

CONAMA 2020

CONGRESO NACIONAL DEL MEDIO AMBIENTE

**Sistema biológico avanzado
para tratamiento de aguas
residuales de la industria
ganadera, agroalimentaria y
pequeños núcleos urbanos**



Autor Principal: Celia Cano Shaw (Instituto Madrileño de Investigación y Desarrollo Rural, Agrario y Alimentario-IMIDRA)

Otros autores: Pedro Vicente Mauri Ablanque (Instituto Madrileño de Investigación y Desarrollo Rural, Agrario y Alimentario-IMIDRA); Fernando Suárez Mejido (SIDEMA CONSULTORES); José Plaza Ramos (Investigador autónomo).

ÍNDICE

1. Título
2. Resumen
3. Antecedentes
4. Desarrollo del proyecto
 - 4.1. Construcción de los canales de helófitas
 - 4.2. Plantación del filtro de helófitas
 - 4.3. Rotobioreactor de contenedores
5. Metodología. Resultados preliminares
 - 5.1. Índice NDVI. Medición con GreenSeeker
 - 5.2. Índice de Clorofila: medición con Spad
 - 5.3. Medidas de temperatura del dosel: Pistola infrarroja
 - 5.4. Otras Medidas de vegetación: longitud de hojas y raíces
 - 5.5. Medidas de oxígeno disuelto: sonda óptica digital
 - 5.6. Ensayos preliminares con RBRC
6. Conclusiones
7. Financiación
8. Bibliografía

1.- TÍTULO

El título del proyecto es: “Sistema biológico avanzado para el tratamiento de aguas residuales de la industria ganadera, agroalimentaria y pequeños núcleos urbanos”.

Título abreviado: Residuos Agroalimentarios

2.- RESUMEN

El presente proyecto se está desarrollando en el Instituto Madrileño de Investigación y Desarrollo Rural, Agrario y Alimentario (IMIDRA) de la Consejería de Medio Ambiente, Ordenación del Territorio y Sostenibilidad de la Comunidad de Madrid.

Este proyecto se ha redactado en el marco de las Ayudas al establecimiento de los Grupos Operativos dentro de la Medida 16 (Cooperación) del Programa de Desarrollo Rural de la Comunidad de Madrid 2014-2020, cofinanciadas por el Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación (MAPA), el Fondo Europeo Agrícola de Desarrollo Rural (FEADER) y el IMIDRA.

El Grupo Operativo RESIDUOS AGROALIMENTARIOS surgió ante la necesidad de gestión de residuos y efluentes de industrias agroalimentarias y ganaderas y está formado por tres miembros: “Vinos y Aceites Laguna, S.L.” que es una empresa familiar del sector agroalimentario ubicada en Villacanejos y dispone de instalaciones para la elaboración de vinos y de aceites. “ISBAL Servicios y Proyectos, S.L.”, que es una empresa domiciliada en Pozuelo de Alarcón, con experiencia en el planteamiento y ejecución de proyectos innovadores en el sector agroalimentario; y el propio IMIDRA a través del Departamento de Investigación Agroambiental con una amplísima experiencia en el planteamiento y desarrollo de experiencias con fines de investigación.

El proyecto pretende desarrollar un sistema piloto para depurar aguas residuales procedentes de la industria agroalimentaria y núcleos urbanos rurales de hasta 2000 habitantes equivalentes, basado en tecnologías de fitodepuración mediante humedales con macrófitas en flotación en combinación con rotobiocontenedores (RBCs) [1]. La planta helófitas utilizada en los canales, es la *Typha domingensis* Pers., poniéndose entre 11/12 plantas por cada soporte de espuma de polietileno reciclado. El uso de los RBCs tiene como objetivo la oxidación previa y más enérgica de la materia orgánica de forma aeróbica como tratamiento previo a la fitodepuración, y gracias a estos rotobiocontenedores, las industrias agroalimentarias y ganaderas (como bodegas, almazaras, destilerías...) podrán hacer frente a los picos de producción de residuos, reduciendo las altas cargas orgánicas provenientes de estas industrias. Los RBC requieren poco espacio para su instalación, además de sus bajos requerimientos energéticos.

Con todo ello se pretende dar una solución al tratamiento de estas aguas residuales, con el menor impacto medioambiental y con los menores costes económicos y energéticos, para que sean asumibles por pequeñas agroindustrias. Los beneficios del sistema consisten en lograr con muy bajo coste y apenas mantenimiento, valores de depuración adecuados, para su vertido a la red de saneamiento, a los ríos, embalses u otros elementos del Dominio Público Hidráulico, respetando los parámetros establecidos en la legislación, como SS, DQO, DBO5.... siendo un aspecto muy importante el que no genera lodos, ni problemas de malos olores o

mosquitos, su impacto visual es mínimo integrándose perfectamente en el paisaje y fomentando la biodiversidad. Además, la parte aérea de la planta puede servir como compost, alimento para el ganado o con fines energéticos, habiéndose registrado en el caso de la *Typha spp.* Hasta 2,23 kg de biomasa por metro cuadrado y año en materia seca. Asimismo, los rizomas de la planta almacenan 1 kg/m² y año de azúcares y almidón que serían una buena opción para producción de etanol [1].

En la planta piloto, ubicada en la Finca de El Encín del IMIDRA (Alcalá de Henares. Madrid), se está llevando a cabo el seguimiento de la especie elegida (*Typha domingensis*) con mediciones de distintos parámetros e índices de vegetación (NDVI, Clorofila, estado hídrico...) así como de la evolución de la calidad del agua ante los distintos tipos de vertido midiendo niveles de pH, CE, OD, SS, DQO, DBO, Nt, Pt...con el objetivo final de dimensionar la planta ajustándola a las necesidades de cada agroindustria.

