

EFICIENCIA Y TECNOLOGÍAS DE OXIDACIÓN AVANZADA COMO MÉTODOS DE DESINFECCIÓN COMPLEMENTARIOS DE UN SISTEMA DE DEPURACIÓN NATURAL, Y APROVECHAMIENTO DE SUBPRODUCTOS

SISTEMA DE DEPURACIÓN NATURAL
DEL CAMPUS DE TAFIRA DE LA UNIVERSIDAD DE LAS
PALMAS DE GRAN CANARIA

DOCTORADO EN INGENIERÍA AMBIENTAL Y DESALINIZACIÓN

BIENIO 2003 – 2005

Diciembre de 2006

Tutor: *Dr. José Alberto Herrera Melián*



Centro Instrumental Químico-Físico para el
Desarrollo de Investigación Aplicada (CIDIA)



UNIVERSIDAD DE LAS PALMAS
DE GRAN CANARIA

Doctorando

José Alberto Rexachs González
Ldo. en Ciencias Ambientales

**EFICIENCIA Y TECNOLOGÍAS DE OXIDACIÓN AVANZADA
COMO MÉTODOS DE DESINFECCIÓN COMPLEMENTARIOS DE
UN SISTEMA DE DEPURACIÓN NATURAL, Y
APROVECHAMIENTO DE SUBPRODUCTOS**

SISTEMA DE DEPURACIÓN NATURAL
DEL CAMPUS DE TAFIRA DE LA UNIVERSIDAD DE
LAS PALMAS DE GRAN CANARIA

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	5
1.1 LA NECESIDAD DE DEPURAR.....	5
1.2 SISTEMAS DE DEPURACIÓN NATURAL. LA LAGUNA DE DEPURACIÓN NATURAL DEL CAMPUS UNIVERSITARIO DE TAFIRA.....	5
2. EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DE LA DEPURADORA NATURAL DEL CAMPUS UNIVERSITARIO DE TAFIRA	8
2.1 INTRODUCCIÓN	8
2.1.1 BACTERIAS INDICADORAS DE CONTAMINACIÓN	8
a) Coliformes totales y fecales	9
b) Enterococos.....	9
2.2 OBJETIVO	10
2.3 METODOLOGÍA.....	10
2.3.1 ANÁLISIS DE BACTERIAS INDICADORAS DE CONTAMINACIÓN	10
a) Preparación y esterilización del material.....	11
b) Toma de muestras	12
c) Cultivo de las muestras.....	12
d) Interpretación de los resultados	13
2.3.2 ANÁLISIS DE PARÁMETROS FÍSICO-QUÍMICOS	14
2.4 RESULTADOS.....	14
2.5 CONCLUSIONES.....	21
3. TECNOLOGÍAS DE OXIDACIÓN AVANZADA COMO MÉTODO DE DESINFECCIÓN TERCIARIO EN SISTEMAS DE DEPURACIÓN NATURAL DE AGUAS RESIDUALES	24
3.1 INTRODUCCIÓN	24
3.2 OBJETIVO	24
3.3 METODOLOGÍA.....	25
3.3.1 ANÁLISIS DE BACTERIAS INDICADORAS DE CONTAMINACIÓN	25
3.3.2 ANÁLISIS DEL CARBONO ORGÁNICO NO PURGABLE (NPOC).....	28
3.4 RESULTADOS.....	28
3.5 CONCLUSIONES.....	33
4. APLICACIÓN DEL EFLUENTE DE LA LAGUNA DE DEPURACIÓN NATURAL AL CULTIVO DE <i>Vallisneria americana</i> var. <i>gigantea</i>	35
4.1 INTRODUCCIÓN	35
4.2 OBJETIVO	35
4.3 METODOLOGÍA.....	36
4.4 RESULTADOS.....	38
4.5 CONCLUSIONES.....	42
5. CONCLUSIONES GENERALES	44
6. PUBLICACIONES	46
7. AGRADECIMIENTOS	47
8. BIBLIOGRAFÍA	48

RESUMEN

La contaminación de las aguas es uno de los principales problemas de la mayoría de las poblaciones actuales. Los sistemas de depuración natural permiten aprovechar las capacidades de la naturaleza en el tratamiento de vertidos de aguas residuales con unos costes mínimos, aunque también con una serie de limitaciones.

La ULPGC cuenta desde hace unos años con un sistema de depuración natural experimental. Este trabajo ha estudiado tres aspectos distintos de la misma. Por una parte se ha tratado de completar los análisis del sistema, sobre todo con nuevos análisis microbiológicos de sus puntos de entrada y salida del flujo. Por otra parte, se han comparado distintos métodos complementarios para mejorar la desinfección del efluente. Y finalmente, se ha estudiado la posibilidad de aprovechamiento del agua depurada para la producción de especies vegetales de interés económico.

Los resultados obtenidos han demostrado la alta capacidad de eliminación de bacterias patógenas de la depuradora. Sin embargo la concentración de salida aún está por encima de los valores máximos recomendados internacionalmente en la mayoría de los casos. No obstante, como se explicará también, la aplicación posterior de tecnologías de oxidación avanzada como sistema terciario de desinfección es una opción interesante para mejorar la calidad del agua de salida para su posterior aprovechamiento

Por otra parte, la investigación realizada en torno al cultivo de plantas acuáticas ha evidenciado posibilidades reales para el aprovechamiento del efluente de la laguna sin ningún tratamiento terciario posterior. Si bien, los resultados son aún limitados, un estudio más completo sobre las condiciones de cultivo puede llevar a obtener mejores resultados.



Ilustración 1. Localización geográfica de la laguna de depuración natural del campus universitario de Tafira de la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria.

1. INTRODUCCIÓN

1.1 LA NECESIDAD DE DEPURAR

La contaminación de las aguas es una de las principales preocupaciones de la sociedad actual. Ya desde el origen de los primeros asentamientos humanos constituyó un problema que se solventó mediante la evacuación de las aguas procedentes del saneamiento. Pero con el desarrollo de los grandes núcleos de población, y particularmente la llegada de la revolución industrial, esta situación se fue agravando al no ser capaz el medio de absorber de manera natural estos vertidos, originándose problemas de salud pública y de contaminación del entorno.

De esta manera surgieron los sistemas de depuración de aguas residuales. Se instalaron primeramente en los grandes núcleos de población donde se generaban grandes volúmenes diarios de aguas residuales. Eran, y aún son, costosas instalaciones basadas en sistemas de tratamiento intensivo, siendo el de lodos activados el más empleado. A medida que van pasando los años, las legislaciones de los distintos países van estableciendo la obligación de depurar las aguas residuales de poblaciones cada vez más pequeñas. Sin embargo, el coste de mantenimiento de estas instalaciones suele ser alto e incluso casi prohibitivo para estas comunidades.

Ante esta situación se presentó la necesidad de buscar alternativas de depuración de bajo coste; sistemas de más fácil mantenimiento y explotación, que requirieran bajas inversiones. Así pues, las investigaciones se dirigieron a estudiar los mecanismos de depuración en la naturaleza, persiguiendo el poder diseñar un sistema basado en ellos que permitieran poder tratar aguas residuales. De esta manera surgieron los primeros diseños de sistemas de depuración natural, entre los que destacan el lagunaje, filtros percoladores, humedales artificiales, filtros verdes, de turba, etc.

1.2 SISTEMAS DE DEPURACIÓN NATURAL. LA LAGUNA DE DEPURACIÓN NATURAL DEL CAMPUS UNIVERSITARIO DE TAFIRA

Los sistemas de depuración natural (SDN) son una alternativa a los sistemas de depuración convencionales en comunidades pequeñas que dispongan de suelo barato y abundante. Están fundamentados en la potenciación de las propiedades depurativas de los sistemas acuáticos naturales, que incluyen complejos procesos físicos, químicos y biológicos.

Por sus características, estos sistemas no son viables para tratar vertidos procedentes de grandes poblaciones, siendo ésta su principal limitación. No obstante, sí es una opción real para pequeñas poblaciones¹ debido al mínimo mantenimiento, que no requiere de personal especialmente cualificado, y el bajo coste de instalación y funcionamiento. Por el contrario, la eficacia de estos sistemas suele ir asociada a largos períodos de permanencia de las aguas en los mismos.

¹ Martín Sánchez, S. Revista Alcántara nº 55. Diputación de Cáceres.

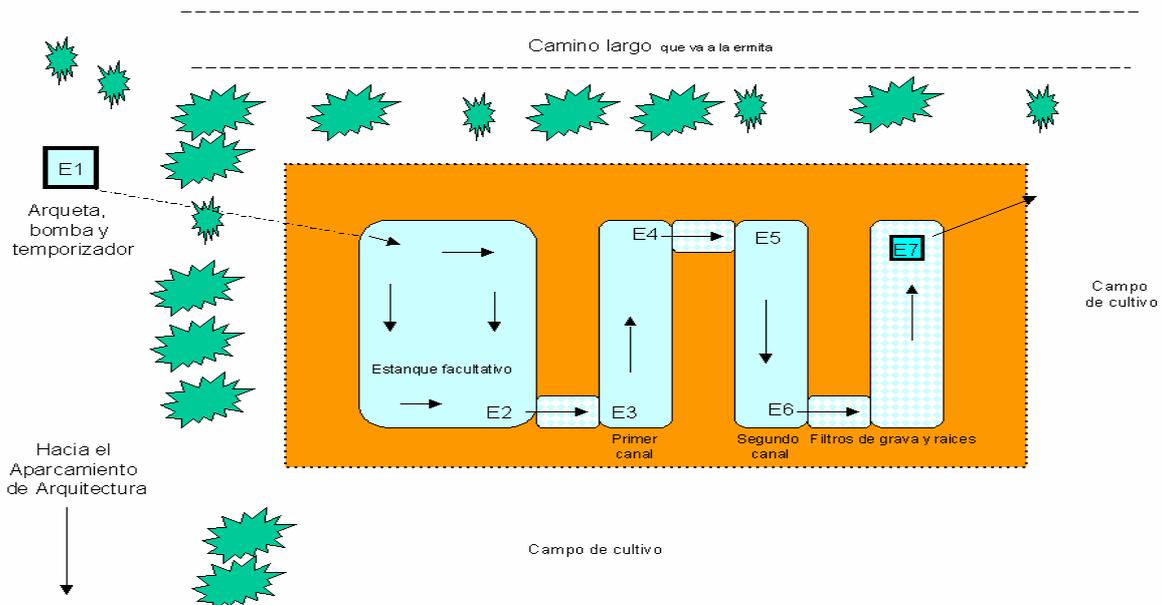


Ilustración 2. Esquema de la laguna de depuración natural del campus universitario de Tafira de la ULPGC (no a escala). Fuente: Dr. José A. Herrera Melián.

La Universidad de Las Palmas de Gran Canaria cuenta desde septiembre de 2000 con un SDN. Es una combinación de laguna y humedal y fue construida por el Instituto Tecnológico de Canarias (ITC). Ésta es experimental y trata parte de las aguas residuales del **Campus Universitario de Tafira**. Físicamente, está formada por un estanque facultativo inicial, seguido de tres canales contiguos, separados entre sí por medio de filtros de grava y arena. Todo el sistema es de flujo superficial excepto el último canal, que es de flujo subsuperficial y donde el agua circula bajo un suelo de gravas hasta la arqueta de salida (punto de muestreo E7). Las especies plantadas en las orillas de todo el sistema y que participan de la depuración son individuos de *Phragmites spp.*, *Juncus spp.*, *Pontederia spp.* y *Typha spp.* El estanque tiene una profundidad máxima de 1,8 m y media de 1,5 m, mientras que la profundidad de los canales ronda los 0,5 m. El sistema tiene además una capacidad de 330 m³ y ocupa una superficie de alrededor de 300 m². Una bomba hidráulica temporizada regula la entrada de aguas residuales, que se estima en una media de 6,5 m³/día.

Los **mecanismos que participan de la depuración** del agua son tan complejos y variados como la composición de la misma agua². No obstante a continuación se nombran los principales. En primer lugar están los factores físicos y químicos principales; la temperatura, pH y concentración de oxígeno disuelto. Ya sea individualmente o mediante combinaciones sinérgicas, estos tres factores tienen una importante influencia en la degradación de los componentes del agua residual. La luz (y más concretamente la radiación ultravioleta) es otra característica muy destacable que provoca la degradación de distintos compuestos y tiene una cierta acción bactericida y desinfectante. También ejercen su influencia en la depuración, el tiempo de retención del agua en el sistema, la evaporación y la profundidad de la laguna (relacionada con la penetración de la luz en el agua). La actividad microbiana (fitoplancton, zooplancton...), ya sea aeróbica como anaeróbica (en los fondos anóxicos de las lagunas), tiene una importante influencia en la transformación de los compuestos químicos presentes en el agua hasta formas asimilables por otros microorganismos heterótrofos, algas o incluso por los propios

² H.E. Maynard et al. "Tertiary lagoons: A review of removal mechanisms and performance". Wat. Res. Vol. 33, nº 1 (1999), pp. 1-13.

macrófitos. El suelo sobre el que se asienta la depuradora y sus propiedades físico-químicas como la capacidad de intercambio iónico del suelo, absorción, adsorción etc. del suelo, participan también de la depuración del agua. Otro factor es la presencia de vegetación macrófita y algas que crecen aprovechando la aportación de nutrientes del agua (nitratos, fosfatos, amonio, etc.) y que permiten retirar estos compuestos del vertido dando lugar a nueva. Los elementos físicos son parte fundamental del sistema; así nos encontramos con la función de filtro natural que ejercen las barreras de gravas que separan los canales y que permiten retener la materia de mayor tamaño (que en parte ha sedimentado también en el estanque facultativo). Por último, y aunque menos estudiado, parece ser que las toxinas liberadas por las microalgas, la depredación y la competencia entre especies bacterianas pueden influir también en la depuración; concretamente en la reducción de los microorganismos patógenos..

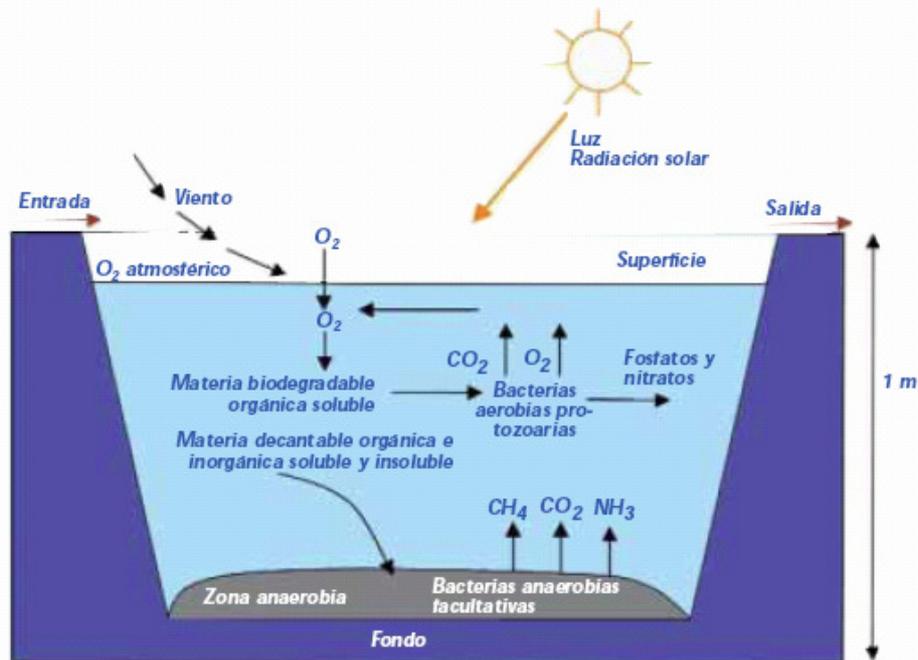


Ilustración 3. Esquema de los mecanismos que participan en las balsas de lagunaje natural (sin macrófitos). Fuente: Comisión Europea. "Procesos extensivos de depuración de las aguas residuales adaptadas a las pequeñas y medias colectividades". Oficina de Publicaciones Oficiales de la Comunidad Europea, 2001.

