



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR  
DE INGENIEROS DE CAMINOS,  
CANALES Y PUERTOS



# EVALUACIÓN DE LOS SERVICIOS ECOSISTÉMICOS PROPORCIONADOS POR LOS HUMEDALES ARTIFICIALES. APLICACIÓN AL HUMEDAL ARTIFICIAL DE CARRÍCOLA (VALENCIA).

Trabajo final de grado

*Titulación:* Grado en Obras Públicas.

**Especialidad en Hidráulica y Medio Ambiente.**

Curso: 2014/15

Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos  
Universidad Politécnica de Valencia

***Autora:*** Blanca de la Cruz Vicente

***Tutor:*** Miguel Martín Moneris

*Valencia, junio de 2015*

## **ÍNDICE DOCUMENTAL**

### **DOCUMENTO Nº1: MEMORIA**

**CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN Y CONCEPTOS**

**CAPÍTULO 2. DESCRIPCIÓN DEL CASO DE ESTUDIO: HUMEDALES ARTIFICIALES PARA LA DEPURACIÓN DE AGUAS RESIDUALES DE CARRÍCOLA, VALENCIA.**

**CAPÍTULO 3. ESTUDIO DE LOS SERVICIOS ECOSISTÉMICOS PROPORCIONADOS POR LOS HUMEDALES ARTIFICIALES DE CARRÍCOLA. EN CONCRETO EL SERVICIO RELACIONADO CON LA MEJORA EN LA CALIDAD DE AGUAS.**

**CAPÍTULO 4. PROPUESTAS DE MEJORA Y NUEVOS SERVICIOS**

**CAPITULO 5. CONCLUSIONES**

**BIBLIOGRAFÍA**

### **DOCUMENTO Nº2: PLANOS**



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR  
DE INGENIEROS DE CAMINOS,  
CANALES Y PUERTOS



## DOCUMENTO N°1: MEMORIA

EVALUACIÓN DE LOS SERVICIOS ECOSISTÉMICOS PROPORCIONADOS POR LOS  
HUMEDALES ARTIFICIALES. APLICACIÓN AL HUMEDAL ARTIFICIAL DE CARRÍCOLA  
(VALENCIA).

*El presente trabajo se enmarca dentro del acuerdo de colaboración existente entre el ayuntamiento de Carrícola y la Universitat Politècnica de València firmado en fecha 24/02/2011 y prorrogado en fecha 24/02/2014.*

#### **AGRADECIMIENTOS**

*Quiero en estas líneas dar las gracias a todos los que han hecho posible la realización de este trabajo, a mi tutor Miguel, a Carmen y Sara por ser pacientes y enseñarme en el laboratorio; así como a todas las personas de Carrícola que hacen posible la existencia de estas alternativas y en concreto a Vicent Bohigues por la ayuda en la comprensión del sistema y la recogida de datos.*

## ÍNDICE

<b>CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN Y CONCEPTOS.....</b>	<b>1</b>
1.1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.2. SERVICIOS ECOSISTÉMICOS .....	2
1.3. HUMEDALES NATURALES.....	3
1.3.1. SERVICIOS ECOSISTÉMICOS BRINDADOS POR LOS HUMEDALES NATURALES...5	
1.3.2. MECANISMOS DE MEJORA DE LA CALIDAD DEL AGUA DESARROLLADOS EN LOS HUMEDALES NATURALES.....9	
1.4. HUMEDALES ARTIFICIALES .....	11
1.4.1. SERVICIOS ECOSISTÉMICOS DE LOS HUMEDALES ARTIFICIALES.....	11
1.4.2. HUMEDALES ARTIFICIALES PARA LA DEPURACIÓN DE AGUAS RESIDUALES ....	13
1.4.2.1. TIPOS DE HUMEDALES SEGÚN LA ZONA DE CIRCULACIÓN DEL FLUJO.....	15
1.4.2.2. ESQUEMA DE FUNCIONAMIENTO DE LOS HUMEDALES ARTIFICIALES SUSBSUPERFICIALES .....	16
1.4.2.3. MECANISMOS DE REMOCIÓN DE CONTAMINANTES EN LOS HUMEDALES ARTIFICIALES.....	19
<b>CAPÍTULO 2. DESCRIPCIÓN DEL CASO DE ESTUDIO: HUMEDALES ARTIFICIALES PARA LA DEPURACIÓN DE AGUAS RESIDUALES DE CARRÍCOLA, VALENCIA. ....</b>	<b>23</b>
2.1. MARCO GEOGRÁFICO .....	23
2.2. CLIMATOLOGÍA .....	24
2.3. USOS DEL TERRITORIO Y ECONOMÍA .....	25
2.4. DEMOGRAFÍA.....	26
2.5. NECESIDADES DE DEPURACIÓN.....	27
2.5.1. NORMATIVA.....	27
2.5.2. SITUACIÓN PREVIA.....	30
2.6. DESCRIPCIÓN DE LA ACTUACIÓN ADOPTADA: SISTEMA DE HUMEDALES ARTIFICIALES.....	32
2.6.1. DISEÑO DE LA SOLUCIÓN ADOPTADA.....	33
2.6.1.1. PRETRATAMIENTO .....	34

2.6.1.2. TRATAMIENTO PRIMARIO.....	34
2.6.1.3. TRATAMIENTO SECUNDARIO .....	36
2.6.1.4. CONDUCCIONES Y ARQUETAS.....	40
<b>CAPÍTULO 3. ESTUDIO DE LOS SERVICIOS ECOSISTÉMICOS PROPORCIONADOS POR LOS HUMEDALES ARTIFICIALES DE CARRÍCOLA. EN CONCRETO EL SERVICIO RELACIONADO CON LA MEJORA EN LA CALIDAD DE AGUAS.....</b>	<b>44</b>
3.1. OBJETIVOS.....	44
3.2. EL ECOSISTEMA GENERADO: EVOLUCIÓN DE LA VEGETACIÓN EN EL HUMEDAL ARTIFICIAL DE CARRÍCOLA .....	45
3.3. ESTUDIO DE LA CALIDAD DE LAS AGUAS EN EL HUMEDAL ARTIFICIAL DE CARRÍCOLA.....	55
3.3.1. RECOPIACIÓN DE LOS DATOS OBTENIDOS .....	55
3.3.2. OPERACIÓN DEL SISTEMA .....	56
3.3.3. RESULTADOS.....	58
3.3.3.1. EVOLUCIÓN DEL SISTEMA EN TORNO A LA CALIDAD DEL AGUA.....	58
3.3.3.2. EVOLUCIÓN DETALLADA DE LOS PRINCIPALES PARÁMETROS DE CALIDAD DE AGUAS .....	65
3.3.4. RESUMEN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS.....	74
3.4. CONSEJOS PARA LA BUENA OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DEL SISTEMA....	76
3.5. OTROS SERVICIOS ECOSISTÉMICOS.....	81
<b>CAPÍTULO 4. PROPUESTAS DE MEJORA Y NUEVOS SERVICIOS .....</b>	<b>82</b>
4.1. PROPUESTA DE HUMEDALES PARA LA DESHIDRATACIÓN DE LOS FANGOS EXTRAIDOS DE LOS TANQUES IMHOFF .....	82
<b>CAPITULO 5. CONCLUSIONES .....</b>	<b>89</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>91</b>



## CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN Y CONCEPTOS

### 1.1. INTRODUCCIÓN

Todos los seres vivos formamos parte de un gran ecosistema que transformamos para mantener nuestra existencia. Los seres humanos, en nuestra organización social, realizamos modificaciones en el medio con fines diversos. Las obras públicas son una parte más de estas alteraciones, cuyo fin último debiera ser siempre el bienestar de la comunidad. Al modificar el medio, debemos ser conscientes de que somos parte de ese ecosistema en el que, la mayoría de las veces de forma inadvertida para nosotras, se llevan a cabo funciones y procesos que son imprescindibles para el mantenimiento de la vida.

Este trabajo se enmarca dentro de ese continuo aprendizaje sobre las relaciones que se desarrollan en los ecosistemas y que son esenciales para la vida humana.

El buen estado de las masas de agua y de sus ecosistemas asociados es un tema de gran preocupación en las últimas décadas. El aumento en las aglomeraciones de población llevadas a cabo en los últimos años, así como la continua industrialización, han generado unos cambios en las características de las aguas residuales que han agotado la capacidad de autodepuración de muchas masas de agua. Llegando a provocar cambios irreparables en esos ecosistemas.

Un aumento de la concienciación sobre las problemáticas que se generan de la contaminación del agua, así como un mayor conocimiento sobre los procesos naturales de depuración que se llevan a cabo en los ecosistemas, nos puede ayudar a paliar este problema utilizando esos propios procesos naturales para la depuración de los efluentes a verter en el medio.

Además, la implantación de este tipo de tecnologías basadas en la reproducción de ecosistemas naturales fomentan la aparición de todas aquellas relaciones ecosistémicas que pasan a formar parte de la vida de la comunidad donde son implantadas.



## 1.2. SERVICIOS ECOSISTÉMICOS

Los seres vivos, como parte de la biosfera, aprovechan los recursos y alteran el medio que habitan. Sin embargo, como consecuencia del crecimiento de la población humana y de las capacidades de explotación de los recursos, el ser humano, está llevando a cabo acciones que producen un aumento progresivo de la degradación del medio y un cambio en las relaciones ecosistémicas de las que depende nuestra vida y grado de bienestar.

El aumento de la preocupación sobre el estado de los ecosistemas y las posibles repercusiones sobre los seres humanos (llevado a cabo a partir de la década de los 70) tuvo como consecuencia la implantación del concepto de los servicios ecosistémicos. Este concepto fue acuñado con el fin de aumentar la conciencia sobre la relación entre la calidad de vida de las poblaciones humanas y el resto de los factores del ecosistema del que forman parte. Así como de las repercusiones que las acciones antrópicas pueden desencadenar en los ecosistemas.

En 1997 Gretchan Daily definía a los *servicios como las condiciones y procesos a través de los cuales los ecosistemas naturales y las especies que los conforman, sostienen y nutren la vida humana.*

Posteriormente con la creación del Millenium Ecosystem Assessment (MA)<sup>1</sup> se extendió la definición de los servicios ecosistémicos como *los beneficios que proveen los ecosistemas a los seres humanos.*

Este organismo agrupó los servicios ecosistémicos en cuatro grandes categorías: *servicios de suministro*, como los alimentos y el agua; *servicios de regulación*, como la regulación de las inundaciones, las sequías, la degradación del suelo y las enfermedades; *servicios de base*, como la formación del suelo y los ciclos de los nutrientes; y *servicios culturales*, como los beneficios recreacionales, espirituales, religiosos y otros beneficios intangibles. (MA, 2005)

---

<sup>1</sup> Organismo promovido por las Naciones Unidas para determinar en qué medida los cambios en los servicios de los ecosistemas han afectado el bienestar humano, de qué manera los cambios en los ecosistemas pueden afectar a las personas en las próximas décadas, y qué tipos de respuestas pueden adoptarse en las escalas local, nacional o global con el fin de mejorar el manejo de los ecosistemas y, con ello, contribuir al bienestar humano y a la disminución de la pobreza. (Ecosistemas y Bienestar Humano: El Marco de la Evaluación, MA 2003)

Como comentan Patricia Balvanera y Helena Cotler en su estudio sobre los servicios ecosistémicos (2007), multitud de definiciones han sido acuñadas desde entonces, sintetizando ellas como concepto de los servicios ecosistémicos o servicios ambientales aquel que permite hacer un vínculo explícito entre el estado y funcionamiento de los ecosistemas y el bienestar humano. Pudiendo ser esta relación directa o indirecta y teniendo en cuenta que los seres humanos pueden o no ser conscientes de su existencia.

### 1.3. HUMEDALES NATURALES

El concepto de humedales engloba una amplia variedad de hábitats de interior, costeros o marinos que contienen áreas donde se producen inundaciones temporalmente. Según la Fundación Humedales<sup>2</sup> *los humedales son ecosistemas que permanecen con su suelo saturado de agua o en condiciones de inundación y/o anegamiento durante considerables períodos de tiempo, particularmente en la época de crecimiento vegetal. Por lo tanto, los humedales presentan rasgos físicos, químicos y biológicos con predominio de procesos anaeróbicos en los suelos que fuerzan a la biota –y particularmente a las plantas arraigadas– a presentar adaptaciones para tolerar la inundación o la alternancia inundación-sequía.*

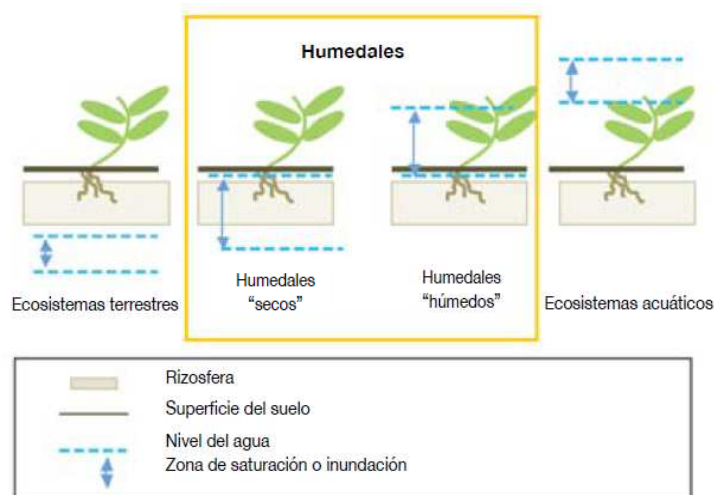


Ilustración 1: Esquema de los ecosistemas terrestres, acuáticos y humedales en relación a la variación del nivel del agua. (Fuente: FUNDACIÓN HUMEDALES - Adaptado de Brinson 2004)

<sup>2</sup> La Fundación Humedales (*Fundación para la Conservación y el Uso Sustentable de los Humedales*) es la oficina en Argentina de Wetlands International-LAC, la cual es una organización mundial de conservación, sin fines de lucro, que opera sobre bases científicas y produce instrumentos e información para brindar asistencia destinada al desarrollo y aplicación, por parte de los gobiernos, de las políticas, convenios y tratados que son necesarios para lograr la conservación de los humedales. (<http://lac.wetlands.org/>, feb-2015)

Por las características descritas anteriormente los humedales construyen el hábitat de multitud de especies albergando una amplia diversidad.

Debido al enorme valor que estos ecosistemas albergan, se firmó en febrero de 1971 la *Convención relativa a los Humedales de Importancia Internacional especialmente como Hábitat de Aves Acuáticas* (Convención Ramsar) cuyo objetivo es “la conservación y el uso racional de los humedales mediante acciones locales, regionales y nacionales y gracias a la cooperación internacional, como contribución al logro de un desarrollo sostenible en todo el mundo”.

Esta convención define a los humedales como “las extensiones de marismas, pantanos y turberas o superficies cubiertas de aguas, sean éstas de régimen natural o artificial, permanentes o temporarias, estancadas o corrientes, dulces, salobres o saladas, incluyendo las extensiones de aguas marinas cuya profundidad en marea baja no exceda los seis metros”. (Artículo 1.1)

La característica principal de los humedales es la alternancia de zonas con distinto grado de saturación. La vegetación que crece de manera natural en estos ecosistemas se caracteriza por haber desarrollado unas peculiaridades específicas que les permiten la adaptación a las diferentes condiciones de humedad que se dan dentro de estos ecosistemas.

Según la fundación Global Nature<sup>3</sup>, se pueden distinguir dos grandes grupos de macrófitas que se encuentran habitualmente en los humedales: hidrófitos e higrófitos terrestres.

Se denomina hidrófitos a las plantas que muestran un grado de adaptación muy avanzado para vivir en medios acuáticos. Este tipo de vegetación dispone de una amplia red de conductos huecos a lo largo de los tallos a través de los cuales almacena y permite la circulación del aire rico en oxígeno (deficitario en las zonas saturadas). Esta estructura que facilita la oxigenación de la parte radicular de las plantas actúa como agente aireador del humedal, siendo de vital importancia para la mejora de la calidad del agua.

---

<sup>3</sup> La Fundación GlobalNature es una entidad privada de ámbito nacional y carácter benéfico docente cuyos fines son la conservación, protección y ordenación del medio ambiente. (<http://www.fundacionglobalnature.org>, 2015)

Por higrófitos terrestres se denominan aquellas plantas que, sin ser acuáticas, muestran un cierto grado de adaptación a las condiciones de saturación del suelo. Algunas de estas especies son tolerantes a la contaminación del agua por lo que pueden ser empleadas en los humedales artificiales por su contribución a los procesos físicos de filtrado del agua.

La fauna que habita en los humedales es, quizá, una de las más ricas y variadas de los ecosistemas del planeta estando compuesta principalmente por aves, peces, anfibios, mamíferos, moluscos, crustáceos e insectos.

Se estima que algunos de los humedales cuentan con los ecosistemas más productivos del planeta. Por ello mismo estos ecosistemas han sido considerados por los seres humanos como sitios de especial interés para la habitabilidad pues albergan multitud de recursos naturales y servicios ecosistémicos.

### **1.3.1. SERVICIOS ECOSISTÉMICOS BRINDADOS POR LOS HUMEDALES NATURALES**

Dada la especial riqueza de estos ecosistemas, el bienestar de las personas que viven en sus alrededores suele estar altamente ligado a la integridad ecológica del mismo. *Entendida esta como la capacidad de soportar y mantener una comunidad de organismos con una estructura, funcionalidad y procesos de cambio comparables a lo que sería un ambiente natural de la región.* (P. Kandus et al. 2010)

Según una publicación sobre los bienes y servicios ecosistémicos del Humedal de Paraná (P. Kandus et al. 2010 - Fundación Humedales), los bienes y servicios que proveen los humedales a la sociedad dependen del mantenimiento de las funciones ecosistémicas de los mismos.

En el cuadro mostrado a continuación se observa una relación de las funciones básicas de los humedales relacionadas con los bienes y servicios que de éstas obtienen las personas.

## CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN Y CONCEPTOS

Tabla 1. Relación entre los bienes y servicios que prestan los humedales y sus funciones ecosistémicas.  
(Fuente: P. Kandus et al. 2010 - Fundación Humedales)

Funciones ecosistémicas		Bienes y servicios (ejemplos)
Genéricas	Específicas	
<b>Regulación Hidrológica</b>	Desaceleración de los flujos y disminución de turbulencia del agua	<i>Estabilización de la línea de costa. Disminución del poder erosivo.</i>
	Regulación de Inundaciones	<i>Disminución de la intensidad de los efectos de las inundaciones sobre áreas vecinas</i>
	Retención de agua Almacenaje a largo y corto plazo	<i>Presencia de reservorios de agua para consumo y producción.</i>
	Recarga de acuíferos	<i>Reservas de agua dulce para el hombre, para consumo directo y para utilización en sus actividades productivas</i>
	Retención y estabilización de sedimentos	<i>Mejoramiento de la calidad del agua</i>
	Regulación de procesos de evapotranspiración	<i>Atemperación de condiciones climáticas extremas</i>
<b>Regulación Biogeoquímica</b>	Ciclado de nutrientes (Nitrógeno, Carbono, Fósforo, etc.) Almacenaje / retención de nutrientes (ej. Fijación/ acumulación CO <sub>2</sub> , liberación de NH <sub>4</sub> )	<i>Retención de contaminantes Mejoramiento de la calidad del agua Acumulación de Carbono Orgánico (ie.turba). Regulación climática</i>
	Transformación y degradación de nutrientes y contaminantes	<i>Mejoramiento de la calidad del agua. Regulación climática</i>
	Exportación de nutrientes y compuestos.	<i>Vía agua: Sostén de cadenas tróficas vecinas Regulación Climática: Emisiones CH<sub>4</sub> a la atmósfera</i>
	Regulación de salinidad	<i>Provisión de agua dulce - Protección de suelos - Producción de sal</i>
<b>Ecológicas</b>	Producción primaria	<i>Secuestro de carbono en suelo y en biomasa Producción agrícola Producción de forraje para ganado doméstico y especies de fauna silvestre de interés. Producción apícola Producción de combustible vegetal y sustrato para cultivos florales y de hortalizas (turba)</i>
	Producción secundaria	<i>Producción de proteínas para consumo humano o como base para alimento del ganado doméstico ( fauna silvestre , peces e invertebrados acuáticos) Producción de especies de interés cinegético Producción de especies de peces para pesca deportiva y comercial. Producción de especies de interés turístico-recreacional (aves, mamíferos, reptiles, anfibios)</i>
	Provisión de hábitat	<i>Ambientes de interés paisajístico Oferta hábitat de especies de interés comercial, cinegético, cultural, etc. Provisión de hábitats críticos para especies migradoras (ej. aves) Provisión de hábitats críticos para la reproducción de especies animales (ej. aves, tortugas acuáticas, peces e invertebrados acuáticos)</i>
	Mantenimiento de interacciones biológicas	<i>Mantenimiento de cadenas tróficas locales y de ecosistemas vecinos Exclusión de especies invasoras.</i>
	Mantenimiento de la diversidad tanto específica como genética	<i>Provisión de productos animales y vegetales alimenticios, y construcción. Provisión de productos animales y vegetales no alimenticios (cueros, pieles, plumas, plantas y peces ornamentales, mascotas, etc.) Provisión de productos farmacológicos y etnobiológicos (para etnomedicina, con fines religiosos, rituales, etc.) Producción agrícola</i>

Según la clasificación del Millenium Ecosystem Assessment mencionada anteriormente, este organismo publicó en el informe "Los ecosistemas y el bienestar humano: humedales y agua" (2005) una relación de los servicios ecosistémicos - de los que se tiene constancia - que los humedales otorgan a los seres humanos:

## CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN Y CONCEPTOS

Tabla 2. Servicios de los ecosistemas que provienen o derivan de los humedales.

(Fuente: Millenium Ecosystem Assessment, *Los ecosistemas y el bienestar humano: humedales y agua*<sup>4</sup>, 2005)

Servicios	Comentarios y ejemplos
<b>De aprovisionamiento</b>	
Alimento	Producción de pescado, caza, frutas y granos
Agua dulce*	Almacenamiento y retención de agua para uso doméstico, industrial y agrícola
Fibra y combustible	Producción de troncos, leña, turba, forraje
Bioquímicos	Extracción de medicinas y otros materiales desde la biota
Materiales genéticos	Genes para la resistencia a patógenos de plantas, especies ornamentales, etc.
<b>De regulación</b>	
Regulación del clima	Fuente y sumidero de gases de efecto de invernadero; en los niveles local y regional influye sobre la temperatura, precipitación y otros procesos climáticos
Regulación del agua (flujos hidrológicos)	Recarga y descarga de agua subterráneas
Purificación del agua y tratamiento de residuos	Retención, recuperación y eliminación del exceso de nutrientes y otros contaminantes
Regulación de la erosión	Retención de suelos y sedimentos
Regulación de desastres naturales	Control de inundaciones, protección contra las tormentas
Polinización	Hábitat para polinizadores
<b>Culturales</b>	
Espirituales y de inspiración	Fuente de inspiración; muchas religiones vinculan valores espirituales y religiosos a aspectos de los ecosistemas de los humedales
Recreativos	Oportunidades para actividades recreativas
Estéticos	Muchas personas encuentran belleza y valores estéticos en ciertos aspectos de los humedales
Educacionales	Oportunidades para la educación formal y no formal y para capacitación
<b>De apoyo</b>	
Formación de suelos	Retención de sedimentos y acumulación de materia orgánica
Ciclo de los nutrientes	Almacenaje, reciclaje, procesamiento y adquisición de nutrientes

\*Si bien el agua dulce se consideró como un servicio de aprovisionamiento en la EM, varios sectores la consideran también un servicio de regulación.

Según el MA, dos de los más importantes servicios que ofrecen los humedales a nivel mundial son el suministro de pescado y el abastecimiento de agua (teniendo en cuenta que las aguas subterráneas de las que depende el abastecimiento de entre 1.500 y 3.000 millones de personas son habitualmente recargadas por humedales). Así como la purificación del agua y detoxificación de desechos (pudiéndose encontrar ratios de reducción de hasta un 80% en las concentraciones de nitratos), la regulación del clima -mediante la captura y emisión de carbono<sup>5</sup> y la regulación de los procesos de evapotranspiración - y la mitigación de los efectos del cambio climático, pues como expresaremos a continuación, los humedales juegan un papel fundamental en la amortiguación de los eventos hidrológicos extremos.

<sup>4</sup> Este informe contiene una tabla más completa en la que se refleja la importancia de cada uno de los servicios ecosistémicos según el tipo de humedal a estudiar.