3.- ANTECEDENTES

Las aguas residuales, contienen microorganismos capaces de causar graves enfermedades en el ser humano, además de elementos como nitrógeno y fósforo, que afectan seriamente a ríos y embalses provocando su eutrofización, lo que causa problemas en muchos ámbitos naturales y humanos, e incrementa el coste de potabilización del agua para consumo humano. Dichas aguas deben, por tanto, ser tratadas.

Existen diversos métodos para tratar aguas residuales urbanas o derivadas de procesos industriales (queserías, bodegas, etc), desde complejas y costosas instalaciones de depuración (EDAR), hasta lagunajes, filtros percoladores, biodiscos, etc. presentando cada uno ciertas ventajas e inconvenientes. En todos ellos el agua alcanza los requisitos necesarios, para su vertido a las aguas continentales.

La fitodepuración consiste en aprovechar la función natural de la vegetación propia de las riberas de los ríos, para depurar las aguas contaminadas (tanto agua urbana residual como aguas procedentes de procesos industriales). Esto se realiza mediante la construcción de balsas, a las que se les añade vegetación de ribera, simulando un ecosistema natural.

Cuando se valora qué tecnología aplicar en las pequeñas poblaciones para tratar sus aguas residuales, es fundamental que la tecnología ofrezca facilidad y bajo coste de operación y mantenimiento [2]. La razón es evidente, las pequeñas poblaciones no suelen tener medios técnicos suficientes para depurar sus aguas y su externalización conlleva un coste muy elevado pues muchas veces son poblaciones distantes de núcleos importantes donde se pueden tener estos medios.

Otro aspecto muy importante a tener en cuenta en las pequeñas poblaciones es la integración paisajística, ya que suelen estar enclavadas en entornos naturales, a veces protegidos.

Finalmente, las pequeñas poblaciones suelen tener gran variación de población estacional, ya que muchas de ellas tienen poblaciones muy importantes en verano.

Por otro lado, las pequeñas industrias agroalimentarias suelen ser un problema grave en pequeñas y medianas poblaciones, ya que aumentan la carga a depurar y suelen alterar el

funcionamiento de las depuradoras urbanas cuando se vierten sus aguas sin depurar o con una depuración deficiente.

El presente proyecto, ha tenido en cuenta todos estos aspectos a la hora de estudiar las distintas opciones de planta piloto que se deberían tener en cuenta para el desarrollo del proyecto, integrando tecnologías que se adapten a todos los anteriores aspectos.

Las tecnologías extensivas, especialmente los **humedales artificiales** dan una buena respuesta al coste y sencillez de mantenimiento, así como a la integración paisajística [2], sin embargo, no dan una respuesta muy favorable a la variación estacional de la población ni a la necesidad de depurar altas cargas orgánicas provenientes de la industria agroalimentaria.

Ha sido, por tanto, fundamental el buscar tecnologías complementarias a los humedales artificiales de macrófitas que pudieran dar respuesta a la estacionalidad y a la alta carga y que fueran tecnologías con carácter innovador, de manera que el proyecto mantuviera su perfil de utilizar tecnologías innovadoras y avanzadas.

Para solucionar estos problemas se ha instalado un equipo experimental diseñado por el Grupo de Agroenergética de la Universidad Politécnica de Madrid, consistente en un módulo construido en acero inoxidable que aloja un biocontenedor de forma circular y 25 cm de ancho, relleno de soportes de alta relación superficie/volumen, con objeto de que alojen biofilm suficiente para realizar la depuración de fluidos de alta carga orgánica en tiempos reducidos.

4.- DESARROLLO DEL PROYECTO

Una vez planteado el objetivo del proyecto y la caracterización de los vertidos (convencionales y puntuales), se hizo un estudio para elegir la tecnología más adecuada para las dos situaciones planteadas:

- Tecnología para cargas normales: elección de canales de macrófitas en flotación.
- Tecnología para altas cargas estacionales: inicialmente se pensó en tecnologías de biodiscos pero teniendo conocimiento de otros sistemas más evolucionados se optó por los rotobiorreactores de contenedor (RBRC).

Elegida la tecnología más innovadora a aplicar a nuestro proyecto, que permitiera tanto el tratamiento de aguas residuales urbanas en pequeñas poblaciones, como el de aguas con alta carga orgánica procedente de la industria agroalimentaria, comenzaron los trabajos de construcción diseñados por "SIDEMA Consultores" de una planta piloto en la Finca de El Encín (Alcalá de Henares). Se trata de una finca del IMIDRA (Instituto madrileño de Investigación y Desarrollo Rural, Agrario y Alimentario de la Consejería de Medio Ambiente, Ordenación del Territorio y Sostenibilidad) de la Comunidad de Madrid.

4.1.- Construcción de los canales de helófitas:

El 10 de diciembre de 2019 se inicia la construcción de los canales. Se trata de tres canales paralelos de hormigón armado con unas dimensiones exteriores de 4 metros de ancho por 10

de largo y 1 metro de profundidad. Eliminando los bordes, estas dimensiones pasan a ser de 3,6 m x 9,6 m= 34,5m² cada balsa o canal, que en total suman 103,68 m². Estos canales tienen un diseño de flujo en zig-zag, que obliga al agua a recorrer por completo las tres balsas por gravedad, aprovechando la pendiente del terreno.

A finales de diciembre de 2019 se acabó el encofrado de los muros laterales y la solera, y en enero de 2020 la instalación quedó lista para iniciar el llenado de los canales.



Figura 1. Encofrado de los muros de los canales

4.2.- Plantación del filtro de helófitas:

La plantación de los filtros de helófitas en flotación o filtros flotantes de helófitas (FFH) tiene una ventana límite en el tiempo que es la primavera, y estaba previsto realizarla durante el mes de abril, pero debido a las circunstancias excepcionales que se han producido el presente año con motivo del estado de alarma debido a la Covid-19, se retrasó el momento de la plantación hasta los primeros días del verano, es decir, cinco o seis días posteriores al límite máximo inicialmente fijado.