El **objetivo** del presente trabajo es continuar la investigación que se viene llevando a cabo en la depuradora realizando tres estudios distintos pero complementarios. Por una parte se analizó la eficacia del sistema en la eliminación de bacterias patógenas, además de continuar con los análisis físico-químicos. El interés de este trabajo radica en el análisis del efluente desde el punto de vista de la salud pública, con el objetivo de conocer si la utilización del agua conlleva un riesgo para las personas. Los resultados nos permitirán saber en qué usos se puede emplear dependiendo de su calidad sanitaria. Por otra parte, se compararon diversos métodos para mejorar la capacidad desinfectante del sistema. Y finalmente, se realizó una experiencia real de emplear el agua del efluente para el cultivo de plantas, partiendo de los análisis que viene realizando Herrera Melián y colaboradores en la depuradora, y que señalaban la posibilidad de su uso en agricultura dado el aporte de nutrientes del efluente. De esta manera se realizaba una experiencia piloto sobre el aprovechamiento del agua depurada para una posible actividad económica.

2. EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DE LA DEPURADORA NATURAL DEL CAMPUS UNIVERSITARIO DE TAFIRA

2.1 INTRODUCCIÓN

En los proyectos que se han ido desarrollando en la laguna de depuración natural, se han estudiado diversos fundamentalmente parámetros físico-químicos relacionados con los mecanismos de depuración del sistema. A lo largo de su recorrido se ha estudiado la evolución de parámetros como la concentración de oxígeno disuelto, la temperatura, el carbono orgánico total, el nitrógeno total, la conductividad, sulfatos, fosfatos, etc. Toda esta información está permitiendo conocer en profundidad las peculiaridades de esta depuradora natural. Sin embargo, quedaba aún pendiente conocer la capacidad depurativa del sistema en cuanto a desinfección.

Este aspecto es de gran interés debido al origen de las aguas residuales: el campus universitario. Las aguas residuales del campus poseen una composición muy similar a las aguas residuales urbanas pues proceden de una pequeña población (la universidad) cuyo principal vertido es de origen humano. Por tanto, son aguas que portan una gran cantidad de microorganismos, fundamentalmente bacterias, que proceden directamente del organismo humano.

Ante esta situación, el trabajo se centró en la presencia de tres grupos bacterianos que son comúnmente utilizados como indicadores de contaminación orgánica: coliformes totales, coliformes fecales y enterococos. No obstante también se analizaron otros parámetros de interés, como se expondrá en los resultados.

2.1.1 BACTERIAS INDICADORAS DE CONTAMINACIÓN

En el medio existen millones de especies de bacterias de las cuales, unos cientos o miles son de interés desde el punto de vista sanitario. El caso de las aguas no es distinto, ni mucho menos.

En el caso de aguas depuradas procedentes de aguas residuales urbanas, la carga bacteriana es enorme destacando una alta concentración de microorganismos patógenos que tienen su origen en las heces, principalmente. A la hora de realizar análisis sería imposible realizar cultivos para todas y cada una de las posibles especies presentes en el agua, ya que sería muy costoso y requeriría de mucho tiempo; de modo que no sería rentable ni productivo.

Ante esta situación surgió la necesidad de buscar indicadores. Estos se basan en analizar unos pocos grupos de microorganismos cuya presencia, de una u otra manera, suele estar relacionada con la presencia de otros de interés, más difíciles de encontrar. En general, para que un microorganismo pueda ser empleada como indicador debe cumplir con una serie de requisitos generales:

- Ser fáciles de aislar y cultivar en laboratorio,
- Ser relativamente inocuas para el hombre y los animales,

- Su presencia en el agua debe estar relacionada con la de otros microorganismos, patógenos y/o de aislamiento más difícil.

En este trabajo se han analizado tres grupos concretos de bacterias indicadoras de contaminación: coliformes totales y fecales, y enterococos. Esta elección se ha basado en que son tres grupos ampliamente empleados en este tipo de estudios, que además tiene están recogidos y diversas legislaciones y guías de calidad de aguas nacionales e internacionales.

a) Coliformes totales y fecales

Son aquellas bacterias de morfología bacilar, gram negativas, aerobias o anaerobias facultativas, oxidasa negativas, no esporógenas, que fermentan la lactosa con producción de ácido y de gas a 37°C en un tiempo máximo de cuarenta y ocho horas. Este grupo comprende los géneros *Escherichia*, *Citrobacter*, *Klebsiella* y *Enterobacter*, pertenecientes a la familia Enterobacteriáceas.



Ilustración 4. Cartel de la depuradora natural

Es un grupo de bacterias habitantes de la región intestinal de mamíferos y aves. Todos los coliformes pueden existir como saprófitos independientes o como microorganismos intestinales, excepto el género *Escherichia*, que sólo puede tener origen fecal. Esto ha hecho necesario distinguir entre coliformes totales (grupo que incluye a todos los coliformes de cualquier origen) y coliformes fecales (término que designa a los coliformes exclusivamente de origen intestinal, es decir, al género

Escherichia). De entre todos los coliformes, solamente *Escherichia*, y ocasionalmente

Klebsiella, tienen la capacidad de fermentar la lactosa no sólo a 35-37 °C, sino también a 44,5 °C. Así, sólo la presencia de coliformes fecales, cultivados a 44,5 °C, nos confirma una contaminación microbiológica de origen fecal, mientras que la presencia de coliformes totales, cultivados a 35 °C, sólo nos indica la existencia de contaminación sin informar sobre su origen.

Los **coliformes fecales** son bacterias coliformes que además son capaces de fermentar la lactosa con producción de ácido y de gas a 44°C, en un tiempo máximo de veinticuatro horas. Como su nombre indica, son de origen fecal.

Tomando como ejemplo *E. coli*, la especie referencia de los coliformes fecales, las infecciones que puede causar van desde las infecciones de vías urinarias (es la causante del 75 % de ellas) hasta gastroenteritis, pasando por infecciones peritoneales y biliares, y bacteriemia, la manifestación más grave de infección por *E. coli* consistente en una invasión del torrente sanguíneo que puede acabar en una afección sistémica.

b) Enterococos

Los enterococos son un subgrupo de los Estreptococos fecales. Los estreptococos fecales son aquellas bacterias cocáceas gram positivas aerobias o anaerobias facultativas, catalasa negativas, que fermentan la glucosa con producción de ácido a 37 °C en un tiempo máximo de cuarenta y ocho horas. El conjunto comprende las especies

Streptococcus faecalis, *E. faecium*, *E. durans*, *Streptococcus bobis* y *S. equinus*, todas ellas comprendidas en el grupo serológico D de Lancefield.

Los estreptococos fecales se encuentran normalmente en el intestino de mamíferos y aves, y nos sirven como indicadores complementarios de contaminación fecal.

El grupo de enterococos es considerado como un indicador de contaminación fecal más fiable que los propios estreptococos fecales.

Los estreptococos fecales, en general, son causa frecuente de infecciones urinarias en individuos con anormalidades del aparato urinario.

2.2 OBJETIVO

El objetivo de este trabajo fue realizar un acercamiento al estudio de la capacidad de reducción de bacterias patógenas de la laguna de depuración natural.

Se decidió elegir los grupos de bacterias anteriormente mencionados por ser indicadores comúnmente aceptados y porque existe legislación y recomendaciones diversas en materia de aguas que incluye valores límites y guía para ellos.

Los resultados del trabajo permitirán conocer la eficacia de la depuración respecto al contenido microbiológico de estas aguas residuales y determinar en qué grado cumple con las recomendaciones existentes en torno a la reutilización de aguas. Igualmente, se analizarán otros parámetros de interés relacionados con los procesos de depuración.

2.3 METODOLOGÍA

2.3.1 ANÁLISIS DE BACTERIAS INDICADORAS DE CONTAMINACIÓN

Dado el carácter inicial del trabajo, se decidió estimar la capacidad reductora de bacterias patógenas comparando la cantidad de bacterias a la entrada del sistema y a la salida.

Para el recuento de bacterias se optó por el método de filtración por membrana por ser un método ampliamente extendido y sencillo. Entre las ventajas de este método para el análisis bacteriológico de aguas se encuentran respecto al método del número más probable (NMP) están³:

- Mayor grado de precisión.
- Permite el examen de mayor volumen de muestras.
- Se obtienen resultados en menor tiempo; lo que es especialmente útil en situaciones de emergencia.
- Permite la filtración de muestras en el campo y el análisis posterior de las membranas en el laboratorio.
- Es útil en las aguas habitualmente poco contaminadas.
- Está muy indicado en las aguas fuertemente mineralizadas que provocan falsas reacciones en la polimetría en medios líquidos.

³ Publicaciones Millipore, "Análisis de aguas", 1994.

En este trabajo se ha empleado un sistema de filtración múltiple, membranas esterilizadas de 0,45 μm de poro, y embudos portafiltros de Millipore.

a) Preparación y esterilización del material

Todo el material empleado fue esterilizado en autoclave (calor húmedo) a 121 $^{\circ}\text{C}$ durante 15 minutos. El material contaba con puntas de pipetas, embudos portafiltros, matraces de 25 ml, frascos de toma de muestras...

Para realizar las diluciones necesarias y el enjuagado de las paredes de los embudos de filtración se elaboró una solución tamponada² posteriormente esterilizada. Es una mezcla compuesta de 1,25 ml de una solución A, más 5 ml de una solución B y completada hasta 1000 ml con agua destilada. Las soluciones de mezcla se prepararon de la siguiente manera y se conservaron posteriormente en nevera:

- Solución A: Se añadió 8,5 g de fosfato monopotásico dihidrogenado (KH_2PO_4) a 100 ml de agua destilada. Se tamponó a pH 7,2 con ácido clorhídrico y se completó hasta 250 ml con agua destilada.
- Solución B: Se añadió 38 g de cloruro magnésico (MgCl_2) a 1000 ml de agua destilada.

Para la toma de muestras se emplearon dos frascos esterilizados transparentes de color marrón oscuro.

Los filtros membrana y las cajas de Petri empleados vinieron esterilizados en origen.

Para cultivar las bacterias se emplearon dos tipos de medios:

- *Agar Chapman TTC (Tergitol 7)* Para coliformes totales y fecales.
- *Agar Slanetz-Bartley*. Para enterococos.

El **agar Chapman TTC (Tergitol 7)** es el recomendado por la norma UNE-EN-ISO 9308:2000. Se fundamenta en que la fermentación de la lactosa se pone de manifiesto por el viraje del azul de bromotimol; las colonias lactosa positivas tienen un halo amarillo, mientras que las lactosa negativas presentan un halo azulado. El Sodio Heptadecil Sulfato (Tergitol 7) es inhibidor de la flora acompañante. Este medio puede ser utilizado sin la adición de TTC y permitirá la presunción de Coliformes. La adición del TTC permite una sospecha precoz de la presencia de *E. coli*. Este producto es reducido por todos los Coliformes, a excepción de *E. coli*. Las colonias adquieren un color rojo ladrillo, mientras que la colonia de *E. coli* es amarilla con o sin centro anaranjado. El medio es el mismo para coliformes totales y fecales, ya que únicamente se diferencian por su crecimiento a 37 $^{\circ}\text{C}$ o 44 $^{\circ}\text{C}$, respectivamente.

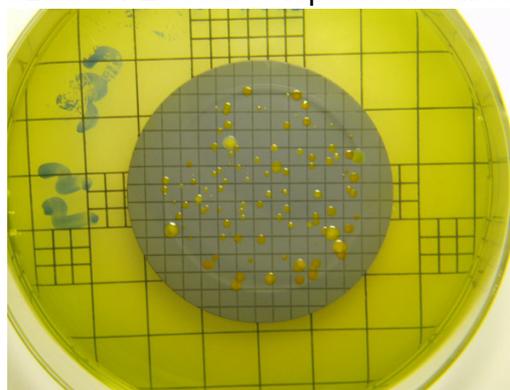


Ilustración 5. Cultivo de coliformes fecales.

El **agar Slanetz-Bartley** original fue formulado por Slanetz y colaboradores con el objeto de hacer recuentos de Enterococos en aguas. Con la técnica de filtración por membrana se demostró que era el medio que daba los resultados más satisfactorios. Es el recomendado en la legislación española, norma UNE, e ISO (UNE-EN-ISO 7899-2:2001) para la determinación de Enterococos por el método de filtración por membrana, en la determinación de la calidad de agua. Se fundamenta en que el sodio azida inhibe el crecimiento de los microorganismos gram negativos. Los enterococos reducen el 2,3,5 Trifenil-2H-Tetrazolio Cloruro produciendo un precipitado rojo insoluble, responsable de que las colonias se presentan de color rojo ladrillo. Los demás ingredientes aportan el soporte nutritivo y energético necesarios para el buen desarrollo de las bacterias.

La característica de este medio es que contiene azida sódica que inhibe el crecimiento de las bacterias gram negativas. El TTC facilita el recuento de las colonias.

Los medios de cultivo fueron preparados de acuerdo con las especificaciones del fabricante (Panreac).

b) Toma de muestras

Las muestras se tomaron en la entrada (E1) y la salida (E7) de la laguna de depuración empleando los frascos esterilizados destinados al efecto.

Estas se recogieron aproximadamente siempre entre las 16:30 y las 17:30, procediéndose a la filtración de las muestras en la media hora posterior. La cercanía del laboratorio a la depuradora permitió que no fuese necesario prever ningún tipo de medidas de conservación de las muestras. Aún así, unas pruebas realizadas nos indicaron la posibilidad de conservar las muestras inmediatamente en nevera a unos 6 °C, no apreciándose efectos significativos en los resultados al analizarse a las 24 horas siguientes.

c) Cultivo de las muestras

Las muestras recién tomadas se manipularon en todo momento dentro de una campana de flujo laminar estéril y cerca de una llama, que a la vez sirvió para esterilizar las puntas de las pinzas de trabajo humedecidas en alcohol.

Los frascos de muestras fueron agitados durante unos minutos para homogeneizar el líquido. A continuación se procedió a realizar las diluciones adecuadas que llenaban los matraces que eran vertidos sobre los filtros de membranas. Los filtros eran manipulados con las pinzas y colocados sobre el portafiltros correspondiente donde finalmente se colocaba el embudo de filtrado. Se empleó siempre un único embudo por dilución, al igual que el mismo portafiltros no se utilizaba para dos diluciones seguidas, con estas medidas evitábamos la posible contaminación de filtrados con restos de otras diluciones. Los portafiltros, después de cada dilución, eran limpiados con alcohol que luego se prendía para eliminar los residuos.



Ilustración 6. Filtrado de muestras

Después de filtrar la muestra con apoyo de una bomba de vacío, los filtros con la muestra eran colocados dentro de una placa de Petri (de unos 10 cm de diámetro) con el medio de cultivo adecuado, para luego ser introducido en la estufa correspondiente, boca abajo para evitar posibles condensaciones de humedad sobre los filtros. Los tiempos y temperaturas de cultivo fueron los indicados en la Tabla 1.

	Coliformes Totales	Coliformes Fecales	Enterococos
Temperatura	37 ± 1 °C	44 ± 1 °C	37 ± 1 °C
Tiempo	24 ± 2 h	24 ± 2 h	44 ± 4 h

Tabla 1. Parámetros de cultivo de bacterias indicadoras

d) Interpretación de los resultados

Las colonias de coliformes totales y fecales cultivados en el medio Agar Chapman TTC se identificaban porque que al ser capaces de fermentar la lactosa y producir el consiguiente ácido, provocaban un cambio del color del medio de verde a amarillo, y se consideraban sospechosas. También se consideran colonias sospechosas las de coloración amarilla con centro naranja o rojo ladrillo y halo amarillo. Para confirmar que son colonias de coliformes hay que aplicar las pruebas de la oxidasa y del indol; de manera que todas las oxidasa negativas se consideran coliformes, y las oxidasa negativas e indol positivas son consideradas *Escherichia coli*.

En los medios de Agar Slanetz-Bartley, las colonias sospechosas de ser de enterococos eran aquellas que eran de color rojo, violeta, marrón o rosa, ya que habían sido capaces de crecer en presencia de azida sódica y de reducir el TTC a formazán. Para confirmarlo, hay que traspasar las membranas a un medio de agar bilis esculina azida, observando todas aquellas colonias que sean capaces de hidrolizar la esculina en un plazo de unas 2 horas dando una coloración que va desde el marrón al negro. Si no existe confirmación, en cualquier caso las colonias son estreptococos fecales.

En el recuento de colonias se darán por buenas las membranas que contengan⁴:

Coliformes Totales	20-80 UFC/membrana
Coliformes Fecales	20-60 UFC/membrana
Estreptococos	10-20 UFC/membrana

Tabla 2. Rangos de fiabilidad en el recuento de bacterias indicadoras

Siendo UFC = unidades formadoras de colonias. Este es un rango de fiabilidad establecido para garantizar, en cierta manera, la veracidad de los datos; pues valores muy bajos o muy altos pueden dar resultados globales, en 100 ml, alejados de la realidad. Por otra parte, apuntar que dado que los enterococos son un grupo de estreptococos, se asumieron estos valores de referencia en los recuentos.