<sup>5</sup> Uno de los ejemplos de la regulación del clima por la captación de carbono lo podemos encontrar en las turberas, donde se estima que se encuentra almacenado un 1,5% del total de carbono almacenado a nivel mundial y alrededor de un 25 a 30% del que está contenido en la vegetación terrestre y los suelos. (MA 2005)

Como se expresa en la tabla 1, estos ecosistemas tienen gran influencia en la regulación del ciclo hidrológico y biogeoquímico, ejerciendo funciones de control de las inundaciones, recarga de aguas subterráneas, regulación del caudal en los ríos y mejora en la calidad de las aguas.

- **Influencia en el control de inundaciones:** las llanuras de inundación reducen los picos de crecida reteniendo los excedentes de la escorrentía y liberándolos posteriormente, con lo que se disminuye la naturaleza destructiva de las inundaciones.
- **Disminución en la velocidad del flujo:** esta función de los humedales es primordial pues influye directamente en la **capacidad erosiva** de los ríos y en la **sedimentación de materiales y nutrientes** que permiten que estas tierras puedan ser usadas para la agricultura, el pastoreo y la producción pesquera.
- **Retención y almacenamiento de agua:** Los humedales pueden ser utilizados para la captación de agua para el uso humano. Por otro lado, la captura y mantenimiento de la humedad en los suelos ofrecen una **gran diversidad de hábitats**.
- **Recarga de aguas subterráneas:** La disminución de la velocidad del flujo en estos ecosistemas aumenta la percolación de agua a los acuíferos subterráneos.
- **Depuración de aguas:** La mejora en la calidad de las aguas a su paso por estos ecosistemas ha resultado ser uno de los servicios ecosistémicos más aprovechados por los seres humanos. A grandes rasgos se puede avanzar que las causas de la mejora de la calidad del agua están estrechamente relacionadas con la disminución en la turbulencia y velocidad del flujo - que provoca la sedimentación de los sólidos en suspensión - , las características de oxidación-reducción de estos ecosistemas - que pueden resultar favorables para la degradación de la materia orgánica, el reciclado del nitrógeno, la complejación y precipitación de fósforo y metales - y con las especies vegetales que crecen de forma natural en estos hábitats. Este hecho ha fomentado la utilización de estos ecosistemas como herramientas de depuración mediante la construcción de humedales artificiales para la depuración de aguas.

Además de los servicios ecosistémicos descritos anteriormente los humedales brindan gran cantidad de servicios espirituales y culturales pues proporcionan lugares con un alto valor estético, educacional, espiritual y sociocultural así como una amplia gama de oportunidades para la recreación y el turismo.

Aunque desde nuestra percepción no sea posible poner un valor monetario a estos ecosistemas podemos decir que se han realizado estudios en los que se refleja que el valor económico total de los humedales naturales es a menudo mayor que el de los que han sido convertidos a otros usos. Este hecho refleja cómo muchos de los servicios que los humedales nos prestan no han sido considerados por quienes están a cargo de la toma de decisiones. (MA 2005)

### **1.3.2. MECANISMOS DE MEJORA DE LA CALIDAD DEL AGUA DESARROLLADOS EN LOS HUMEDALES NATURALES**

Los humedales naturales constituyen ecosistemas que por sus características intrínsecas mejoran la calidad de las aguas que circulan a su través. En este proceso intervienen tanto los seres vivos, como la parte abiótica del ecosistema, y las relaciones que entre ellos se suceden dan lugar a un complejo entramado de procesos físicos, químicos y biológicos.

El proceso de mejora en la calidad de las aguas se inicia con la pérdida en la velocidad del flujo. Este suceso permite que las partículas en suspensión decanten y disminuya la turbidez. Dicho descenso en la celeridad del agua aumenta la filtración, lo cual supone otra mejora en la calidad.

Los seres vivos que forman parte de estos ecosistemas son los responsables de gran parte de los procesos de depuración. Dentro de ellos podemos destacar, por su importancia en la remoción de contaminantes, los microorganismos, las algas y las plantas superiores (vegetación).

Los **microorganismos** que colonizan estos ecosistemas suelen albergarse en la superficie de las partículas sólidas, sedimentos y partes sumergidas de las plantas. Estos organismos son indispensables para la depuración, pues intervienen en la descomposición de la materia orgánica. Dentro de esta clase de seres vivos que habitan en los humedales se encuentran las bacterias, las cuales son responsables de la degradación de los compuestos de carbono. A su vez, tienen una importancia fundamental en la remoción del nitrógeno, ya que son capaces de transformarlo hacia formas asimilables por las plantas así como hacia formas gaseosas que pueden ser fácilmente liberadas a la atmósfera.



Otros organismos pertenecientes a este grupo son los protozoos, muy importantes por su tarea de regulación de la población bacteriana así como por su contribución a la floculación de sólidos orgánicos.

Las **algas** son organismos acuáticos autótrofos que juegan un papel muy importante en la mejora de la calidad del agua pues contribuyen, liberando oxígeno fotosintético, a la creación de un ambiente propicio para los procesos de oxidación que son necesarios en la remoción de carga contaminante. No obstante, el crecimiento de las poblaciones de algas no ha de ser excesivo pues, si el nivel de nutrientes es elevado, puede ocasionar la eutrofización del ecosistema.

La **vegetación** de estos ecosistemas desempeña un papel fundamental en los procesos físicos que intervienen en la mejora de la calidad del efluente. Al actuar como una barrera física, reducen la velocidad del influente reteniendo a su vez sólidos entre sus tallos. Este ambiente es además el más propicio para el crecimiento de bacterias, protozoos y algas.

Por otro lado, las plantas absorben diferentes nutrientes en su propio desarrollo, con lo que colaboran en la eliminación de nitrógeno y fósforo, así como de otros micronutrientes u oligoelementos.

Otro tipo de seres vivos que se alojan en estos ecosistemas, como los hongos y distintos tipos de animales como insectos, aves, peces y anfibios, juegan un papel importante en la regulación de las poblaciones de microorganismos y algas.

#### **1.4. HUMEDALES ARTIFICIALES**

Los humedales artificiales, contruidos o antrópicos son zonas diseñadas, construidas y manejadas por el hombre en las que, de forma controlada, se reproducen las condiciones físicas, químicas y biológicas características de los humedales naturales.

Los principales aspectos que diferencian los humedales artificiales de los naturales tienen que ver con el control del hombre sobre el medio. En los humedales artificiales, el operador suele controlar el flujo de agua y el tiempo en el que el humedal se encuentra saturado, así como otras características dependiendo del objetivo principal para el que se ha llevado a cabo su construcción.

##### **1.4.1. SERVICIOS ECOSISTÉMICOS DE LOS HUMEDALES ARTIFICIALES**

Los humedales artificiales, por la analogía con los naturales, constituyen delicados ecosistemas que pasan a formar parte del hábitat de multitud de seres vivos cumpliendo funciones esenciales para el mantenimiento de la vida humana.

La construcción por los seres humanos de humedales artificiales tiene que ver con la amplia cantidad de servicios ecosistémicos que estos hábitats nos brindan. Entre otros, los objetivos que se persiguen con su construcción son: el control de inundaciones, la mejora de la fauna y la biodiversidad, la retención de nutrientes, la disminución en la emisión de gases de efecto invernadero y la depuración de aguas residuales.

A continuación se describen algunas de las experiencias recopiladas por Vymazal en su estudio sobre los servicios ecosistémicos de los humedales restaurados o artificiales (2010):

- Control de inundaciones y mejora de la fauna

Los humedales artificiales de "Des Plaines", en el noreste de Illinois, contruidos para la purificación del agua, el control de inundaciones y la mejora de la fauna recogieron tras su evaluación que el número de individuos y especies de aves acuáticas que pasaban por los humedales aumentó alrededor del 4000% y 400%, respectivamente. También se notificó la llegada de varias especies en peligro de extinción tanto para la anidación como durante la época de reproducción.

Otro ejemplo lo podemos encontrar en el estudio realizado por Shuven et al. (2001) sobre 240 hectáreas de humedales artificiales en Yancheng, Reserva de la Biosfera en China, donde la producción primaria total del sistema aumentó en 3,3 veces cuando la tierra de pastos se convirtió en un humedal.

- Restauración de tierras agrícolas

En los últimos años, diversos países han implementado la creación de humedales artificiales con el objetivo de volver a conseguir los servicios ecosistémicos que se perdieron tras el drenaje de humedales y la conversión en tierras agrícolas. Un ejemplo de humedales creado con este fin tuvo lugar al sur de Suecia donde los estudios realizados posteriormente concluyeron que la creación de estos ecosistemas había mejorado la retención de nitrógeno y disminuido las emisiones de CH<sub>4</sub>. La alta densidad de plantas acuáticas fue la propiedad más importante de los humedales que disminuyó la producción neta de metano, facilitando a su vez la retención de nitrógeno.

- Creación de zonas ribereñas

Otros proyectos de humedales artificiales se han realizado para la recuperación o la creación de zonas de ribera. Las zonas de ribera, al formar el ecosistema intermedio entre la zona terrestre y los ríos, desempeñan funciones muy importantes como pueden ser: mejorar la calidad del agua - pues disminuyen la contaminación difusa-, estabilizan las márgenes de los ríos evitando la erosión, minimizan los picos de crecida en las inundaciones, crean microclimas que mejoran el hábitat para especies salvajes (tanto acuáticas como terrestres) y minimizan las emisiones de gases de efecto invernadero entre muchas otras funciones.

- Humedales para la depuración de aguas residuales

Los humedales naturales se han usado desde hace tiempo para la depuración de aguas residuales. La utilización de estos ecosistemas ha generado daños en ellos muchas veces irreparables. Por ello, se han empezado a implantar humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales donde el control sobre el agua vertida es mayor. En los apartados posteriores se ha recopilado más información sobre el funcionamiento y operación de este tipo de sistemas así como sobre los múltiples servicios ecosistémicos que proporcionan.

#### 1.4.2. HUMEDALES ARTIFICIALES PARA LA DEPURACIÓN DE AGUAS RESIDUALES

Como se ha comentado en los apartados anteriores las características propias de los humedales propician una mejora en la calidad de las aguas que fluyen a través de ellos. En este apartado se pretende abordar cómo los seres humanos han aprovechado estos mecanismos que se llevan a cabo de forma natural en los humedales para el desarrollo de tecnologías de depuración no convencionales.

##### TÉCNICAS DE DEPURACIÓN CON HUMEDALES ARTIFICIALES

La concentración de la carga contaminante en las aguas residuales hace necesaria una depuración previa de los vertidos para evitar un gran perjuicio a los cauces receptores.

La utilización de los humedales artificiales para disminuir la carga contaminante de las aguas residuales se basa en la reproducción de las condiciones naturales de los humedales que, como hemos visto anteriormente, desarrollan mecanismos de depuración de las aguas que los atraviesan.

En el diseño de un humedal artificial hay que tener en cuenta las siguientes características:

1. Asegurar la **estanqueidad e impermeabilización** de las capas de base para evitar que percolen las aguas residuales.
2. Elección de un **sustrato adecuado** para el enraizamiento de las plantas y el crecimiento de los microorganismos que van a fomentar los procesos de biodegradación de los contaminantes presentes en las aguas residuales. El medio granular debe ser limpio, duro y durable. No es recomendable la utilización del suelo original como base para la implantación del humedal pues suele provocar una rápida colmatación del sustrato. (CENTA 2007) A la hora de elegir las capas granulares deberemos tener muy en cuenta la conductividad hidráulica ya que nos determinará la cantidad de flujo que puede tratar el humedal. Debe tenerse en cuenta que este parámetro disminuirá con el paso del tiempo.

3. Elección de la **vegetación** que conforma el humedal y que contribuye a la oxigenación del sustrato y la eliminación de nutrientes.

La vegetación que forma parte de este tipo de sistemas suele ser la habitual de los humedales naturales (plantas acuáticas emergentes como el junco, el carrizo o la enea). Este tipo de plantas toleran bien la falta de oxígeno que tiene lugar en los sustratos saturados facilitando la aireación a través del área radicular.

En la selección de la vegetación a usar en un humedal artificial se deben tener en cuenta las características de la región donde se realizará el proyecto, así como las siguientes recomendaciones (J.García y A.Corzo, 2008):

- *Las especies deben ser colonizadoras activas, con eficaz extensión del sistema de rizomas.*
- *Deben ser especies que alcancen una biomasa considerable por unidad de superficie para conseguir la máxima asimilación de nutrientes.*
- *La biomasa subterránea debe poseer una gran superficie específica para potenciar el crecimiento de la biopelícula.*
- *Deben disponer de un sistema eficaz de transporte de oxígeno hacia las partes subterráneas para promover la degradación aeróbica y la nitrificación.*
- *Se debe tratar de especies que puedan crecer fácilmente en las condiciones ambientales del sistema proyectado.*
- *Debe tratarse de especies con una elevada productividad.*
- *Las especies deben tolerar los contaminantes presentes en las aguas residuales.*
- *Se deben utilizar especies propias de la flora local.*

### 1.4.2.1. TIPOS DE HUMEDALES SEGÚN LA ZONA DE CIRCULACIÓN DEL FLUJO

#### HUMEDALES SUPERFICIALES

La característica principal de este tipo de sistemas es que una gran parte del flujo de agua está expuesto directamente a la atmósfera, circulando a través de los tallos de la vegetación que coloniza el humedal.

Esta característica les confiere un mayor valor ecosistémico pues aumenta el atractivo para albergar distintas especies. Pero a su vez, aumenta el riesgo de aparición de malos olores y mosquitos, así como de contacto directo con las aguas residuales.

Es por ello por lo que este tipo de humedales suelen ser empleados para la mejora de la calidad de efluentes provenientes de tratamientos secundarios o para la restauración ambiental de ecosistemas acuáticos.

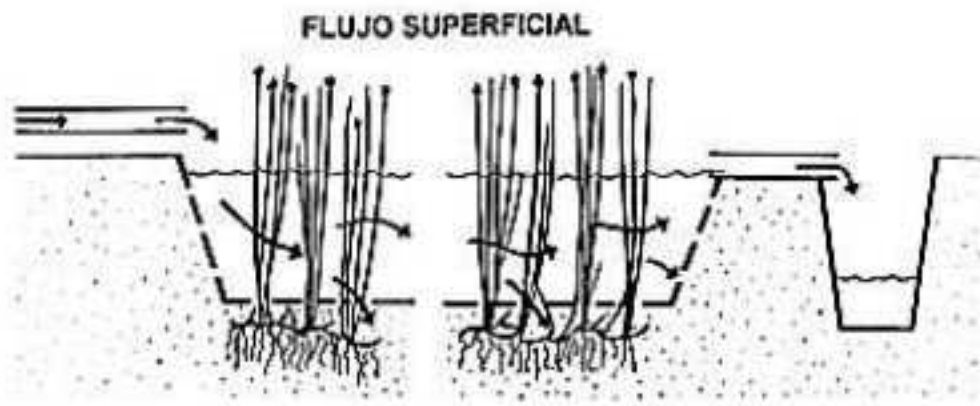


Ilustración 2. Esquema de funcionamiento de los humedales artificiales de flujo superficial. (Fuente: Hans Brix - Universidad de Aarhus, Dinamarca).

#### HUMEDALES SUBSUPERFICIALES

La característica que diferencia a estos sistemas con los anteriores es la zona que atraviesa el flujo. En los humedales subsuperficiales el agua circula únicamente a través del sustrato que

sirve de soporte de la vegetación y que debe permitir una permeabilidad suficiente para evitar la temprana colmatación del medio granular.

Este tipo de sistemas suelen requerir menos superficie que los de flujo superficial, contando también con una mayor capacidad de tratamiento por lo que suelen ser empleados para la depuración de las aguas residuales de poblaciones menores a los 2000 habitantes.

Otra de las características más importantes de estos sistemas es el amortiguamiento de las variaciones ambientales pues las plantas reducen la intensidad de la luz incidente sobre el medio granular evitándose así grandes oscilaciones térmicas que pueden afectar el proceso de depuración.

Los humedales subsuperficiales se pueden clasificar según la dirección con la que circulan las aguas a través del medio granular obteniendo así dos tipos de sistemas: humedales subsuperficiales de flujo horizontal y de flujo vertical.

### **1.4.2.2. ESQUEMA DE FUNCIONAMIENTO DE LOS HUMEDALES ARTIFICIALES SUBSUPERFICIALES**

A la hora de diseñar este tipo de sistemas se sigue el esquema básico de cualquier planta de tratamiento de aguas residuales. Las etapas que se pueden diferenciar son: Pretratamiento, tratamiento primario y tratamiento secundario.

**Pretratamiento:** El objetivo de esta fase es la eliminación de elementos gruesos, grasas y flotantes. El sistema más habitual de eliminación de estos componentes suele llevarse a cabo con la colocación de rejillas de desbaste con una separación de 2-3 cm entre barrotes.

**Tratamiento primario:** Tiene como objetivo la disminución de los sólidos en suspensión que se encuentran en las aguas residuales. En este paso se suelen utilizar fosas sépticas o tanques Imhoff, que además de ayudar a la sedimentación de los sólidos en suspensión facilitan la degradación anaerobia y la mineralización de la fracción orgánica sedimentable.

**Tratamiento secundario:** La pretensión de esta fase es la eliminación de la materia orgánica disuelta o coloidal. En los sistemas de humedales artificiales esta fase es desarrollada por los humedales en sí.

#### HUMEDALES SUBSUPERFICIALES DE FLUJO HORIZONTAL

En estos sistemas la alimentación se efectúa de manera continua, atravesando horizontalmente el sustrato que será homogéneo en toda la sección. (Diámetros medios de 5-8 mm ofrecen muy buenos resultados. J.García y A.Corzo, 2008)

Uno de los puntos más importantes de estos sistemas es el reparto homogéneo del flujo a través de toda la sección transversal. Para ello suelen recogerse las aguas entrantes en una arqueta colocando un dispositivo horizontal en la entrada del humedal que produzca un reparto equitativo del flujo. Es importante a su vez evitar la creación de caminos preferentes dentro del humedal.

La recogida del efluente suele realizarse mediante una tubería perforada que se coloca en el fondo del humedal en el extremo opuesto a la entrada. A la salida de estos sistemas se coloca una tubería flexible en "L" que permite el control del nivel del agua en el interior del humedal. Este nivel suele mantenerse unos 5 cm por debajo de la rasante impidiendo que las aguas entren en contacto directo con la atmósfera.

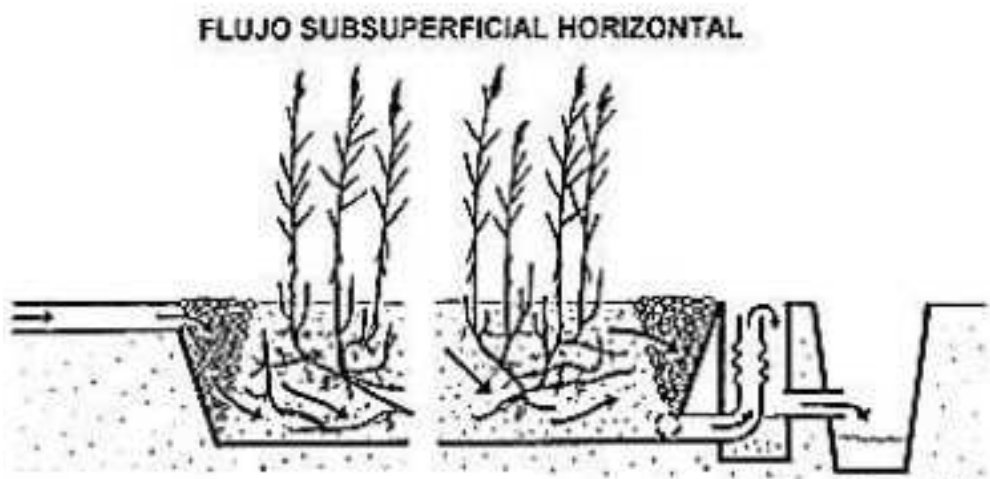


Ilustración 3. Esquema de funcionamiento de los humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal. (Fuente: Hans Brix - Universidad de Aarhus, Dinamarca).



### HUMEDALES SUBSUPERFICIALES DE FLUJO VERTICAL

En estos sistemas la alimentación se efectúa de manera intermitente circulando las aguas en sentido vertical. El medio granular a disponer en esta clase de humedales suele ser de tipo heterogéneo, disponiendo de distintas capas horizontales cuya granulometría aumenta con la profundidad. Esta disposición se adopta para regular la velocidad del flujo por el lecho.

La alimentación intermitente es esencial para la regulación del crecimiento de la biomasa, la aireación de los sistemas y la mineralización de la materia orgánica.

Para una distribución homogénea del fluido se utilizan redes de tuberías dispuestas sobre la superficie, ya sea en forma radial o a lo largo del lecho. Debido al flujo discontinuo, en climas fríos se suelen colocar enterradas en el lecho entre 0,05 y 0,1 m por debajo de la superficie con el fin de evitar la congelación (J.García y A.Corzo, 2008). En el fondo de estos humedales se coloca una red de drenaje que recoge los efluentes tratados. Este tipo de sistemas suelen contar a su vez con una serie de chimeneas verticales que permitan la completa aireación de la columna de gravas. Se suele recomendar la instalación de 1 tubería por cada 4 m<sup>2</sup>.

Los humedales de flujo vertical tienen una mayor capacidad de depuración de las aguas pues aumentan la oxigenación del flujo permitiendo que se desarrollen más fácilmente los procesos de nitrificación.

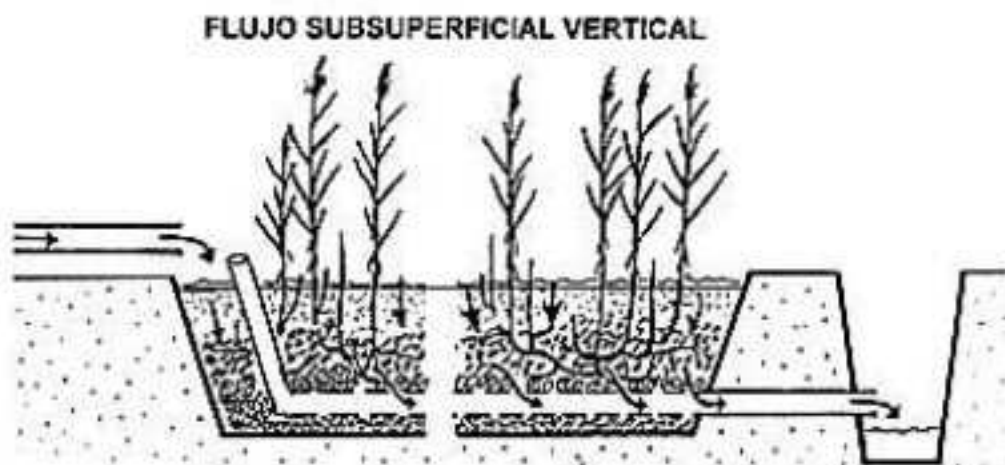


Ilustración 4. Esquema de funcionamiento de los humedales artificiales de flujo subsuperficial vertical. (Fuente: Hans Brix - Universidad de Aarhus, Dinamarca).

Es muy habitual el diseño de sistemas de depuración que combinen ambos tipos de humedales (de flujo horizontal y de flujo vertical) pues de esta manera se favorece la sucesión progresiva de procesos de nitrificación y desnitrificación que provocan una mejor eliminación del nitrógeno.

#### **1.4.2.3. MECANISMOS DE REMOCIÓN DE CONTAMINANTES EN LOS HUMEDALES ARTIFICIALES**

Como se introdujo en el apartado anterior la pretensión principal de la utilización de humedales artificiales para la mejora de la calidad del agua radica en su eficiente eliminación de materia orgánica biodegradable, y por tanto, suelen formar parte del tratamiento secundario o terciario. No obstante también se produce reducción del resto de los contaminantes principales. A continuación se introducen los mecanismos de eliminación de contaminantes:

Reducción de sólidos en suspensión (SS): la eliminación de la materia en suspensión dentro de los humedales artificiales se produce principalmente por los procesos de sedimentación, floculación y filtración. Siendo este último el más relevante en los humedales de flujo subsuperficial.

Reed y col. (1995) proponen para la evaluación de los SS en esta tipología de humedales la siguiente ecuación:

$$SSe = SSi(0.1058 + 0.0011 \times CHS)$$

Siendo:

SSe: concentración de sólidos en suspensión en el efluente (mg/l).

SSi: concentración de sólidos en suspensión en el influente (mg/l)

CHS: carga hidráulica superficial (cm/d) que se calcula como:  $CHS=100 \cdot Q/S$

Q= caudal influente (m<sup>3</sup>/d)

S= superficie del humedal (m<sup>2</sup>)

Eliminación de la materia orgánica: En la reducción de la materia orgánica presente en las aguas residuales intervienen dos tipos de proceso: de carácter físico y de carácter biológico.

La materia orgánica que llega en forma particulada o coloidal es separada físicamente mediante los procedimientos descritos para la materia en suspensión (floculación, sedimentación y filtración). Pero además en este caso pueden producirse procesos físicos de sorción<sup>6</sup> relacionados con las características superficiales del sustrato o elemento sobre el que se producen.