Finalmente, la plantación se llevó a cabo el 25 de junio de 2020. Para ello se utilizaron placas flotantes de características novedosas ya que proceden de espuma de polietileno de célula cerrada G-cell de medidas 1185x585 mm. Las placas van troqueladas con 82 orificios de manera que se ajusten perfectamente en ellos los plantones de las plantas. El alto volumen de orificios facilita el crecimiento y el afloramiento del potencial de multiplicación vegetativa de estos plantones.

En cada placa se pusieron 11-12 plantones, de manera que la densidad fue de 16 plantas por m².

Con objeto de valorar dos modelos distintos de placa y comprobar su comportamiento mecánico, se utilizaron en dos de los canales placas de 40 mm de grosor y en uno de los canales placas de 25 mm de grosor. La utilización de un espesor menor facilita el proceso de transporte, además de abaratar el precio del filtro.

En la implantación se colocaron 6 placas a lo ancho unidas por grapas de galvanizado que facilitaban su colocación y evitaba que se desplazaran entre ellas. De largo se colocaron seis bloques de 6 placas, cubriendo prácticamente toda la superficie de cada canal.

La especie utilizada fue *Typha domingensis*, llamada comúnmente “enea”, una especie perenne propia de nuestros ríos. Es más robusta y resiste mejor la contaminación que otras *Typhas*, pudiendo alcanzar hasta 3 m de altura. Su ciclo vegetativo es anual, la planta muere en invierno, sobreviviendo como rizoma, hasta la siguiente primavera en la que empieza a emitir hojas y tallos de nuevo.

En el momento de la plantación, las plantas presentaban, en general, un buen estado de humedad, si bien sí que se observaba que algunas de las plantas tenían un ligero stress hídrico. La planta fue suministrada en bandejas de 60 alveolos por “Viveros Forestales La Dehesa, S.L.” especializados en producción de helófitas ubicados en la provincia de Cáceres.



Figura 2. Día de la plantación y dos meses después

El 26 de agosto, exactamente 2 meses de su plantación, a pesar de que esta se realizó de manera muy tardía, el FFH ya presentaba un aspecto de total cubrimiento de la superficie, con gran nivel de ahijamiento y un desarrollo muy considerable.

4.3.- Rotobioreactor de contenedores:

Los sistemas de filtros de helófitas son adecuados para tratamiento de aguas residuales de pequeñas poblaciones, debido a su bajo coste de implantación y, especialmente, a sus reducidos costes de operación y mantenimiento.

Sin embargo, este tipo de instalaciones soportan solo baja carga orgánica debido, en parte a que el sistema de operación se desarrolla de forma pasiva, tanto porque los niveles de oxigenación que se consiguen en el entorno del sistema radicular son mucho más bajos que los que se consiguen en un sistema de aireación forzada, como porque se pueden producir efectos de fitotoxicidad con elevadas concentraciones de DBO₅ o DQO.

Por ello, para la industria agroalimentaria, con vertidos de mayor carga orgánica y, en muchas ocasiones, producciones muy estacionales, es necesario utilizar sistemas más intensivos que permitan en menos espacio y tiempo la depuración de altas cargas y arranques y paradas más elásticos. Sin embargo, dentro de la filosofía del proyecto, de perseguir unos fines más sostenibles, se aboga por sistemas de bajo consumo energético.

Por tal motivo, se justifica la utilización de modo experimental, de un módulo de RBRC (rotobioreactores de contenedor), similar a los desarrollados por la Universidad Politécnica de Madrid, para realizar mediciones y valorar la capacidad de depuración de estos residuos [3].

Por ello, se ha instalado un equipo experimental con un módulo construido en acero inoxidable que aloja un biocontenedor de forma circular y 25 cm de ancho, relleno de soportes de alta relación superficie/volumen, con objeto de que alojen biofilm suficiente para realizar la depuración de fluidos de alta carga orgánica en tiempos reducidos. El contenedor tiene un diámetro de 1,2 m, con lo que su volumen útil es de 110 litros.



Figura 3. Módulo RBRC

Dado que el relleno tiene una relación superficie/volumen de unos $400 \text{ m}^2/\text{m}^3$ y que el potencial reductor de este tipo de instalaciones es de unos $12 \text{ g DQO}/\text{m}^2$ y día, deberíamos obtener con este biocontenedor experimental de un solo cuerpo, cuando tenga todo el biofilm creado y a pleno rendimiento, unos $500 \text{ g DQO}/\text{día}$.

Es importante considerar que con un solo cuerpo esperamos que las reducciones sean algo menores, debido a que no existen efectos sumados entre los distintos contenedores que amortiguan los rendimientos de alta carga en los primeros contenedores de una serie y los de alta carga en los últimos. Por ello, se pretende actuar con distintos niveles de carga y distintos tiempos de retención con objeto de valorar el potencial de depuración en distintas circunstancias.

El RBRC estará funcionando de forma continua, accionado por un motor de $0,18 \text{ kW}$ equipado con un reductor doble que obtiene una velocidad de rotación de 4 rev./minuto (4 min^{-1}).

Durante este año, las pruebas se han comenzado a hacer con hidrolato procedente del residuo de las industrias de destilación de lavanda. De manera que es un producto limpio, transparente y, donde vamos a poder valorar fácilmente los lodos generados.

El rotobiorreactor, que tenía una ligera capa de biofilm bacteriano procedente de ensayos anteriores, se ha tenido previamente funcionando 8 días para ir creando biofilm adaptado al residuo utilizado, realizándose mediciones ya en esa primera semana.

5.- METODOLOGÍA. RESULTADOS PRELIMINARES:

Una vez “establecida” la plantación (aunque se considera que el desarrollo no es completo hasta el segundo año), se comenzaron a tomar datos semanalmente desde el mes de septiembre de 2020 en la Planta Piloto. La toma de datos se centra en:

- Desarrollo vegetativo de la planta, utilizando para ello conocidos índices de vegetación como NDVI, de clorofila y la pistola infrarroja. Así como longitud de hojas y raíces.
- Oxígeno disuelto a distintas profundidades (OD)
- Pruebas con el RBRC

5.1.- Índice NDVI. Medición con GreenSeeker

El GreenSeeker es un instrumento que nos permite medir el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI). Se trata de un índice muy utilizado para estimar la cantidad, calidad y el desarrollo de la biomasa vegetal [4] y [5].

