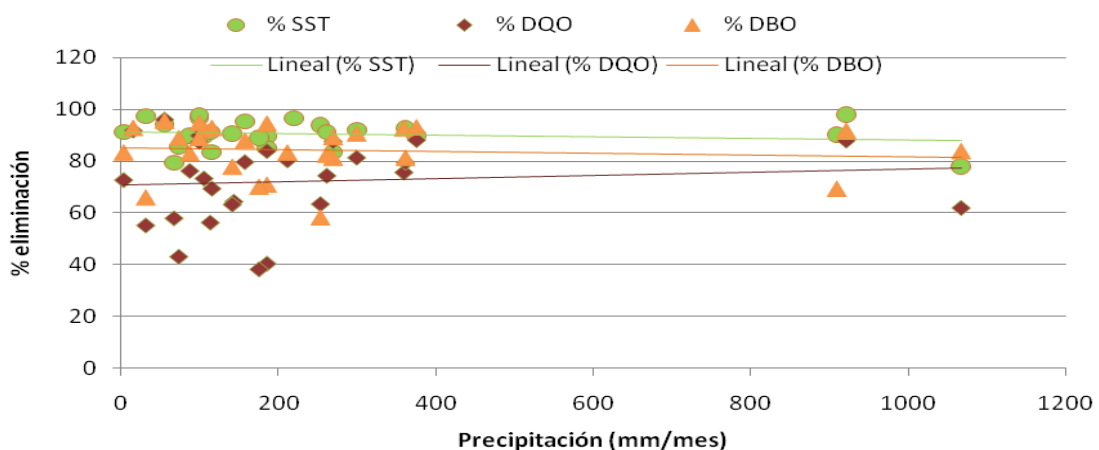


Figura 6. Valores de eliminación de concentración de las distintas variables a la salida del FHS.

El primero es la capacidad de gobernanza y autogestión porque las características de la instalación facilitan que la responsabilidad en todo su ciclo de vida sea asumida por el Consistorio.

Segundo, es la facilidad de integración en las actividades ciudadanas proveyendo servicios educacionales como recreacionales. El FHS genera únicamente el output de la biomasa recolectada, la cual es revalorizada y puesta en circulación como forraje, combustible, producción de compost, y artesanía tradicional. El Ayuntamiento de Fabara realiza cursos y formaciones en artesanía y jardinería en estas instalaciones para todas las edades.

La apertura de la instalación no solo se realiza para cursos o propuestas culturales y educativas, sino que es extensiva a las actividades de la vida diaria. Son infraestructuras sencillas y amables con un riesgo mínimo que permite la apertura de la instalación a los habitan-

tes, formando parte de su vida, integrándolas como lugar de encuentro, aprendizaje e incluso como visita turística para familiares y amigos que visitan la zona, respetando las medidas de seguridad para evitar contaminación.

Tercero, el impacto en el cauce y la evolución de su estado al integrarse tanto a la topografía del terreno como al paisaje natural de la zona donde se ubica, no produciendo impacto visual. Su instalación tiene un impacto positivo en la regeneración de los cauces según se muestra en la siguiente figura, con la comparativa de las ortofotos de la zona. Los Sistemas de Información Geográfica se confirman como herramientas para complementar el monitoreo y el seguimiento de la instalación y de sus ecosistemas y confirmar la mejora de la hidrogeo-morfología de los ríos por la continuidad ecológica de los cauces y riberas a causa de la mejora de la calidad del agua.



Figura 7. Ortofotos del cauce próximo al punto de vertido del FHS en los años 1986 y 2014.

La presencia de la flora en los cauces se constituye como una importante barrera

física que garantiza el aumento de la rugosidad de las riberas que disminuye la velocidad de la corriente, hecho que, minimiza la disolución y disgregación de suelos aumentando la estabilidad de los cauces. Es un hecho constatado que un ecosistema saludable garantiza la seguridad hídrica con respecto a la calidad del recurso, al mismo tiempo que también es un importante mecanismo que ayuda a combatir la desertificación, los caudales y sus extremos de sequía e inundación, incidiendo en los regímenes hidrológicos (Keddy,2000) favoreciendo la resiliencia del ecosistema.