Los microorganismos presentes en el humedal actúan sobre la materia orgánica produciéndose procesos biológicos tanto aerobios como anaerobios. En el caso de la presencia de oxígeno las reacciones que se llevan a cabo pueden ser de oxidación, síntesis o respiración endógena. Siendo estas las más adecuadas para la eliminación de materia orgánica.

En las zonas del humedal que permanecen en condiciones de anaerobiosis se llevan a cabo procesos de degradación que constan de tres etapas que se desarrollan de manera concatenada (hidrólisis, acidogénesis y metanogénesis) produciéndose finalmente biogás que se expulsa a la atmósfera. Estas reacciones son más lentas y menos eficientes que las producidas en presencia de oxígeno.

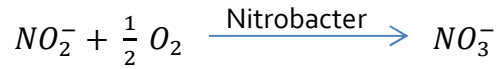
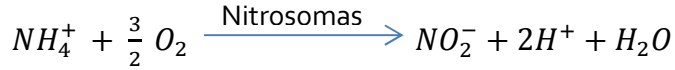
Eliminación de Nitrógeno: El nitrógeno puede estar presente en las aguas residuales en forma de nitrito ( $\text{NO}_2^-$ ), nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ), amonio ( $\text{NH}_4^+$ ) y nitrógeno orgánico, siendo estas dos últimas formas las predominantes en las aguas residuales urbanas.

El nitrógeno orgánico se transforma a nitrógeno amoniacal mediante procesos de amonificación. La remoción del nitrógeno amoniacal en los humedales artificiales puede producirse mediante dos procesos: asimilación del nitrógeno amoniacal por la vegetación del humedal (no elimina más de un 15-20%) y mediante procesos de nitrificación-desnitrificación (principal vía de eliminación de esta forma de nitrógeno).

---

<sup>6</sup> La sorción es el proceso físico de retención de una sustancia por otra cuando están en contacto; incluye las operaciones de absorción, adsorción, intercambio iónico y diálisis.

La nitrificación es el proceso de conversión biológica de amonio a nitrato. Este proceso se desarrolla en dos etapas: las bacterias Nitrosomas oxidan el nitrógeno amoniacal a nitrógeno nitroso, posteriormente las bacterias Nitrobacter oxidan las formas nitrosas a nítricas.



Como se observa en las ecuaciones anteriores la nitrificación es un proceso aerobio en el que las condiciones de pH y temperatura ejercen una gran influencia sobre las bacterias presentes.

La desnitrificación es el proceso en el cual se reduce el nitrato a nitrógeno gaseoso mediante la acción de bacterias heterótrofas. Para la consecución de esta reacción es indispensable la condición de anoxia así como la presencia de carbono orgánico en cantidad suficiente.

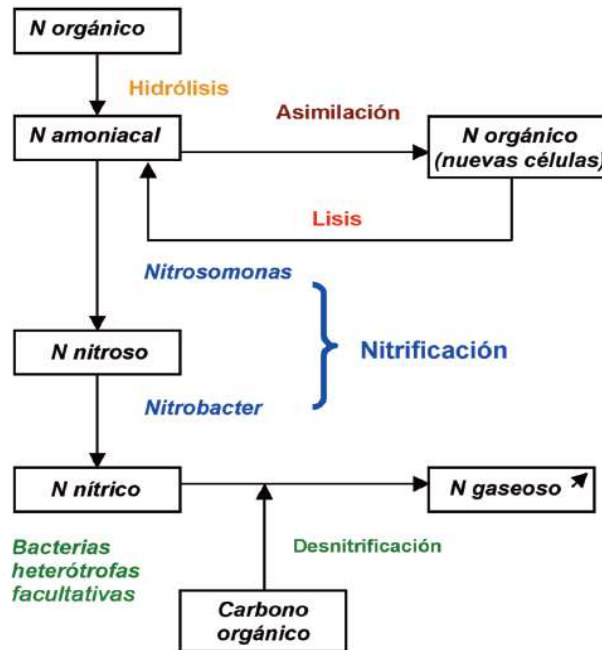


Ilustración 5. Esquema mecanismos de eliminación del Nitrógeno. (Fuente: CENTA 2007)

Eliminación de Fósforo: El fósforo se encuentra en las aguas residuales en forma orgánica e inorgánica (principalmente ortofosfatos). Las principales vías de remoción de este elemento son: asimilación por la vegetación (en torno al 10%), adsorción sobre el sustrato y precipitación mediante reacciones con compuestos como el hierro, el aluminio o el calcio dando lugar a fosfatos insolubles.

Reed y col. (1995) proponen para la evaluación de la eliminación del fósforo en los humedales artificiales la siguiente ecuación:

$$Pe = Pi \times \exp(-Kp/CHS)$$

Siendo:

Pe: concentración de fósforo en el efluente (mg/l).

SSi: concentración de fósforo en el influente (mg/l).

Kp: constante de reacción con un valor de 2,73 cm/d.

CHS: carga hidráulica superficial (cm/d) que se calcula como en los casos anteriores.

Eliminación de organismos patógenos: las aguas residuales pueden contener una amplia gama de organismos patógenos sin embargo para el análisis de la contaminación por patógenos suele utilizarse como indicador el recuento de coliformes fecales. Los humedales artificiales reducen la contaminación por patógenos mediante los siguientes mecanismos: absorción sobre el sustrato, eliminación mediante los antibióticos producidos por las raíces de la vegetación y la acción depredadora de bacteriófagos y protozoos.

Eliminación de metales pesados: Los principales mecanismos de eliminación de metales traza en los humedales artificiales son: procesos de sedimentación, precipitación química, adsorción y asimilación por las plantas. Cuando se sabe que el agua residual contiene una elevada cantidad de metales es necesario realizar un tratamiento previo.

## CAPÍTULO 2. DESCRIPCIÓN DEL CASO DE ESTUDIO: HUMEDALES ARTIFICIALES PARA LA DEPURACIÓN DE AGUAS RESIDUALES DE CARRÍCOLA, VALENCIA.

### 2.1. MARCO GEOGRÁFICO

Carrícola es un pequeño municipio situado al sureste de la comarca de la Vall d'Albaida, provincia de Valencia (38°50'26" N y 0°28'17" O).

El término municipal colinda al sur con el Palomar y Bufalí, al oeste con Atzeneta d'Albaida y al norte y este con Bélgida.

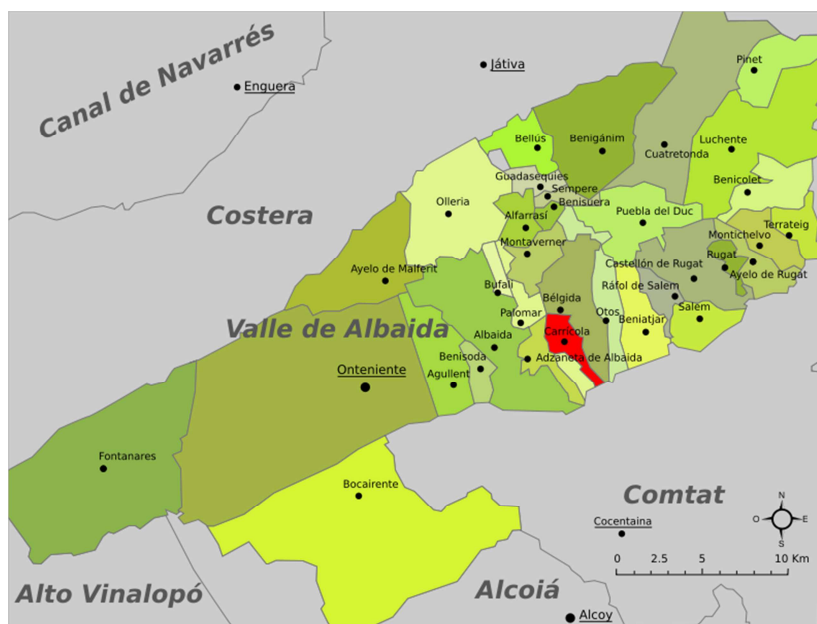


Ilustración 6. Localización Carrícola, Valle de Albaida

El municipio se extiende a lo largo de 4,6km<sup>2</sup> en la vertiente norte de la Sierra del Benicadell, de naturaleza calcárea, pudiéndose observar dos sectores claramente diferenciados: uno al norte, llano, a una altura de entre 300 y 400 metros sobre el nivel del mar donde se encuentran las casas y la huerta de Carrícola, y otro al sur, de naturaleza más abrupta, modelado por la sierra del Benicadell, donde se llega hasta alturas cercanas a los 800 metros en las proximidades del Alt de la Font Freda.

Al norte, en la parte más baja del municipio donde se encuentra la huerta de Carrícola, el término es cruzado por varios barrancos como el Barranc del Molí, que recoge las aguas de los barrancos del Castellet, Atzeneta y la Font Freda, y el del Raboser, que desaguan las aguas de la zona en el río Vernissa.

## 2.2. CLIMATOLOGÍA

Carrícola se encuentra en la franja mediterránea donde el clima es templado, con algunas heladas durante el invierno y calurosos veranos. Los vientos más frecuentes son los de poniente y levante coincidiendo las temperaturas extremas con invasiones de vientos saharianos y de Siberia o del Ártico. Las principales lluvias se producen a finales de otoño y principios de primavera.

Entre el año 1961 y el 1990 la Comunidad Valenciana ha realizado un seguimiento de la climatología mediante el Atlas Climático de la Comunidad Valenciana. En la realización del registro de los datos se colocó una estación meteorológica en el municipio de Carrícola. Del seguimiento de esta estación se ha obtenido que la temperatura media registrada en la localidad es de 17°C. Siendo enero el mes más frío con una temperatura media de 10,1°C y julio el más caluroso con una media de 25,7°C. Entre los meses de enero y febrero es cuando se suelen registrar las heladas.

Con respecto a las precipitaciones, el balance medio anual registrado en la estación meteorológica de Carrícola es de 677,4mm. Siendo octubre el mes con mayor volumen de precipitación alcanzando una media de 106,1 mm, y julio el mes más seco con 10,8mm.

Según la clasificación de Thornthwaite el tipo de clima que corresponde a Carrícola es: **Subhúmedo seco (C<sub>1</sub>; -20 < Índice Hídrico < 0)**, con superávit moderado de agua en invierno (**s**, 10 < Índice de Humedad < 20). **Mesotérmico templado cálido (B'3; 856 < ETP < 997)** con un nivel de **b'4** en concentración estival de la eficiencia térmica (48 < ETPV% < 51.9).

A continuación se muestran los datos climatológicos de una serie de quince años (2000-2014), correspondientes a las medias mensuales de la estación de Planes, estación con datos históricos recientes<sup>7</sup> más cercana al municipio de Carrícola.

---

<sup>7</sup> Desde el año 2013 se disponen de datos de la estación de Bélgida, más cercana, pero no con suficientes registros para poder estimar la media de las variables.

Tabla 3. Datos climatológicos Planes. Serie anual 2000-2014. (Fuente: Servicio Valenciano de Riego, IVIA.)

Mes	Tmed med (°C)	Tmed máx (°C)	Tmed mín (°C)	HR med (%)	V med (Km/h)	ETo med (mm)	Ptotal med (mm)
Enero	8,17	14,09	3,03	31,88	3,77	1,12	67,51
Febrero	8,89	14,92	3,50	36,14	4,92	1,66	47,67
Marzo	11,51	17,79	5,72	38,10	4,19	2,48	53,27
Abril	13,89	20,51	7,56	38,08	3,76	3,30	64,00
Mayo	17,18	24,33	10,23	35,14	2,98	4,09	60,80
Junio	21,97	29,89	14,11	31,43	2,75	5,10	15,35
Julio	24,89	33,06	16,94	25,07	2,64	5,36	2,33
Agosto	24,72	32,88	17,19	22,02	2,56	4,60	18,92
Septiembre	20,77	28,28	14,39	21,44	2,39	3,18	64,42
Octubre	16,88	23,81	10,94	23,22	2,55	2,04	97,82
Noviembre	11,15	16,96	6,15	25,89	3,09	1,18	100,20
Diciembre	8,28	14,15	3,31	28,36	3,34	0,94	99,55

### 2.3. USOS DEL TERRITORIO Y ECONOMÍA

El municipio de Carrícola tiene su origen en una antigua alquería islámica en la cual la población musulmana centraba su cultivo en variedades hortícolas. Más adelante se comenzó con el cultivo de secano con especies como el olivo y el algarrobo las cuales tienen una gran adaptación a las características edáficas y climatológicas de la zona. Motivo por el cual se siguen manteniendo grandes extensiones dedicadas a estos cultivos (un 25% aproximadamente)

En las últimas épocas el panorama ha cambiado sustancialmente debido a la rápida expansión de los frutales como ciruelos, albaricoqueros, melocotoneros, naranjos y caquis los cuales han acabado ocupando poco menos del 50% de las tierras. (INE, Censo agrario 2009)



Actualmente la economía carricolina sigue estando basada en la agricultura. A partir de la década de los 80 se introdujeron los métodos de riego por goteo y más recientemente ha sido introducida la producción ecológica, la cual encontró en Carrícola una aceptación generalizada pues las condiciones edáficas, microbiológicas y climáticas han sido favorables a estas técnicas.

#### 2.4. DEMOGRAFÍA

La población actual de Carrícola es de 99 habitantes (INE 2014). Como se puede observar en la figura 1, la tendencia de la población de Carrícola en los últimos 10 años ha ido en ascenso.

Tabla 4. Evolución de la población de Carrícola en los últimos 10 años. (Fuente: INE Padrón continuo)

POBLACIÓN TOTAL CARRÍCOLA											
Año	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
Población	79	81	88	94	82	90	93	93	98	105	99

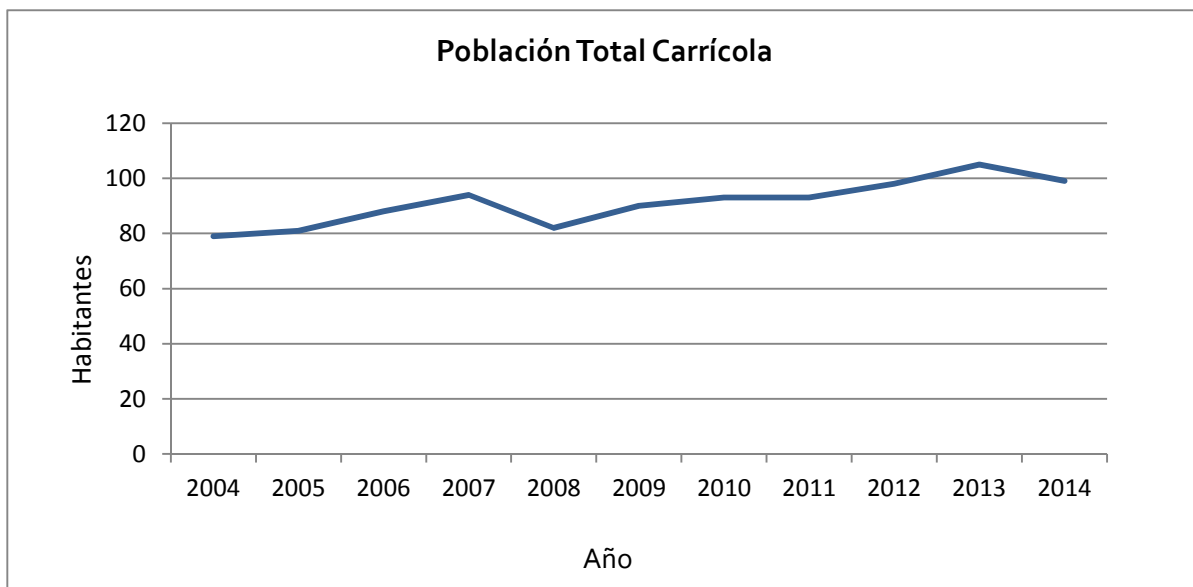


Figura 1. Evolución de la población de Carrícola en los últimos 10 años. (Fuente: INE Padrón continuo.)

## 2.5. NECESIDADES DE DEPURACIÓN

### 2.5.1. NORMATIVA

En el año 1991, la Unión Europea, dada la situación de contaminación de las aguas en los diferentes Estados miembro, promulgó la Directiva 91/271/CEE, sobre depuración de aguas residuales urbanas. Dicha directiva estipula que a partir del 31 de diciembre 2005, se deben depurar, mediante un tratamiento adecuado, los vertidos de poblaciones equivalentes inferiores a 2.000 h-e cuando el vertido es en aguas continentales y estuarios.

La Directiva 91/271/CEE fue transpuesta al derecho español mediante el Real Decreto Ley 11/1995 donde se establecen las normas aplicables al tratamiento de las aguas residuales urbanas, el cual se desarrolla mediante el R.D. 509/1996.

En el año 1998, la unión Europea promulga la Directiva 98/15/CE, que modifica la Directiva 91/271/CEE y que se traspone en España mediante el Real Decreto 2116/1998 que modifica al del año 1996.

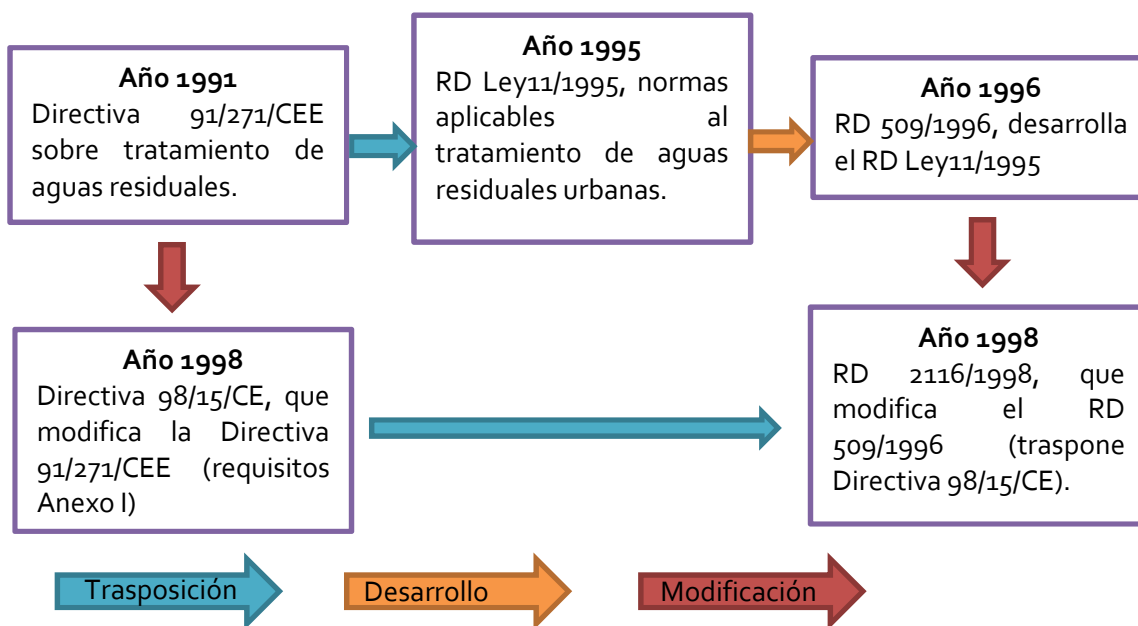


Ilustración 7. Esquema de la evolución de la legislación en depuración en España. (E. Ortega Busutil. MAGRAMA 2012)

En el anexo I del R.D. 509/1996 se establecen los requisitos para los vertidos procedentes de instalaciones de tratamiento de aguas residuales urbanas.

El cuadro 1 recoge los requisitos generales y el cuadro 2 los requisitos de los vertidos realizados en zonas sensibles cuyas aguas sean eutróficas o tengan tendencia a serlo en un futuro próximo.

Tabla 5. Cuadro 1 del Anexo I del RD 509/1996 que recoge los requisitos para los vertidos procedentes de instalaciones de depuración de aguas residuales urbanas.

<b>REQUISITOS PARA LOS VERTIDOS PROCEDENTES DE INSTALACIONES DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES URBANAS. Se aplicará el valor de concentración o el porcentaje de reducción.</b>			
<b>Parámetros</b>	<b>Concentración</b>	<b>Porcentaje mínimo de reducción (1)</b>	<b>Método de medida de referencia</b>
<b>Demanda bioquímica de oxígeno (DBO 5 a 20 °C) sin nitrificación (2).</b>	<b>25 mg/l O<sub>2</sub></b>	<b>70-90</b> 40 de conformidad con el apartado 3 del artículo 5 R.D.L. (3).	Muestra homogeneizada sin filtrar ni decantar. Determinación del oxígeno disuelto antes y después de cinco días de incubación a 20°C, en completa oscuridad. Aplicación de un inhibidor de la nitrificación.
<b>Demanda química de oxígeno (DQO).</b>	<b>125 mg/l O<sub>2</sub></b>	<b>75</b>	Muestra homogeneizada, sin filtrar ni decantar. Dicromato potásico.
<b>Total de sólidos en suspensión (SS).</b>	35 mg/l (4) 35 de conformidad con el apartado 3 del art. 5 R.D.L. (más de 10.000 h-e) (3).  60 de conformidad con el apartado 3 del art. 5 R.D.L. (de 2.000 a 10.000 h-e) (3).	90 (4) 90 de conformidad con el apartado 3 del art. 5 R.D.L. (más de 10.000 h-e) (3).  70 de conformidad con el apartado 3 del art. 5 R.D.L. (de 2.000 a 10.000 h-e) (3).	Filtración de una muestra representativa a través de una membrana de filtración de 0,45 micras. Secado a 105 °C y pesaje. Centrifugación de una muestra representativa (durante cinco minutos como mínimo, con una aceleración media de 2.800 a 3.200 g), secado a 105 °C y pesaje.

(1) Reducción relacionada con la carga del caudal de entrada.

(2) Este parámetro puede sustituirse por otro: carbono orgánico total (COT) o demanda total de oxígeno (DTO), si puede establecerse una correlación entre DBO 5 y el parámetro sustituto.

(3) Se refiere a los supuestos en regiones consideradas de alta montaña contemplada en el apartado 3 del artículo 5 del Real Decreto-ley 11/1995, de 28 de diciembre.

(4) Este requisito es optativo.

De manera paralela cada una de las confederaciones hidrográficas establece sus propios límites de vertido, los cuales deben estar en consonancia con los estipulados por el R.D. 509/1996. De esta forma la Confederación Hidrográfica del Júcar establece los siguientes límites:

Tabla 6. Límites de vertido establecidos por la CHJ.

AGUAS RESIDUALES URBANAS		
PARÁMETROS FÍSICO-QUÍMICOS	PARÁMETROS AUTORIZABLES	EXCEPCIONES
Ph	5,5 – 9,5	-
Sólidos en suspensión (mg/l)	60	-
Materias sedimentables (mg/l)	0'5	-
Sólidos gruesos	Ausentes	-
D.B.O.5 (mg/l O <sub>2</sub> )	25	-
DQO (mg/l O <sub>2</sub> )	125	-
Temperatura (°C)	< 25°	-
Color	Incoloro	-
Boro (mg/l)	1-2	-
Cloruros (mg/l)	250(*)	-
Sulfatos (mg/l)	250	-
Fósforo total (mg/l)	8	(**)
Amonio (mg/l)	7	(***)
Nitrógeno Nítrico (mg/l)	15	(***)
Aceites y grasas (mg/l)	10	-
Detergentes (mg/l)	2	-

(\*)El límite de 250 mg/l establecido para Cloruros y Sulfatos es el que se considera apto para destinar las aguas depuradas para riego.

(\*\*)En caso de que el vertido se realice a zona calificada como sensible, según definición del Real Decreto 509/96 y la Resolución de 10 de julio de 2006, el límite de vertido para el Fósforo total es de 2 mg/l (de 10.000 a 100.000 h-e) 1 mg/l (más de 100.000 h-e).

(\*\*\*)En caso de que el vertido se realice en zonas sensibles los límites de vertido de amonio y nitrógeno nítrico se sustituyen por los límite siguientes para el Nitrógeno total (suma de nitrógeno Kjeldahl total -N orgánico y amoniacal-, nitrógeno en forma de nitrato y nitrógeno en forma de nitrito) 15 mg/l N (de 10.000 a 100.000 h-e) ó 10 mg/l N (más de 100.000 h-e).

En caso de que el vertido se realice en una zona vulnerable a la contaminación por nitratos, según el Real Decreto 261/1996, de 16 de febrero, sobre protección de las Aguas contra la Contaminación producida por los Nitratos procedentes de Fuentes Agrarias se fija un límite de vertido para los nitratos de 50 mg/l mientras que el límite de vertido del amonio se mantiene en 7 mg/l.