Las mediciones se han realizado con un instrumento portátil “TrimbleGreenSeeker”, que consiste en un sensor de cultivos, de medición muy eficaz y fácil de usar. Su funcionamiento depende del sensor que produce breves emisiones de luz roja e infrarroja y que a continuación mide la cantidad de cada uno de estos tipos de luz que se refleja en las plantas.



Figura 4. GreenSeeker

El valor del Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) que aparece en la pantalla LCD del instrumento varía entre 0,00 y 0,99. La intensidad de la luz detectada constituye un indicador directo de la salud del cultivo, la planta estará más sana cuando mayor sea el valor de la lectura NDVI.

Los valores obtenidos entre septiembre y octubre de 2020 han variado entre 0,61 y 0,75, generalmente cercanos a 0,70, lo que indica que la planta se encuentra en muy buenas condiciones y con un buen desarrollo. En las últimas mediciones de finales de octubre, se observa que empiezan a descender debido a las bajas temperaturas y al menor número de horas de sol. En esas fechas apreciamos que la planta empieza a amarillear con la llegada del otoño.

En el **Cuadro 1** se recogen los datos medios del índice NDVI en las tres balsas con sus desviaciones típicas y la separación de grupos. La significación de 3 estrellas nos indica la gran diferencia entre balsas. La Balsa 1 tiene un índice mayor que las otras dos y esto puede ser debido a que es la primera que recepciona el agua residual cargada de nutrientes y materia orgánica. Según va pasando el flujo de agua por la balsa 2 y posteriormente a la balsa 3 se observan valores decrecientes, posiblemente por tener menores cargas.

5.2.- Índice de Clorofila: medición con Spad

El medidor de clorofila SPAD de Minolta es un instrumento que mide la cantidad de clorofila (un factor importante para la comprensión de la situación nutricional de una planta) en una hoja, y muestra los resultados. Las medidas se toman in situ sin necesidad de cortar muestras de hojas y se consigue simplemente proyectando luz a través de una hoja.

Para hacer las mediciones se han marcado seis plantas en cada una de las tres balsas (se hacen 3 medidas por planta), que se realizan con sólo insertar la hoja que se quiere medir en las pinzas o cabeza de medición y presionando para cerrarla. Las medidas se pueden tomar sin dañarlas hojas, lo que permite que la misma hoja sea medida varias veces a medida que continúa creciendo y desarrollándose.



Figura 5: Spad de MINOLTA. Medición de hoja de Typha

El método de medida utilizado por el Spad se basa en la diferencia de densidad óptica de 2 longitudes de onda. El valor de clorofila obtenido está estrechamente relacionado con la

cantidad de nitrógeno presente en la hoja. De esta manera se puede comprobar el estado nutricional de la planta.

Los resultados obtenidos durante el periodo de medidas (desde primeros de septiembre hasta el 21 de octubre de 2020) están en torno a valores de índice de clorofila de 50, lo que nos da idea del buen estado de la planta y del aporte nutricional adecuado. Valores inferiores a 35 indicarían que es necesario aportar nitrógeno a la planta.

A continuación, se expresan los resultados obtenidos en los dos índices de vegetación elegidos (NDVI y clorofila), una vez procesados los datos de las mediciones:

Cuadro 1. Efecto de flujo del agua residual en NDVI (índice de vegetación de diferencia normalizada) y la clorofila medida con SPAD. La ANOVA con los niveles de significancia (***) $p < 0,001$). Los valores medios, la desviación típica y la separación de grupos se reflejan en la tabla.

	Balsa 1	Balsa 2	Balsa 3	Anova significación
NDVI	0,71 ^b ± 0,02	0,70 ^{ab} ± 0,03	0,67 ^a ± 0,05	0,001***
SPAD	50,02 ^b ± 3,30	50,18 ^b ± 3,29	46,09 ^a ± 5,60	0,001***

Los dos índices nos están dando unos resultados muy coherentes, en los que tanto NDVI como clorofila son más bajos en la tercera balsa, en la que previsiblemente sale el agua con menos nutrientes, y los valores más altos se dan en la primera y segunda balsa. La significación de 3 estrellas (***) $p < 0,001$, muy alta, indica estas diferencias entre balsas. Todo ello da idea de la fiabilidad de los dos instrumentos de medida.

Las medidas se tomaron semanalmente desde el 2 de septiembre y hasta el 21 de octubre, y en términos generales los que podemos concluir lo siguiente:

- Los valores del índice de clorofila son cercanos al 50 siendo inferiores en la tercera balsa.
- La balsa 2 es la que tiene unos mayores índices de clorofila. Estos valores son apoyados con la observación visual, que indiscutiblemente se aprecia un mejor desarrollo vegetativo.
- La balsa 3 es la que tiene unos índices menores en todos los muestreos. Ello puede ser debido a que la planta de las balsas 1 y 2 ha ido consumiendo los nutrientes contenidos en el agua residual que entra en la balsa 1. Además, los valores DQO y DBO5 en la salida de las balsas (que se corresponde con la balsa 3) son muy inferiores a los valores de entrada.
- Los valores de clorofila crecen hasta finales de septiembre, donde se observa que empiezan a decaer y van bajando considerablemente cada semana.

5.3.- Medidas de temperatura del dosel: Pistola infrarroja

Este termómetro nos permite medir la temperatura del dosel y relacionarla con la temperatura del aire para ver el estado hídrico de las plantas. El instrumento usado en nuestros ensayos es el termómetro infrarrojo FLUKE 561.



Figura 6. Pistola infrarroja

Este instrumento nos sirve para tomar mediciones sin contacto con el cultivo, y nos permite saber la temperatura de la superficie midiendo la cantidad de energía infrarroja emitida por las plantas. Para evaluar el estado hídrico de las parcelas se ha comparado la temperatura obtenida de las plantas con la temperatura del aire.