Dado que este trabajo tenía por finalidad realizar un primer acercamiento al conocimiento de la capacidad de desinfección de la depuradora, no se realizaron las pruebas de confirmación sobre las muestras, antes comentadas.

⁴ Publicaciones Millipore, "Análisis de aguas", 1994.

2.3.2 ANÁLISIS DE PARÁMETROS FÍSICO-QUÍMICOS

Los parámetros que han sido analizados son la demanda biológica -o bioquímica- de oxígeno (DBO), demanda química de oxígeno (DQO), carbono orgánico total (TOC), sólidos en suspensión (SS), contenido de amonio y contenido de fosfatos. El carbono se determinó como NPOC (carbono orgánico no purgable), para eliminar la interferencia del carbono inorgánico (CI), empleando un equipo Shimadzu 5000-A. La DBO medida fue en muestras no filtradas, homogeneizadas, a 5 días, 20°C y sin nitrificación, por el método manométrico. La determinación de la DQO se realizó en muestras no filtradas por el método de digestión ácida al dicromato y valoración con disolución de sulfato ferroso amónico. Fosfatos y amonio fueron medidos por cromatografía iónica. Los métodos empleados para realizar estos análisis se basaron en estándares internacionalmente aceptados y recogido en manuales como el "Standard Methods"⁵.

2.4 RESULTADOS

Los resultados obtenidos muestran, para todos los grupos de bacterias indicadoras empleados, un porcentaje global de **reducción del 98,72%**, lográndose una disminución en la concentración de bacterias en torno a los 2,62 órdenes de magnitud de diferencia respecto a la entrada del sistema. En general, obtenemos una concentración de bacterias en el efluente en torno a los 2×10^5 UFC/100 ml.

Balance de bacterias entre la entrada (E) y la salida (S)
CT= Coliformes Totales; CF= Coliformes Fecales; ENT= Enterococos

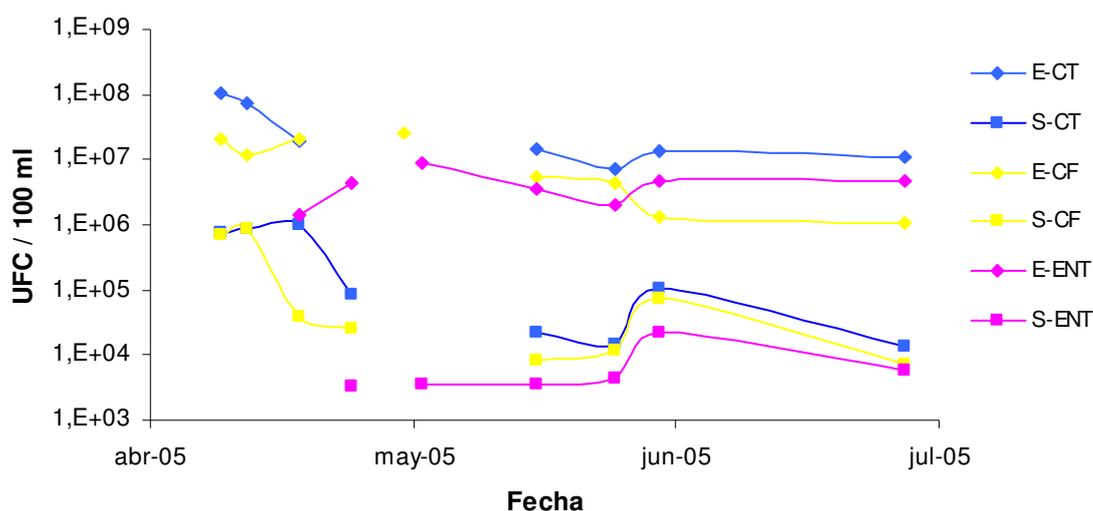


Ilustración 7. Bacterias a la entrada y la salida del sistema.

⁵ American Public Health Association. "Standard methods for the examination of water and wastewater". 1992.

El grupo en el que se observó un porcentaje de reducción más constante y alto fue los **enterococos**. Este varió entre 100% y 99,52%, manteniéndose en una media del 99,85%. La concentración media de salida en la depuradora está en torno a 10^3 UFC/100 ml, reduciéndose la presencia de enterococos en torno a 3,29 órdenes de magnitud.

Enterococos a la entrada (E) y salida (S) de la depuradora

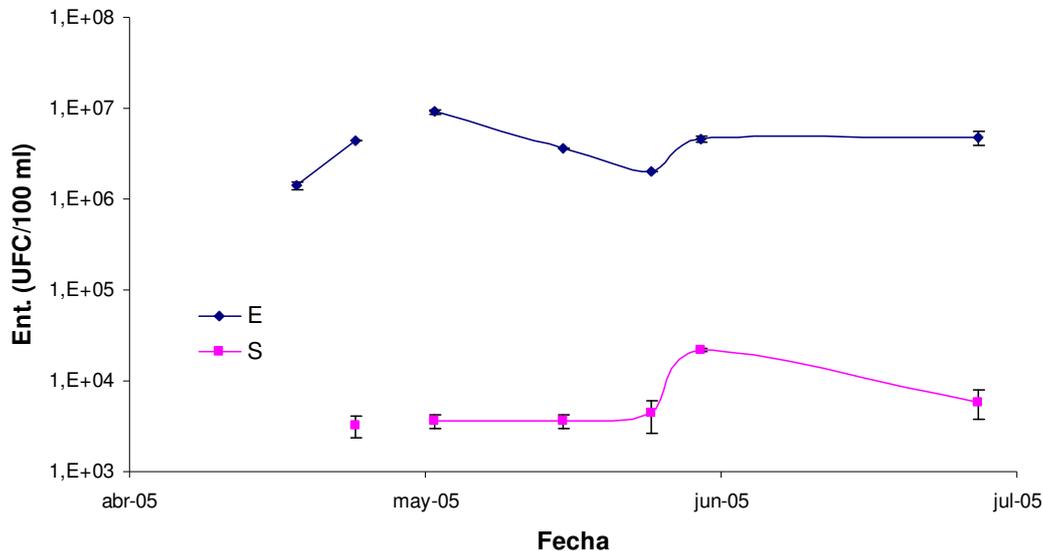


Ilustración 8. Enterococos en la depuradora.

En el otro extremo encontramos a los **coliformes fecales** que si bien se logró siempre superar un 93% de eliminación de bacterias, el porcentaje fue más variable. Destacan dos mínimos muy marcados en las muestras de los días 29 de abril y 15 de junio. La concentración media de salida rondó las $2,1 \times 10^5$ UFC/100 ml.

Coliformes fecales a la entrada (E) y salida (S) de la depuradora

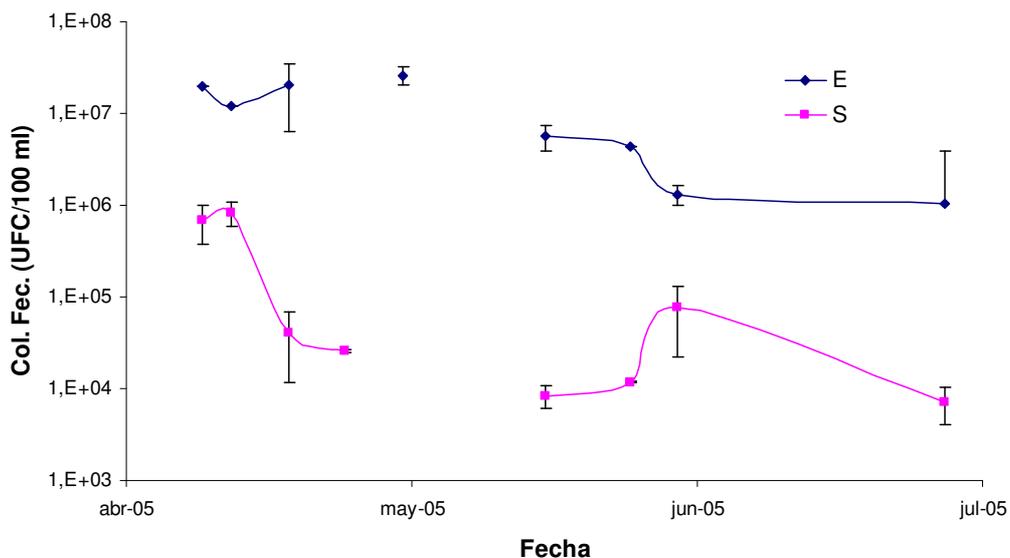


Ilustración 9. Coliformes fecales en la depuradora.

Respecto a los **coliformes totales**, a pesar de que en la última etapa del experimento presentó un porcentaje de reducción relativamente constante y la segunda

media más alta (98,82%), este fue el grupo de bacterias con el que se obtuvo la peor concentración de salida: alrededor de $3,6 \times 10^5$ UFC/100 ml. Fue también el grupo que menos órdenes de magnitud variaron, 2,29 órdenes.

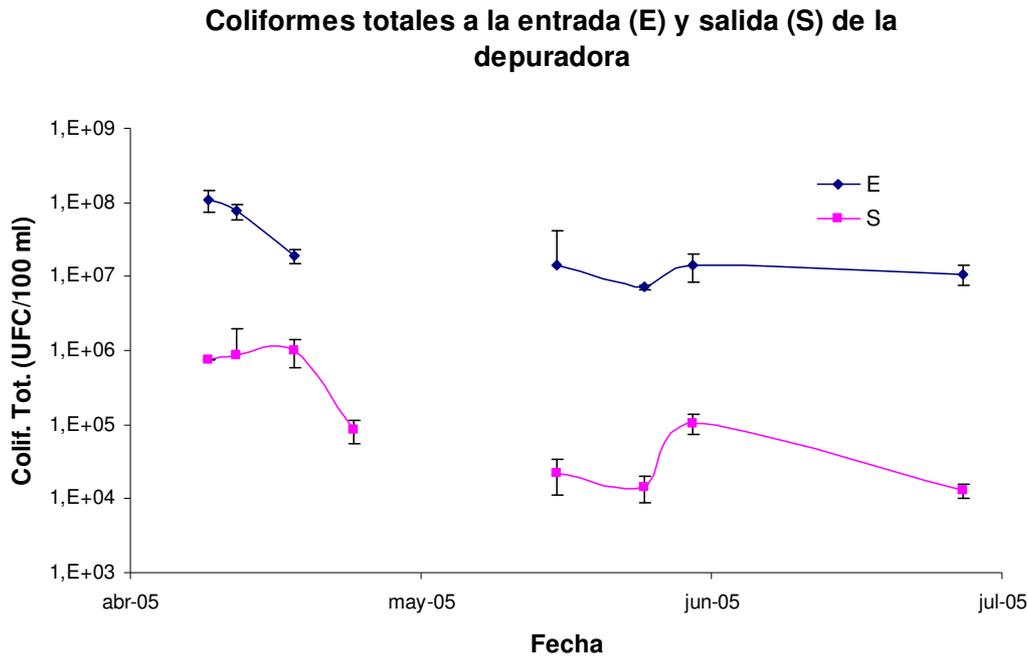


Ilustración 10. Coliformes totales en la depuradora.

Quisiéramos destacar el hecho de que el día 15 de junio se registrase en todos los grupos de bacterias analizados una disminución del porcentaje de eliminación, siendo más patente en los coliformes fecales. En los valores de salida se observa desde finales de mayo como la concentración de bacterias va aumentando hasta alcanzar su punto máximo el 15 de junio, cuando también se obtienen de los niveles más bajos de entrada de coliformes totales y fecales desde el inicio del experimento. Estos niveles bajos de entrada y altos de salida, se tradujeron en porcentajes bajos de eliminación de bacterias patógenas. La explicación de esta situación está en que pocos días antes se procedió a aumentar el caudal de entrada de la depuradora, de unos $5.4 \text{ m}^3 \text{ día}^{-1}$ a $12.6 \text{ m}^3 \text{ día}^{-1}$, al objeto de determinar qué efecto tendría una carga de choque sobre la eficiencia del sistema.

Evolución de la DBO de la depuradora

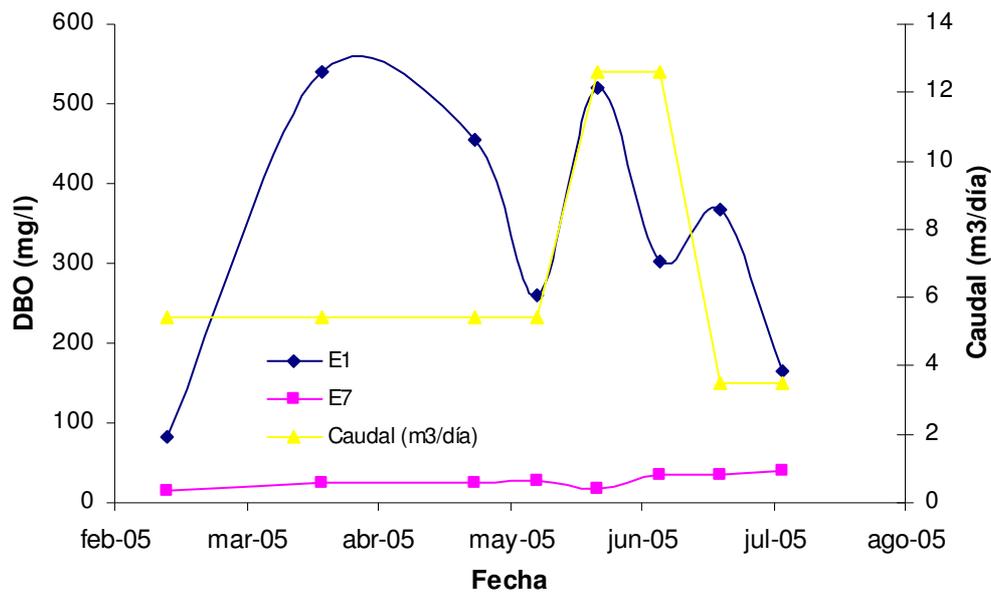


Ilustración 12. Evolución de la DBO en la depuradora.

Evolución de la DQO en la depuradora

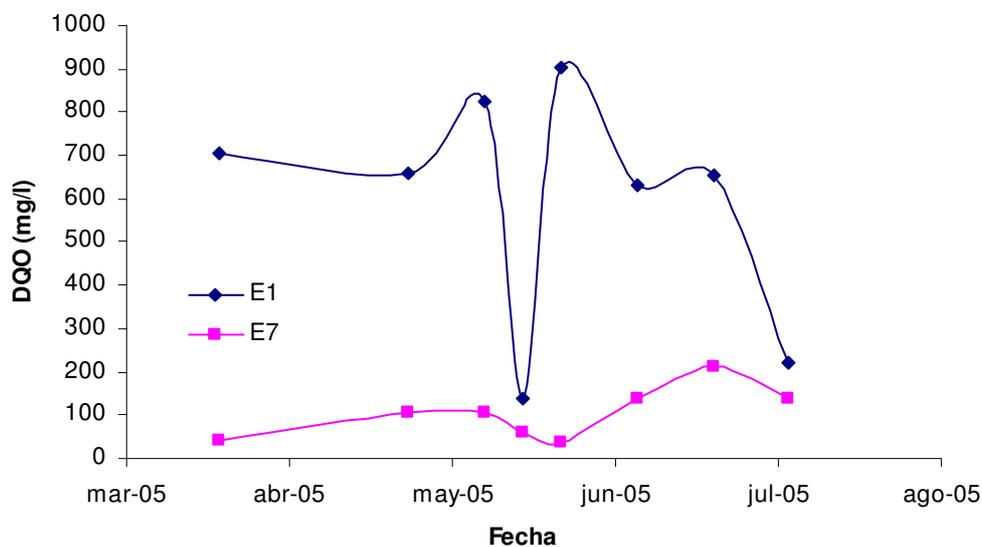


Ilustración 13. Evolución de la DQO de la depuradora.

El **TOC** muestra una evolución similar a la DBO y DQO, principalmente en el último período de medición. La diferencia está claramente en los primeros datos, donde, tal vez debido a diferentes episodios meteorológicos, se producen unas oscilaciones poco comunes en las que se llegan a igualar los valores de entrada y salida. A pesar de que la media de eliminación del TOC para el período ronde el 66,35%; los datos de primavera – cuando se observa una mayor estabilidad- elevan la media al 78% de reducción. En la figura correspondiente, donde se ha incluido el caudal, se puede observar en qué momento se produce el aumento del **caudal** de entrada (de 5,40 a 12,60 m³/día), y como provoca en el TOC una reacción similar a la comentada anteriormente.