**En el caso de Carrícola la Confederación Hidrográfica del Júcar no exige el cumplimiento de los parámetros de nitrógeno y fósforo.**

### 2.5.2. SITUACIÓN PREVIA

Cuando se comenzó a estudiar la propuesta de la construcción de nuevo sistema de depuración de aguas residuales del municipio de Carrícola, el número de habitantes empadronados en el municipio era de 82 (datos del IVE, 2008).

Según datos proporcionados por el ayuntamiento de la localidad, el consumo de agua registrado era de aproximadamente 2.597 m<sup>3</sup>/año, unos 86 l/hab día.

La EDAR previa a la actual fue construida a finales de los años 70 y constaba de dos elementos fundamentales: un tanque Imhoff seguido de un lecho de gravas.

Al parecer, el funcionamiento durante su época de operación fue correcto pues durante esos años no se registró ningún problema ambiental provocado por el vertido al Barranco del Castellet.

El segundo elemento, el lecho filtrante de gravas, debió ser concebido como un Filtro Percolador, pero no tenía un funcionamiento adecuado pues el efluente del Tanque Imhoff entraba a nivel superficial al lecho de gravas y caía directamente al fondo del tanque, por donde era evacuado.

Las analíticas del agua de salida de la EDAR efectuadas hasta 2010 mostraban que la calidad del vertido cumplía en su momento con los requisitos establecidos por la Confederación Hidrográfica del Júcar.

Como medida inicial mientras se redactaba y construía la actual EDAR, se modificó el funcionamiento del lecho de gravas haciendo circular el agua en sentido ascendente, introduciéndola por el fondo y extrayéndola por superficie, para que, al aumentar el tiempo de residencia, favoreciera la eliminación de materia orgánica y sólidos suspendidos. En la superficie del lecho se plantaron enneas como ejemplo de lo que representa actualmente el sistema de Humedales Artificiales.



Ilustración 8. Tanque Imhoff EDAR previa.



Ilustración 8. Lecho de gravas EDAR previa



Ilustración 10. Conjunto EDAR previa

Durante los meses de junio, julio y octubre del 2010 un equipo del Instituto de Ingeniería del Agua y del Medio Ambiente (UPV) se desplazó puntualmente a Carrícola con el fin de observar las modificaciones y tomar muestras de agua en tres puntos del sistema:

- Entrada al Tanque Imhoff.
- Salida del Tanque Imhoff.
- Salida del lecho de gravas.

Las variables analizadas fueron: Sólidos Suspendidos, Sólidos Suspendidos Volátiles, DQO total, Nitrógeno Total y Fósforo Total, temperatura, concentración de oxígeno disuelto y porcentaje de saturación, conductividad y pH.

En el análisis de los resultados obtenidos se observó que la calidad del agua de salida de la EDAR cumplía, en la mayoría de las variables y muestras<sup>8</sup>, con los requisitos establecidos por la CHJ para el vertido a cauces públicos.

No obstante, de la observación continua de las instalaciones, se percibió que dichas mediciones no reflejaban el funcionamiento real de la depuradora pues equivalían a tres muestras puntuales, en meses consecutivos, y poco después de una limpieza del sistema.

Por este motivo se consideró adecuado comenzar a plantearse la renovación de las infraestructuras de depuración existentes pues se consideró habían quedado obsoletas e insuficientes.

Además, el vertido procedente del sistema se realizaba directamente al barranco del Castellet, lo que suponía una degradación paulatina de este hábitat.

### **2.6. DESCRIPCIÓN DE LA ACTUACIÓN ADOPTADA: SISTEMA DE HUMEDALES ARTIFICIALES**

Para mejorar el sistema de tratamiento de aguas residuales de la población de Carrícola, se propuso en 2012 la instalación de **Humedales Artificiales de Flujo Subsuperficial**. Esta alternativa, como se ha descrito en el capítulo anterior, se trata de sistemas naturales de depuración que reproducen los procesos físicos, químicos y biológicos presentes en los humedales naturales.

La población de Carrícola, en las últimas décadas, ha estado planificando y desarrollando diversos proyectos encaminados a la mejora medioambiental y al mantenimiento de formas de vida tradicionales (agroecología, artesanía, uso de recursos locales, ahorro energético, uso sostenible del agua, uso sostenible de los recursos forestales, planta de compostaje, etc).

---

<sup>8</sup> Para los datos de octubre de 2010, aunque la concentración de nitrógeno total no excede los valores límite de la CHJ, sí que los supera la concentración de nitrógeno amoniacal. Para información más detallada consultar el ejercicio final de carrera de C.C.A.A. de Eva Blasco (UPV, 2011)

El planteamiento de este sistema de depuración natural extensivo, o blando se propuso dentro de la dinámica de sostenibilidad encaminada por el municipio, teniendo en cuenta las **ventajas en cuanto a energía** (la energía empleada durante el proceso de depuración es totalmente natural), **la obra a desarrollar** (la obra civil se limita, básicamente, al movimiento de tierras en el cual no se requiere el empleo de mano de obra especializada), **los costes** (los costes de implantación, gestión y mantenimiento de las instalaciones son menores que en los sistemas intensivos) y la **integración en el medio ambiente** (la integración en el paisaje es mucho mayor y más sencilla de llevar a cabo).

### 2.6.1. DISEÑO DE LA SOLUCIÓN ADOPTADA

Como ya se comentó en el apartado “Esquema de funcionamiento de los humedales artificiales” el diseño de este tipo de sistemas sigue el esquema básico de cualquier planta de tratamiento de aguas residuales. Cuyas unidades de tratamiento se pueden clasificar en: Pretratamiento, Tratamiento primario y Tratamiento secundario.

Para el aprovechamiento de las antiguas infraestructuras de depuración, la actuación se ha desarrollado en dos parcelas:

- La parcela A: Donde se encontraban los antiguos sistemas de depuración, tanque Imhoff y lecho de gravas. En esta parcela es donde se ubica el pretratamiento (reja de desbaste) y el tratamiento primario (tanques Imhoff).
- La parcela B: Compuesta por terreno antiguamente dedicado al cultivo y que consta de dos alturas. En esta parcela se ubica el tratamiento secundario (los humedales artificiales).

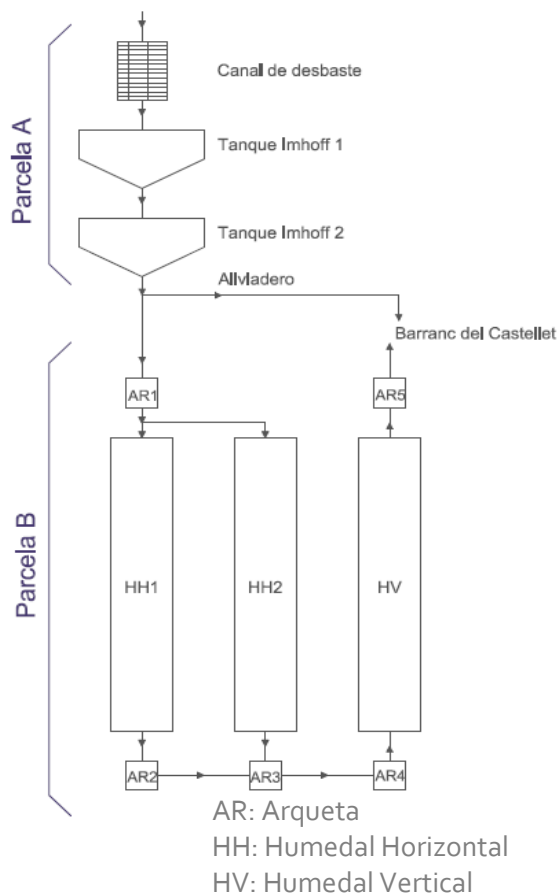


Ilustración 9. Esquema del sistema de depuración actual.



### 2.6.1.1. PRETRATAMIENTO

El tratamiento previo o pretratamiento está formado por todos aquellos procesos que se sitúan al inicio del sistema de depuración, y cuya función esencial consiste en eliminar sólidos gruesos, grasas y arenas que puedan dañar o interferir en los procesos posteriores.

En la depuradora de Carrícola esta fase está compuesta por un canal de desbaste formado por una arqueta rectangular. En el interior del canal de desbaste se encuentra alojado un filtro de rejas de funcionamiento manual con una anchura de los barrotes de 2 cm y una luz entre ellos de 2,5 cm. La pendiente de la reja en relación a la vertical es de 45°.

Las dimensiones de la arqueta son de una longitud de 1,2 m, una anchura de 1 m y una profundidad de 0,7 m.



Ilustración 10. Canal de desbaste

### 2.6.1.2. TRATAMIENTO PRIMARIO

Tiene como objetivo la reducción de la materia en suspensión que se encuentran en las aguas residuales. En los sistemas en los que el tratamiento secundario consta de humedales artificiales es una fase clave pues ayuda a mitigar el proceso paulatino de colmatación.

Como ya se ha comentado anteriormente, la estación depuradora de Carrícola contaba, en su sistema original, con un **tanque Imhoff**. Este elemento fue reutilizado en la construcción de la nueva EDAR.

Para proceder al cálculo de las infraestructuras se realizó el estudio mediante la metodología descrita por García y Corzo<sup>9</sup>. La cual comienza con un cálculo del caudal y de la carga orgánica para obtener las dimensiones del Tanque Imhoff.

Para el cálculo del caudal residual se puede estimar dicho valor como un porcentaje (80-90%) del caudal de abastecimiento. No obstante para obtener un resultado con un mayor margen de seguridad, se asignó el valor de la dotación de abastecimiento (obtenida con los datos recabados) que asignaba una dotación de 80 litros por habitante y día.

A su vez, para obtener la variación de caudal anual se diferenciaron entre cuatro categorías de usuarios: habitantes continuos, habitantes estacionales, escuela de verano y restaurante.

A partir del manejo de los datos<sup>10</sup> se determina un **caudal medio diario de 7,84 m<sup>3</sup>/d** y un **caudal punta diario de 13,33 m<sup>3</sup>/d**.

Para el cálculo de la carga orgánica en este tipo de poblaciones se puede asignar un valor de 40 g DBO<sub>5</sub>/hab día<sup>11</sup>. Si extrapolamos este valor a la población (teniendo en cuenta la estacionalidad) de Carrícola nos situamos en un valor de 4.9 kg DBO<sub>5</sub>/d que nos da una concentración media anual de **624.5 mg/l de DBO<sub>5</sub>**.

Para las condiciones de caudal y carga con las que se diseñó el sistema actual, el tanque Imhoff de la depuradora original estaba sobredimensionado y, al encontrarse en buen estado, se consideró adecuada la **reutilización del tanque Imhoff presente y se realizó un segundo tanque Imhoff** en el lugar en el que se encontraba originariamente el lecho filtrante de gravas.

---

<sup>9</sup> García Serrano, J y Angélica Corzo Hernandez (2008). Depuración con Humedales Construidos. Guía Práctica de Diseño, Construcción y Explotación de Sistemas de Humedales de Flujo Subsuperficial. DIHMA-UPC.

<sup>10</sup> Para más información sobre el cálculo de la infraestructura consultar el ejercicio final de carrera de C.C.A.A. de Eva Blasco (UPV, 2011) y el proyecto de construcción de la EDAR (Vicent Bohigues, 2012 – Ajuntament de Carrícola)

<sup>11</sup> Barrera, A. (1999). Análisis y Caracterización de los Parámetros de las Aguas Residuales Necesarios para el Dimensionamiento de Estaciones Depuradoras de Menos de 2000 h.e. Tesina de Especialidad, ETSECCPB, Universitat Politècnica de Catalunya. Barcelona, 110 p.

Las dimensiones de dichos elementos son:

- **Tanque Imhoff 1:** 2,95 x 2,36 x 3 m (largo, ancho y profundo). Con una zona de decantación de 2,45 x 1 x 1 m (largo, ancho y profundo).
- **Tanque Imhoff 2:** 2,28 x 2,28 x 3 m (largo, ancho y profundo). Con una zona de decantación de 1,8 x 0,85 x 0,85 m (largo, ancho y profundo).

Entre estos dos elementos se encuentra un pequeño área de secado de dimensiones 2.5 x 2.85 m que se utiliza para deshidratar los flotantes extraídos de los tanques Imhoff.

Los fangos de los tanques Imhoff son vaciados mediante el empleo de bombas de succión 1 o 2 veces al año. Actualmente dichos fangos no pueden ser deshidratados en la depuradora de Carrícola pues no consta con las instalaciones necesarias, debiendo ser tratados por un gestor autorizado.



Ilustración 11. Tanques Imhoff en serie

### 2.6.1.3. TRATAMIENTO SECUNDARIO

El objetivo de esta etapa es la eliminación de la materia orgánica disuelta o coloidal. En el sistema diseñado son los humedales artificiales los que desarrollan esta función.

Cuando se diseñó la planta depuradora se propuso la adopción de las dos tipologías de humedal artificial de flujo subsuperficial: de flujo horizontal y de flujo vertical.

### Humedales de flujo horizontal

El dimensionamiento de humedales de flujo horizontal se realiza en dos etapas: en la primera se determina la superficie necesaria de tratamiento (dimensionamiento biológico) y en la segunda se establecen las dimensiones geométricas del sistema (dimensionamiento hidráulico).

En la aplicación de las ecuaciones de cálculo se obtiene que la superficie necesaria de los humedales es de 404 m<sup>2</sup>. Pero, tras las comprobaciones pertinentes, se obtiene que es recomendable aumentar la superficie a **408 m<sup>2</sup>**.

Del dimensionamiento hidráulico se extrajo que las dimensiones adecuadas para el sistema podrían ser de dos celdas de 10 x 20 m, pero en la implantación de las mismas se estimó más conveniente la realización de **dos celdas en paralelo de 6 x 33 m**.

En la construcción de las celdas se llevaron a cabo los siguientes trabajos:

Excavación de una superficie de 198 m<sup>2</sup> para cada celda y una profundidad de 0,7 m. Sobre la base de la celda perfectamente nivelada y compactada, y con una pendiente del 0,3%, se vertió material granular, arenas, rellenando un total de 5 cm de espesor debidamente compactadas.

A continuación se procedió al montaje de todo el sistema de conducciones, canales y arquetas descritas en el apartado posterior. Se impermeabilizó el vaso de las celdas mediante la colocación de un geotextil (Gramaje de 150 gr/m<sup>2</sup>) sobre el que se colocó una lámina de EPDM (e = 1,5 mm) perfectamente acoplada a los taludes de la celda. Sobre la lámina impermeabilizante se colocó otra malla geotextil para la protección de posibles pinchazos. (Gramaje de 150 gr/m<sup>2</sup>).

El relleno de material granular de las celdas se inició con la colocación de una franja de gravas muy gruesa ( $\varnothing = 4$  cm) en la cabecera de la celda de 50 cm de espesor, ocupando toda la anchura y 1 m de longitud sobre las celdas. Esta franja inicial debe quedar siempre libre de plantaciones.

La zona intermedia entre la franja inicial de grava muy gruesa y el final de la celda, se rellenó con una alternancia de gravas gruesas y finas. Se comenzó con 5 m de grava gruesa ( $\varnothing = 2$  cm), a continuación 1 metro de grava fina ( $\varnothing = 1$  cm) y así sucesivamente hasta el final de la celda. El espesor de la capa de gravas finas es el mismo que el de las gruesas, es decir, 50 cm. El calado óptimo de la lámina de agua es de aproximadamente 40 cm sobre la base de la celda, es decir, unos 10 cm por debajo de la superficie del material granular.

Una vez acabadas todas las tareas descritas anteriormente, y estando ya en marcha la estación depuradora (humedales llenos de agua), se procedió a la plantación de especies vegetales sobre el lecho de gravas del interior de las celdas (febrero de 2014). La especie vegetal escogida en este caso es el carrizo, con una densidad aproximada de plantación de 3 ejemplares por metro cuadrado. Actualmente, una vez transcurrido un año desde la plantación, la densidad aproximada de tallos de carrizo es de 8-9 tallos por decímetro cuadrado en las zonas más densas y 3-4 tallos por decímetro cuadrado en las zonas menos densas.

Para la introducción del agua en el sistema se dispone de una canaleta en el inicio del humedal, apoyada sobre el suelo y que se distribuye a lo ancho de toda la celda. De este modo el agua rebosa homogéneamente por toda la sección inicial del humedal y circula horizontalmente a través del sustrato hasta llegar al extremo opuesto.



Ilustración 12. Humedales artificiales subsuperficiales de flujo horizontal.

### Humedales de flujo vertical

Como ya se comentó anteriormente es muy común la construcción sistemas que combinen humedales artificiales de flujo horizontal y vertical pues de esta forma se favorece la sucesión progresiva de procesos de nitrificación y desnitrificación que mejoran la eliminación del nitrógeno.

Por ello, en el diseño de la depuradora actual se propuso la construcción de una celda de flujo vertical, con dimensiones y características semejantes a las de flujo horizontal, que culminase el proceso de depuración.

El tamaño de la celda de flujo vertical es igual a las de flujo horizontal (**33 x 6 x 0,5 m**) pero se encuentra situada en la terraza inferior de la parcela (a una diferencia de cota con las de flujo horizontal de 2m).

La construcción de esta celda se realizó de manera similar a las de flujo horizontal variando la disposición de las gravas en el interior y las canaletas para la distribución del flujo.

En este caso el relleno granular es homogéneo realizado con grava gruesa ( $\varnothing = 2 \text{ cm}$ ) a lo largo, ancho y profundo de toda la celda.

El sistema de llenado del humedal está constituido por una canalización situada en el eje central de la celda que, por rebosamiento, vierte las aguas residuales en el interior del humedal.

El funcionamiento del humedal vertical se realiza de la siguiente manera: todos los martes se realiza el vaciado. A partir de este momento, se comienza a llenar la celda (2-3 días dependiendo del caudal de entrada), durante los siguientes días hasta el martes próximo la celda se mantiene llena y el agua rebosa por la tubería final.



Ilustración 13. Humedal artificial subsuperficial de flujo vertical.

#### **2.6.1.4. CONDUCCIONES Y ARQUETAS**

##### PARCELA A: Pretratamiento y Tratamiento primario

El colector de entrada (PVC corrugado DN 315mm) llega a esta parcela y vierte las aguas residuales al canal de desbaste. Todas las conducciones de la Parcela A se realizan con tuberías de PVC corrugado DN 315mm.

Con el sistema de depuración previo, las aguas residuales se vertían al barranco del Castellet mediante un colector que conectaba directamente el lecho de gravas con el barranco. En la construcción de la nueva depuradora, y dado que este colector comunica la parcela A con la parcela B, se procedió a su reutilización para la conducción de las aguas desde el tratamiento primario hasta el secundario.

Para desviar las aguas a los humedales construidos, se colocó un pozo de registro que permite una bifurcación entre la conducción que llega hasta el barranco y la que llega hasta la parcela B. En ese mismo punto se creó un aliviadero que regula las avenidas extraordinarias impidiendo que los excesos entren en el humedal artificial y desviándolos directamente al barranco.

La comunicación del pozo de registro con la parcela B se realiza a partir de una tubería de PVC DN 315mm.

### PARCELA B: Tratamiento secundario

La entrada de las aguas residuales en el humedal artificial se realiza a través del tramo de colector detallado anteriormente.

En el punto final del colector de entrada se encuentra una arqueta de reparto que se encarga de distribuir las aguas a las dos celdas del humedal de flujo horizontal.

En la llegada del colector a la arqueta, se dispuso la tubería de forma vertical, de manera que eleva las aguas 1,25 metros permitiendo la caída por el exterior del colector a la arqueta. Esta estructura en forma de champiñón permite la oxigenación del agua. La arqueta de distribución tiene unas dimensiones interiores de 1 m x 1 m x 0,6 m (largo x ancho x profundo).

Desde esta arqueta se disponen dos tuberías de salida hacia los dos humedales de flujo horizontal. Estas tuberías son de PVC DN 110mm. A la salida de la arqueta estas tuberías cuentan con una válvula de regulación para variar el caudal de entrada a los humedales.

La entrada de agua en las celdas se realiza mediante canales a cielo abierto de dimensiones 15 cm x 15 cm y longitud igual a la anchura de la celda, 6 m en este caso. Estos canales están colocados por encima del sustrato de forma perpendicular al humedal y permiten la entrada homogénea del agua residual en las celdas por desbordamiento.



Ilustración 14. Arqueta 1: Arqueta de reparto del agua residual a las dos celdas de flujo horizontal



En el extremo opuesto del humedal se realiza la salida de las aguas mediante una pequeña arqueta colocada en la parte central de la celda que se encuentra cubierta con un mallazo de luz 15x15mm, que permite el paso de agua y la no obturación del mismo por las gravas.

Esta pequeña arqueta evacúa las aguas mediante una conducción que atraviesa el talud de la celda, hasta llegar a una arqueta en la que la conducción termina en forma de "L" invertida, con final flexible. Dicha tubería es de PVC corrugado DN 160mm. La altura del final de la conducción determina el nivel del agua en el interior de la celda. Las dimensiones interiores de las dos arquetas de salida de los dos humedales horizontales son de 1,34 m x 0,6 m x 1,2 m (largo x ancho x profundo).

El agua recogida en las dos arquetas se conduce mediante una tubería de PVC corrugado DN 250mm a una arqueta situada en la parte baja de la parcela, junto al humedal de flujo vertical.

Desde esta arqueta el agua se distribuye al canal de vertido en el humedal mediante una tubería de PVC DN 125mm. El canal se encuentra en la zona central del humedal y lo recorre a su largo distribuyendo las aguas por desbordamiento.

El sistema de salida del agua del humedal de flujo vertical es similar al empleado en las celdas de flujo horizontal, es decir, mediante una conducción flexible que vierte el agua a una arqueta terminando en forma de "L" invertida.

Desde esta arqueta el agua se vierte al barranco mediante una tubería de PVC corrugado DN 315mm que desemboca en la parte alta de la ladera dejando fluir al agua hasta llegar al cauce.

Para poder observar el nivel del agua dentro de cada humedal, se dispusieron dos tuberías perforadas de 315 mm de diámetro colocadas en el eje central de las celdas de manera perpendicular a la base; a uno y dos tercios de la longitud total.

Al realizar la "L" invertida con el colector que llega a la Parcela B para mejorar la oxigenación del flujo, y en la entrada de la segunda celda del humedal horizontal, se generan dos codos en los cuales se acumulan sólidos. Para evitar la obstrucción de las conducciones se han dispuesto dos tuberías que permitan la limpieza de estos puntos.

La tubería que sale del codo generado en el colector de entrada se bifurca pudiendo desembocar tanto en la primera celda de flujo horizontal como en la parte más baja de todo el sistema, en el humedal de flujo vertical.

La tubería que sale del codo de la segunda celda del humedal horizontal se une a la tubería que baja a descargar los sólidos desde el codo del colector al humedal vertical.

La purga de dichos sólidos se efectúa una vez al mes descargándolos en la parte final de la canaleta que distribuye el agua al humedal vertical.

Adjunto se encuentran los planos de ubicación, plantas y detalles del sistema implantado para la mejor comprensión de la actuación adoptada.

## **CAPÍTULO 3. ESTUDIO DE LOS SERVICIOS ECOSISTÉMICOS PROPORCIONADOS POR LOS HUMEDALES ARTIFICIALES DE CARRÍCOLA. EN CONCRETO EL SERVICIO RELACIONADO CON LA MEJORA EN LA CALIDAD DE AGUAS.**

### **3.1. OBJETIVOS**

El objetivo principal de este proyecto es el estudio de uno de los servicios ecosistémicos brindado por los humedales artificiales para la depuración de aguas residuales de Carrícola, Valencia. El servicio a estudiar es el relacionado con la **mejora de la calidad de las aguas a su paso por los humedales artificiales.**

Para abordar dicho objetivo, se hará un análisis de la **evolución del humedal desde el punto de vista ecosistémico** mientras se lleva a cabo un seguimiento mensual de diversos **parámetros de calidad del agua** en varios puntos del sistema descrito.

A la hora de hacer el muestreo se pretende observar a su vez el funcionamiento del sistema, con el objetivo de detectar las posibles deficiencias, así como estudiar las tareas de mantenimiento adecuadas para un funcionamiento óptimo.

Con los resultados obtenidos se llevará a cabo la elaboración de propuestas de mejora del servicio o de nuevos servicios que puedan ser de interés.

### 3.2. EL ECOSISTEMA GENERADO: EVOLUCIÓN DE LA VEGETACIÓN EN EL HUMEDAL ARTIFICIAL DE CARRÍCOLA

Una de las piezas esenciales del ecosistema que forman los humedales artificiales es la vegetación. La zona radicular de las plantas que viven en el humedal genera el hábitat idóneo para la población microbacteriana mientras la parte aérea ayuda a la oxigenación del sustrato. Estas condiciones son las propicias para que las bacterias lo colonicen provocando los procesos de mejora de la calidad del agua que estudiaremos posteriormente. La evolución en la vegetación nos da una idea de la salud del hábitat, estando estrechamente relacionada con el resto de servicios ecosistémicos que los humedales prestan.