Los resultados nos permiten comprobar que nuestras plantas tienen un estado hídrico adecuado y no están estresadas. Por lo general, las medidas que se han tomado desde septiembre nos permiten comprobar que la temperatura de la planta es ligeramente inferior a la temperatura ambiente, estando aproximadamente dos grados por debajo.

5.4.- Otras Medidas de vegetación: longitud de hojas y raíces

A pesar de que la plantación se realizó más tarde de lo programado (el 25 de junio de 2020), debido a problemas del Covid-19, la planta se desarrolló perfectamente y no hubo que reponer marras. En el primer mes ya se apreciaba un vigoroso crecimiento y ahijamiento de la planta, viéndose que en el segundo mes la planta superaba el metro de altura. (ver Figura 2).

La *Typha domingensis* no consigue su desarrollo total hasta el segundo año que fructifica y su sistema radicular está formado completamente. No obstante, con el inicio de los muestreos el 2 de septiembre (solamente dos meses y una semana después de la plantación) se decidió tomar datos de longitud de hojas y raíces.

Para el mantenimiento del FFH, es necesario segar la *Typha* una o dos veces al año. Ello implica cortar la parte aérea de la planta y retirarla de los canales para evitar que se pudra y provoque más contaminación. Dependiendo de dónde se ubique, esta operación se suele realizar en

nuestra zona en el mes de julio el primer corte y a finales de septiembre el segundo, hasta que en primavera vuelve a brotar la planta [6].

Los resultados obtenidos se resumen en lo siguiente:

- La longitud de hoja en la primera balsa es inferior a las otras dos. Las medias rondan los 1,5 m siendo el máximo de 1,9 m de altura en esta primera balsa y la longitud de raíces es de media 26 cm.
- En la segunda balsa se observa un mayor desarrollo tanto de la parte aérea como de la radicular. La altura media de la planta está en 1,74 m alcanzando alturas máximas de 2,5 m. Las raíces tienen una longitud aproximada cercana a los 30 cm de media, habiéndose encontrado algunas que alcanzan los 45 cm.
- En la tercera balsa la longitud media de las hojas esta en 1,68 m, alcanzándose máximos de 2,3 m. Las raíces rondan longitudes similares a la balsa 2 y están en torno a los 30 cm de media, alcanzando en algunos casos los 40 cm.



Figura 7. Vista general de las raíces.



Figura 8. Medición de las raíces

5.5.- Medidas de oxígeno disuelto: sonda óptica digital

Como hemos apuntado anteriormente, entendíamos que la tardía plantación no nos iba a permitir tener medidas en el presente año de los parámetros de funcionamiento del FFH.

No obstante, el rápido crecimiento del filtro, a pesar de que el desarrollo radicular todavía era débil, nos ha permitido un primer control indirecto del potencial de depuración del filtro.

El parámetro elegido para ello fue el control del oxígeno disuelto a distintas profundidades que nos da el nivel de oxigenación del agua y, por tanto, el potencial de desarrollo de organismos bacterianos aerobios que son los responsables de la depuración en este tipo de instalaciones.

Es importante reseñar aquí, que los FFH forman parte de los denominados sistemas extensivos de depuración, es decir sistemas que presentan la ventaja de no utilizar energía ni mecanismos artificiales de oxigenación pero que presentan la desventaja de que los niveles de oxigenación son inferiores, con lo cual la superficie necesaria y los tiempos de retención son mayores. En concreto, para una instalación de este tipo se precisan unos 3 m² por habitante equivalente. Es decir, cada metro cuadrado, potencialmente elimina 20 g de DBO₅ al día y, aproximadamente, el doble de DQO en un agua standard.

La planta utilizada (*Typha domingensis*) pertenece a las plantas denominadas “anfibia”, en las que la oxigenación que les permite subsistir dentro del agua proviene del aerénquima, que es un tejido hueco que permite transferir el oxígeno hacia la zona radicular, lo cual resulta imprescindible para que la eliminación de contaminantes se realice con eficacia estimulando además la degradación de materia orgánica y el crecimiento de bacterias nitrificantes.

El sistema radicular forma un complejo entramado que va es el que permite absorber los nutrientes, nitrógeno y fósforo. En nuestro caso, habrá que esperar al próximo año para que el sistema radicular se desarrolle completamente.

La rizosfera creada en torno a *Thypha spp.* ha sido estudiada en la búsqueda de bacterias útiles en la degradación de aguas residuales. Así Salgado-Bernal Irina, y col. de 58 cepas de bacterias aisladas de *Thypha domingensis Pers.* 21 mostraron respuestas satisfactorias en el tratamiento de efluentes y 13 de las 21 respondieron a niveles de DQO complejos en sólo 72 horas [7].



Figura 9. Vista del aerénquima [8]

Ya hemos comentado que los canales tienen una profundidad de un metro que da, aproximadamente 80 cm útiles. Esto permite que las plantas desarrollen sus raíces en la zona alta, en los 10-20 cm iniciales, aspecto facilitado por la gran cantidad de orificios que se han dejado en el troquel que facilitan mucho el crecimiento en superficie de las plantas.

De esta manera, los canales desarrollan un gradiente de anaerobiosis en profundidad, de manera que la parte más superficial es ligeramente aerobia, mientras el fondo está en situación anaerobia, lo que permite a los cuerpos bacterianos o lodos de depuración caer al fondo y degradarse en condiciones anaeróbicas.

Entendemos que unas condiciones adecuadas para este tipo de instalaciones sería alcanzar niveles de oxígeno disuelto en el entorno radicular cercanos a 1 mg/l. Sin embargo, se debe apreciar un descenso apreciable en profundidad que permita la creación de zonas anaeróbicas.