Evolución del TOC en la depuradora

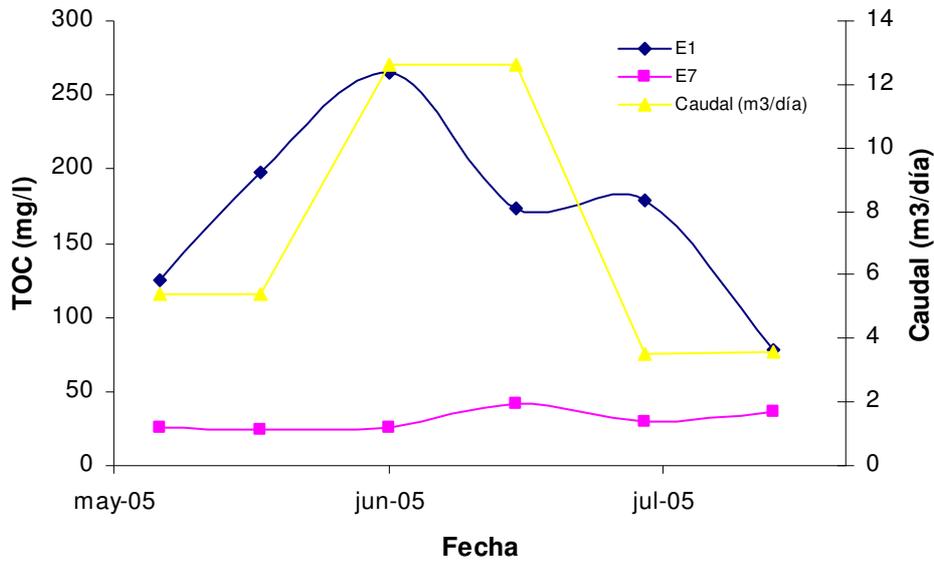


Ilustración 14. Evolución del TOC de la depuradora.

Aunque los **sólidos en suspensión (SS)** tienen un comportamiento similar a los otros parámetros descritos, resulta especialmente interesante el momento en que este parámetro responde al aumento de caudal. Se puede apreciar como el máximo de SS se detecta alrededor de unos 15 días después del pico del caudal. Esto se traduce en una mínima oscilación en los valores de salida, en comparación a los otros parámetros. Esta mínima variación está también sostenida por el alto porcentaje de eliminación de SS del sistema, que se sitúa sobre el 92%.

Evolución de los Sólidos en Suspensión de la depuradora

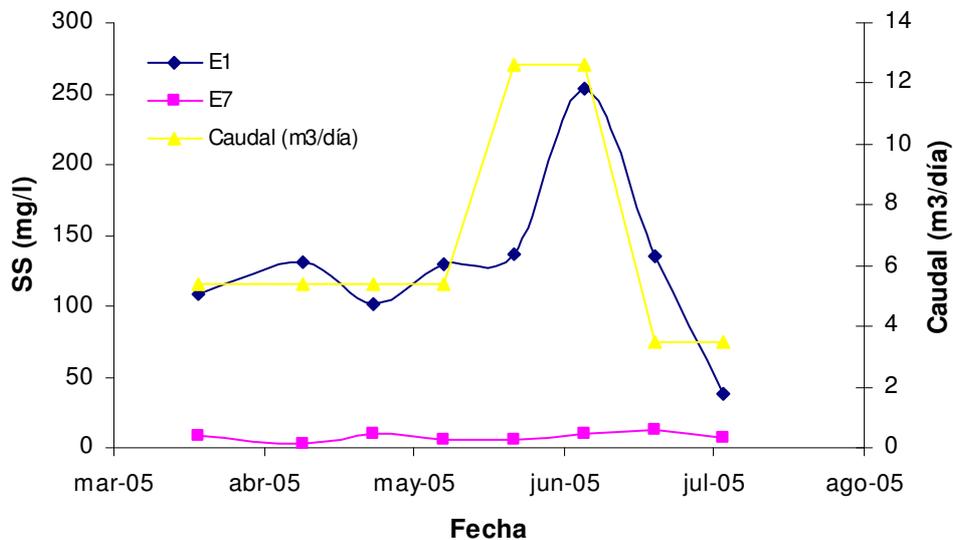


Ilustración 15. Evolución de los SS de la depuradora.

Por último, el **amonio** y los **fosfatos**. Como ya se apuntó, estos son los dos parámetros que menos se ven alterados por los procesos de la laguna. Presentan índices de eliminación muy inferiores, donde las variaciones de concentración en el caudal de entrada se muestran en el caudal de salida entre 15 y 20 días después. El caso más extremo es el de los fosfatos, en el que prácticamente no existe eliminación, frente al 47% del amonio.

Evolución de los fosfatos en la depuradora

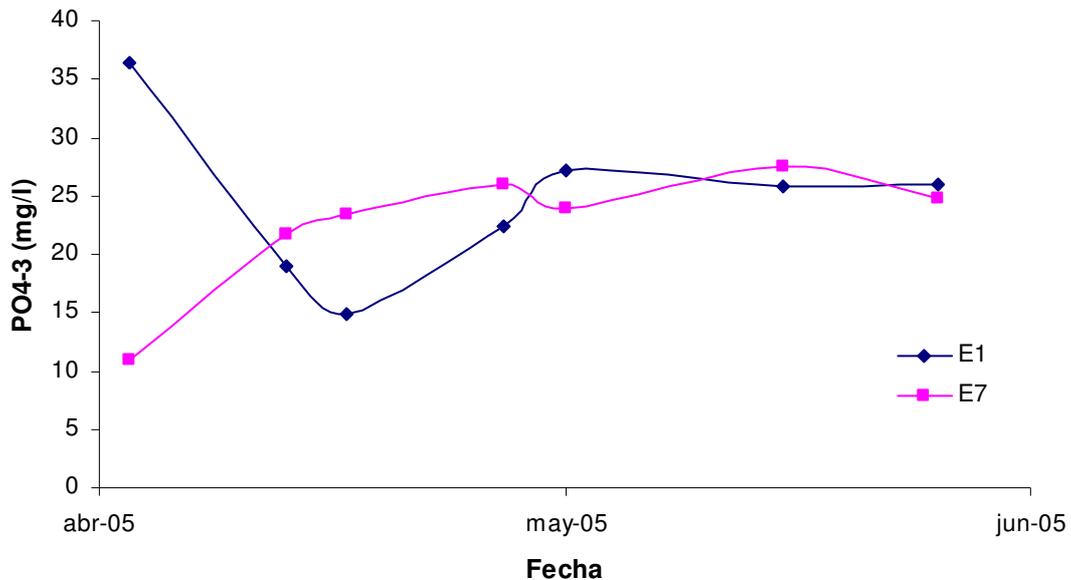


Ilustración 16. Evolución de los fosfatos en la depuradora.

Evolución del amonio en la depuradora

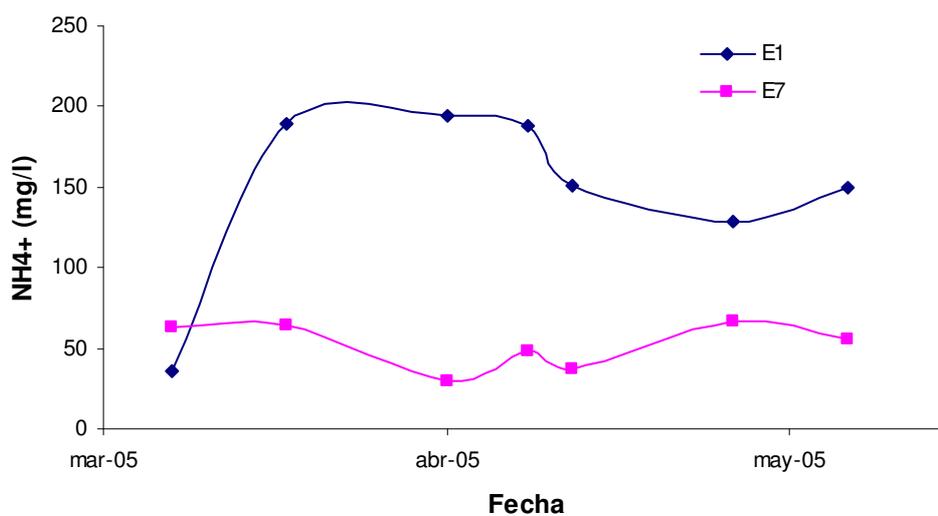


Ilustración 17. Evolución del amonio en la depuradora.

2.5 CONCLUSIONES

De acuerdo con las recomendaciones de la **OMS**⁶, un agua residual destinada al riego no restringido en agricultura debería tener menos de 10^3 coliformes fecales/100 ml y menos de 1 huevo viable de nemátodos intestinales por litro. Luego se amplió recomendándose 0 huevos viables de trematodos por litro. Este sería el caso de riego de cosechas comestibles, campos de deportes y parques públicos. Con estos parámetros se considera que tanto los trabajadores de los campos como los usuarios están suficientemente protegidos, estando en consonancia con los estándares para aguas de baño. El riego restringido se refiere a árboles, forraje, pastos y cultivos industriales (ej: algodón).

En lo que respecta a los coliformes fecales, en 2 de las 10 muestras tomadas durante el período del experimento se alcanzó una concentración de salida de 10^3 UFC/100 ml. Esto nos indica, pues, que el sistema es capaz, en determinadas ocasiones de depurar en un grado tal el agua residual que su efluente podría ser empleado en agricultura, en el caso de que no se encontraran **huevos viables de parásitos**. En este sentido, el Instituto Tecnológico de Canarias (ITC) nos ha facilitado los resultados de sus muestreos en la depuradora durante el mismo período de este experimento; y en ellos se puede apreciar que en los cuatro análisis para la detección de huevo de nemátodos intestinales viables, detectaron menos 0,4 huevos/litro en todos los casos.

Fecha	10/05/05	07/06/05	05/07/05	02/08/05
Huevos nemátodos intest. / litro	< 0,40	< 0,40	< 0,40	< 0,40

Tabla 3. Huevos de nemátodos intestinales en la laguna.

Fuente: Instituto Tecnológico de Canarias

Otras guías internacionales no especifican nada respecto a la presencia de huevos de parásitos intestinales. Este es el caso de los estados de **Estados Unidos**⁷, donde se establecen únicamente valores límites de coliformes (totales o fecales según el caso), pero no para huevos. No obstante sí establecen limitan otros parámetros como turbidez, DBO₅ o total de sólidos en suspensión. Comentar, que en EE.UU. los límites de coliformes en las aguas depuradas son más restrictivos situándose entre 10^1 y 10^2 UFC/100 ml de media, para uso agrícola en cultivos de especies no comestibles (forraje, fibras, semillas, pastos, césped de granjas, etc.).

Siguiendo con el experimento llevado a cabo, los resultados nos muestran que el sistema, tal y como está diseñado actualmente no es capaz de producir en todo momento un agua depurada que cumpla los valores recomendados por la OMS para su uso no restringido en agricultura desde el punto de vista de la presencia de coliformes fecales.

Para poder tener la garantía de alcanzar valores de patógenos en todo momento por debajo de los límites guía de la OMS se debería implementar algún sistema complementario. En este sentido, cabe destacar el trabajo realizado por J. Araña *et al* (2002)⁸ en esta misma laguna en la que se estudiaron distintos **tratamientos terciarios**

⁶ Organización Mundial de la Salud. "Guidelines for the safe use of wastewater and excreta in agriculture and aquaculture". 1989.

⁷ U.S. Environmental Protection Agency (EPA). "Guidelines for water reuse". 2004.

⁸ J. Araña *et al*. "TiO₂-photocatalysis as a tertiary treatment of naturally treated wastewater". Catalysis Today 76 (2002), 279-389.

para el efluente con el fin de aumentar la reducción de distintos parámetros analizados. Entre estos análisis valoraron el efecto de las distintas alternativas sobre los coliformes totales lográndose incluso la total desinfección. De entre todas las alternativas destaca el uso únicamente de luz solar, que junto a la introducción de aire y ozono, logró valores de salida de 10^2 UFC/100 ml; si bien medidas posteriores indicaron una reactivación bacteriana al obtenerse valores de 10^3 UFC/100 ml. Otras alternativas (empleando distintos catalizadores junto con aire y ozono) permitieron alcanzar la total desinfección al no detectarse reactivación microbiana alguna. En cualquier caso es siempre importante la presencia de luz, pues la radiación ultravioleta es muy efectiva en la desinfección de aguas depuradas como indican diversos estudios⁹.

No obstante, la primera alternativa es más interesante. Constituye un sistema terciario sencillo y de relativamente bajo coste, que sigue pues la filosofía del proyecto de la laguna de lograr un sistema de depuración de bajo coste. A priori, los resultados son muy interesantes para este experimento presentado pues permitiría reducir los coliformes totales a los niveles recomendados por la OMS para el riego no restringido en agricultura.

Respecto a los **parámetros físico-químicos** estudiados se pueden destacar varias cosas. Se puede observar cómo la laguna ejerce un efecto destacado de depuración respecto a la DQO, TOC, y sobre todo, DBO y SS. De acuerdo a los resultados obtenidos se obtienen porcentajes de eliminación entre el 66% y 92%. También se aprecia como, ante oscilaciones de gran magnitud en los valores de entrada (variaciones del caudal y concentración del influente) el sistema ejerce un destacado efecto amortiguador que permite obtener un efluente con una composición, al menos en estos parámetros, relativamente constante y estable. Este aspecto es muy interesante si se pretende dar un uso al agua de salida, por ejemplo en agricultura, donde es preferible tener un agua de composición conocida y más o menos constante. De esta manera se logra realizar un riego más eficaz y productivo.

Pero sobre todo, quisiéramos destacar la evolución del amonio, y especialmente de los fosfatos. Desde el punto de vista de la depuración, estos serían dos puntos a mejorar claramente, puesto que la eficacia en ellos está muy lejos de ser la idónea. Sin embargo, desde el punto de vista de la reutilización del agua, es uno de los efectos más positivos del sistema. Como se apuntó, prácticamente estos compuestos pasan por la laguna, sin casi sufrir ninguna reducción, como es el caso de los fosfatos. El interés de esta situación radica en que, mientras que los compuestos que provocan la contaminación (principalmente orgánica) del agua son eliminados en gran medida en la laguna; los nutrientes existentes en el afluente del sistema, se recogen en la salida en concentraciones altas, o incluso en las mismas que en la entrada. Esto permite por tanto mantener un recurso (los nutrientes) que puede ser reutilizado.

Concluyendo, los resultados obtenidos en este estudio indican una gran reducción de bacterias patógenas, pero que no alcanza los valores guía de la OMS para su uso no restringido en agricultura. Así pues, sería interesante estudiar la posibilidad de completar la depuración de la laguna con algún sistema terciario, preferiblemente de bajo coste. Entre las alternativas destaca el empleo de luz solar junto con aire y ozono, que puede permitir alcanzar estos valores guía. En esta línea de investigación se debería estudiar su efecto sobre los coliformes fecales y los enterococos, además de sobre los coliformes fecales ya analizados en otros trabajos.

⁹ A. Hassen *et al.* "UV disinfection of treated wastewater in a large-scale pilot plant and inactivation of selected bacteria in a laboratory UV device". *Bioresource Technology* 74 (2000), 141-150.

Por otra parte, los resultados de los parámetros físico-químicos ofrecen una visión prometedora acerca de la posible reutilización del agua. La presencia de una alta concentración de nutrientes en el efluente del sistema permite plantear aprovechar el agua, para usos principalmente agrícolas, donde la presencia en el agua de compuestos nutritivos para las plantas –tales como fosfatos, nitratos, etc.- puede permitir generar un beneficio económico (se ahorra en fertilizantes y abonos) y ambiental (reciclaje de nutrientes, ahorro energía, impacto estético positivo...). Sería, pues, interesante seguir esta línea de investigación, recopilando más datos sobre la evolución de estos otros parámetros en la laguna (analizando, por ejemplo, otros nutrientes), y estudiar la influencia del efluente en el desarrollo de las plantas. En este sentido, la última parte de este trabajo ofrece una primera impresión acerca de su uso para el cultivo de plantas acuáticas.

3. TECNOLOGÍAS DE OXIDACIÓN AVANZADA COMO MÉTODO DE DESINFECCIÓN TERCIARIO EN SISTEMAS DE DEPURACIÓN NATURAL DE AGUAS RESIDUALES

3.1 INTRODUCCIÓN

Como se ha podido comprobar en el apartado segundo, el sistema de depuración natural ubicado en el campus universitario de Tafira de la ULPGC ha sido capaz de lograr niveles tales de depuración respecto a bacterias indicadoras, que pueden permitir el uso restringido del efluente en la agricultura.