Conforme el IAA, se entiende como objetivo de la instalación depuradora el cumplimiento de la legislación existente para la zona en proyección y la provisión de un suministro estable durante la totalidad del ciclo de vida de la instalación. Sin embargo, la actividad de la instalación no ha sido reconocida ni integrada por las Administraciones regionales. De hecho, el IAEST dependiente del Gobierno de Aragón no incluye la instalación de aguas residuales de Fabara como planta depuradora en su estadística de 2014, pese a estar construida desde 2006 y autorizado su vertido desde 2010 por los procedimientos establecidos. El no ser considerada esta propuesta como alternativa por las autoridades regionales, se supera el alcance de resultados y se confiere una dimensión política a la depuración.

Además, la planificación y gestión de la depuración del agua en Aragón realizada por el Instituto Aragonés del Agua, (IAA) ha sido denunciada ante la fiscalía anticorrupción por la gestión opaca, plagada de irregularidades, y con graves indicios de corrupción (2019)

## 4. Conclusiones

El caso de la depuradora de Fabara corrobora que mientras que la depuración convencional plantea problemas de sostenibilidad en determinados territorios, la tecnología no convencional del FHS correctamente implementada, consigue buenos resultados en la eliminación de contaminantes. Es un ejemplo de sensatez innovadora adaptada a la realidad y enfocada a la sostenibilidad en el diseño, construcción y durante el tiempo de funcionamiento. El diseño a esta escala tecnológica facilita la asunción de responsabilidades en la conservación y mantenimiento por parte del Consistorio si es capacitado, escapando del control y seguimiento de los círculos de tecnócratas y expertos y minimizando la posibilidad de abandono de la instalación. La ejecución y mantenimiento de la instalación es gestionada por el municipio sin necesidad de recurrir a un endeudamiento de este.

Además, se trata de una propuesta de cooperación de carácter multidisciplinar entre el centro político de toma de decisiones y el Centro de Investigación en la Universidad, así como las empresas. Es una interesante alternativa a articular de cooperación público-público que puede abrir nuevas vías en el conocimiento, implantación y desarrollo de propuestas novedosas que faciliten en cumplimiento de los objetivos de la depuración, integrando a la universidad en el tejido social.

Asimismo, al tratarse de una infraestructura fácilmente integrable y adaptable al paisaje natural de la zona donde se ubica, provee valiosos servicios ecosistémicos además del suministro de agua limpia y la eliminación de residuos,



como son la generación de hábitat al asimilarse a áreas naturales, la regulación climática e hidrológica, la belleza estética, además de servicios educativos y recreacionales con las correspondientes medidas preventivas.

Se confirma que el nivel actual de conocimientos permite asegurar que en pequeñas poblaciones cualquier tipo de agua residual urbana puede ser depurada de forma autónoma sin energía adicional, ni suministros externos, además de no generar residuos, garantizando el cumplimiento de los distintos ejes de sostenibilidad económica, social y ambiental y que así se está aplicando en otros países. Pero las propuestas técnicas o tecnológicas en sí mismas no son útiles sin un marco estratégico más global que las acompañen, debido a la necesidad de garantizar su funcionamiento durante su ciclo de vida. Es por ello que la tecnología ha de estar asumida en los círculos de toma de decisiones. Además, su gestión y mantenimiento fuera de círculos especialistas, facilitaría la transparencia además de evitar escenarios de corrupción. Esta contribución es también extrapolable

para poblaciones reducidas en el contexto de cooperación al desarrollo, dado que es gestionable a nivel comunitario.

Por ello, es necesario vencer las fuerzas que se oponen al cambio de modelo en la implementación de la depuración con la apertura a tecnologías alternativas. Es imprescindible articular y reforzar sistemas multidisciplinares y multiescales a nivel local, regional y nacional para la aceptación y la reintroducción de estas tecnologías en las empresas del sector.

Los beneficios que se demuestran asociados a este tipo de tecnología deberían ser un condicionante y propulsor, en sí mismo, para que se implementara su instalación, se financiaran y abrieran nuevas líneas de investigación de las propuestas existentes como nuevas propuestas cobrando un protagonismo similar o mayor al de otros países.

### Agradecimientos

CENTA, Ayuntamiento de Fabara, Grupo de Agroenergética de Universidad Politécnica de Madrid.

## REFERENCIAS

- Bates B. C., Kundzewicz Z. W., Wu S., Palutikof, J.P. (2008) Climate Change and Water. Technical Paper of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC).
- Brix H., Arias CA. (2005) Danish guidelines for small-scale constructed wetland systems for onsite treatment of domestic sewage. *Water Science Technology* 51, 1-9.
- Cajigas, A., (2012) La evolución de la depuración de las aguas residuales urbanas en España. *Ingeniería Civil* nº 168.
- Collado N. (2000). Análisis Económico de Sistemas Naturales de Depuración en Núcleos Rurales. ETSECCPB dissertation, Technical University of Catalonia, 89 pp.