Typha domingensis Pers., ha mostrado su potencial adaptativo a condiciones de alta carga contaminante y bajos niveles de oxígeno (bajo potencial redox). Y ha desplazado a otras especies cuando las condiciones del medio se han hecho meso o eutróficas, por altos niveles de nitrógeno o fósforo. Así ha sucedido en los Everglades de Estados Unidos, donde ha desplazado a la especie natural oligotrófica *Cladium jamaicense Crantz.*, pasando de las 442 ha en 1991 a 1979 ha en 2003. Las causas de ésta “invasión” se han debido al aumento del fósforo en las aguas, y a la capacidad de *Typha domingensis* de inyectar aire en sus raíces (flujo convectivo) y sobrevivir en medios muy reductores. [9].

Los valores de oxígeno disuelto se han tomado con una sonda óptica digital de Hanna modelo Opdo HI 98198, oxímetro óptico, como se aprecia en la imagen:



Figura 10. Sonda óptica digital OD

A continuación, expresamos las medidas realizadas durante el mes de septiembre, tanto en lo que se refiere al oxígeno disuelto como al porcentaje de saturación que depende de la temperatura. Los valores de OD se han tomado a cuatro profundidades: 6 cm, 25 cm, 50 cm y 70 cm, que es el fondo de las balsas.

BALSA 1					BALSA 1				
mg O2/l				Fondo	% SATURACIÓN				Fondo
cm	6	25	50	70	cm	6	25	50	70
02-sep	0,70	0,54	0,45	0,36	02-sep	No hay datos			
02-sep	0,48	0,34	0,30	0,28	02-sep	No hay datos			
09-sep	1,36	1,30	1,31	1,37	09-sep	18,50	15,40	15,40	15,90
09-sep	1,19	1,10	1,26	1,28	09-sep	13,10	13,70	14,60	15,00
16-sep	1,00	0,50	0,60	0,46	16-sep	12,30	7,00	7,20	5,70
16-sep	0,54	0,43	0,39	0,35	16-sep	5,00	5,30	5,00	4,30
23-sep	0,22	0,18	0,21	0,15	23-sep	2,60	2,30	2,50	1,90
23-sep	0,50	0,22	0,19	0,16	23-sep	5,80	2,60	2,20	1,90
30-sep	0,54	0,46	0,41	0,38	30-sep	6,70	5,20	4,70	4,4
30-sep	0,59	0,35	0,31	0,26	30-sep	6,30	4,20	3,50	3,1
Medias	0,71	0,54	0,54	0,51	Medias	8,79	6,96	6,89	6,53
Var. Profund.		-24%	0%	-7%	Var. Profund.		-21%	-1%	-5%
Var. B1-B2	29%	43%	52%	48%	Var. B1-B2	44%	48%	55%	53%
Var. B1-B3	43%	60%	66%	66%	Var. B1-B3	44%	63%	70%	70%

BALSA 2					BALSA 2				
mg O2/l				Fondo	% SATURACIÓN				Fondo
cm	6	25	50	70	cm	6	25	50	70
02-sep	0,40	0,30	0,28	0,30	02-sep	No hay datos			
02-sep	0,56	0,35	0,26	0,26	02-sep	No hay datos			
09-sep	0,95	0,56	0,45	0,43	09-sep	7,60	6,70	5,40	5,20
09-sep	0,62	0,45	0,45	0,43	09-sep	7,20	5,40	5,50	5,20
16-sep	0,83	0,39	0,32	0,41	16-sep	6,70	4,80	3,90	5,00
16-sep	0,70	0,24	0,20	0,24	16-sep	6,50	2,80	2,40	2,90
23-sep	0,20	0,16	0,14	0,11	23-sep	2,40	1,90	1,70	1,30
23-sep	0,11	0,10	0,06	0,06	23-sep	1,40	1,20	0,60	0,70
30-sep	0,39	0,28	0,24	0,22	30-sep	4,40	3,10	2,90	2,50
30-sep	0,29	0,25	0,19	0,16	30-sep	3,30	2,80	2,20	1,80
Medias	0,51	0,31	0,26	0,26	Medias	4,94	3,59	3,08	3,08
Var. Profund.		-39%	-16%	1%	Var. Profund.		-27%	-14%	0%
Var. B2-B3	20%	29%	29%	35%	Var. B2-B3	0%	29%	32%	36%

BALSA 3					BALSA 3				
mg O2/l				Fondo	% SATURACIÓN				Fondo
cm	6	25	50	70	cm	6	25	50	70
02-sep	0,37	0,25	0,22	0,20	02-sep	No hay datos			
02-sep	0,33	0,24	0,22	0,23	02-sep	No hay datos			
09-sep	0,52	0,29	0,28	0,24	09-sep	6,20	3,50	3,40	3,00
09-sep	0,58	0,23	0,24	0,21	09-sep	6,70	2,80	2,70	2,60
16-sep	0,60	0,35	0,33	0,34	16-sep	7,30	4,30	4,00	4,10
16-sep	0,67	0,31	0,18	0,15	16-sep	8,10	3,80	2,20	1,90
23-sep	0,28	0,10	0,06	0,07	23-sep	3,40	1,20	0,70	0,90
23-sep	0,12	0,06	0,03	0,02	23-sep	1,30	0,80	0,40	0,30
30-sep	0,32	0,20	0,15	0,12	30-sep	3,50	2,30	1,80	1,50
30-sep	0,27	0,16	0,14	0,13	30-sep	3,00	1,80	1,60	1,50
Medias	0,41	0,22	0,19	0,17	Medias	4,938	2,563	2,100	1,975
Var. Profund.		-46%	-16%	-8%	Var. Profund.		-48%	-18%	-6%

Figura 11. Valores de Oxígeno disuelto a cuatro profundidades

De estos valores, y a falta de tener más datos para poder valorar el nivel de significación estadística de los mismos, podemos sacar a priori algunas conclusiones:

- Que existe un claro gradiente de descenso del oxígeno en profundidad, si bien este gradiente aparentemente solo es importante en la variación de los primeros centímetros. Es decir, las mediciones a 6 cm de profundidad, en la zona radicular son las que dan claramente un nivel de oxígeno más elevado, reduciéndose hasta un 40% en los primeros 25 cm.