Sin embargo, en la mayoría de los casos los niveles de presencia de bacterias indicadoras de contaminación estuvieron por encima de los límites recogidos por las recomendaciones de la OMS y de la EPA. Por tanto, si bien, el agua sale del sistema con un alto grado de depuración en líneas generales, desde el punto de vista bacteriológico no sería recomendable su uso para riego no restringido en agricultura (cosechas de productos que se consumen sin cocinar, campos deportivos, parques públicos...), aunque sí para riego restringido (cosechas industriales, pastos, árboles, etc.). No obstante, la situación ideal es la obtener un agua con la menor carga contaminante, cuya composición sea lo más parecido a las aguas naturales y potables, y cuyo uso, por tanto, no presente ningún tipo de restricción.

Es aquí donde entran en juego los sistemas de terciarios de depuración. Estos permiten mejorar la calidad de agua efluente hasta que esta alcance su óptimo en función del uso que se le quiera dar. En las grandes estaciones de depuración de aguas residuales de nuestras ciudades es común que existan estos sistemas terciarios, donde destacan el uso de compuestos de cloro, ozono e incluso sistemas de separación por membrana (ej: ósmosis inversa). Sin embargo, nuestro sistema de depuración natural es un sistema de bajo coste, por lo que emplear métodos tan costosos como algunos de los anteriormente citados podrían hacer que no fuera rentable la depuración.

Por tanto se hace necesario, para lograr una calidad de agua óptima para su uso no restringido, el buscar un sistema terciario de depuración que sea sencillo y eficaz, y cuyo coste pueda ser perfectamente asimilado.

3.2 OBJETIVO

El objeto de esta investigación es encontrar un método de depuración terciario acorde con la filosofía de sencillez y coste bajo de nuestro sistema de depuración natural, y que además sea eficaz, o sea, que se alcancen los niveles óptimos de presencia de bacterias indicadoras de contaminación.

Para ello, nos hemos centrado en las consideradas tecnologías de oxidación avanzadas, y hemos comparado distintos métodos y combinaciones de ellos:

- Ozono (O₃)
- Luz Ultravioleta (UV)
- Luz Ultravioleta y Ozono

- Luz Ultravioleta y Dióxido de Titanio (TiO₂)
- Luz Ultravioleta, Ozono, Dióxido de Titanio y Carbón Activo (CA)

Como indicador de la eficacia de los distintos métodos se empleó el recuento de enterococos. Por otra parte, también se midió el carbono orgánico no purgable (NPOC), para conocer el efecto que estos métodos tienen sobre el carbono orgánico presente en las muestras.

3.3 METODOLOGÍA

3.3.1 ANÁLISIS DE BACTERIAS INDICADORAS DE CONTAMINACIÓN

a) Elección de los enterococos como bacterias indicadoras de contaminación

Para medir el efecto de los distintos métodos de desinfección se optó por el recuento de enterococos (ver apartado 2.1.1) como bacteria indicadora de contaminación fecal. Si bien son los coliformes totales y fecales los usualmente elegidos para este cometido en las principales guías de reutilización de aguas depuradas, en la experiencia de medición de la eficiencia depuradora del sistema, pudimos observar como la presencia de enterococos y su variación con el tiempo era similar a la de coliformes.

Esta decisión se apoyó además en que la presencia de este tipo de bacterias en nuestro sistema de depuración natural es alta, siendo fácilmente detectable mediante filtración por membrana. Además, las colonias resultantes son fácilmente distinguibles, lo cual facilita su recuento.

b) Toma de muestras

La mayoría de las muestras recogidas pertenecen al sistema de depuración natural, donde se tomaron muestras a la entrada (E1) y a la salida del sistema (E7). No obstante, la escasez de agua existente a la llegada del verano, obligó a que las muestras del 18 de mayo de 2006 (UV+O₃) fuesen tomadas de los puntos E2 y E3 (antes y después del primer filtro de gravas). Por la misma razón, las muestras tomadas después del verano - una última perteneciente al método UV+O₃ y las de los métodos con UV únicamente y UV+TiO₂- fueron tomadas en la Estación Depuradora de Aguas Residuales de Las Palmas de Gran Canaria situada en Barranco Seco, gestionada por Emalsa.

Las muestras tomadas en Emalsa, fueron únicamente del punto del sistema anterior a la desinfección en el terciario. Aunque el sistema ya no es el mismo, el agua de este punto de la EDAR correspondería con la E7 del sistema natural, y por lo tanto, mantenía una suficiente población de enterococos que permitía continuar la investigación.

Por tanto, en la etapa en la que se empleó muestras de agua de Emalsa, el trabajo únicamente se centró en la evaluación de los sistemas de desinfección, midiéndose la presencia de bacterias antes, durante y después de realizar la desinfección en el laboratorio.

FECHA	MÉTODO	ORIGEN	MUESTRAS
29/12/2005 a 26/1/2006	O3	Sistema Natural	4
31/01/2006 a 15/02/2006	O3+TiO2+CA+UV	Sistema Natural	5
07/03/2006 a 27/03/2006	O3+UV	Sistema Natural	3
30/10/2006	UV	Emalsa	2
03/11/2006	UV+TiO2	Emalsa	2

Tabla 4. Listado de muestras analizadas

c) Métodos de desinfección

Las medidas de enterococos se realizaron a la entrada del sistema (E1), cuando se tenían muestras, y a la salida (E7) del mismo. De esta manera se procedía de nuevo a obtener datos nuevos relativos a la eficacia global del sistema respecto a la eliminación de bacterias patógenas.

Para valorar el efecto de los distintos métodos de oxidación avanzada (o desinfección), se midió la presencia de enterococos antes del inicio de la desinfección (tiempo cero, $t=0$; que corresponde con el resultado de la E7), a los quince minutos ($t=15$), a los treinta minutos ($t=30$) y a los cuarenta y cinco ($t=45$) o sesenta ($t=60$) minutos, según fuese la evolución de la muestra.



Ilustración 18. Desinfección con $O_3+TiO_2+CA+UV$

Un volumen de muestra aproximado de 250 ml era vertido en un reactor de vidrio y mantenido en continua agitación, mientras duraba el experimento correspondiente de desinfección.

A continuación se analizan cada uno de los componentes de cada método de oxidación:

Ozono (O_3)

El ozono es un fuerte oxidante que es empleado por ello para la desinfección en diversas aplicaciones e industrias.

Para la generación de ozono se empleó un ozonizador de laboratorio. El caudal aproximado de ozono fue de **6,36 mg O₃/l** (alrededor de 1,68 mg O₃/min).

Ultravioleta (UV)

La radiación UV, por ser un tipo de radiación ionizante, posee una alta capacidad desinfectante. Esta se debe a que la radiación UV atraviesa la membrana de las bacterias alterando su ADN, lo que provoca la muerte de las mismas.

En los experimentos se emplearon **lámparas UV de Philips, modelo HB 175**, formada por cuatro tubos Philips Cleo de 15 W, que presentan una radiación UV muy concentrada en el rango 300-400 nm (máximo centrado en 365 nm). El tiempo de aplicación de la radiación fue de 45 minutos o de 60 minutos, según la muestra empleada.

Dióxido de Titanio (TiO₂)

Es, quizás, el catalizador más empleado en fotocatalisis. Su importancia radica en que bajo radiación suficientemente energética, genera radicales altamente oxidantes capaces de mineralizar contaminantes, o de al menos transformarlos en productos biodegradables. Si se emplea radiación natural UV, junto con la baja toxicidad del TiO₂, hacen que la descontaminación por fotocatalisis sea un ejemplo de química verde.

La concentración de este catalizador en las muestras en las que se añadió fue de **0,5 g/l Degussa P-25**, por muestra.

Carbón Activado (CA)

El carbón activado es un preparado artificial de carbón que presenta una gran porosidad, y por tanto una muy alta superficie interna. Estas características le confieren una alta capacidad de adsorción, que es la razón de su empleo en depuración. Su alta versatilidad, al ser capaz de adsorber una alta variedad de sustancias, hace de la filtración con carbón activado uno de los sistemas más empleados en depuración.

En las muestras en las cuales se añadió carbón activado, la concentración fue de **0,035 g/l** por muestra.

d) Metodología de análisis e interpretación de resultados

La metodología empleada para la detección de las bacterias es, como se ha comentado, el **método de filtración por membrana**.

Para el cultivo de los enterococos se empleó el agar **Slantez-Bartley**, y se actuó de la misma manera explicada en el apartado 2.3.1. La presencia de bacterias se midió a la entrada del sistema de depuración natural, a la salida de mismo, durante la aplicación del método de desinfección y al finalizar el mismo. Los resultados se contabilizan como unidades formadoras de colonias (UFC) por cada 100 ml de muestra, tal y como también se explicó en el apartado 2.3.1.

3.3.2 ANÁLISIS DEL CARBONO ORGÁNICO NO PURGABLE (NPOC)

Para conocer la presencia de carbono orgánico en el agua y cómo se podría ver afectada por la aplicación de los distintos métodos de desinfección, esta se midió como carbono orgánico no purgable (NPOC, en su siglas en inglés).

El agua puede contener carbono tanto en formas orgánicas como inorgánicas. El método de medición del **NPOC** permite eliminar aquellas formas inorgánicas, así como las orgánicas volátiles, de manera que sólo queda en la muestra el carbono orgánico no purgable.

Para medir el NPOC, cada muestra fue primero acidificada y sometida a aireación durante 15 minutos. Posteriormente cada una de ellas fue analizada como carbono total en un analizador **TOC-V-CSN de la marca Shimadzu**.

La medición de NPOC sólo se realizó para las muestras tomadas en el sistema de depuración natural, concretamente a las 13 realizadas entre los días 16 de enero y 27 de marzo de 2006, incluidos.



Ilustración 19. Purgado de muestras para calcular el NPOC

3.4 RESULTADOS

Los datos recogidos fueron tratados para generar las gráficas resultantes que se muestran a continuación y que resumen la eficiencia de los distintos métodos analizados. En primer lugar se eliminaron de los análisis datos considerados *outliers*, esto es, valores atípicos que distan mucho del resto de datos probablemente debidos a alteraciones en el agua de muestra o en el tratamiento de las muestras. La detección de estos *outliers* se realizó mediante la aplicación de análisis de varianza (ANOVA), del que se hablará más adelante. Se calcularon los valores medios de todos los datos para cada método de desinfección y posteriormente se calculó la línea de regresión exponencial correspondiente. Ello nos permitió obtener constantes de cinética de primer orden (modelo de Chick), de utilidad para comparar los distintos métodos. El error típico fue calculado como desviación estándar.

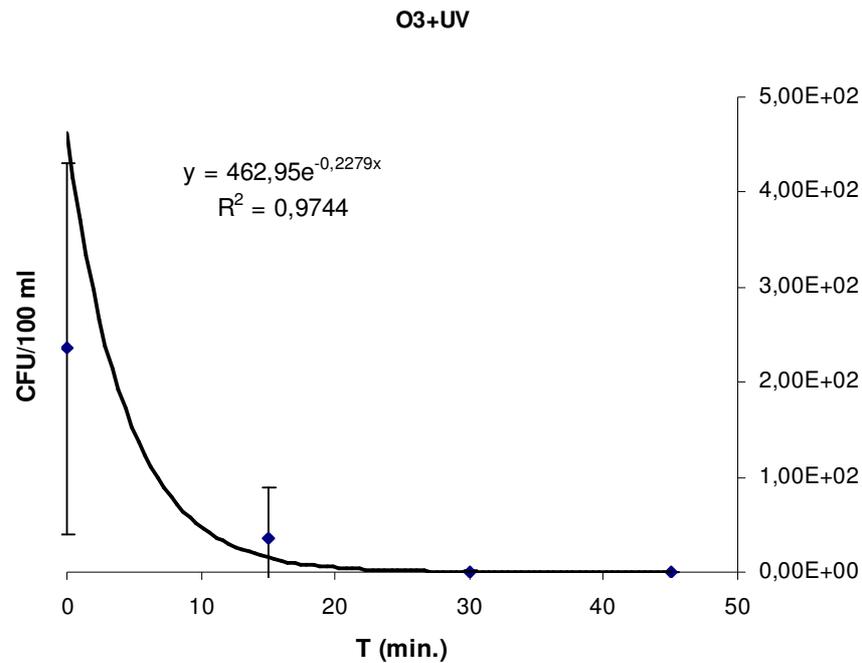


Ilustración 20. Desinfección con O₃+UV

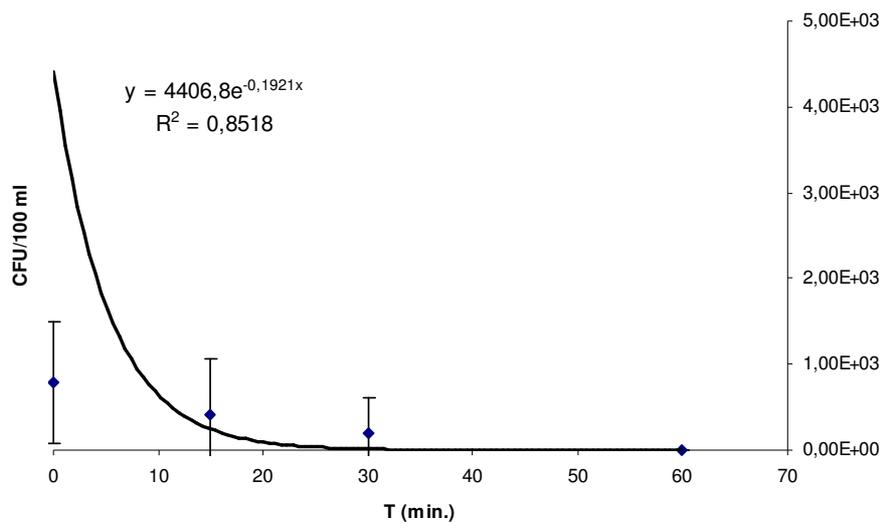
Una **visión conjunta** de todos los métodos de desinfección empleados nos muestra que estos sistemas terciarios pueden lograr una reducción media de bacterias patógenas (en este caso representadas por los enterococos) del **88,22%**. Si bien es bastante más bajo que el 99,51% de media de eficiencia del sistema natural (comparando la presencia entre los puntos E1 y E7), el resultado es bastante alentador ya que la concentración resultante se sitúa en torno a **3x10² UFC/100 ml**; una concentración bastante aceptable tal y como se valorará en las conclusiones. Sólo en uno de los casos, se detectó una concentración final superior a 10³ UFC/100ml.

Los resultados mostraban valores muy distintos. Para poder afirmar objetivamente que entre los métodos existían diferencias significativas, se llevó a cabo un análisis de varianza (**ANOVA**, de una vía) mediante el programa informático SPSS, para un intervalo de confianza del 95%, sobre las constantes de cinética. Este se aplicó únicamente a los métodos con **O₃**, **O₃+TiO₂+CA+UV** y **O₃+UV**, en los que se analizó agua procedente del sistema de depuración natural. Los parámetros obtenidos fueron:

	Suma de Cuadrados	Grados de libertad (gl)	Media cuadrática	F	Significancia
Inter-grupos	19,706	2	9,853	15,901	0,001
Intra-grupos	5,577	9	0,620		
Total	25,283				

Tabla 5. Resultados de la ANOVA

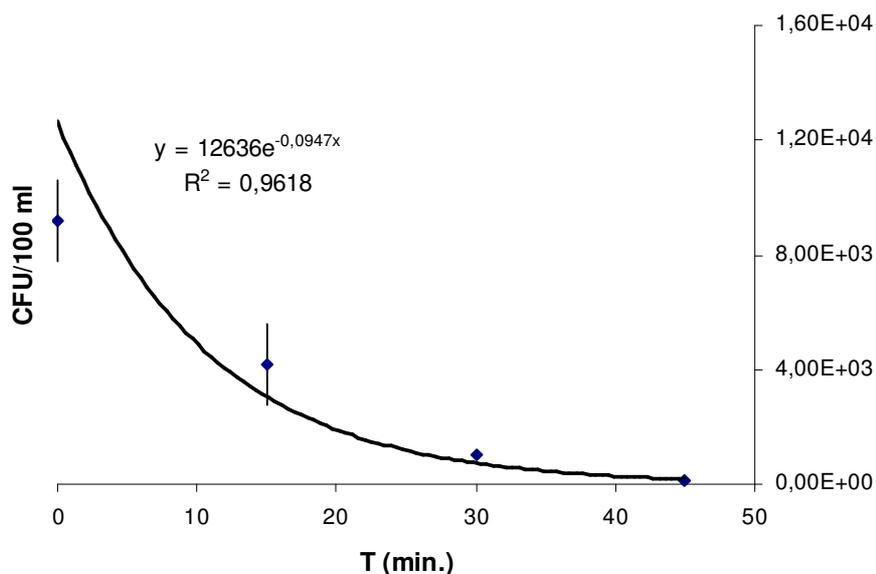
O3

Ilustración 21. Desinfección con O₃

Dado que la significancia es $p < 0,05$, se rechaza la hipótesis nula (que dice que no existen diferencias significativas entre las medias, las medias son iguales) y **se puede afirmar que existen diferencias significativas entre las medias de los tres métodos**, más allá de posibles casualidades.