En el caso de Carrícola se realizó la primera plantación en febrero de 2014, con una densidad aproximada de 3 ejemplares de carrizo por metro cuadrado, obteniéndose los plantones de humedales próximos a la zona. Al realizarse la plantación en invierno, durante los primeros meses el crecimiento de la vegetación fue muy reducido.

#### *Fotos 27 de mayo de 2014*



Ilustración 15. Humedal Horizontal 1 - Mayo 2014



Ilustración 16. Humedal Horizontal 2 - Mayo 2014



Ilustración 17. Humedal Vertical - Mayo 2014

Con el comienzo de las altas temperaturas la vegetación empezó a cobrar densidad, percibiéndose en de junio de 2014 un aumento bastante importante en el número de ejemplares.

**Fotos 30 de junio de 2014**



Ilustración 190. Humedal Horizontal 1 - Junio 2014



Ilustración 181. Humedal Horizontal 2 - Junio 2014



Ilustración 20. Humedal Vertical Junio 2014- 1



Ilustración 21. Humedal Vertical Junio 2014- 2

Como se puede observar en las fotos del muestreo de junio, la creación de un entorno húmedo con elevada cantidad de nutrientes, favoreció durante los primeros meses la aparición de distintas especies de vegetación que fueron arrancadas manualmente para evitar la competencia con el carrizo.

**Fotos 24 de julio de 2014**



Ilustración 24. Humedal Horizontal 1 - Julio 2014



Ilustración 25. Humedal Horizontal 2 - Julio 2014



Ilustración 22. Humedal Vertical - Julio 2014

En la visita de julio se pudo comprobar como en los meses de verano la velocidad en la evolución del ecosistema se incrementa notablemente, observándose una gran mejoría en el humedal vertical.

En los humedales horizontales se observa, desde el comienzo de la expansión de la vegetación, como la dispersión del carrizo en la primera celda tiene lugar más lentamente que en la segunda. Otro hecho curioso de mencionar, que se ha ido observando en la evolución de la vegetación de las celdas horizontales, es como las franjas con un diámetro de gravas menor ( $\varnothing = 1\text{cm}$ ) son las más adecuadas para el crecimiento del carrizo notándose en estas una mayor densidad de tallos que en las zonas con gravas más gruesas.

*Fotos del 2 de septiembre de 2014*



Ilustración 25. Humedal Horizontal 1 - Septiembre 2014 (Salida)



Ilustración 2824. Humedal Horizontal 1 - Septiembre 2014 (Entrada)



Ilustración 29. Humedal Horizontal 2 - Septiembre 2014 (Salida)



Ilustración 30. Humedal Horizontal 2 - Septiembre 2014 (Entrada)



Ilustración 3123. Humedal Vertical - Septiembre 2014 (Entrada)



Ilustración 32. Humedal Vertical - Septiembre 2014

En el muestreo de septiembre de 2014 se observó el mayor aumento en la densidad de carrizo en la evolución de los humedales. Durante el mes de agosto los ejemplares de carrizo se expandieron prácticamente por toda la superficie de las celdas. Como ya se venía viendo en los meses anteriores la primera celda de los humedales horizontales tiene un crecimiento más rezagado que las otras dos celdas.

Durante este muestreo se distinguieron numerosas especies oportunistas que se habían alojado en el ecosistema. Cabe destacar como, en la celda vertical, tuvieron un gran desarrollo especies como el chopo y las tomateras. Para que estas especies no interfirieran en el correcto funcionamiento del humedal se decidió arrancarlas manualmente.



Ilustración 26. Chupos alojados en el Humedal Vertical - Septiembre 2014



Ilustración 27. Tomateras alojadas en el Humedal Vertical - Septiembre 2014

Durante el final del verano la vegetación siguió creciendo a un ritmo muy elevado encontrándose en octubre con ejemplares de carrizo de un porte de hasta 2m.



**Fotos 6 de octubre de 2014**



Ilustración 35. Humedal Horizontal 1 - Octubre 2014



Ilustración 36. Humedal Horizontal 2 - Octubre 2014



Ilustración 28. Humedal Vertical - Octubre 2014

Durante el mes de octubre de 2014 apareció en los humedales una plaga de pulgón. Por las características de este tipo de ecosistemas es bastante frecuente la presencia de plagas e insectos pues las condiciones de hábitat que se generan son propicias para ellos. En ese momento se decidió tratar la plaga con unos jabones específicos que se utilizan en la zona para la agricultura ecológica. Entre que se dio la plaga y tuvo lugar la actuación transcurrió más de un mes. Es de destacar que aunque la plaga se extendiera por el humedal la calidad del agua no se vio afectada.

Cuando comienzan a bajar las temperaturas se observa una estabilización del crecimiento de la vegetación así como un aumento de los tallos y hojas secas.

**Fotos 3 de noviembre de 2014**



Ilustración 38. Humedal Horizontal 1 - Noviembre 2014



Ilustración 299. Humedal Horizontal 2 - Noviembre 2014



Ilustración 30. Humedal Vertical - Noviembre 2014

**Fotos 7 de enero 2015**



Ilustración 41. Humedal Horizontal 1 - Enero 2015



Ilustración 31. Humedal Horizontal 2 - Enero 2015



Ilustración 43. Humedal Vertical - Enero 2015

Una vez transcurrido un año en la evolución del ecosistema se observa como la vegetación ha colonizado todo el humedal y el carrizo ha completado su ciclo de crecimiento. En el mes de marzo del 2015 se pudieron observar otra vez nuevos ejemplares de carrizo creciendo en el humedal dando lugar a un nuevo ciclo de la vegetación.

**Fotos 3 de marzo 2015**



Ilustración 33. Humedal Horizontal 1 - Marzo 2015



Ilustración 34. Humedal Horizontal 1 - Marzo 2015



Ilustración 46. Humedal Horizontal 2 - Marzo 2015



Ilustración 327. Humedal Horizontal 2 - Marzo 2015



Ilustración 358. Humedal Vertical - Marzo 2015

Los nuevos ejemplares de carrizo que aparecieron dentro del humedal tenían una sección de tallo muy ancha. Al principio se pensó que podía ser una intrusión de caña. Tras observar su crecimiento se constató que era carrizo, y se intuyó que las secciones tan gruesas tendrían que ver con la alta alimentación de nutrientes y agua de la que disponen.

La densidad de tallos de carrizo para mayo de 2015 se encontraba entre valores de 8-9 tallos por decímetro cuadrado en las zonas más densas y 3-4 tallos por decímetro cuadrado en las zonas menos densas.

*Fotos 5 de mayo 2015*



Ilustración 36. Humedal Horizontal 1 - Mayo 2015



Ilustración 370. Humedal Horizontal 2 - Mayo 2015



Ilustración 51. Humedal Vertical - Mayo 2015

### 3.3. ESTUDIO DE LA CALIDAD DE LAS AGUAS EN EL HUMEDAL ARTIFICIAL DE CARRÍCOLA

#### 3.3.1. RECOPIACIÓN DE LOS DATOS OBTENIDOS

Para estudiar la evolución de la calidad del agua a su paso por la depuradora de Carrícola se ha realizado un muestreo mensual desde que se puso en marcha el sistema, febrero de 2014. El muestreo se realiza habitualmente en los primeros días de la semana y a principios de mes, entre las 11 y la 1 del mediodía.

Para analizar la mejora en la calidad del agua a lo largo de todo el sistema se toman 6 muestras en distintos puntos de la EDAR:

1. Entrada Imhoff 1
2. Entrada Imhoff 2
3. Salida Imhoff 2
4. Entrada sistema de humedales horizontales (Arqueta de reparto - AR1)
5. Entrada al humedal vertical (Arqueta de reparto - AR4)
6. Punto de vertido

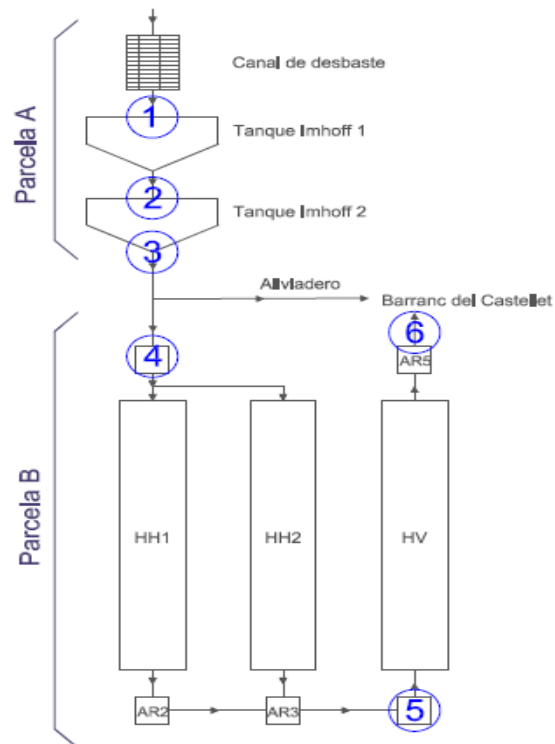


Ilustración 38. Esquema de la EDAR con puntos de muestreo.

De cada una de las muestras se realiza *insitu* el análisis de los siguientes parámetros: conductividad, concentración de sales, oxígeno disuelto y porcentaje de saturación, PH y temperatura. En los puntos 2, 5 y 6 se realiza a su vez una medición del caudal.

Una vez en el laboratorio se determinan **Sólidos en Suspensión (SS), turbidez, DQO, DBO, Nitrógeno total, Fósforo total, Amonio (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) y Nitratos (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>)**.

La determinación de sólidos suspendidos (SS) se realizó mediante filtración de acuerdo a las normas UNE-EN 872.

La turbidez se determina con un turbidímetro.

Para DQO, Nitrógeno Total y Fósforo Total se utiliza la muestra en crudo y se realiza un análisis mediante métodos espectrofotométricos estandarizados. El NT y el PT se pasan a nitratos ( $\text{NO}_3^-$ ) y fosfatos ( $\text{PO}_4^{3-}$ ) mediante una digestión y se procede, posteriormente, a su medición con los métodos utilizados para estos últimos parámetros.

Para realizar la medición de nitratos ( $\text{NO}_3^-$ ) y amonio ( $\text{NH}_4^+$ ) presentes en cada una de las muestras, se utiliza el filtrado obtenido en el proceso de medición de sólidos en suspensión pues estos componentes se encuentran disueltos en el agua. El análisis se realiza también con métodos espectrofotométricos.

La DBO se determina mediante el sistema de Oxitop®.

### 3.3.2. OPERACIÓN DEL SISTEMA

Como ya se comentó en la descripción del sistema, la depuradora de Carrícola cuenta con un pretratamiento (canal de desbaste), un tratamiento primario (2 tanques Imhoff en serie) y un tratamiento secundario (sistema de humedales subsuperficiales).

El sistema de humedales se compone por dos humedales subsuperficiales horizontales en paralelo que desaguan a un humedal subsuperficial vertical. Los humedales horizontales tienen un funcionamiento continuo, mientras que el humedal vertical se opera de forma discontinua vaciándolo una vez por semana.

El sistema de depuración se puso en funcionamiento en febrero del año 2014. Durante los tres primeros meses (febrero, marzo y abril) se registró un caudal medio a la salida de 60,2 m<sup>3</sup>/día. Este valor estaba muy por encima de la media de consumo estimada para una población de las características de Carrícola con lo que, tras realizar una revisión a la red de colectores, se detectó una fuga de una valsa de riego que vertía agua a la red y aumentaba el caudal de entrada de la depuradora. Este aumento en el caudal también se vio reflejado en las

concentraciones de los principales parámetros medidos en el seguimiento de la calidad del agua, pues la fuga provocó una disminución en estos valores. Desde mayo, una vez corregida la fuga, el caudal medio con el que opera la depuradora es de 14,9 m<sup>3</sup>/día, reflejándose en la figura 3 los valores de los caudales medidos a la salida de la EDAR en los días de muestreo.

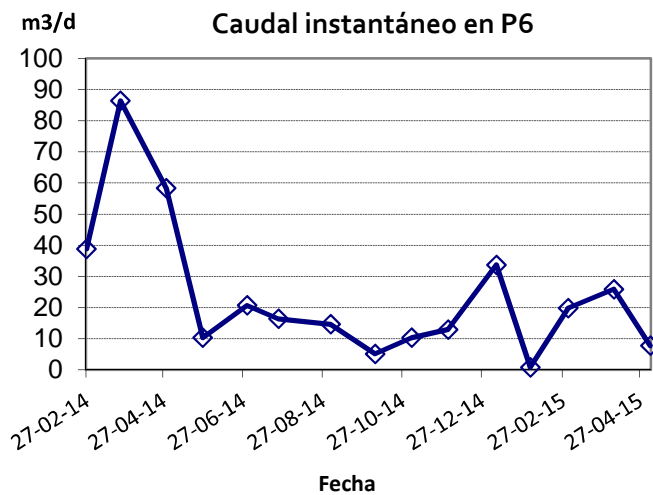


Figura 2. Caudal instantáneo en el punto 6 de muestreo.

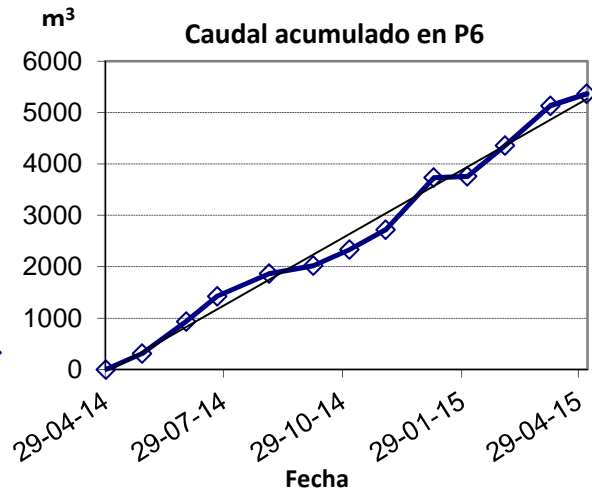


Figura 3. Caudal acumulado en el punto 6 de muestreo.

Con estos datos de caudal registrado se estima que el tiempo medio de residencia del agua en los humedales horizontales es de 5,9 días siendo casi 9 días el tiempo de residencia total, observándose una gran variabilidad en función de las oscilaciones del caudal.

Como se podrá observar en las gráficas de resultados, en diciembre de 2014 no se reflejan los datos obtenidos. Esto es debido a que el día del muestreo (1 de diciembre) el caudal de entrada y salida de la depuradora era muy alto, pues el fin de semana anterior se registraron unas lluvias muy fuertes en la zona. Los datos de ese día tienen concentraciones muy bajas con lo que no se ha considerado adecuado utilizarlos en el análisis. (En la figura 2 no se refleja un aumento en el caudal pues se estimó ese dato como promedio de los anteriores). Es de remarcar cómo este tipo de sistemas son más afectados por las condiciones climáticas y del entorno pues como cualquier otro ecosistema se ven alterados por todo aquello que los rodea.

Otro muestreo a mencionar por sus especiales características y su relación con la operación del sistema es el realizado el martes 7 de abril, después de la semana santa, pero todavía durante vacaciones escolares. Se estima que la población en esas fechas llegó a rondar los 300



habitantes, pero la característica más especial de este muestreo fue el encontrar obturada la conducción hacia el Tanque Imhoff por un aumento en el vertido de toallitas y otros elementos sólidos no degradables. Esta obturación provocó que el agua residual se dirigiera directamente hacia los humedales artificiales sin pasar por el tratamiento primario.

Por otro lado, es de importancia mencionar en el apartado de operación cómo se procede a evacuar los sólidos que se quedan acumulados en los dos codos existentes en el sistema. Como ya se comentó previamente en la entrada del colector a la parcela B, donde se encuentran alojados los humedales, se procedió a la elevación de la tubería mediante la realización de un codo en forma de "L" invertida para mejorar la aireación del flujo antes de la entrada a los humedales.- El flujo se eleva dentro de la L invertida realzando una caída por el exterior que permite la oxigenación del agua.-

El otro codo propenso a la sedimentación de sólidos se encuentra en la entrada a la segunda celda del humedal horizontal, pues la tubería va enterrada hasta la entrada dónde se eleva a la superficie y se crea un codo. En estos codos se acumulan sólidos que deben ser evacuados para evitar la obturación del colector por lo que una vez al mes, tras realizar el muestreo, se evacúan los sólidos acumulados en la parte posterior del humedal vertical.

### **3.3.3. RESULTADOS**

#### **3.3.3.1. EVOLUCIÓN DEL SISTEMA EN TORNO A LA CALIDAD DEL AGUA**

Durante el primer año de funcionamiento de la depuradora tiene lugar la maduración del ecosistema conformado por los humedales artificiales. Como hemos visto en la evolución de la vegetación, hasta pasados los primeros meses en los cuales tiene lugar la implantación del carrizo en los humedales, los procesos de depuración llevados a cabo por los microorganismos son menores. El ecosistema todavía no se encuentra en un alto grado de madurez y no ha sido colonizado completamente por todos los seres vivos que se encuentran en este tipo de hábitat de forma natural.

Conforme transcurre ese periodo, se establece la vegetación y se crea el hábitat propicio para los microorganismos (motores de los procesos de depuración), se empieza a observar una

estabilización en los procesos de depuración que nos indica que el ecosistema ha alcanzado un mayor grado de madurez.

Para analizar la evolución en la calidad del agua a su paso por el sistema se ha recurrido a la observación de los rendimientos de eliminación de los principales parámetros evaluados a la hora de medir la calidad del agua. En las gráficas expuestas a continuación se ha incluido una línea de tendencia para una mejor comprensión de la evolución pero sin categoría estadística.

### **Demanda química de oxígeno (DQO)**

La DQO determina la cantidad de oxígeno requerido para oxidar la materia orgánica en una muestra, bajo condiciones específicas de agente oxidante, temperatura y tiempo. Es una oxidación rápida y da una idea cuantitativa de la cantidad de sustancias susceptibles de oxidación que existen en el agua. En condiciones naturales, dicha materia orgánica puede ser biodegradada lentamente mediante un proceso que puede tardar desde unas pocas semanas hasta cientos de años. En las pruebas de DQO se acelera artificialmente la biodegradación que realizan los microorganismos, mediante un proceso de oxidación forzada, utilizando oxidantes químicos y métodos debidamente estandarizados, que tienen por objeto garantizar la reproducibilidad y comparabilidad de las mediciones (APHA 1992, citado en Romero-Aguilar et al, 2009).

En el caso de Carrícola, la evolución en el ratio de eliminación de DQO para todo el sistema refleja una rápida adaptación del ecosistema al paso de carga orgánica. Los rendimientos de eliminación del conjunto del sistema para este parámetro son muy elevados superando el 90% en casi todo el periodo de operación. En los humedales artificiales el porcentaje de eliminación es también muy elevado llegando a valores superiores al 80% tras medio año en funcionamiento. En el humedal horizontal, al generarse los procesos de depuración de forma natural, se observa una variabilidad estacional. En invierno, cuando las temperaturas son más extremas, los procesos de degradación se llevan a cabo más lentamente con lo que los ratios de eliminación son menores. Entre los dos humedales, el humedal horizontal alcanza ratios de eliminación mayores que el vertical, dato esperable pues la concentración en la carga entrante a la celda vertical es muy baja y su disminución es más costosa.

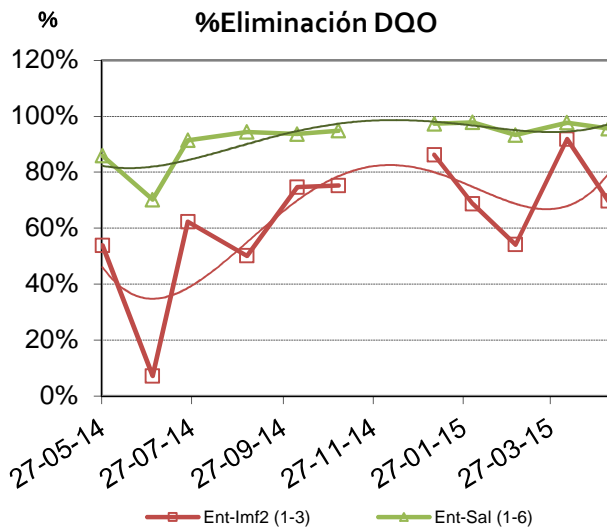


Figura 2. Evolución del rendimiento de eliminación de DQO (Tratamiento primario y Total del sistema)

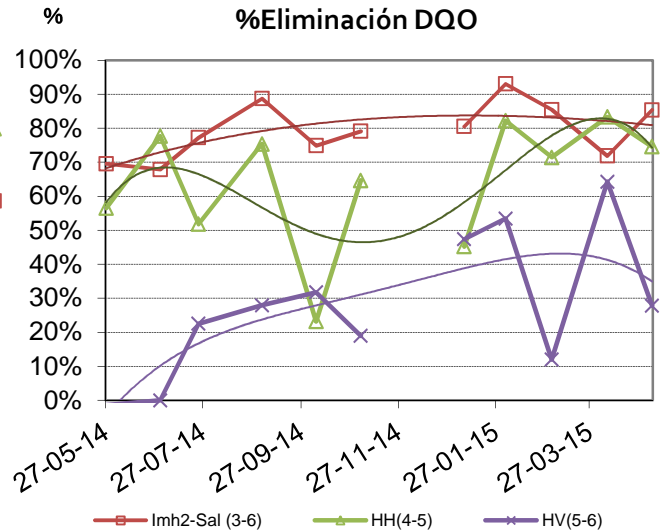


Figura 3. Evolución del rendimiento de eliminación de DQO (Tratamiento secundario, Humedal horizontal y Humedal Vertical)

### Demanda Biológica de Oxígeno (DBO<sub>5</sub>)

La DBO determina la cantidad de oxígeno que consume una población microbiana en crecimiento para oxidar la materia orgánica en CO<sub>2</sub> y agua. Es una medida relativa de la materia orgánica biológicamente degradable que se encuentra presente en la muestra. Dado que la biodegradación continúa indefinidamente, se ha limitado la DBO última a 20 días, cuando se estima que se ha consumido más del 95% del oxígeno necesario. No obstante, para acortar el tiempo de espera, se suele utilizar una medida de 5 días, la DBO<sub>5</sub> a 20°C.

La adaptación del sistema de Carrícola a la eliminación de materia orgánica biodegradable ha tenido una evolución muy rápida. Desde el primer momento los rendimientos de depuración son elevados, mayores al 60%. En los seis primeros meses de maduración del ecosistema el porcentaje de eliminación de DBO<sub>5</sub> ha ido subiendo hasta llegar a valores superiores al 90% una vez la vegetación ha colonizado todas las celdas de humedal.

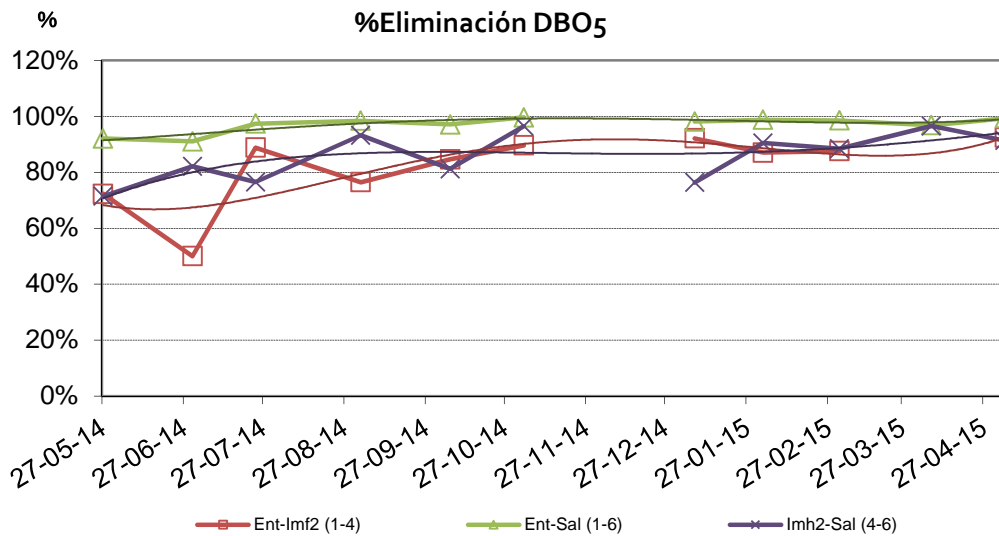


Figura 4. Evolución del rendimiento de eliminación de DBO<sub>5</sub> (Tratamiento primario, Total del sistema y Tratamiento secundario).