- Que los niveles de oxígeno, no obstante, son relativamente bajos, mucho más bajos de los que se dan normalmente en los sistemas de aireación forzada, pero suficientes para que exista un claro efecto de aerobiosis que se reduce en profundidad.
- Que este gradiente, difícilmente se debe a que se produzca intercambio de oxígeno en superficie, debido a que las placas de polietileno lo impiden, con lo cual se debe a los efectos del aerénquima.
- No obstante, también se observa que los niveles de oxígeno son sustancialmente más elevados en la primera balsa, que es por donde entra el efluente a la instalación y se produce un efecto de oxigenación mecánica.
- El % de descenso del oxígeno en profundidad, es más acusado en la segunda y tercera balsas, donde el nivel de oxígeno disuelto es menor y no existe ningún efecto de aumento de oxígeno por entrada del efluente bombeado. Lo que indica que aquí se producen diferencias más significativas que son exclusivamente originadas por el aerénquima.

Todas estas conclusiones se pueden extraer a la vista del cuadro anterior, si bien insistimos que debido a los pocos datos existentes y también a que el filtro se halla todavía en fase de implantación con insuficiente desarrollo radicular, son muy preliminares y carecen todavía de rigor estadístico.

5.6. Ensayos preliminares con RBRC

En los ensayos llevados a cabo con el rotobioreactor de contenedores (RBRC) se parte del residuo procedente de las destiladoras de lavanda y lavandín de la zona de Brihuega. Se han utilizado cuatro contenedores de 1000 litros cada uno de hidrolato de lavanda que presentaba las siguientes características:

Cuadro 2. Caracterización de hidrolatos de lavanda

Contenedor	DQO(mg/l)	PH	CE(μ S/cm)
1	6598	3,73	131
2	6949	3,70	109
3	5852	4,64	112
4	7025	3,55	123

Fuente: Datos propios

El rotobiorreactor, que tenía una ligera capa de biofilm bacteriano procedente de ensayos anteriores, se ha tenido previamente funcionando 8 días para ir creando biofilm adaptado al residuo utilizado, realizándose mediciones ya en esa primera semana.

Para la primera semana, ya que se desconocía el comportamiento del hidrolato o los efectos de los polifenoles que contiene, se preparó una solución del hidrolato con una DQO de 1200 mg/l. rellenándose el contenedor con esta solución. Se hicieron tres mediciones de la DQO, la inicial, al día siguiente y a los 8 días, con los siguientes resultados:

Cuadro 3. Evolución de la DQO en RBRC

Fecha	mg/l DQO
RBRC 29/09/2020	1218
RBRC 30/09/2020	838
RBRC 06/10/2020	147

Fuente: Datos propios

Como se puede observar, el primer día ya se observó una reducción de la DQO del 31% llegando al 90% de reducción en el 8º día.

Si bien estos resultados no son valorables desde el punto de vista de si el nivel de depuración es suficiente, aparentemente todavía no lo es debido a los elevados tiempos de retención, hay que considerar que durante este período solamente se pretendía que se desarrollara el biofilm bacteriano. El hecho de que se produjera un nivel significativo de reducción de la DQO indica que se desarrolla biofilm y que los polifenoles que existen de forma importante en la solución no son inhibidores muy potentes del proceso.

Otro aspecto importante a reseñar, es que el pH de efluente era muy bajo, en torno a 3,5-4, y a pesar de ello, existe un nivel significativo de depuración.

6.- CONCLUSIONES:

Desde la formación del Grupo Operativo se ha estado trabajando para conseguir los objetivos propuestos. Por un lado, ya está construida y en funcionamiento la Planta Piloto, formada por tres canales como se ha venido explicando en capítulos anteriores.

El desarrollo vegetativo de la planta ha sido muy satisfactorio a pesar de haberse realizado *in extremis*, unos días después de lo recomendado. No obstante, la planta no conseguirá su desarrollo completo hasta el próximo año, en el que fructifica, por lo cual todos los datos obtenidos durante este breve periodo son provisionales y orientativos. La parte aérea ha alcanzado 2,5 metros de altura y el sistema radicular 40 cm.

Los índices de vegetación han verificado el buen estado de las plantas durante su desarrollo dando resultados coherentes y fiabilidad a las técnicas utilizadas.

Con objeto de valorar la calidad de la planta como alimento para el ganado, se envió una muestra de la parte aérea de *Typha domingensis* a un laboratorio asturiano especializado en nutrición animal, pastos y forrajes. Los resultados de la analítica en proteína bruta dieron un 11,05 % sms, lo que indica que resulta de calidad para alimentación ganadera.

Estudios llevados a cabo en una cuenca de agua natural, en Manitoba (Canada), mostraron cómo la *Typha spp.*, presentaba rendimientos en biomasa 4 veces superiores a los cultivos, y máximos rendimientos en biomasa, en los menores tiempos de maduración. Presenta buenas propiedades de densificación, fibra de alta calidad y alta densidad energética, por lo que también es una buena opción como biocombustible. Con valores energéticos similares a la paja de trigo seca, o pellets de

madera. Además de la retirada del ecosistema de importantes cantidades de nitrógeno y fósforo [10].

Las medidas tomadas indican que desde mediados de octubre los valores de clorofila y el NDVI comienzan a decaer, y esto es debido a la propia planta, que en invierno se seca y hace una parada vegetativa hasta la primavera siguiente que vuelve a desarrollar su parte aérea.

A pesar del breve espacio de tiempo que ha estado la planta en las balsas (desde su plantación el 25 de junio y hasta que se ha cortado el 10 de noviembre de 2020), ha conseguido su objetivo: desarrollar un potente sistema aéreo y radicular, e inyectar oxígeno en el agua. Esto último lo hemos podido verificar con las mediciones con la sonda óptica de OD, viendo además que existe un claro gradiente de descenso del oxígeno en profundidad.