Collado R., Vargas G., (1991). La depuración de aguas residuales en pequeñas comunidades. Criterios de selección. Tecnología del Agua, 80.

CENTA (2012), Manual para la implantación de sistemas de depuración para pequeñas poblaciones.

CEDEX (2010). XXVIII Curso sobre tratamiento de aguas residuales y explotación de estaciones depuradoras.

Davidson C.I., Matthews H.S., Hendrickson C.T., Bridges M.W., Allenby B.R., Crittenden J.C. (2007). Adding sustainability to the engineer's toolbox: a challenge for engineering educators. Environ. Sci. Technol., 41, pp. 4847-4850.

El País (2018).

[https://elpais.com/politica/2018/07/24/actualidad/1532458329\\_809489.html](https://elpais.com/politica/2018/07/24/actualidad/1532458329_809489.html)

<https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/waterbase-uwwtd-urban-waste-water-treatment-directive-5#tab-additional-information>

Fernández, J., Domenech, F. (2017). La fitodepuradora de Fabara, 10 años de funcionamiento de un filtro verde flotante. Retema, nº 199.

Ferrer Y., Ortega de Miguel, E., Salas, J.J. (2012) Tendencias actuales en las tecnologías de tratamiento de las aguas residuales generadas en las pequeñas aglomeraciones urbanas. Ingeniería Civil. (CEDEX). 168.

Gebrezgabher S.A., Meuwissen M., Kruseman G., Lakner D., Oude Lansik A., (2015) Factors influencing adoption of manure separation technology in the Netherlands. Journal of Environmental Management. Vol 150, pages 1-8.

Hoy Aragón (2019).

<https://www.hoyaragon.es/a-fondo/plan-depuracion-podemos-fiscalia/>

Keddy P.A. (2000) Wetland ecology: principles and conservation. Cambridge University Press.

Landeros-Sánchez C., Lango-Reynoso F., Cstañeda-Chávez M., Galaviz-Villa I., Nikolskii-Gavrilov I., Palomarez-García M., Reyes-Velázquez Mínguez-Rodríguez, (2012). Assessment of Water Pollution in Different Aquatic Systems: Aquifers, Aquatic Farms on the Jamapa River, and Coastal Lagoons of Mexico. Journal of Agricultural Science; Vol. 4, No. 7; 2012.

Metcalf & Eddy Inc. (2002): Wastewater Engineering: Treatment and Reuse Vols. I y II. 1ra. Edición. Editorial McGraw – Hill.

PNUD (2006) Informe sobre desarrollo humano 2006. Más allá de la escasez: poder, pobreza y la crisis mundial del agua. Mundi-prensa libros. 2006.

- Puigagut, J., Villaseñor, J., Salas, J.J., Bécares, E., García, J. (2007). Subsurface-flow constructed wetlands in Spain for the sanitation of small communities: a comparative study. *Ecological Engineering* 30(4), 312-319.
- Sato, T., Qadir, M., Yamamoto, S (2013). Global, regional, and country level need for data on wastewater generation, treatment, and use. *Agricultural Water Management*, 2013. Vol 130, 1-13.
- Schulz R., Peall S.K.C (2001) Effectiveness of a Constructed Wetland for Retention of Nonpoint-Source Pesticide Pollution in the Lourens River Catchment, South Africa. *Environmental Science Technology*, 2001, 35 (2), pp 422-426.
- Tessier, D., Lajudie, A., Petit, J. C. (1992) Relation between the macroscopic behavior of clays and their microstructural properties. *Applied Geochemistry*. Vol 7, pg. 151-161.
- UNESCO (2017) UN World Water Development Report, Wastewater: The Untapped Resource.
- Weber K.P. Legge R.L. (2013) Comparison of the catabolic activity and catabolic profiles of rhizospheric, gravel-associated and interstitial microbial communities in treatment wetlands. *Water Sci. Technol.* 67:886-893
- Wu J. (2013). Landscape sustainability science: ecosystem services and human well-being in changing landscapes. *Landscape Ecology*, 28, 999-1023.
- World resource institute. <https://www.wri.org/>
- WWAP (2009). Tercer Informe sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos en el Mundo (WWDR3).