### Sólidos en suspensión (SS)

Los SS son sólidos que no pasan a través de una membrana filtrante de un tamaño determinado. Dentro de los SS se encuentran los sólidos sedimentables, que decantan por gravedad (aproximadamente el 60% de los SS) y no sedimentables. Se estima que el 75% de los SS son de naturaleza orgánica. (CENTA, 2007)

La eliminación de los sólidos en suspensión en el sistema de Carrícola sigue una evolución muy parecida que para los parámetros de DQO y DBO. Según los datos obtenidos los rendimientos de eliminación son muy elevados alcanzando desde el sexto mes de operación valores por encima del 95%. Tanto en los tanques Imhoff como en los humedales se observa un elevado rendimiento para la depuración de este parámetro siendo el humedal vertical el que presenta ratios más bajos y variables.

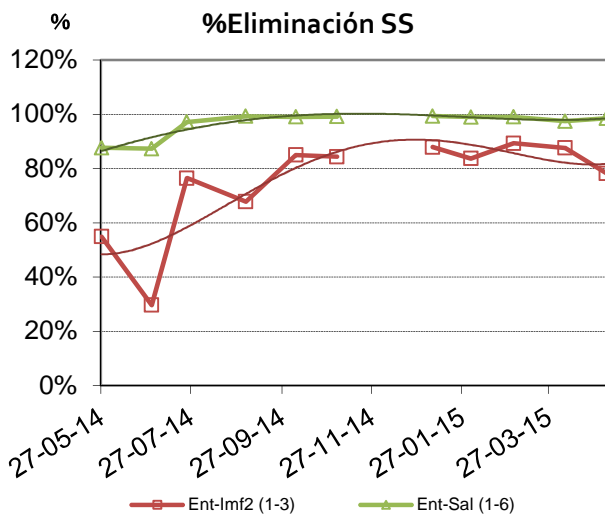


Figura 5. Evolución del rendimiento de eliminación de SS (Tratamiento primario y Total del sistema)

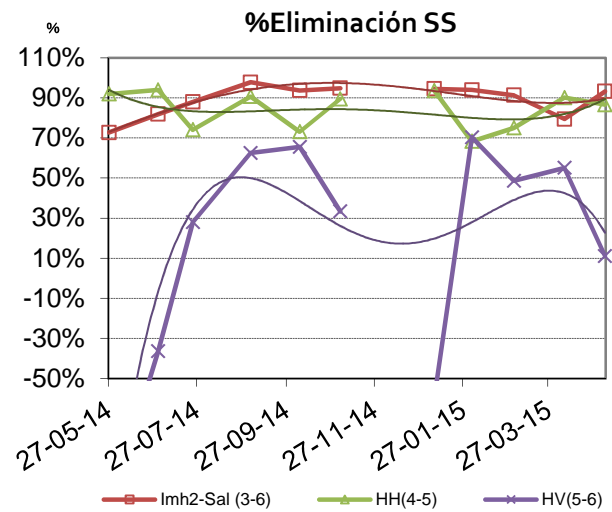


Figura 6. Evolución del rendimiento de eliminación de SS (Tratamiento secundario, Humedal horizontal y Humedal vertical)

### Nitrógeno Total (NT)

El nitrógeno se presenta fundamentalmente en las aguas residuales en forma de nitrógeno orgánico y amonio, y en menor medida como nitratos y nitritos. Como ya se comentó previamente, los procesos de descomposición y mineralización llevados a cabo por los microorganismos, transforman este nitrógeno a nitritos o nitratos (nitrificación) y finalmente a nitrógeno gas (desnitrificación).

Como es habitual en estos sistemas la eliminación del nitrógeno total no es elevada observándose en la figura 9 una tendencia bastante variable tanto para el conjunto de todo el sistema como para el tratamiento primario. En esta evolución se observa un aumento desde el inicio hasta el comienzo del invierno alcanzando porcentajes de eliminación superiores al 60% pero volviendo a disminuir a finales de otoño y primavera a valores que rondan el 20%. No obstante, el ratio de eliminación de nitrógeno en los humedales ha ido aumentando desde la puesta en marcha del sistema alcanzándose en los últimos meses porcentajes de eliminación superiores al 40%. En los ecosistemas de humedales las bacterias nitrificantes y desnitrificantes tienen una evolución más lenta que las encargadas de la degradación de la materia orgánica. Este hecho se refleja en la eliminación del NT que sigue una tendencia más moderada que en los parámetros anteriores.

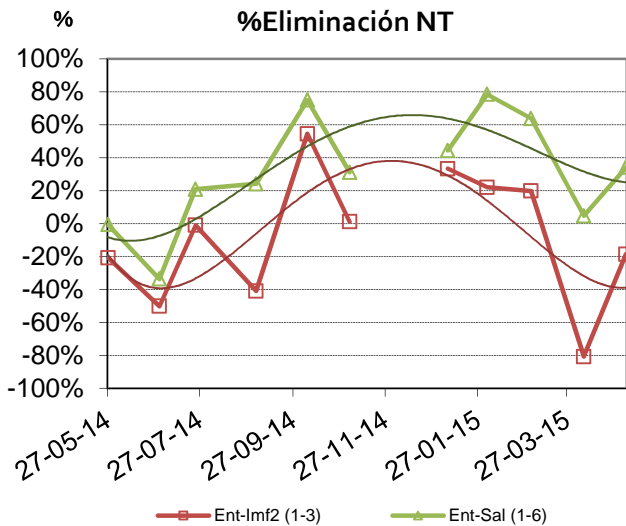


Figura 7. Evolución del rendimiento de eliminación de NT (Tratamiento primario y Total del sistema)

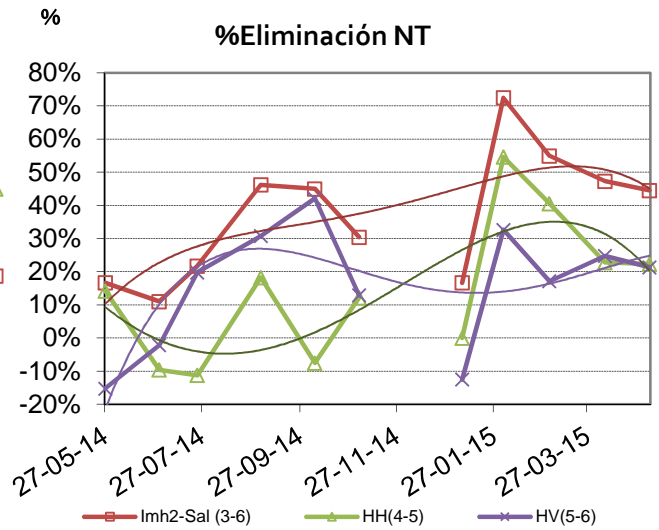


Figura 8. Evolución del rendimiento de eliminación de NT (Tratamiento secundario, Humedal horizontal y Humedal vertical)

### Fósforo Total (PT)

El fósforo en aguas residuales se encuentra principalmente en formas orgánicas e inorgánicas (ortofosfatos y fosfatos complejos). La contaminación de agua por este elemento tiene su fuente principal en el uso de productos de limpieza con compuestos fosforados como principios activos. La cantidad de fósforo asimilada por la vegetación o fijada al sedimento suele ser pequeña en relación a la aportada por el agua residual pudiendo concluir que los humedales artificiales no tienen una eliminación significativa del fósforo a no ser que se usen grandes áreas con gravas ricas en hierro y aluminio que potencien la retención del mismo (Gómez et al. 2001, citado en Romero-Aguilar et al. 2009).

La evolución en el rendimiento de eliminación del fósforo en el caso de estudio es muy similar a la del nitrógeno, observándose un aumento en el ratio de eliminación hasta mediados de invierno cuando se alcanzaron porcentajes de eliminación superiores al 70%. El rendimiento medio de eliminación en los humedales es más elevado del que cabría esperar pues alcanza valores superiores al 40%.

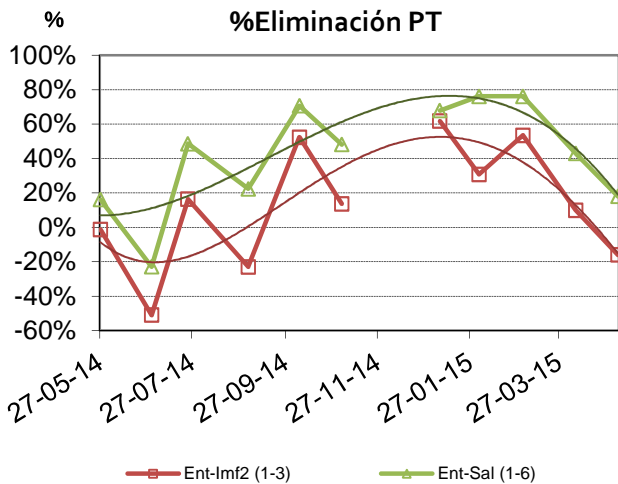


Figura 9. Evolución del rendimiento de eliminación de PT (Tratamiento primario y Total del sistema)

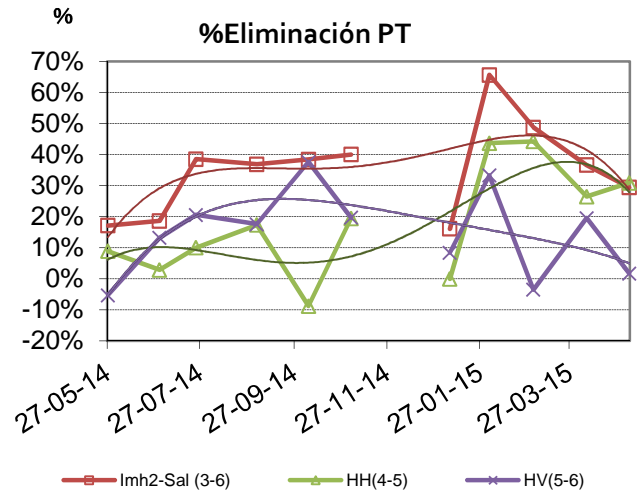


Figura 10. Evolución del rendimiento de eliminación de DQO (Tratamiento secundario, Humedal horizontal y Humedal vertical)

### CONCLUSIONES DE LA EVOLUCIÓN DEL SISTEMA EN CUANTO A CALIDAD DEL AGUA

Dado que los procesos de depuración de las aguas en los humedales artificiales están estrechamente relacionados con la evolución del ecosistema, se observa que hasta julio de 2014, cuando tiene lugar un aumento de las temperaturas y un establecimiento completo de la vegetación en las celdas, los procesos de depuración no alcanzan los rendimientos óptimos. Es a partir de este momento cuando el ecosistema empieza a albergar a los microorganismos naturalmente presentes que están vinculados a los distintos servicios ecosistémicos que los humedales prestan, y en concreto a aquellos responsables de la mejora en la calidad de las aguas. Desde este momento se observa una estabilización en la tendencia de los principales parámetros de carga orgánica (DQO, DBO y SS) en los cuales los rendimientos de depuración son muy elevados. Con respecto a los parámetros del nitrógeno y el fósforo se observa como estos ecosistemas tienen una evolución más lenta hasta alcanzar los óptimos de depuración. Esto nos indica como las condiciones adecuadas para la presencia de bacterias nitrificantes y desnitrificantes no están todavía presentes en los humedales artificiales sabiendo, por experiencias anteriores, que este tipo de reacciones tiene lugar de forma moderada en estos sistemas.

### 3.3.3.2. EVOLUCIÓN DETALLADA DE LOS PRINCIPALES PARÁMETROS DE CALIDAD DE AGUAS

Para tener una visión más explícita de la evolución de la calidad del agua a su paso por el sistema se desarrolla en este apartado la tendencia de cada uno de los parámetros estudiados tanto a la entrada como a lo largo del sistema.

#### Demanda química de oxígeno (DQO)

En el caso de Carrícola, la DQO de entrada ha ido aumentando paulatinamente hasta valores que rondan los 1000 mg/l en los últimos meses. En los tres primeros meses, cuando el agua entraba diluida, se registró una media de 137mg/l. Muy diferente es la media registrada desde el mes de mayo de 2014 pues da un valor de 967mg/l con un coeficiente de variación del 64%.

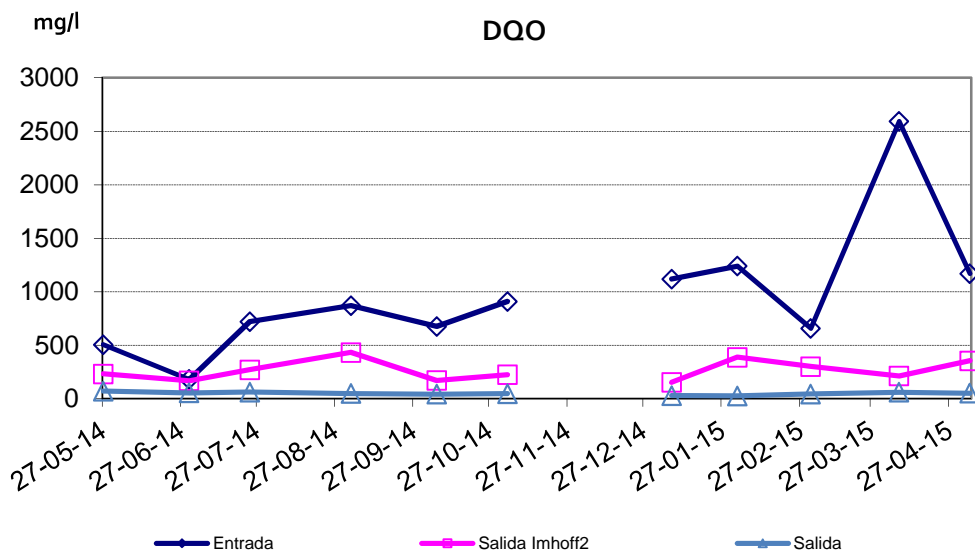


Figura 11. Evolución de la concentración de DQO a partir de Mayo de 2014 (Entrada, Salida Imhoff2 y Salida)

No obstante, pese a las variaciones en las concentraciones de entrada, la DQO de salida sigue manteniendo valores por debajo de los 100mg/l en todo el periodo de funcionamiento. En el punto 6 de muestreo se registra una media desde mayo de 2014 de 49 mg/l de DQO, no sobrepasando en ningún momento los límites marcados por la CHJ (125mg/l).



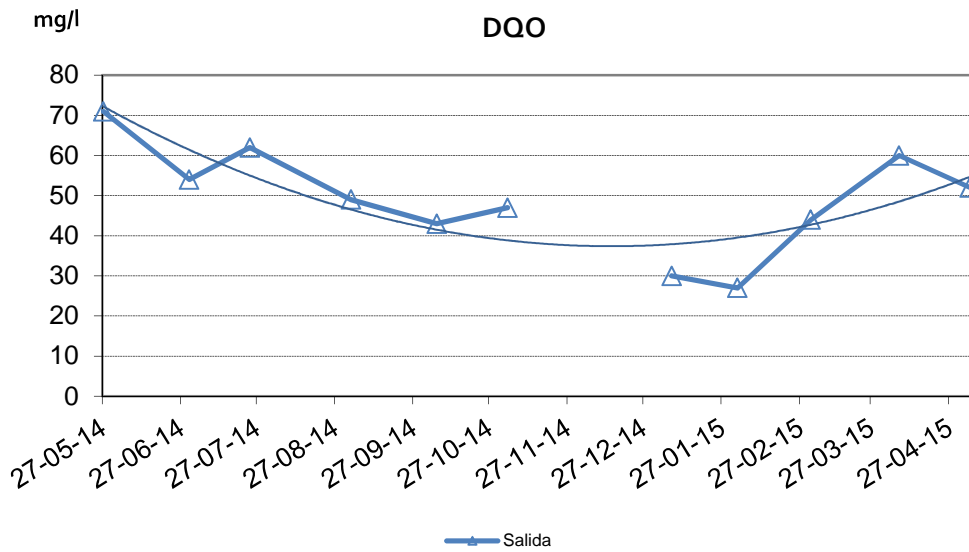


Figura 12. Evolución de la concentración de DQO a partir de Mayo de 2014, en la Salida

Con los datos registrados se ha procedido al cálculo de la carga orgánica por superficie y día lo que nos da un valor medio de 12,2 g/m<sup>2</sup>·día.

### **Demanda Biológica de Oxígeno (DBO)**

En nuestro caso, al igual que la DQO, la DBO<sub>5</sub> de entrada ha ido aumentando paulatinamente desde la puesta en marcha de la depuradora. En los tres primeros meses se registró un valor medio a la entrada de 110,4 mg/l. Desde mayo de 2014 hasta ahora la media de la DBO<sub>5</sub> en el primer punto de muestreo es de 665,5 mg/l y un coeficiente de variación del 60%. De la relación entre la DQO y la DBO se puede extraer que las aguas residuales que llegan a la depuradora son altamente biodegradables.

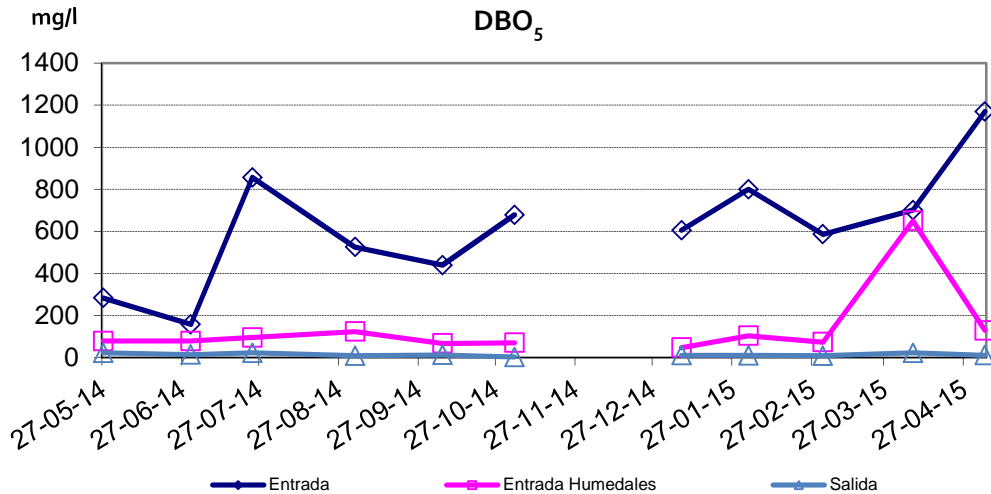


Figura 13. Evolución de la concentración de DBO<sub>5</sub> a partir de Mayo de 2014 (Entrada, Entrada humedales y Salida)

De los datos recogidos a la salida del sistema se puede concluir que la eliminación de materia orgánica biodegradable es elevada, recogiéndose una media de 13,3 mg/l de DBO<sub>5</sub> para los muestreos desde mayo de 2014.

Salvo en marzo y abril de 2014, cuando la operación de la depuradora no era la correcta, no se ha registrado ningún valor de DBO<sub>5</sub> por encima de los 25mg/l que limita la CHJ.

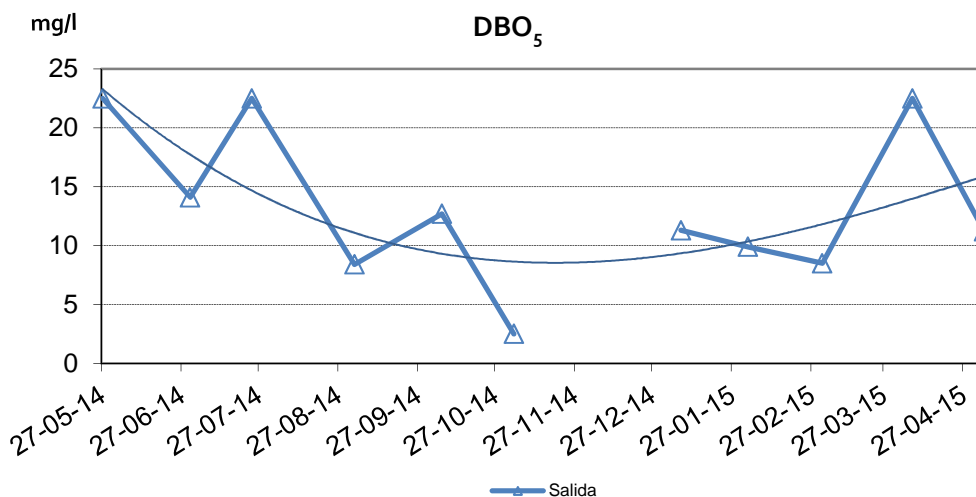


Figura 14. Evolución de la concentración de DBO<sub>5</sub> a partir de Mayo de 2014 en la Salida

Para el caso de la DBO<sub>5</sub> también se ha al cálculo de la carga por superficie y día lo que nos da un valor medio de 4,43 g/m<sup>2</sup>-día.

### Sólidos en suspensión (SS)

En el caso de estudio los sólidos en suspensión presentes en el agua de entrada también reflejan un aumento paulatino desde la puesta en funcionamiento. En los últimos cuatro meses se puede observar un punto de inflexión en esta tendencia, estabilizándose entre valores de 300 a 400 mg/l. La media registrada en la entrada en los tres primeros meses de operación se sitúa en 55,4mg/l aumentando considerablemente a partir de mayo de 2014. Desde esta fecha la media registrada es de 255,3 mg/l con un coeficiente de variación del 46%.

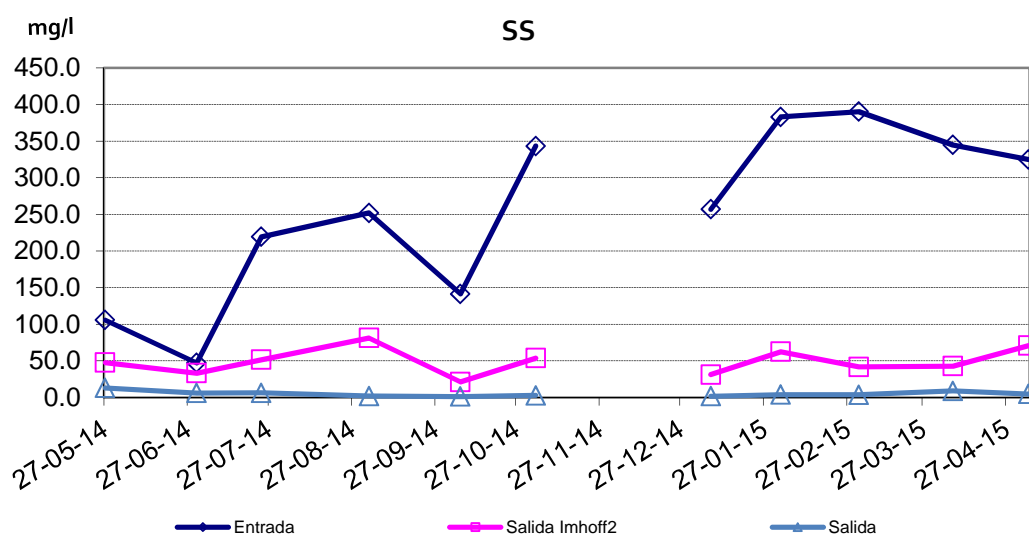


Figura 15. Evolución de la concentración de SS a partir de Mayo de 2014 (Entrada, Salida Imhoff2 y Salida)

No obstante, pese a observarse ese aumento de la concentración en el agua de entrada, el efluente de salida no supera en ningún muestreo 15 mg/l de sólidos en suspensión anotándose una media desde mayo de 2014 de 4,9 mg/l. Muy por debajo del límite marcado por la CHJ (60mg/l).

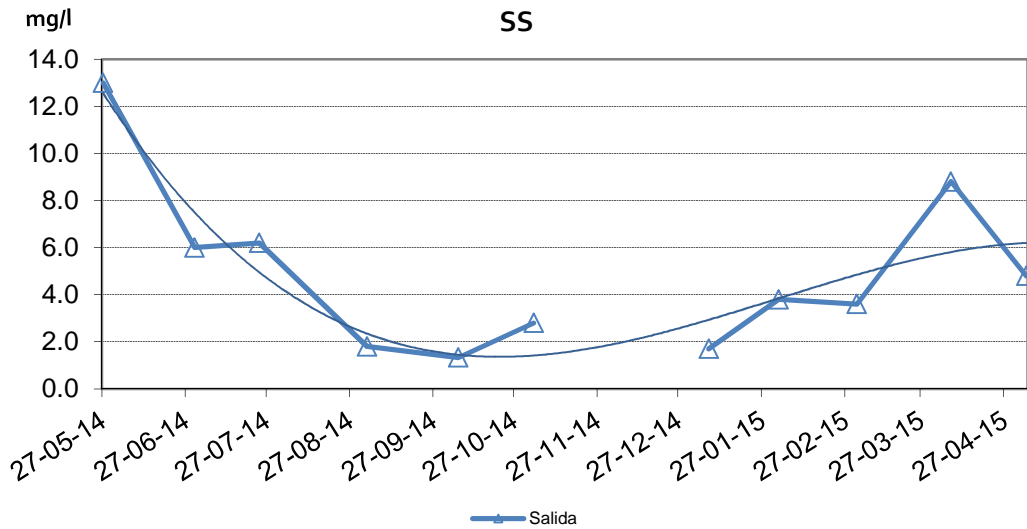


Figura 16. Evolución de la concentración de SS a partir de Mayo de 2014 en la Salida

### Especies nitrogenadas (NT, $\text{NH}_4^+$ y $\text{NO}_3^-$ )

En el caso de Carrícola, el nitrógeno total en las muestras de entrada ha ido aumentando desde la puesta en funcionamiento del sistema, observándose una estabilización en esta tendencia desde julio de 2014. Desde esta fecha, la media registrada en la entrada de la depuradora se encuentra en 55,2 mg/l situándose todos los valores entre 40 y 70 mg/l.