Como ya se ha comentado, el próximo año completará su crecimiento la planta establecida en las balsas y se prevé que los niveles de oxígeno disuelto en el agua sean superiores a los recogidos el presente año, que han resultado inferiores a 1 mg O₂/l en los primeros 6 cm de agua.

El potencial depurador de la planta lo corrobora una publicación sobre ensayos en contenedor con *Typha domingensis Pers.*, en los que, aplicando una solución artificial de nitratos, amonio y fósforo, mostró como en tres días, los porcentajes de reducción que se alcanzaron fueron del 30-50 %, el 80 % y el 20 % respectivamente. En dicho ensayo queda patente la remoción del fósforo por *Typha spp.*, la acumulación de fósforo en los rizomas y raíces y la mayor acumulación de nitrógeno en las hojas, y en las raíces. [11]

Con respecto al RBRC, se ha estado probando con único residuo procedente de las destiladoras de aceites esenciales de lavanda de Brihuega (Guadalajara), y los resultados también han sido favorables ya que el módulo ha conseguido reducir la DQO del residuo un 31% en un solo día y un 90% en ocho días.

Durante el próximo y último año del Grupo Operativo, está previsto continuar realizando ensayos con distintos residuos procedentes de industrias agroalimentarias y ganaderas, (bodegas, almazaras e incluso con purines), de alta carga orgánica y en muchas ocasiones, producciones estacionales, utilizando el módulo de RBRC como sistema más intensivo y previo a su entrada en el sistema de filtros de helófitas como sistema más extensivo y menor carga orgánica.

El Objetivo final es validar el sistema mediante su carga con diferentes cantidades de materia orgánica y nutrientes, evaluar la eficiencia depurativa del sistema, valorar el bajo coste y sencillo mantenimiento de esta tecnología, el dimensionamiento de las instalaciones en metro cuadrado por habitante equivalente y estudio de su comportamiento a lo largo del año y en distintas condiciones climáticas. Asimismo, la divulgación de la tecnología a desarrollar y de los resultados del proyecto, son un aspecto de gran relevancia para el Grupo Operativo.

Podemos concluir con resultados previos obtenidos hasta el momento, que el proyecto contribuye a mejorar la protección del medio ambiente, consiguiendo la depuración de vertidos ricos en nutrientes que contaminan las aguas superficiales y profundas y llegan a comprometer la viabilidad de numerosos ecosistemas. No obstante, la eliminación de fósforo y nitrógeno es una asignatura pendiente en la mayoría de las cuencas fluviales de todo el territorio español, y en nuestro caso, de la Comunidad de Madrid.

7.- FINANCIACIÓN

El Grupo Operativo RESIDUOS AGROALIMENTARIOS está cofinanciado por la Unión Europea a través del Fondo Europeo Agrícola de Desarrollo Rural (FEADER) – Europa invierte en zonas rurales, el MAPA, y la Comunidad de Madrid a través del IMIDRA, en el marco del PDR-CM 2014-2020.



8.- BIBLIOGRAFÍA

- [1] Fernández González, J. *Manual de Fitodepuración. Filtros de macrófitas en flotación*. Proyecto LIFE. **2005**.
<https://www.fundacionglobalnature.org/macrophytes/Manual%20sobre%20fitodepuracion.htm>
- [2] Ortega de Miguel, E. (CEDEX), Ferrer Medina, Y. (CEDEX), Salas Rodríguez, J.J. (CENTA), Aragón Cruz, C. (CENTA), Real Jiménez, A. (CENTA). “Manual para la implantación de sistemas de depuración en pequeñas poblaciones”. Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino. **2010**.
- [3] Fernández, J., Rodríguez, M. Revista Técnica de Medio Ambiente RETEMA “Nuevo rotobiorreactor de biopelícula como alternativa a los biodiscos clásicos para la depuración de aguas”. **2017**.
- [4] Babar, M.A.; Reynolds, M.P.; Van Ginkel, M.; Klatt, A.R.; Raun, W.R.; Stone, M.L. Spectral reflectance indices as a potential indirect selection criteria for wheat yield under irrigation. *CropSci.* 46, 578–588. **2006**
- [5] Marti, J.; Bort, J.; Slafer, G.A.; Araus, J.L. Can wheat yield be assessed by early measurements of normalized difference vegetation index? *Ann. Appl. Biol.* 150, 253–257. **2007**.
- [6] Fernández, J., Domenech, F. (2017). Revista Técnica de Medio Ambiente RETEMA, nº 199. “La fitodepuradora de Fabara, 10 años de funcionamiento de un filtro verde flotante”. **2017**.
- [7] Salgado-Bernal I., Duran-Dominguez C., Cruz-Arias M., Carballo-Valdes M.E. y Martinez Sardinias A. “Bacterias rizosféricas con potencialidades fisiológicas para eliminar materia

orgánica de aguas residuales”. Rev. Int. Contam. Ambient. Vol 28. México. **2012**.

- [8] Salas, J.J. Artículo “La depuración mediante “Macrófitas en flotación” contada por su autor” publicado en www.iagua.es. **2020**
- [9] Li, S., Lissner, J., Mendelssohn, I.A., Brix, H., Lorenzen, B., Mckee, K. y Miao, S. “Nutrient and growth responses of cattail (*Typha domingensis*) to redox intensity and phosphate availability. Annals of Botany”. pp. 1-10. **2009**.
- [10] Berry, P., Yassin, F., Grosshans, R. y Lindeschmidt, K.E. “Surface water retention systems for cattail production as a biofuel. Journal of Environmental Management” 203 pp 500-509. **2017**.
- [11] Di Luca, G.A., Mufarrege, M.M., Hadad, H.R. y Maine, M.A. N”itrogen and phosphorus removal and *Typha domingensis* tolerance in a floating treatment wetland. Science of the Total Environment” 650 pp. 233-240. **2019**.