Ante este resultado se procedió a realizar un **Test de Bonferroni**, para realizar comparaciones múltiples de todas las medias entre sí. El análisis de este test reveló que la **mayor diferencia** se observaba entre los métodos **O₃** y **O₃+TiO₂+CA+UV**; siendo, sin embargo **muy similares**, las medias de **O₃** y **O₃+UV**.

UV+TiO2

Ilustración 22. Desinfección con UV+TiO₂

Ya conociendo que existen diferencias significativas entre los métodos, la valoración de la constante cinética nos permitía determinar cuál de ellos era el más eficaz. De ello resultó que el método del **O₃+UV** ($k = -0,228 \text{ min}^{-1}$) **fue el más eficaz**, aunque sólo un poco más que el método con sólo O₃ ($k = -0,192 \text{ min}^{-1}$). Destacó sobre manera el método más complejo de O₃+TiO₂+CA+UV por ser el que presentó la más baja constante de desinfección ($k = -0,018 \text{ min}^{-1}$). De la misma manera, el método con sólo UV ofreció una baja eficacia ($k = -0,073 \text{ min}^{-1}$), que sin embargo se ve mejorada cuando se presenta la combinación UV+TiO₂ ($k = -0,095 \text{ min}^{-1}$).

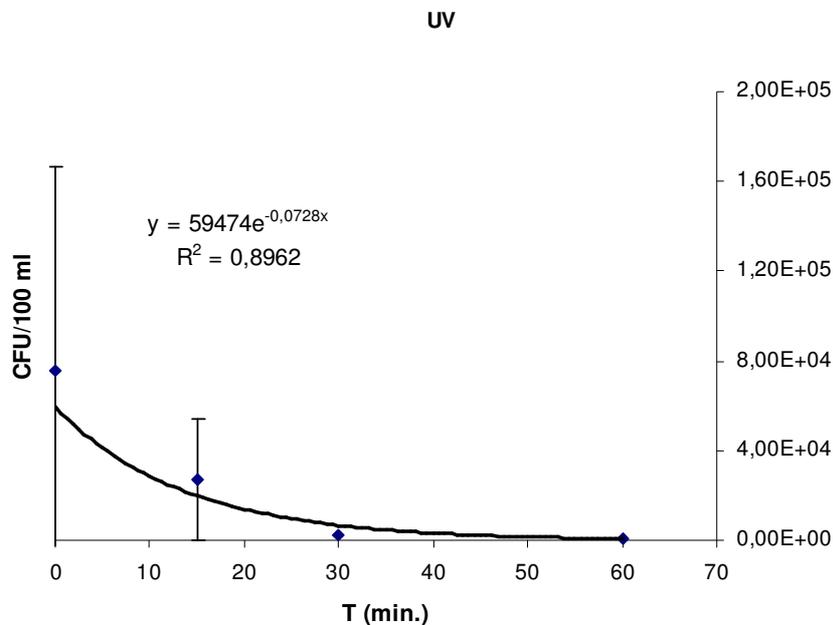


Ilustración 23. Desinfección con UV

Por otra parte los métodos **O₃** y **O₃+UV** fueron los únicos que tuvieron una **eficacia global de desinfección del 100% de enterococos**, seguido del UV+TiO₂ (con 98,53%), UV (con 89,43%) y O₃+TiO₂+CA+UV (con 53,12%).

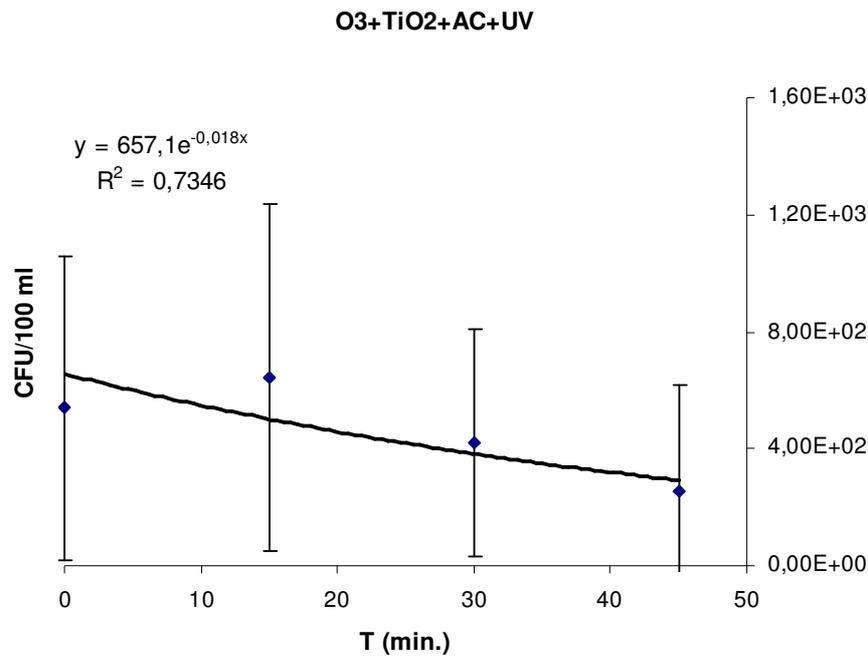


Ilustración 24. Desinfección con O₃+TiO₂+CA+UV

El **NPOC** fue igualmente determinado sólo en los métodos aplicados a las muestras que procedían del sistema natural (O₃, O₃+TiO₂+CA+UV y O₃+UV). A diferencia de lo ocurrido al evaluar la eliminación de enterococos, la mineralización (en este caso como reducción del carbono orgánico no purgable) durante la aplicación de esos tres métodos fue muy variable, no pudiéndose calcular rectas de ajuste que representase fielmente la evolución de este parámetro. Sorprendentemente, en este caso el método **O₃+TiO₂+CA+UV** fue el que mejor resultado dio, logrando una **reducción del 47,26%**, muy por encima de los otros métodos (O₃+UV = 13,25%; O₃ = 8,05%).

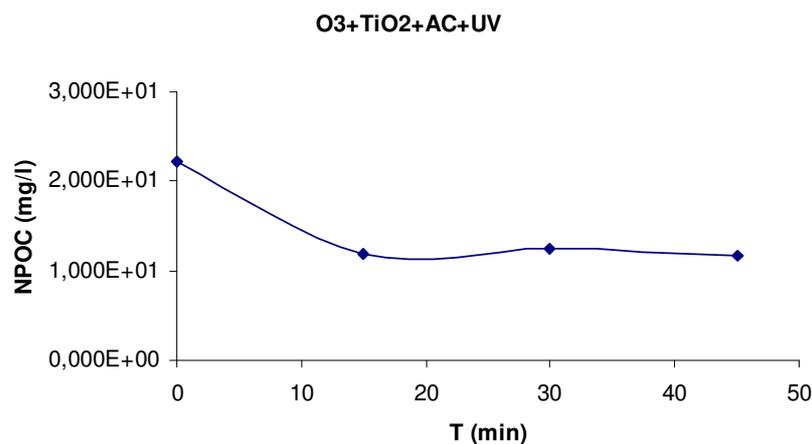


Ilustración 25. Reducción de NPOC con O₃+TiO₂+CA+UV

3.5 CONCLUSIONES

Los métodos de oxidación avanzados pueden contribuir a mejorar la calidad del agua efluente de un sistema de depuración natural, en lo referente a su desinfección.

La investigación realizada concluye que, de manera global, son capaces de reducir la presencia de enterococos hasta niveles aceptables. Como se ha comentado en el apartado 2.5, la **OMS**¹⁰ establece un límite de hasta 10^3 UFC de coliformes fecales/100 ml para poder realizar un uso no restringido de un agua depurada en agricultura. Si, tal y como se ha descrito en este trabajo, la presencia de coliformes y enterococos en el sistema es similar, podremos presuponer que el efluente del sistema, posteriormente sometido a desinfección, puede ser empleado en los usos sin restricciones dado que la presencia media de enterococos se estima en 10^2 UFC/100 ml de media. No obstante, dado que en general los límites son más restrictivos en la guía de la **EPA**¹¹ (los valores varían entre los estados), aún con este nivel de bacterias no se podría utilizar esta agua sin restricciones para usos urbanos, y en el caso de la agricultura sólo en unos pocos estados.

Sin embargo estas limitaciones desaparecen dependiendo de qué método se emplee finalmente. De acuerdo con los resultados obtenidos, una desinfección combinada de **O₃+UV** es el mejor tratamiento terciario para nuestro sistema natural, pues es el que logra una **mayor eficacia** en eliminación de bacterias respecto al tiempo, logrando además una **desinfección del 100%** al final del tratamiento. A este método le siguen respectivamente el O₃ y UV+TiO₂.

En lo referido a la eliminación de **carbono orgánico**, los resultados tan dispares de NPOC obtenidos, no reflejan claramente un efecto similar que el obtenido con las bacterias. Con lo cual, no podemos asegurar que estas técnicas avanzadas contribuyan a eliminar el carbono orgánico de aguas residuales.

De los resultados, sorprende que el tratamiento combinado **O₃+TiO₂+CA+UV** fuera precisamente el que pero resultados de desinfección dio (excepto en eliminación del NPOC). Aunque la explicación requeriría de un estudio en profundidad, cabe suponer que la acción oxidante de cada uno de estos “*productos*” sea entorpecida entre sí, ya sea debido a reacciones entre ellos que reduzcan su potencial de acción, quizás unido a que el aumento de turbidez que producen al ser añadidos a las muestras entorpezca además la acción de la luz UV.

Por todo ello, **podemos concluir** que las tecnologías de oxidación avanzada, combinadas con un tratamiento previo con un sistema de depuración natural, pueden emplearse para la desinfección de aguas residuales. Además, el análisis comparativo entre varios de estas tecnologías, sugieren que el método más eficaz para esta labor es la combinación de **O₃+UV**. Sin embargo, respecto a la eliminación de carbono orgánico, no está tan clara la eficacia de estos métodos.

¹⁰ Organización Mundial de la Salud. “Guidelines for the safe use of wastewater and excreta in agriculture and aquaculture”. 1989.

¹¹ U.S. Environmental Protection Agency (EPA). “Guidelines for water reuse”. 2004.

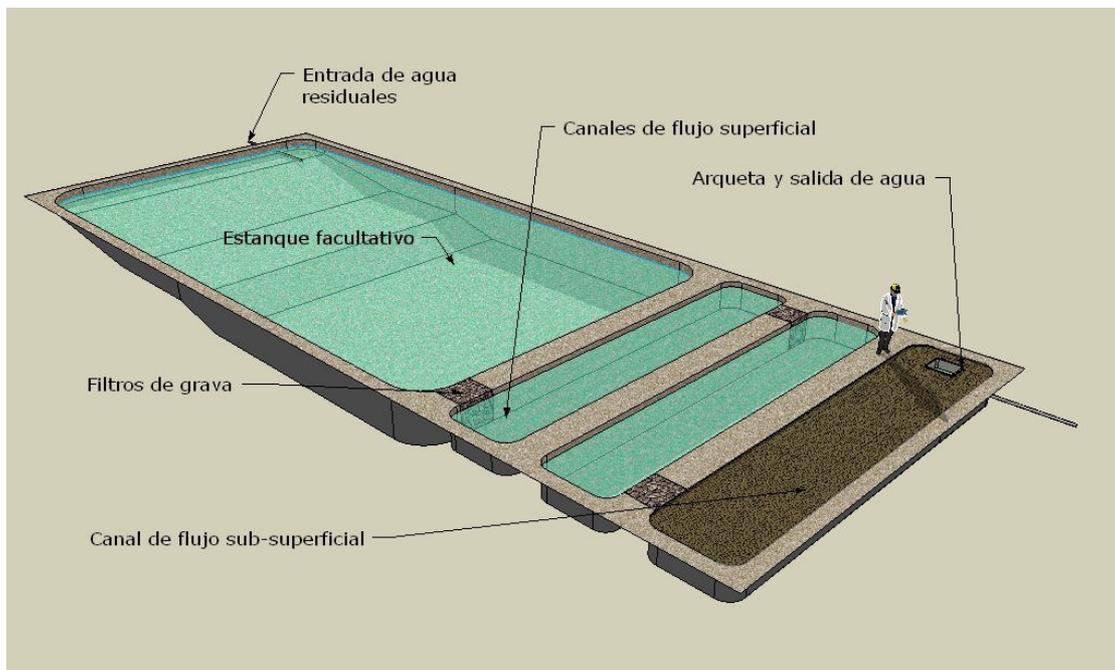


Ilustración 26. Esquema del sistema de depuración natural combinado de laguna-humedales
Fuente: José A. Rexachs González

Ante los resultados obtenidos se hace interesante indagar más en el uso de estas tecnologías para la desinfección de aguas residuales. Por ello la investigación debería encaminarse a analizar una mayor cantidad de muestras, e incluso aplicándose nuevos métodos para comparar. A pesar de que los enterococos son un buen indicador de contaminación fecal, la medición de coliformes fecales y totales permitiría contar con más datos de desinfección que enriquecerían la investigación. Por otro lado, la incógnita de la escasa eliminación de carbono orgánico suscita interrogantes que podrían suponer una nueva línea de investigación. Finalmente, los resultados que se pudieran obtener podrían desembocar en la aplicación real del método más apropiado al sistema de depuración natural, con el objetivo de diseñar un sistema de depuración de bajo coste pero de alta eficacia que permitiese el aprovechamiento del efluente.

4. APLICACIÓN DEL EFLUENTE DE LA LAGUNA DE DEPURACIÓN NATURAL AL CULTIVO DE *Vallisneria americana* var. *gigantea*

4.1 INTRODUCCIÓN

El objetivo final de cualquier sistema de depuración es cerrar el ciclo del agua reintroduciendo el agua ya depurada en el medio. No obstante, la forma de llevarlo a cabo dependerá del grado de calidad que tenga el agua.

Si el agua resultante de la depuración es de alta calidad, es común su empleo como agua potable pero no destinada a su ingestión (por motivos de seguridad sanitaria, a día de hoy no se permite emplear agua depurada para beber), como por ejemplo: para regar determinados cultivos de alimentos que se consumen sin procesar, para usos urbanos en los que hay contacto frecuente con personas (fuentes, riego de parques y campos de deportes, limpieza de patios de escuelas...), fabricación de nieve artificial... A medida que va siendo menor la calidad del agua, sus usos van siendo más restringidos. En general, podemos decir que se van empleando en actividades donde cada vez va siendo menor el contacto con las personas. Uno ejemplo claro es el caso de la agricultura, con menor calidad, el agua se puede usar para regar cultivos de alimentos que deben ser procesados antes de ingerirse; luego para regar forraje y pastos; y finalmente para regar zonas verdes no agrícolas y donde el contacto agua-personas es poco o nada frecuente.

Las aguas de peor calidad también son empleadas para la limpieza urbana, de vehículos, en la construcción, e incluso para inyección en acuíferos donde el tiempo de residencia sea lo suficientemente largo para que el agua finalice su depuración de manera natural.

Así pues, prácticamente todas las aguas residuales tienen algún uso directo distinto al de cerrar el ciclo del agua que dependerá de la calidad de la misma.



Ilustración 27. *Vallisneria americana* var. *gigantea*

4.2 OBJETIVO

Esta otra parte de la investigación tuvo como finalidad estudiar las posibilidades de aprovechamiento del efluente del sistema de depuración natural directamente, sin someterla a ningún tratamiento terciario. Más concretamente, el objetivo era comprobar la posibilidad de emplear el agua del efluente para cultivar una especie de planta acuática conocida como *Vallisneria gigantea* (*Vallisneria americana* var. *gigantea*).