En todas las muestras analizadas el mayor porcentaje del nitrógeno presente se encuentra en forma amoniacal o como nitrógeno orgánico (siendo la mayoría de esta fracción eliminada en el tratamiento primario), con ínfimas cantidades de nitratos.

En los primeros 6 meses de funcionamiento de la estación depuradora, los valores de salida para el nitrógeno total fueron mayores que los de la entrada. Estos datos pueden ser debidos a que en los primeros meses el agua de entrada llegaba muy diluida y el paso por el tratamiento primario hacía que se aumentasen los niveles de nitrógeno.

A partir de julio de 2014 los valores de nitrógeno total a la salida comienzan a ser menores a los de entrada. La media recogida en las muestras de salida desde ese momento es de 30,1 mg/l, con un coeficiente de variación de 37%.

Como se puede observar en la figura 19, hay varios datos de nitrógeno a la salida del tanque Imhoff 2 que son más elevados que los de entrada. Esto puede deberse a dos motivos: por un lado el agua de la primera muestra entra a distinta hora que el agua de la muestra en la salida del segundo Imhoff, con lo que puede darse que en la salida del segundo tanque se esté vertiendo un agua que entró con mayor concentración que el que entra en el momento de nuestro muestreo. Por otro lado puede tener lugar también la disolución de nitrógeno de los fangos del tanque que aumente dicho valor.

No obstante, aun aumentando la concentración del nitrógeno en el tratamiento primario, se observa como desde mayo de 2014 las concentraciones de nitrógeno disminuyen a su paso por los humedales artificiales.

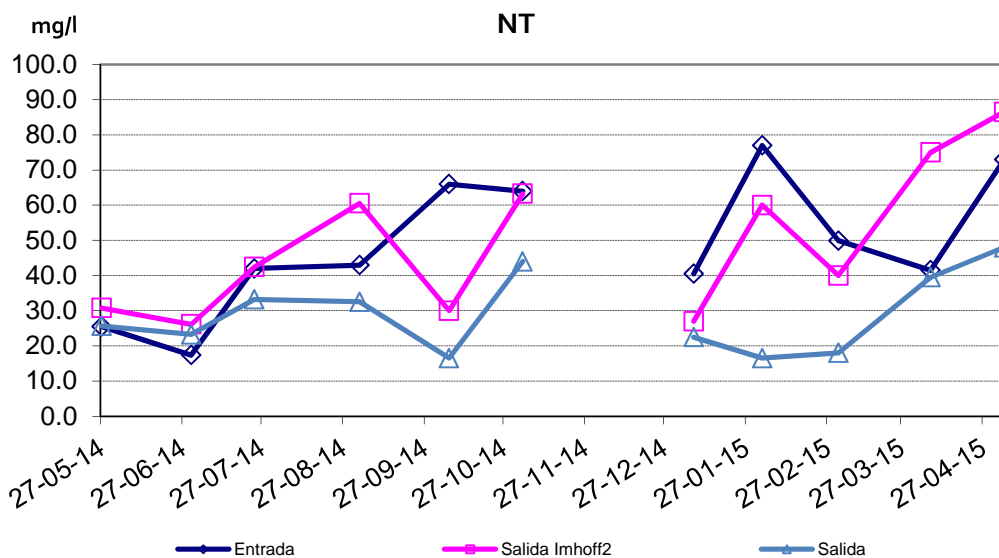


Figura 17. Evolución de la concentración de NT a partir de Mayo de 2014 (Entrada, Salida Imhoff2 y Salida)

Si nos fijamos en la variación de los nitratos a lo largo del tiempo, podemos extraer que en la mayoría de las muestras los nitratos a la entrada son mayores que a la salida del tratamiento primario lo que significa que en esta etapa se pueden estar dando procesos de desnitrificación. Sin embargo, si nos fijamos en los datos de salida del tratamiento secundario, se observa en varios muestreos un aumento relativo con respecto a la entrada a esta fase. Este cambio de tendencia puede estar provocado por un aumento en los procesos de nitrificación en los humedales artificiales. La media para los nitratos en el punto de vertido desde la puesta en marcha de la depuradora es de 0,26 mg/l. Desde marzo de este año los datos recogidos a la

salida de los humedales son siempre menores que a la entrada, con lo que se puede deducir que se están comenzando a dar también procesos de desnitrificación o absorción de nitratos por la vegetación en esta fase.

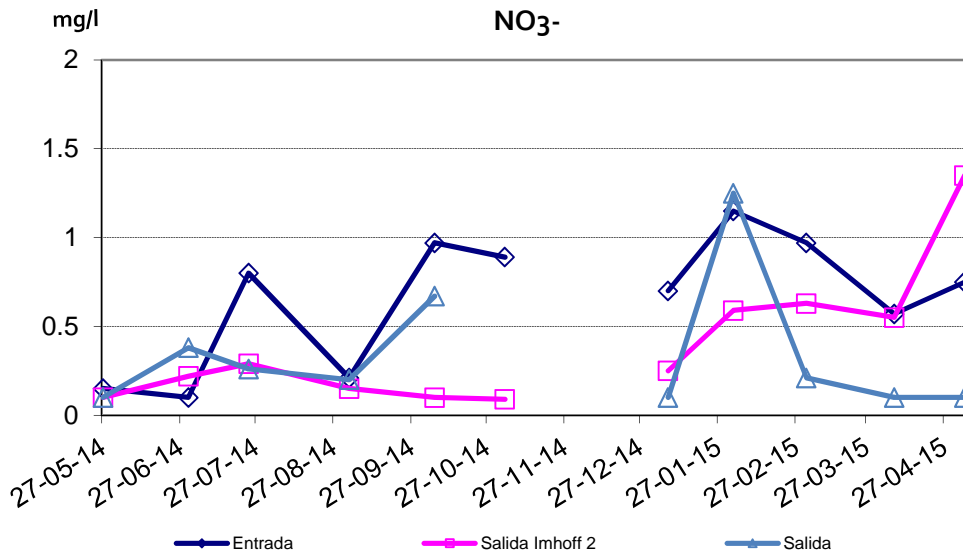


Figura 18. Evolución de la concentración de NO<sub>3</sub> a partir de Mayo de 2014 (Entrada, Salida Imhoff2 y Salida)

En cuanto al amonio, al ser la fracción mayoritaria del nitrógeno total (en torno al 70% en la entrada, mayor al 80% tras el tratamiento primario) el patrón de evolución es muy similar al del nitrógeno total. En varias muestras el amonio aumenta en el tratamiento primario (amonificación del nitrógeno orgánico). Sin embargo, los valores de salida del tratamiento secundario son siempre menores a los de entrada, con lo que se puede extraer que en los humedales artificiales se están llevando a cabo procesos de nitrificación (como se reflejaba en la evolución de los nitratos) o de absorción del nitrógeno por la vegetación.

No obstante, al aumentarse el amonio en el tratamiento primario, y no estarse produciendo los procesos de nitrificación muy eficazmente, los valores medios a la entrada y salida de la depuradora son muy parecidos reflejándose una media de 31,02 mg/l para el nitrógeno amoniacal en a salida.

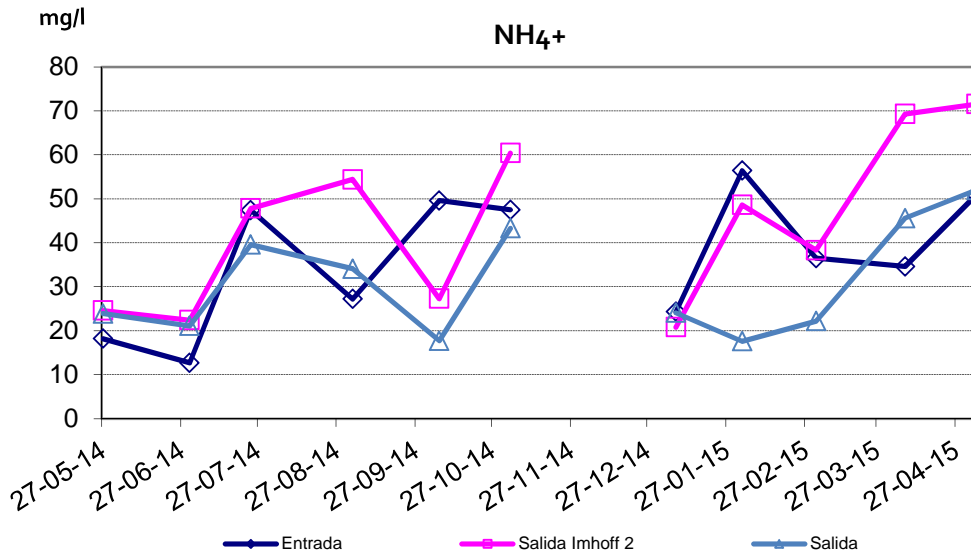


Figura 19. Evolución de la concentración de NH<sub>4</sub> a partir de Mayo de 2014 (Entrada, Salida Imhoff2 y Salida)

### Fósforo total (PT)

En el caso de Carrícola, el fósforo a la entrada de la depuradora no presenta valores muy elevados, notándose también un aumento en la concentración desde la puesta en marcha. Desde mayo del año pasado la media de los valores del fósforo total en las aguas de entrada es de 6,9 mg/l, con un coeficiente de variación del 35%. La concentración de fósforo total a la salida disminuye considerablemente obteniéndose una media desde el mes de mayo de 3,4 mg/l, no situándose en ningún muestreo por encima de 6 mg/l.

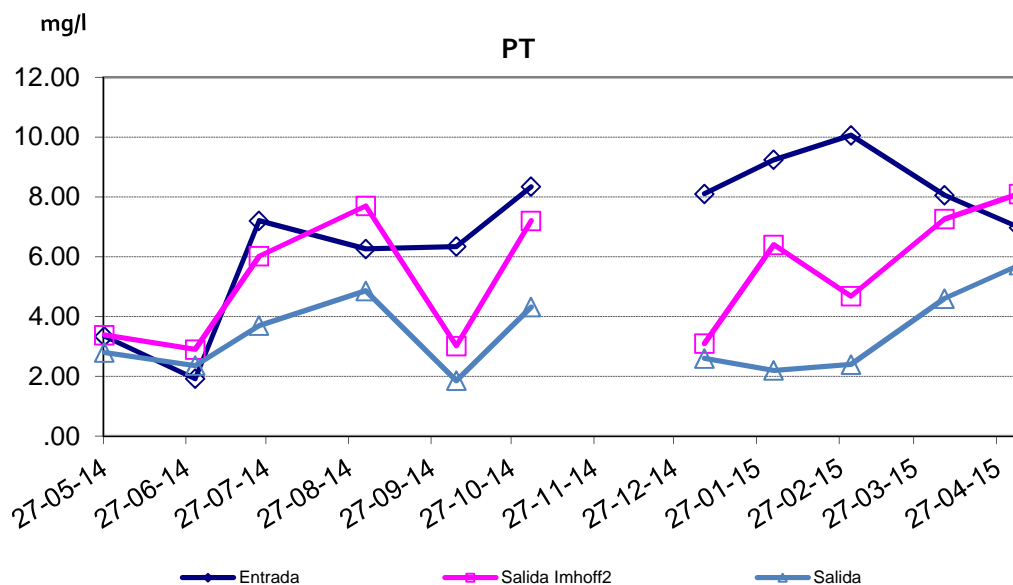


Figura 20. Evolución de la concentración de PT a partir de Mayo de 2014 (Entrada, Salida Imhoff2 y Salida)

### Otras variables (Conductividad, pH, temperatura y OD)

Como el resto de variables la conductividad en las muestras de entrada ha ido amentando desde la puesta en marcha del sistema registrándose una media desde mayo de 2014 de 1084  $\mu\text{S}/\text{cm}$  con un coeficiente de variación del 39%. Tras el paso de agua por el sistema se observa una disminución considerable en esta variable situándose la media para la conductividad en el vertido en 827  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .

Con respecto al pH, el agua de entrada a la depuradora tiene una tendencia básica con valores en torno a 8. A la salida de sistema se observa una disminución en este parámetro registrándose datos en torno a 7,6.

La evolución de la temperatura encuentra su máximo en los meses de verano con temperaturas superiores a los 25°C, disminuyendo paulatinamente hasta valores que rondan los 10°C en los meses de invierno. En todas las muestras, pero más notablemente en la muestras invernales, se observa como la temperatura en el tratamiento primario es superior a la registrada en los humedales artificiales.

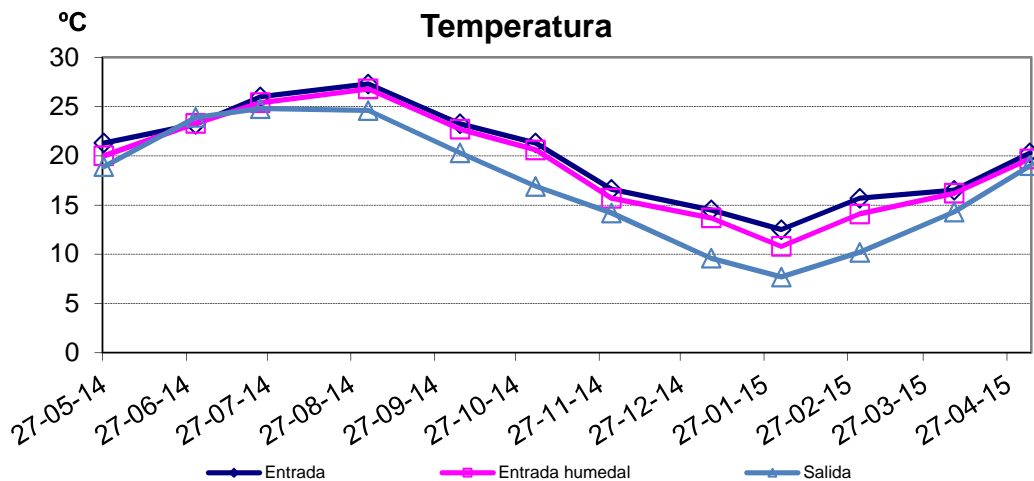


Figura 21. Evolución de la Temperatura a partir de Mayo de 2014 (Entrada, Salida Imhoff2 y Salida)

De la evolución del Oxígeno Disuelto a su paso por la depuradora podemos destacar como, en todas las muestras, disminuye la concentración en el tratamiento primario para aumentar, en la mayoría de los registros, a valores superiores a los de entrada en los humedales artificiales.



### 3.3.4. RESUMEN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS

En la tabla 7 se muestran los resultados medios, y el coeficiente de variación, para los principales parámetros estudiados desde mayo de 2014. De dichos resultados se pueden extraer las siguientes conclusiones:

1. El agua de entrada ha sufrido un aumento paulatino en las concentraciones de los principales contaminantes desde la puesta en marcha del sistema. Las últimas concentraciones son superiores a los valores típicos para estos parámetros en las aguas residuales urbanas.

Tabla 7. Valores típicos de los principales contaminantes en las ARU. (Fuente: CENTA 2007)

Parámetro	Rango habitual
Sólidos en suspensión, SS (mg/l)	150-300
DBO <sub>5</sub> (mg/l)	200-300
DQO (mg/l)	300-600
Nitrógeno (mg/l)	50-70
Fósforo (mg/l)	15-20

2. La eliminación de materia orgánica en el humedal es muy elevada cumpliendo los requisitos de la confederación hidrográfica para DQO, DBO y SS.
3. Para el nitrógeno amoniacal no se observa apenas eliminación dentro del sistema de depuración.

Tabla 8. Valores medios y Coeficiente de Variación para los principales parámetros de muestreo desde el mes de mayo de 2014

Pto Muestreo	DQO		DBO <sub>5</sub>		SS		NT		Nitrógeno Amoniacal		PT	
	Media (mg/L)	CV (%)	Media (mg/L)	CV (%)	Media (mg/L)	CV (%)	Media (mg/L)	CV (%)	Media (mg/L)	CV (%)	Media (mg/L)	CV (%)
1	967,18	64	665,48	60	255,33	46	55,21	35	36,85	40	6,89	35
3	265,00	36	138,10	124	48,84	36	49,23	42	44,13	42	5,43	38
6	49,00	27	13,28	50	4,89	72	30,09	37	31,02	40	3,40	38
límite CHJ	125		25		60							

Con respecto a los porcentajes de eliminación, en la tabla 9 se reflejan los rendimientos medios obtenidos en el pretratamiento, el tratamiento secundario y el rendimiento global del sistema, extrayéndose las siguientes conclusiones:

1. Los rendimientos de depuración, tanto del tratamiento primario como del secundario, en lo referente a materia orgánica son muy elevados registrándose valores por encima de la media. -Según datos del CENTA los rendimientos de tratamientos primarios para SS y DBO<sub>5</sub> se encuentran entre los siguientes rangos respectivamente 40-70% y 25-40%. Los ratios de eliminación del tratamiento primario en el caso de estudio son superiores 75% en las dos variables.-
2. Los rendimientos medios de depuración de los Humedales artificiales de flujo subsuperficial son los siguientes:

Tabla 9. Rendimientos de depuración en Humedales Artificiales de Flujo Subsuperficial. (Fuente: CENTA 2007)

Parámetro	%
Sólidos en suspensión, SS (mg/l)	85-95
DBO <sub>5</sub> (mg/l)	80-90
DQO (mg/l)	75-85
Nitrógeno (mg/l)	20-40
Fósforo (mg/l)	15-30

Los ratios de eliminación obtenidos en el sistema de Carrícola entran dentro de los rangos registrados en los estudios del CENTA. El rendimiento para fósforo total es superior a rango establecido. Este suceso ha sido observado en otros humedales subsuperficiales en los primeros meses de funcionamiento como consecuencia de la mayor cantidad de zonas disponibles para su adsorción. Según reflejan esos estudios esta capacidad de retención inicial disminuye paulatinamente con el tiempo (CENTA 2007).

Tabla 10. Rendimientos medios de eliminación de los principales contaminantes en las distintas fases del sistema

	DQO	DBO <sub>5</sub>	SS	NT	PT
Primario (1-3)	63,08%	75,28%	74,99%	-7,35%	13,36%
Secundario (3-6)	79,40%	85,81%	89,21%	36,99%	35,10%
Global (1-6)	92,00%	97,02%	96,64%	31,20%	42,21%

### 3.4. CONSEJOS PARA LA BUENA OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DEL SISTEMA

Las tareas de mantenimiento que se deben llevar a cabo en los sistemas de humedales artificiales tienen que ver con la limpieza y buen funcionamiento del pretratamiento, el tratamiento primario y los humedales. Aunque no debemos olvidar en ningún momento que es necesario realizar un seguimiento continuo de la salud del ecosistema llevando a cabo una observación periódica de sus componentes principales.

#### PRETRATAMIENTO

En la depuradora de Carrícola la limpieza de la reja de desbaste se realiza dos veces por semana efectuando un rastrillado y depositando los residuos en la parte superior de la reja, en una zona habilitada para el escurrido de los mismos. Posteriormente, una vez ya secos, se recogen en un contenedor.

Tras la observación del primer año de funcionamiento del sistema se ha sacado como conclusión que la limpieza de dicha reja debe aumentarse en las épocas de mayor afluencia de gente al municipio.

El muestreo de abril de 2015 puso de manifiesto cómo un aumento de las toallitas y elementos no fácilmente degradables, que se vierten con las aguas residuales en los periodos vacacionales, obturan la canalización de entrada al tratamiento previo y primario desviando las aguas directamente a los humedales.



Ilustración 39. Colector de entrada al humedal obturado. (Foto tomada el 07/04/2015)

Para evitar que esto ocurra con facilidad se realizó a finales de mayo un aumento de unos centímetros en la altura del muro del aliviadero. Para que sea solo en las avenidas extraordinarias cuando parte del agua residual vaya directamente al tratamiento secundario.



Ilustración 40. Mejora del muro en la arqueta de entrada a la depuradora. Mayo 2015

### TRATAMIENTO PRIMARIO

En los laterales de los tanques Imhoff se forman capas de sobrenadantes que son extraídos, y dejados secar en la zona habilitada para ello, cuando la capa es consistente.

Cuando se diseñó el sistema se estimó que la extracción de los fangos de los tanques Imhoff debía ser realizada 1 o 2 veces al año. Durante el primer año de funcionamiento del sistema se ha observado que la frecuencia de evacuación de los mismos no tiene por qué ser tan elevada, pues el funcionamiento ha sido correcto durante un año completo de su utilización sin evacuación de lodos.

En los datos de muestreo de febrero de 2015 se observaron concentraciones altas a la salida de los Tanques Imhoff, pero se decidió esperar a los valores del siguiente muestreo para estudiar la necesidad de vaciar los fangos del primer tanque. Una vez obtenidos los datos de salida de los Tanques Imhoff en marzo se observó que los parámetros seguían siendo buenos, por lo que no se vio necesaria la extracción.

### TRATAMIENTO SECUNDARIO

Para el correcto funcionamiento de los humedales es necesaria la limpieza periódica de todas las canaletas que vierten el agua al humedal. Es muy habitual el crecimiento de algas en las superficies de las mismas con lo que, según se vaya observando su crecimiento, deben ser eliminadas con una limpieza. En el sistema de Carrícola se utiliza una escoba para la limpieza de dichos elementos.

Dado que la entrada a realizar la limpieza de la canaleta del humedal vertical se hacía complicada con el crecimiento de la vegetación, se estimó correcto segar una pequeña franja a los lados de la misma para permitir una mejor limpieza.

En los primeros meses de operación de los humedales se observó cómo determinadas plantas (sobre todo tomateras y chopos) se instalaban en el humedal. Para un funcionamiento óptimo del sistema es necesaria la eliminación de toda la vegetación oportunista que pueda aparecer y estar en competencia con el carrizo. En la eliminación de este tipo de especies se utilizan siempre métodos manuales.

En mayo de 2014 se observó que cuando el caudal de entrada al humedal vertical es muy bajo, gran parte del agua salía muy cerca del final de la celda. Esto provocaba que cuando la celda estaba llena, el agua que rebosaba por el aliviadero tenía un tiempo de retención muy bajo en el humedal vertical, pues el recorrido dentro de la celda era muy corto. Para evitar la entrada del agua por la parte final del humedal se decidió colocar un tapón en el medio del canal con lo que solo en las grandes avenidas el agua entra directamente por la parte final de la celda.

En el muestreo de abril de 2015 se observaron malos olores en los humedales (habitualmente no se aprecia ningún olor en la depuradora) provocados por un encharcamiento elevado de las gravas. Para evitar que el nivel del agua se coloque por encima del sustrato se recomienda bajar la cadena que regula el nivel de salida de las celdas varios eslabones cuando se prevea gran afluencia de gente al municipio.

En el muestreo de mayo de 2015 los niveles de los humedales estaban muy por debajo de lo habitual (20cm). Se recomendó la subida de los mismos aunque se comentó que un nivel bajo de las aguas en la época de crecimiento de la vegetación puede tener beneficios en el sistema

pues provoca que las raíces del carrizo realicen un crecimiento en profundidad para buscar el agua.

Dado que los rendimientos de eliminación de nitrógeno y fósforo que se logran mediante la siega y recogida de las especies plantadas en los humedales no son muy elevados (menos del 20% para el nitrógeno y menos del 10% para el fósforo) se ha puesto en duda varias veces la necesidad de estas operaciones, aconsejándose en climas fríos que no se lleven a cabo pues la vegetación ejerce una protección térmica.

No obstante, en el área mediterránea, se suele recomendar realizar estas labores una vez al año para evitar la acumulación de materia muerta en los humedales. (Se aconseja llevarla a cabo una vez pasado el periodo de heladas y evitando los periodos de nidificación de las aves que puedan habitar en el humedal).

Tras el primer año de funcionamiento del humedal artificial de Carrícola no se ve necesaria realizar esta siega creyendo ser conveniente posponerla al año que viene.