La elección de esta especie se debió a diversas razones. Por un lado, y de acuerdo con las informaciones previas con las que contaba, desde el punto de vista biológico es una especie que se adapta bien al experimento, pues es una planta típica de acuario, su cultivo es muy sencillo y requiere de pocos cuidados, en condiciones normales tiene un rápido crecimiento y se adapta bien a diversas condiciones del agua. Por otra

parte, es una planta con un gran interés comercial, ya que se trata, como se ha comentado, de una planta típica de acuarios empleada para crear refugios y sombra para aquellos peces menos “sociables” o que requieren cierta protección.

La posibilidad de que esta experiencia pudiera resultar viable estaba basada en los numerosos estudios acerca del empleo de agua depurada en la agricultura. Entre los compuestos que se encuentran en las aguas depuradas se encuentran fosfatos y nitratos que son fuente de nutrientes para los cultivos. Una gestión adecuada del riego con aguas depuradas permite reducir de forma apreciable la necesidad de emplear abonos nitrogenados y fosfatados con el consiguiente ahorro económico. El éxito de este experimento permitiría reciclar el agua, y en concreto parte de los nutrientes que guarda, lo que es muy interesante en ecosistemas como el canario donde el agua es escasa; y sin contar con el interés económico que tendría.

Sabíamos que la Vallisneria no requería de condiciones muy específicas del agua para sobrevivir, por lo que cabía esperar que pudiera adaptarse a las condiciones del agua depurada; y esa fue una de las dudas que intentábamos resolver. La otra pregunta que surgió fue si con el aporte extra de nutrientes contenido en el agua depurada se podía potenciar el crecimiento de la planta, ya sea aumentando su velocidad y/o aumentando su tamaño.

En esta experiencia también se tenía un segundo objetivo. Dado que las plantas son un elemento activo muy importante en muchos sistemas de depuración natural, otra apuesta era también descubrir si esta planta ejercería también un efecto depurativo sobre el agua, al retirar nutrientes del agua para su crecimiento. Para ello se tomaría datos de nitrógeno, carbono, sulfatos y fosfatos, principales fuentes de nutrientes de las plantas.

Quisiera destacar, que este experimento ha sido un primer acercamiento en esta línea de investigación, pues el primer problema que surgió fue la falta de datos concretos acerca del metabolismo y la fisiología de la planta, sobre todo en relación con sus necesidades de oxígeno en el agua, su velocidad de crecimiento o sus requerimientos nutricionales o de luz; encontrando únicamente información relativa a condiciones generales para su cultivo en acuario. Este fue un obstáculo que estuvo presente durante toda la experiencia.

4.3 METODOLOGÍA

El experimento se desarrolló entre el 1 de febrero y el 15 de abril de 2005, y pasó por diferentes fases en función de las necesidades que fueron surgiendo.

1ª Fase: Acuarios en condiciones de interior.

Debido a que es una planta típica de acuario, la primera fase del experimento se realizó en acuarios situados en el interior del laboratorio en condiciones normales de interior.

Se dispusieron para esta experiencia 6 acuarios rectangulares de plástico transparente de un volumen aproximado de 25 litros. La idea era comprobar el comportamiento de la Vallisneria a diferentes concentraciones de agua depurada de la laguna. Así, se prepararon diferentes combinaciones de agua del grifo y depurada:

- Acuario 1 = 100% de agua del grifo;
- Acuario 2 = 75% de agua del grifo + 25% de agua depurada;
- Acuario 3 = 50% de agua del grifo + 50% de agua depurada;
- Acuario 4 = 25% de agua del grifo + 75% de agua depurada;
- Acuario 5 = 100% de agua depurada



Ilustración 28. Acuarios de interior con las bombas de agua.

El 6º acuario se llenó con 100% de agua depurada, pero sin plantas para que sirviera de control. En total, cada acuario contenía 20 litros de líquido. El sustrato empleado para cultivar las plantas fue picón, que cubría unos 10 cm el fondo de cada acuario.

2ª Fase: Primeras pruebas en exterior.

Ya algo avanzada la primera fase, se dispuso tomar datos del comportamiento de las plantas con condiciones reales externas, buscando comprobar similitudes y diferencias en el crecimiento con las plantas de interior.

Así pues, se procedió a establecer un acuario de unos 60 litros en la azotea del laboratorio, en un lugar abierto pero sombreado, para evitar que un exceso de luz solar afectara a las plantas y volvieran sus hojas marrones, un color que reduce el valor comercial de estas plantas. Las plantas se colocaron en 5 macetas con sustrato sumergidas en el acuario. De igual modo, otras 5 macetas con sustrato (también picón) fueron sumergidas directamente en el punto E6 de la depuradora; lo que sería la primera experiencia *in situ*.

3ª Fase: Acuarios en el exterior.

En la última etapa todo el experimento se trasladó a la azotea. En este momento se prescindió del acuario 6º de control, quedándonos con 5 acuarios. Todos los acuarios contenían 20 litros, excepto los acuarios 1 (100% agua del grifo) y 5 (100% agua depurada) que eran de 60 litros.

Esta vez todas las plantas fueron plantadas en macetas individuales que fueron sumergidas en sus respectivos acuarios.

Se localizaron siempre en lugar de sombra, y se taparon para evitar una penetración excesiva de luz (que ya entraba por los laterales transparentes de los acuarios, excepto en los acuarios de 60 litros que eran opacos, por lo se emplearon tapas transparentes); y que permitía reducir la evaporación de líquido.

4.4 RESULTADOS

Como se apuntó anteriormente, un obstáculo que acompañó a toda la experiencia fue el desconocimiento del metabolismo y la fisiología de *Vallisneria*, contando únicamente con datos muy genéricos acerca de las condiciones idóneas para su cultivo.

En un primer momento se pensó en tomar varios tipos de datos: temperatura, conductividad, oxígeno disuelto, pH, TN (nitrógeno total), NPOC (carbono orgánico no purgable), sulfatos y fosfatos. Sin embargo, en pocos días se comprobó que existía un agente limitante muy claro para el crecimiento de las plantas, y que antes de poder realizar las medidas sobre los nutrientes del agua deberíamos garantizar una evolución positiva de las plantas: el **oxígeno**.

Por otra parte, además, surgieron nuevos problemas. Al procurar que el experimento fuera lo más cercano a la realidad, se empleó directamente el agua depurada sin filtrar, sin contar con la cantidad de microorganismos que traería. En pocos días también, caracolillos, larvas de mosquitos y otros microorganismos se desarrollaron rápidamente. El acuario más afectado fue en número 3, seguido del 2 y el 1 -donde los caracolillos comenzaban a alimentarse de las hojas de las plantas-.

Pasados unos 15 días desde el comienzo del experimento, se comenzó a apreciar un considerable desarrollo de **microalgas**, principalmente en los acuarios 3, 4, 5 y 6. En el acuario 5, era tal la cantidad de microalgas que cubrían la superficie y las paredes del acuario, que no se podía apreciar el fondo. En los acuarios 4 y 5, las plantas que parecían haber desaparecido consumidas por los microorganismos y degradadas por la hipoxia, parecían permanecer vivas tras haber reducido el tamaño de las hojas considerablemente, en lo que parece un mecanismo de supervivencia. Las concentraciones de oxígeno disuelto, que habían disminuido drásticamente en los primeros días parecían comenzar a subir, tal vez debido a la producción de oxígeno por parte de la elevada masa de microalgas.



Ilustración 29. Plantas del acuario 2 de interior al comienzo del estudio



Ilustración 30. Plantas del acuario 2 tras ser retiradas mes y medio después.

Ante esta situación se procedió a instalar bombas de agua sumergidas en todos los acuarios. La razón principal era la oxigenación del agua, de modo que se pudieran mantener valores altos de oxigenación tras la etapa de eutrofización sufrida. Además, al ser una bomba de agua, se crearía un flujo que imitaría el flujo de agua en la depuradora. Otra de las actividades que se comenzó a realizar fue un control de microalgas, eliminándolas de forma manual periódicamente, así como también de larvas de mosquito.

Los mosquitos se desarrollaron fundamentalmente en los acuarios 5 y 6, en gran medida por la elevada cantidad de nutrientes y restos desprendidos de las Vallisnerias por su degradación por la hipoxia. Aunque a los 20 días del proyecto comenzaron a salir del agua, el flujo continuo de agua creado por las bombas hizo más difícil el crecimiento de una segunda generación, por la necesidad de aguas calmadas para el desarrollo de las larvas.

Un efecto importante que se apreció fue la evaporación del agua. La pérdida de líquido suponía dos problemas. Por un lado, al bajar el nivel del agua las plantas tenían problemas para desarrollar sus largas hojas (que pueden llegar a alcanzar los 3 metros de longitud); y por otro, se produce un aumento de las concentraciones en el agua. Para solventar esta situación, se procedió a mitad de la experiencia a recuperar el nivel del agua original para lo que se añadió agua destilada. De esta manera, se recuperaba el líquido faltante, sin añadir nutrientes y otros compuestos que alteran la composición y las concentraciones reales.

Llegada la mitad del tiempo del experimento, se procedió a estudiar las reacciones de las plantas ante **condiciones reales fuera de laboratorio**. Para empezar, se cultivaron 5 macetas con plantas en el punto E6 del sistema de depuración y otras 5 con

agua del grifo en la azotea del laboratorio, en un lugar sombreado que evitara una excesiva evaporación y que la radiación directa dañara las plantas.

Esta fase duró poco tiempo, unas dos semanas, debido a que las plantas de la depuradora se degradaron totalmente y se perdieron. Las razones fueron posiblemente dos: la falta de oxígeno y la escasez radiación. El punto E6 del sistema, dado que no ha pasado por el canal de flujo subsuperficial, presenta un color mucho más oscuro que el de la E7, que hace imposible ver más allá de unos pocos centímetros de profundidad, impidiendo que la luz solar penetre en el agua. Por su parte, la elevada concentración aún de materia orgánica en este punto consume la mayor parte del oxígeno disuelto del agua restándole este recurso a las plantas. Una tercera razón también puede ser la gran cantidad de microorganismos que posiblemente se alimentaron de las hojas verdes de las Vallisnerias durante el tiempo que permanecieron en la laguna. Así pues, no se pudieron tomar suficientes datos en esta fase.

Mes y medio después de comenzar la experiencia se procedió a **extraerse** de los acuarios del laboratorio todas las plantas tras percibirse que las que ocupaban los acuarios 4 (75% de agua depurada) y 5 (100% de agua depurada) se habían degradado completamente quedando únicamente restos muertos de las hojas. Como se puede comprobar en la ilustración siguiente, de las plantas que quedaron, únicamente los de los acuarios 1 y 2 crecieron, mientras que las del acuario 3 (50% de agua depurada) disminuyeron su masa.

Porcentaje de variación de la masa de las plantas de acuario Enero a marzo de 2005

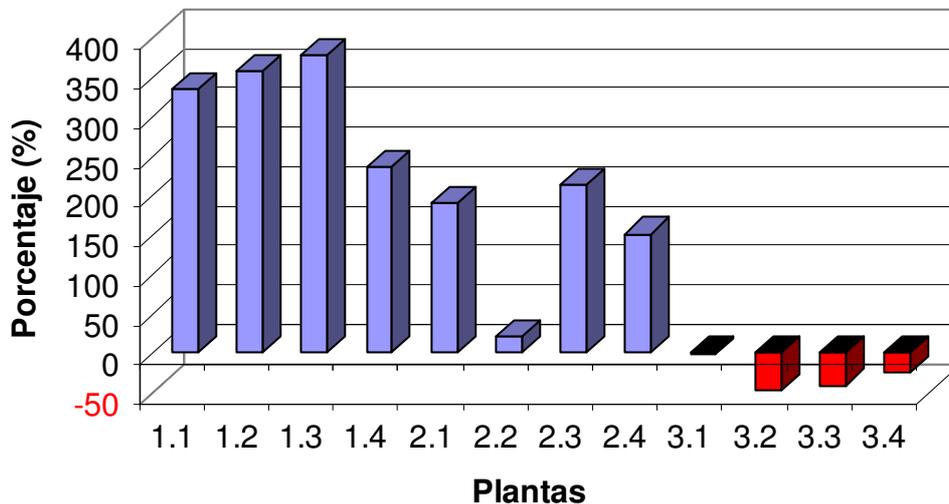


Ilustración 31. Porcentaje de variación de la masa de las plantas de los acuarios de interior.

La principal causa de estos resultados, como se ha apuntado en varias ocasiones ha sido el déficit de oxígeno. En la gráfica correspondiente se puede ver dos tendencias generales. Mientras que para el acuario 1 los niveles de oxígeno se mantuvieron relativamente constantes y altos (en torno a 8,7 mg/l de O₂), el resto de los acuarios sufrieron un pronunciado descenso que duró aproximadamente 10 días. A continuación sufrió un ascenso igual de pronunciado, que tras una pequeña oscilación (posterior a la introducción de bombas de agua en los acuarios) se mantiene más o menos constante.

Cabe destacar la evolución del acuario 2. Al igual que el resto que contenía agua depurada, la concentración de oxígeno disuelto comienza disminuyendo, pero a los pocos días repunta hasta alcanzar 15 días después el mismo nivel de oxígeno disuelto que el acuario 1, e incluso acabando el experimento con un valor también ligeramente mayor.

La conductividad en todos los acuarios se mantuvo siempre constante, incluso en la relación entre las de los distintos acuarios. La única oscilación notable registrada se produjo al suplir el agua evaporada con agua destilada, lo que produjo un descenso en la conductividad. En general, se cumplió que a mayor porcentaje de agua depurada, la conductividad era mayor, y esta siempre siguió una tendencia ligeramente ascendente (salvo el momento anteriormente citado). Sin tantas variaciones con en el caso del oxígeno, es destacar dos situaciones. En primer lugar, llama la atención, como el acuario 6 (100% de agua depurada pero sin plantas) se sitúa en unos niveles entre los acuario 2 y 4, cuando quizás su sitio estuviese junto al acuario 5. Y en segundo lugar, como los acuarios 3, 4 y 5 tienen unos niveles muy cercanos entre sí, a pesar que entre los demás acuarios se mantienen unos 0,25 mS/cm (principalmente a partir de la mitad del experimento).

Oxígeno disuelto en los acuarios de interior Febrero-marzo de 2005

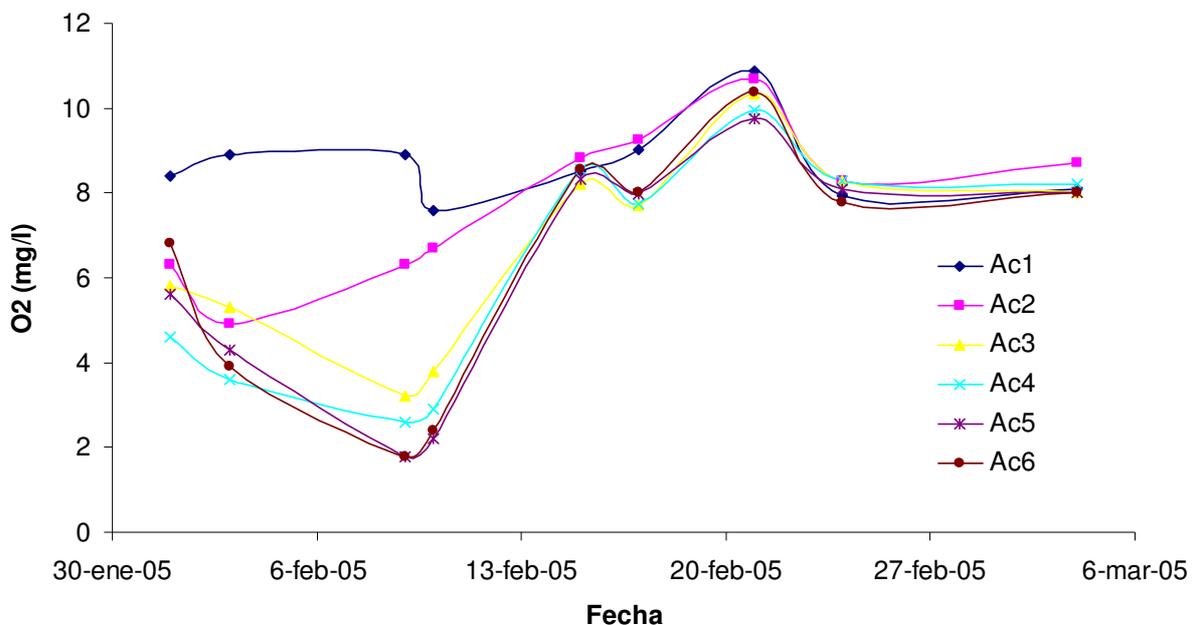


Ilustración 32. Oxígeno disuelto en los acuario de interior. *Nota: el día 16/02/05 se introducen bombas de agua, el 22/02/05 se limpiaron los acuarios y el 24/02/05 se añadió agua destilada a los acuarios para recuperar el agua perdida por la evaporación.*

Otro de los objetivos de este experimento era conocer si la presencia de las plantas en el agua depurada ejercía alguna acción depurativa en el agua. Dado que surgió el problema del déficit de oxígeno, no se pudieron realizar medidas para estudiar algo más esta suposición. No obstante, analizando comparativamente la conductividad entre los acuarios 5 (100% de agua depurada con plantas) y 6 (100% de agua depurada sin plantas), se puede observar lo indicado arriba: la conductividad en el acuario con plantas es superior a la del que no las tiene.