Como se ha comentado en varias ocasiones, la salud del ecosistema es fundamental para conseguir una buena calidad en las aguas. Por ello, dentro de las tareas de mantenimiento también se encuentra la observación periódica de la vegetación, sustrato y otras componentes esenciales del ecosistema.

En el estudio de la evolución de la vegetación ya se mencionó como, en estos sistemas, por el hecho de conformar un nuevo hábitata, y por las características propias del mismo, es habitual la aparición de plagas e insectos en su interior.

Para llevar a cabo la gestión de este tipo de "intrusiones" existen varias alternativas. En las plagas sufridas por el humedal de Carrícola se decidió tratar la planta con unos jabones especiales para el cultivo ecológico que eliminan el insecto, las ventajas de esta actuación es el mantenimiento de una vegetación en buen estado y sin perder las hojas de manera que la afección paisajística es menor. Otra opción válida para la gestión de las plagas, sobre todo en el caso del pulgón, es la no realización de ningún tratamiento. La afección realizada por el pulgón es la eliminación de las hojas de la planta del carrizo, pero no se ve gravemente deteriorada la salud de la planta. Una vez el pulgón abandona el cultivo la planta puede seguir

viviendo, regenerándose las hojas en el siguiente periodo de crecimiento. Esta actuación generaría un impacto visual y podría afectar a la capacidad del ecosistema para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero.

Otra de las formas posibles de actuar sería la eliminación de la vegetación. Aprovechando ya con ello la extracción de biomasa del ecosistema. Esta actuación conlleva las mismas afecciones que la anterior pero si nos encontramos en la época adecuada para realizar la siega puede ser una de las mejores alternativas.

Desde el punto de vista ecosistémico podría gestionarse también favoreciendo la aparición de depredadores naturales.

### 3.5. OTROS SERVICIOS ECOSISTÉMICOS

En el caso de estudio, se ha focalizado en la mejora de la calidad del agua a su paso por el humedal de Carrícola, pero este no es el único servicio que nos brinda el humedal artificial. Es difícil conocer todos los beneficios que puede estar generando la implantación de este humedal sobre la zona, pues las interrelaciones que tienen lugar entre unos ecosistemas y otros pueden llegar a ser muy complejas no queriendo entrar ahora en el análisis de las mismas. Pero, como se observado en otros humedales de similares características, la puesta en marcha de este tipo de sistemas puede conllevar una mejora en los siguientes aspectos:

- Mejora paisajística: La plantación de carrizo en la parcela indicada ha generado una mejora de la calidad paisajística del entorno pues las tierras donde se encuentran implantados los humedales eran previamente cultivos baldíos.
- Aumento de la fauna silvestre y la biodiversidad: Aunque no se haya realizado un estudio detallado, si se ha podido observar en los días de muestreo como el humedal forma parte ahora del ecosistema ejerciendo de hábitat para diversas aves.
- Disminución de gases de efecto invernadero (GEI): Recientemente se están llevando a cabo numerosos estudios sobre la afección de los humedales artificiales o recuperados en las emisiones de gases de efecto invernadero. De los resultados obtenidos en dichas investigaciones se ha concluido que las emisiones de metano son muy variables en el tiempo y en el espacio encontrando ratios más altos de emisión de metano y en las zonas de agua profunda en comparación con las zonas someras, donde las emisiones de CO<sub>2</sub> y N<sub>2</sub>O son mayores (Vymazal 2010). Por otro lado las altas temperaturas del sustrato tienen una relación contundente con el aumento de las emisiones de N<sub>2</sub>O, CH<sub>4</sub> y N<sub>2</sub>.

En el caso de Carrícola no se ha llevado a cabo un estudio detallado de la evolución en las emisiones de GEI pudiendo ser objeto de otro trabajo de fin de grado o master.

- Mejora en la calidad del entorno del barranco: La mejora en la calidad del agua tiene una afección positiva sobre el barranco pues la disminución de la contaminación en la zona, genera un entorno de ocio y disfrute personal más atractivo. Esta mejora en el agua, que influye en la mejora paisajística y de biodiversidad, unida a la recuperación de los caminos y la limpieza del cauce, ha generado áreas idóneas para pasear y disfrutar del entorno.



## **CAPÍTULO 4. PROPUESTAS DE MEJORA Y NUEVOS SERVICIOS**

Como se ha comentado en varias ocasiones a lo largo del trabajo, no existe en Carrícola una línea para el tratamiento de los fangos generados en los tanques Imhoff. Actualmente una de las opciones más viables para la gestión de los fangos era llevarlos a la EDAR de Adzaneta de Albaida para ser sometidos a un tratamiento adecuado lo que encarece el mantenimiento de la depuradora.

Para reducir ese coste añadido y cerrar el ciclo de la materia orgánica se propone en este apartado la implantación de un sistema de deshidratación de fangos mediante humedales artificiales.

### **4.1. PROPUESTA DE HUMEDALES PARA LA DESHIDRATACIÓN DE LOS FANGOS EXTRAIDOS DE LOS TANQUES IMHOFF**

En todos los tratamientos de aguas residuales como resultado de las distintas etapas de depuración se genera una mezcla de agua y sólidos separada del agua residual que forma lo que se denomina lodos o fangos de depuradora.

Los fangos de depuración pueden llegar a ser muy diversos dependiendo del origen de las aguas residuales así como de la tecnología utilizada para su tratamiento. No obstante, las características generales que suelen englobar a los lodos de depuradora son:

- Elevado porcentaje de agua (95-99%) – ocupan un gran volumen y su manipulación es complicada-.
- Alta concentración de materia orgánica (aunque esta disminuye en los sistemas de decantación –digestión) por lo que entran fácilmente en putrefacción y generan malos olores.
- Gran cantidad de organismos patógenos causantes de enfermedades.

Estas características hacen necesaria una eficiente gestión de los mismos.

En el tratamiento primario de la depuradora de Carrícola se generan fangos que son acumulados en la parte baja de los tanques Imhoff. Para un mantenimiento y operación correcta del sistema, los lodos deben ser evacuados una vez al año.

Conforme a la ley 22/2011 de Residuos y Suelos contaminados, la gestión de los lodos procedentes de depuradora debe realizarse teniendo en cuenta la siguiente jerarquía de actuaciones:

1. Prevención
2. Reciclado: Aplicación al suelo con fines de fertilización y reciclaje de los nutrientes y de la materia orgánica.
3. Valorización energética (incluyendo biometanización).
4. Depósito en vertedero.

Independientemente del destino final, los lodos deben ser tratados, para reducir su contenido en agua (reducción de volumen), estabilizar la materia orgánica (evitar problemas de fermentación y putrefacción), conseguir una textura adecuada (maneables y transportables), reducir organismos patógenos y abaratar la gestión de los mismos.

El destino idóneo para el cierre del ciclo de la materia orgánica en el municipio de Carrícola, donde la agricultura es el principal medio de vida, sería la aplicación de los fangos tratados al suelo de las explotaciones agrarias cercanas.

La aplicación de lodos de depuradora al suelo está regulada a través de la Legislación Europea (DE 86/278/CEE), que fue transpuesta a la Legislación Española por el RD 1310/1990 y la Orden de 26 de Octubre de 1993 sobre utilización de lodos de depuración en el sector agrario.

Para hacer factible la reutilización de los fangos en la depuradora de Carrícola es necesaria una deshidratación de los lodos que, debido al avanzado grado de mineralización con la que se extraen de los tanques Imhoff, podría realizarse con un tratamiento de secado *In situ*.

En el caso de Carrícola se propone la implantación de Humedales Artificiales para la deshidratación *in situ* de los fangos extraídos de los tanques Imhoff.

Esta tipología de tratamiento se basa en la construcción de Humedales Artificiales de flujo Vertical donde los fangos concluyen su estabilización y se produce la deshidratación de los mismos.

La utilización de este tipo de sistemas viene provocada por:

- Los tallos, rizomas y raíces de las plantas favorecen el drenaje del agua, creando canales en profundidad por donde el agua es evacuada. Esta es la principal característica que diferencia los humedales de las eras de secado sin vegetación, la cual aumenta significativamente la velocidad de deshidratación.
- El viento produce el movimiento de los tallos de la vegetación que origina huecos en la superficie del fango.
- La evapotranspiración, favorecida por la presencia de las plantas, facilita el secado del lodo.
- Las raíces de las plantas contribuyen a su vez a la transferencia de oxígeno entre las capas de grava, creando ambientes aerobios que favorecen la mineralización e higienización del fango permitiendo un mayor grado de estabilización.

#### CALCULO DE LA SUPERFICIE

Según datos del CENTA, los tanques Imhoff generan una cantidad anual de 120-200 litros de fango por habitante equivalente.

En el caso de Carrícola donde la carga de DBO<sub>5</sub> media en las aguas residuales es de 665,5mg/l y el caudal medio se encuentra en 14,9 m<sup>3</sup>/día los habitantes equivalentes se calculan como:

$$h.e = \frac{Q(m^3/día) \cdot DBO_5(mg/l)}{60 g DBO_5/día}$$
$$h.e Carrícola = \frac{14,9(m^3/día) \cdot 665,5(mg/l)}{60 g DBO_5/día} = 165,3 he \approx 166 he$$

Con estos datos el volumen de fangos que se generará en Carrícola en un año será:

$$Volumen de fangos (m^3) = 200 l/h.e.año \cdot 166 h.e. = 33200 l = 33,2 m^3$$

Si se plantea extraerlos 4 veces al año, en cada extracción se saca un total de 8,3 m<sup>3</sup>. En la zona de actuación de la parcela A se disponen de unos 22 m<sup>2</sup> para realizar la actuación con lo que se propone la disposición de 3 celdas paralelas a los tanques Imhoff a una distancia de 1,5 m de estos. Las dimensiones de cada una de las celdas serían **1,7 x 1,7**; **2,5 x 2,5** y **3,5 x 3,5** m. La superficie total de las tres celdas nos da un conjunto de 21,4 m<sup>2</sup>.

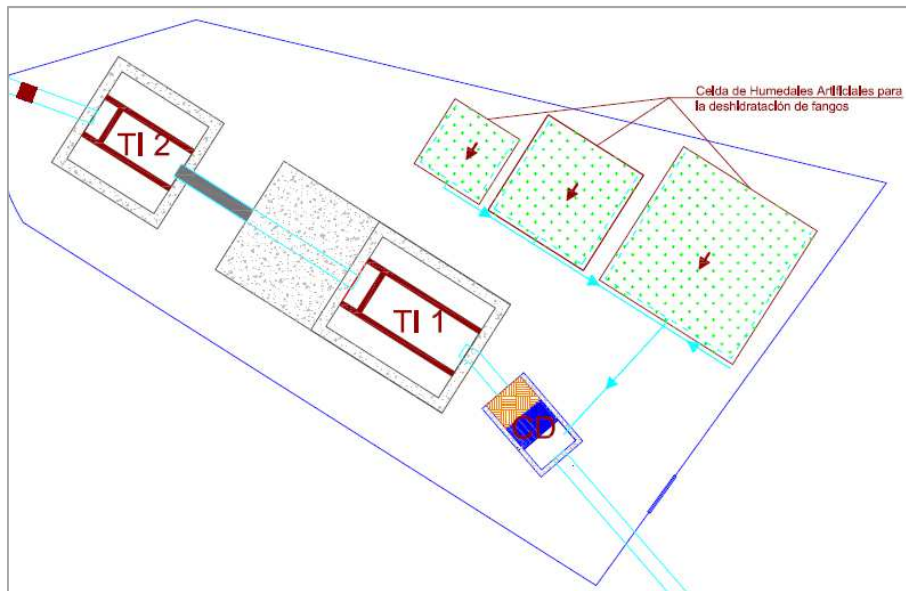


Ilustración 41. Esquema de las celdas de humedales artificiales para la deshidratación de fangos. (Parcela A)

Para conocer cuanta carga por metro cuadrado está soportando el sistema se ha supuesto que el fango extraído tiene las características de un fango digerido, encontrándose la concentración de SS en un rango de 31-40 g/h.e. y día. (Hernández Muñoz, A., 1998)

Con ese valor la cantidad máxima de SS que se extraen con el fango en un año será:

$$SS(kg/año) = 0,040(kg/h.e. \cdot día) \cdot 365 \text{ días} \cdot 166 \text{ h.e.} = 2423,6 \text{ kg/año}$$

Que dividido entre la superficie total de humedal da un valor de carga por superficie de:

$$Carga \text{ fango} = \frac{2423,6 \text{ (kg/año)}}{21,4m^2} = 121 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{año}$$

El valor de carga más comúnmente utilizado es de  $50 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{año}$ , sin embargo hay estudios realizados con criterios mayores, de hasta  $150 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{año}$ , en los cuales el sistema ha funcionado correctamente.

En cuanto a las características y dimensiones de la sección, tanto las paredes como la base del humedal deben ir recubiertas con un material impermeable para evitar el posible vertido. Para la solución propuesta se plantea la impermeabilización con un geotextil (Gramaje de  $150 \text{ gr/m}^2$ ), sobre el que ira colocada una lámina EPDM (1,5mm de espesor) que será cubierta por otro geotextil para evitar los posibles pinchazos por las gravas que se colocaran en la parte superior.

Se sugiere una pendiente de un 3% para facilitar la salida del agua por los drenes. En cada celda se aconseja la colocación de dos drenes paralelos en los extremos, en el sentido del flujo, que desagüen en un dren perpendicular que cubrirá todo el ancho de la celda en la parte más baja. En los drenes laterales se propone la colocación de dos chimeneas verticales de ventilación. Para controlar la salida se colocará una válvula en cada una de las celdas.

Para el relleno del humedal se propone la colocación de una capa inicial de gravas gruesas (3-5cm) de unos 15-20cm sobre la que descansara la capa soporte que estará compuesta por gravas finas (2-10mm) con un espesor de 20-30cm. Sobre esta capa se colocara una cama de arenas (0,5-1mm) con un espesor de 10-15 cm sobre la que se plantará la vegetación. Sobre esta última capa se irán colocando las capas del fango de 40cm hasta un máximo de 1 m de espesor.

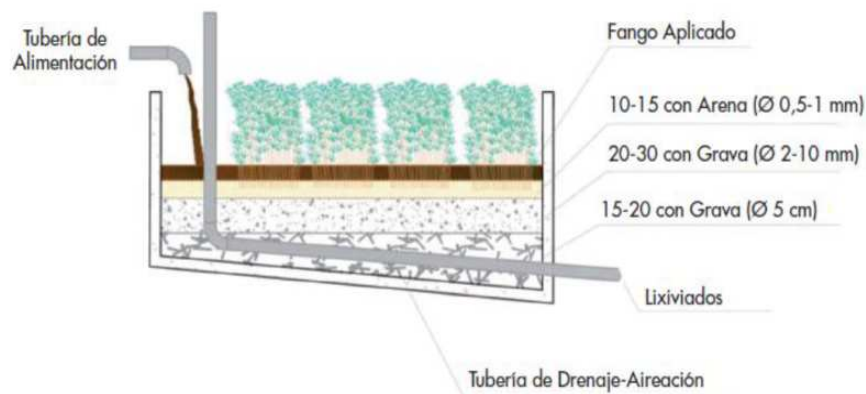


Ilustración 42. Sección de las celdas del humedal para la deshidratación de fangos. (Fuente: CENTA et al., 2014)

En el caso del humedal de Carrícola se propone la utilización de carrizo como planta para deshidratar el fango con el objetivo de crear más continuidad con el sistema de humedales para la depuración y debido a que esta especie está disponible en las zonas cercanas. Se propone una densidad de plantación de 3 ejemplares por metro cuadrado.

### PUESTA EN MARCHA, GESTIÓN Y MANTENIMIENTO

Para la puesta en marcha del sistema es recomendable iniciar con la plantación en primavera, a partir de los meses de marzo y abril. La primera aplicación del fango debe realizarse tras un periodo de 1-2 meses para permitir un crecimiento e implantación adecuada de la vegetación en los humedales.

Cuando se lleve a cabo la aplicación del fango hay que tener en cuenta que no se debe en ningún caso cubrir por completo la vegetación.

El funcionamiento de los humedales se realiza de forma cíclica. La frecuencia de alimentación puede variar mucho de unos casos a otros siendo la óptima igual al periodo de máxima pérdida de agua. Tras la aplicación del fango es necesario dejar un periodo de reposo antes de la siguiente aplicación. Se recomienda que estos periodos de reposo sean cortos en las primeras etapas de funcionamiento, ya que la rápida formación de la costra de fangos puede producir daños a la vegetación del lecho.

En el caso de Carrícola, se propone realizar la carga en un día (vaciando un cuarto de los lodos almacenados durante un año en los tanques Imhoff) dejando un período de descanso de 3 meses. En ese momento se volverá a extraer otro cuarto de los fangos acumulados y se volverá a cargar los humedales.

La altura de la capa de lodos se va incrementando hasta una cota máxima de 1 m en el caso de Carrícola, momento en el que se para la alimentación y el humedal se deja en una etapa final de reposo (de 1-2 meses a un año).

La capa de fango seco se retira junto con la vegetación del humedal y una pequeña capa del lecho filtrante de arenas. (Pueden utilizarse medios mecánicos para llevar a cabo esta operación) Es interesante evitar la retirada de la capa más profunda en la que se encuentran

los rizomas de la vegetación para permitir que vuelva a rebrotar sin necesidad de llevar a cabo una nueva plantación.

La vida útil de los humedales para la deshidratación y secado del fango se encuentra en torno a los 10 años.

La reducción de volumen depende de la concentración inicial del fango, las condiciones climáticas y el espesor de la capa. En la zona de Carrícola, con un espesor de capa de 40 cm se estima que, tras un periodo de 30 días de reposo, el porcentaje de agua en el fango se estabiliza en un 55%. (Uggetti, E. et al., 2012; citado en Illera Gómez, I., 2012)

La materia seca del producto final se ve reducida en torno al 20-40%. Con una reducción de volátiles en un rango de 25-30%, siendo el porcentaje de volátiles en el residuo final del 40-50%. (CENTA, 2014)

Con las características actuales del agua residual no es esperable que los fangos incumplan el Real Decreto 1310/1990 sobre la utilización de lodos de depuración en el sector agrario. No obstante, dado el que la agricultura predominante del municipio está basada en cultivos ecológicos, se deberá un seguimiento adecuado de este aspecto.

## CAPITULO 5. CONCLUSIONES

En la lectura completa del documento se puede apreciar cómo de la realización de este estudio se pueden resaltar unas ideas principales en relación con los servicios ecosistémicos prestados por el humedal artificial de Carrícola. Y en concreto con el servicio de mejora en la calidad del agua. Estas ideas principales se recogen a continuación:

- **Los procesos de depuración de las aguas en los humedales artificiales están estrechamente relacionados con la evolución del ecosistema.** Es por ello que en el humedal de Carrícola, hasta julio de 2014, cuando tuvo lugar el establecimiento completo de la vegetación y se empezó a observar la maduración del ecosistema, los procesos de depuración no alcanzan los rendimientos óptimos. A partir de este momento **se crea el hábitat propicio para los microorganismos** naturalmente presentes en estos ecosistemas que están vinculados a los distintos **servicios ecosistémicos** que los humedales prestan.
- **Desde julio de 2014,** acorde con la maduración del ecosistema, se observa una **estabilización en la tendencia de los rendimientos de eliminación de los principales parámetros de carga orgánica (DQO, DBO y SS).** Obteniéndose siempre ratios de eliminación mayores al 90%, y cumpliendo los requisitos de vertidos establecidos por la CHJ.
- Con respecto a los parámetros del **nitrógeno** se observa como las **condiciones adecuadas para la presencia de bacterias nitrificantes y desnitrificantes no están todavía presentes** en los humedales artificiales.
- De la observación de la vegetación se puede sacar como conclusión **la mejor adaptación del carrizo a los sustratos de gravas finas,** observándose una densidad de tallos mayor en la zona con gravas de diámetros de 1cm.
- Dada la naturaleza de estos sistemas hemos visto cómo **la intrusión de plagas puede ser frecuente.** De este tipo de intrusiones se puede destacar la **alta resiliencia de las funciones ecosistémicas que mejoran la calidad del agua** a este tipo de cambios. Como hemos podido observar durante las plagas de pulgón sufridas por el humedal,



aun gestionando la situación un mes más tarde de la aparición de la plaga, la calidad del agua no se ha visto afectada.

- Sobre el diseño constructivo se puede destacar cómo **las caídas del agua son un buen sistema para evitar la eliminación del oxígeno** que daría lugar a procesos de degradación de la materia orgánica anaeróbios, más lentos. Aunque la no eliminación del oxígeno puede influir también en los procesos de remoción del nitrógeno pues para que se lleve a cabo la desnitrificación es necesario encontrarse en condiciones de anoxia.
- Otro de los puntos interesantes que se deben resaltar del estudio del primer año de funcionamiento del sistema es la **importancia de la concienciación de la población en la depuración de aguas residuales**. Tras unas campañas de sensibilización sobre los materiales a arrojar a través de las aguas negras se mejoró mucho la operación del sistema pues disminuyó la cantidad de toallitas y otros elementos no degradables que obturaban el sistema.
- Tras el estudio de la situación actual se ha **propuesto realizar un humedal artificial para la deshidratación de los fangos** generados en los tanques Imhoff con el objetivo de **reducir los costes de mantenimiento y cerrar el ciclo de la materia orgánica** en la EDAR del propio municipio.
- Como conclusión final cabe destacar que **la puesta en marcha de este sistema** no conlleva únicamente una mejora en la calidad de las aguas pues **desarrolla muchas otras funciones que son esenciales para el disfrute de la vida humana** como pueden ser la mejora del entorno, de la fauna silvestre y la biodiversidad.

## BIBLIOGRAFÍA

**Balvanera, P. y Cotler, H. (2007).** *Acercamientos al estudio de los servicios ecosistémicos.* Gaceta Ecológica N.E. 84-85

**Blasco, E. (2011).** Ejercicio final de carrera de C.C.A.A. *Diseño de un sistema de humedales artificiales para el tratamiento secundario de las aguas residuales de la población de Carrícola (Valencia).*UPV

**Bohigues Pérez, V. (2012).** *Proyecto de construcción de un sistema de depuración de aguas residuales mediante filtros verdes. Término municipal de Carrícola (Valencia).* Ajuntament de Carrícola.

**Curt Fernández, M.D. (2004).** "Fitodepuración en humedales. Conceptos generales" en Fernández González, J., eds. *Manual de fitodepuración. Filtros de macrófitas en flotación.* pp. 61-77

**Evaluación de los Ecosistemas del Milenio. (2003).** *Ecosistemas y Bienestar Humano: Marco para la Evaluación.* World Resources Institute, Washington, DC.

**Evaluación de los Ecosistemas del Milenio. (2005).** *Los Ecosistemas y el Bienestar Humano: Humedales y Agua. Informe de Síntesis.* World Resources Institute, Washington, DC.

**García Serrano, J. y Corzo Hernández, A. (2008).** *Depuración con Humedales Construidos. Guía Práctica de Diseño, Construcción y Explotación de Sistemas de Humedales de Flujo Subsuperficial.* DIHMA-UPC.

**Hernández Muñoz, A. (1998).** *Depuración de aguas residuales.* Colegio de Ingenieros de Caminos Canales y Puertos.

**Illera Gómez, I. (2012).** Ejercicio final de carrera de ITOP. *Diseño de un humedal artificial de flujo subsuperficial para la deshidratación de fangos de la EDAR de Carrícola (Valencia).*UPV

**Kandus, P., N. Morandeira y F. Schivo, Eds. (2010).** *Bienes y Servicios Ecosistémicos de los Humedales del Delta del Paraná.* Fundación Humedales / Wetlands International. Buenos Aires, Argentina.

**Quétier, F. et al. (2007).** *Servicios ecosistémicos y actores sociales. Aspectos conceptuales y metodológicos para un estudio interdisciplinario.* Gaceta Ecológica N.E. 84-85

**Romero-Aguilar, M. et al. (2009).** *Tratamiento de aguas residuales por un sistema piloto de humedales artificiales: Evaluación de la remoción de la carga orgánica.* Rev. Int. Contam. Ambient. 25 (3) 157-167

**Salas Rodríguez, J.J., Pidre Bocado, J.R. y Cuenca Fernández, I. (2007).** *Manual de tecnologías no convencionales para la depuración de aguas residuales.* CENTA-Instituto del Agua de Andalucía.

**Vymazal, J. (2011).** *Enhancing ecosystem services on the landscape with created, constructed and restored wetlands.* Ecol. Eng.37, 1-5

Curso: Tratamiento de aguas residuales en pequeñas aglomeraciones mediante tecnologías extensivas: teoría, investigaciones, soluciones y casos de éxito. (2014, Valencia) *Gestión de lodos en pequeñas poblaciones.* CENTA, aguasresiduales.info y EPSAR.

Autora del TFG: Blanca de la Cruz Vicente

*Valencia, junio 2015*