La tercera fase a pesar de que se inició no pudo completarse. Sin embargo aportó algunos datos. En primer lugar, el desarrollo de las plantas fue similar al de las plantas en el interior del laboratorio, registrándose crecimientos destacables en los acuarios 1 y 2, mientras que en el resto las plantas tendían a degradarse. A diferencia de las plantas del interior, el **exceso de luz** provocó que aquellos individuos que iban sobreviviendo tornaran sus hojas a un color totalmente marrón. También, se pudo comprobar un gran desarrollo de mosquitos, caracolillos y otros insectos de vida acuática así como microalgas, sobre todo en aquellos acuarios con más carga de agua depurada y en las que las bombas habían dejado de funcionar obstruidas por las algas. Por último, al igual que anteriormente, se produjo otra situación destacable en torno a la conductividad. En este caso los datos mostraron que los acuarios con más conductividad fueron el 1 y el 6.

4.5 CONCLUSIONES

Si bien aún no podemos defender la idoneidad del efluente de la depuradora como medio donde cultivar la Vallisneria, sí es cierto que ofrece **resultados positivos** y esperanzadores y abre nuevas líneas de investigación.

Los resultados nos muestran cómo con un porcentaje de agua depurada superior al 25% las plantas muestran series dificultades para desarrollarse. Si en un principio se observó que la baja oxigenación del agua podía ser un elemento limitante del crecimiento, finalmente se concluye que existen otros factores relacionados con el agua depurada que influyen en el desarrollo de las Vallisnerias. Al introducirse las bombas de agua en los acuarios se consiguió, además de aumentar el oxígeno disuelto, mejorar el aspecto del agua de los acuarios (esta era más transparente y permitía por ello que la luz penetrase mejor) y controlar aparentemente la población de mosquitos –un problema que en ocasiones se dan en sistemas de depuración natural-. Sin embargo, las plantas sumergidas en aguas con porcentajes de depurada superiores al **25%** no mejoraron, ni en la experiencia en el interior ni en la exterior. Ello nos lleva a pensar que, efectivamente, existen otros factores en el agua depurada que afectan al desarrollo de estas plantas en concentraciones altas. Estos factores pueden ser desde compuestos químicos, como podría ser el exceso de amonio, hasta organismos que se alimenten de la Vallisneria (dado que en los acuarios se llegaron a desarrollar poblaciones de caracolillos e incluso se observaron algunos parásitos sobre determinadas hojas). En definitiva, es necesario continuar la investigación sobre esta línea.

En estos sistemas naturales siempre está presente el estrés que pueda sufrir los organismos. Al encontrarse la planta en un medio con un agua *muy agresiva* en relación a sus requisitos fisiológicos, esta ha sufrido un estrés que en los acuarios de mayor porcentaje se ha traducido en la pérdida de las plantas. Por ello, una línea nueva de investigación sería comprobar si la adición discontinua de agua depurada en los acuarios, puede permitir que las plantas se vayan adaptando paulatinamente a este nuevo entorno

sin observarse merma en su crecimiento, y alcanzar así el empleo porcentajes altos de agua del efluente.

Por último, se ha podido comprobar que, efectivamente, la *Vallisneria* requiere de poca luz, pues el color totalmente marrón de sus hojas, sólo se desarrolló en la experiencia en el exterior, mientras que en la de interior siempre se mantuvieron. Esto es bastante importante pues se pretende cultivar plantas con valor comercial y éste depende mucho del aspecto, no interesando que el color de las hojas sea marrón.

En definitiva, este experimento ofrece resultados relativamente positivos para continuar esta línea de investigación acerca del aprovechamiento del efluente de la laguna para cultivar especies de plantas acuáticas de interés comercial. Ello permitiría reciclar tanto el agua depurada como sus nutrientes.

5. CONCLUSIONES GENERALES

Los sistemas de depuración natural, y en concreto la laguna de la ULPGC, pueden ofrecer un **efluente de agua aprovechable**. El destino de estos efluentes suele ser el medio: mares, ríos, barrancos, acuíferos..., perdiendo un posible recurso, tal vez importante. Por un lado, se trata de un recurso, el agua, que en muchas regiones del planeta es un bien muy valioso, y que requiere de grandes esfuerzos (técnicos, económicos, sociales e incluso personales) para obtenerla. Por otra parte, las aguas depuradas contienen una gran cantidad de nutrientes que se podrían reciclar, por ejemplo en agricultura, y así minimizar el aporte de estos desde otras fuentes. Además, el aprovechamiento de esta agua, permitiría rentabilizar económicamente el sistema de depuración, ya sea de manera directa (ej. ahorro en el consumo de agua) o indirecta (ej. ahorro en el consumo de fertilizantes).

En general, únicamente se valorizan los efluentes de instalaciones de depuración a gran escala que tratan vertidos de grandes poblaciones. Estos, tras diversos tratamientos producen un agua depurada de alta calidad que se emplea en riego de jardines, limpieza de calles, agricultura. Sin embargo, en pequeñas poblaciones, la implementación de estas tecnologías para reutilizar el agua tiene un coste prohibitivo para estas comunidades; sobre todo cuando cuentan con sistemas de depuración de bajo coste.

Los resultados obtenidos en este trabajo muestran que las aguas de la depuradora natural del campus pueden ser aprovechadas. Mediante el análisis bacteriológico se ha podido comprobar la **gran eficiencia en la eliminación de microorganismos patógenos** que el sistema natural laguna-humedales posee; incluso alcanzándose, en algunos casos y sin tratamientos complementarios, valores por debajo de los máximos recomendados por la OMS para su uso no restringido en agricultura (ej. riego de cultivos de alimentos para consumo directo). Sin embargo, en la mayoría de los casos, se superaban estos límites, por lo que sería únicamente aprovechable para usos restringidos (ej. riego de árboles, gramíneas, etc.)

La aplicación de **tecnologías avanzadas de oxidación** supone complementar la desinfección hasta niveles por debajo de los límites. Entre los sistemas estudiados, el método combinado de **O₃+UV** ofreció los mejores resultados tanto en capacidad de desinfección (100%), como en eficacia respecto al tiempo empleado.

En relación a los **parámetros físico-químicos** analizados, podemos concluir que al no existir casi un efecto depurativo sobre los nutrientes, y sí sobre otros compuestos, existe una alta posibilidad de poder reciclar los nutrientes. De esta manera se podría demostrar como este sistema de depuración de bajo coste podría producir un agua con una composición útil para distintas actividades, como la agrícola. Por otra parte, los tratamientos de desinfección que tan buenos resultados dieron respecto a los enterococos no ofrecieron resultados similares en **mineralización**, lo que abre las puertas de una posible nueva línea de investigación.

No obstante y aunque se requiere de una investigación más profunda, la otra parte del estudio demuestra que ya de por sí se puede emplear el agua directamente desde el efluente para el **cultivo de especies vegetales** de interés económico. La experiencia con **Vallisneria americana** permitió comprobar que, efectivamente, el agua de la depuradora se puede emplear, aunque con limitaciones, en el cultivo. De esta manera se logra reciclar los nutrientes del agua, que de otra forma se perderían en su vertido al medio.

En definitiva, el trabajo ha contribuido a demostrar que el efluente de los sistemas de depuración natural puede llegar a tener una calidad que permita un uso no restringido, ya sea sólo o en combinación con sistemas de desinfección complementarios. De esta manera, se logra recuperar elementos muy importantes económicamente -como son el agua y los nutrientes-, para su uso en actividades económicas –como es el cultivo-; sin contar con el beneficio ambiental que es, ya de por sí, la depuración de las aguas residuales. Es pues, en definitiva un ejemplo más de las posibilidades de depuración, reciclaje y de equilibrio ecológico que suponen los sistemas de depuración natural, de bajo coste y alta eficacia.



Ilustración 33. Laboratorio de análisis microbiológicos del CIDIA

6. PUBLICACIONES

A raíz de las investigaciones realizadas, y con el apoyo de D. José Alberto Herrera Melián, se han presentado tres publicaciones en las que he participado:

Posters

HERRERA MELIAN, J.A.; REXACHS GONZALEZ, J.A.; ARAÑA, J.; GONZALEZ DIAZ, O.; PEREZ PEÑA, J. **“Combining natural and Advanced Oxidation Technologies for complete wastewater treatment”**. Solar Chemistry and Photocatalysis: Environmental Applications. 4th European Meeting. Las Palmas de Gran Canaria. 8-10 de noviembre de 2006.

HERRERA MELIAN, J.A.; REXACHS GONZALEZ, J.A.; ARAÑA, J.; GONZALEZ DIAZ, O.; MARTEL, G.; VERA, L. **“The effect of harvesting on the performance of pond-wetlands”**. 10th International Conference on Wetlands Systems for Water Pollution Control, organizado por la IWA. Lisboa, Portugal. 23-29 de septiembre de 2006.

Libros

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE CANARIAS (ITC). **“Gestión Sostenible del Agua Residual en los Entornos Rurales. Proyecto DEPURANAT”**. 2006. Publicación relacionada con el Proyecto DEPURANAT, financiado con los fondos FEDER de la Unión Europea perteneciente al programa Interreg III-B. Instituto Tecnológico de Canarias, S.A. Diciembre de 2006. ISBN: 84-690-2232-6. Colaborador en el Capítulo 3º **“Evaluación de los Sistemas de Depuración Natural”**.

Combining natural and Advanced Oxidation Technologies for complete wastewater treatment

J. A. Herrera Melián, J. A. Rexachs, J. Araña, O. González Díaz and J. Pérez Peña

INTRODUCTION

There are numerous methods available to treat the most common methods for treating wastewater from small communities (1,000 to 5,000 inhabitants) are the activated sludge process, the trickling filter, the septic tank, and the oxidation pond. However, these methods are not suitable for small communities (1,000 to 5,000 inhabitants) because of their high energy consumption and the need for a large area. In this paper, a new method is proposed, which combines natural and advanced oxidation technologies (AOT) for the treatment of wastewater. The aim of this research is to evaluate the performance of this new method in terms of organic carbon, nitrogen, and phosphorus removal, and to compare it with the conventional activated sludge process.

RESULTS

The results show that the combination of natural and advanced oxidation technologies (AOT) for the treatment of wastewater provides a more efficient and sustainable solution compared to conventional methods. The system achieved high removal efficiencies for organic carbon, nitrogen, and phosphorus, and it required less energy and a smaller area than the activated sludge process.

The effect of 'harvesting' on the performance of pond-wetlands

J. A. Herrera Melián, J. A. Rexachs, J. Araña, O. González Díaz, J. Pérez Peña and J. L. Vera

1. Introduction

Pond-wetlands are a natural and sustainable method for wastewater treatment. However, their performance can be affected by the presence of floating plants and algae. This study aims to evaluate the effect of harvesting on the performance of pond-wetlands.

2. Study site

The study was conducted in a pond-wetland system in the rural area of Gran Canaria. The system consists of a series of ponds and wetlands that receive wastewater from a small community.

3. Results

3.1. Evaluation of the harvesting activity

The results show that harvesting significantly improved the performance of the pond-wetland system. The removal of floating plants and algae increased the oxygen transfer rate and reduced the organic carbon concentration in the water.

3.2. Effect of harvesting on BOD concentration

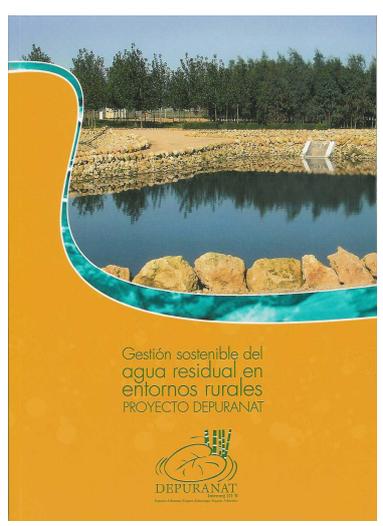
The BOD concentration in the water decreased significantly after harvesting. This indicates that the system is more efficient at breaking down organic matter when the water is free of floating plants and algae.

3.3. Effect of harvesting on BOD concentration

The BOD concentration in the water decreased significantly after harvesting. This indicates that the system is more efficient at breaking down organic matter when the water is free of floating plants and algae.

3.4. Effect of harvesting on BOD concentration

The BOD concentration in the water decreased significantly after harvesting. This indicates that the system is more efficient at breaking down organic matter when the water is free of floating plants and algae.



7. AGRADECIMIENTOS

En primer lugar quería sobre todo agradecer el poder haber realizado este trabajo a mi tutor en esta investigación, Dr. José Alberto Herrera Melián, por su ayuda, paciencia y comprensión.

En segundo lugar, quisiera agradecer la colaboración, facilidades y acogida en el laboratorio al Dr. Jesús Pérez Peña (Catedrático/coordinador del grupo de investigación), Dr. José Miguel Doña Rodríguez (Catedrático), Dr. Oscar Manuel González Díaz, Dr. Francisco Javier Araña Mesa, Dr. Erick Tello Rendón y demás miembros del Centro Instrumental Químico-Físico para el Desarrollo de Investigación Aplicada (CIDIA) de la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria.

Igualmente, agradecer también la labor realizada a todos los que de una u otra manera han participado en la organización de este *Doctorado en Ingeniería Ambiental y Desalinización*, desde administración hasta todos los profesores que han impartido los cursos, especialmente al director coordinador del programa, Dr. Sebastián O. Pérez Báez, por el interés mostrado y su disposición permanente.

Por otra parte, quisiera agradecer al Instituto Tecnológico de Canarias (ITC) la amabilidad para facilitarnos los resultados de sus muestreos en la laguna y a la Empresa Municipal de Aguas de Las Palmas (EMALSA) las facilidades para poder tomar muestras de la EDAR de Barranco Seco y poder completar la investigación.

Finalmente y por supuesto, agradecer todo el apoyo y ánimos que he recibido por parte de mi padres, Lola e Isidro, mis hermanas, Elena y Marta, mi pareja, María, mi tía Lola Isabel y del resto de mi familia y amigos durante todo este período de investigación.

8. BIBLIOGRAFÍA

- ARAÑA, J.; HERRERA MELIÁN, J.A.; DOÑA RODRÍGUEZ, J.M.; GONZÁLEZ DÍAZ, O.; VIERA, A.; PÉREZ PEÑA, J.; MARRERO SOSA, P.M.; ESPINO JIMÉNEZ, V. "TiO₂-photocatalysis as a tertiary treatment of naturally treated wastewater". *Catalisis Today*, 76 (2002), pp. 279-289.
- COMISIÓN EUROPEA. "Procesos extensivos de depuración de las aguas residuales adaptadas a las pequeñas y medias colectividades". Oficina de las publicaciones oficiales de las comunidades europeas (Luxemburgo), 2001.
- EPA (U.S. Environmental Protection Agency). "Guidelines for water reuse". Septiembre de 2004.
- HARRISON et al. "Principios de Medicina Interna". Ed. Interamericana McGraw-Hill. 11ª edición, 1989.
- HASSEN A.; MAHROUK M.; OUZARI H.; CHERIF M.; BOUDABOUS A.; DAMELINCOURT, J.J. "UV disinfection of treated wastewater in a large-scale pilot plant and inactivation of selected bacteria in a laboratory UV device". *Bioresource Technology* 74 (2000), pp. 141-150.
- CLESCERL, L.S.; GREENBERG, A.E.; EATON, A.D. "Standard methods for the examination of water and wastewater". American Public Health Association, 17ª edición, 1992.
- GUMY, D.; RINCON, A.G.; HAJDU, R. ; PULGARIN, C. "Solar photocatalysis for detoxification and disinfection of water: Different types of suspended and fixed TiO₂ catalysts study". *Solar Energy* Volume 80, Issue 10 , October 2006, Pages 1376-1381. *Solar Power and Chemical Energy Systems (SolarPACES'04)*
- LIBERTI, L.; NOTARNICOLA, M.; PETRUZZELLI, D. "Advanced treatment for municipal wastewater reuse in agriculture. UV disinfection: parasite removal and by-product formation". *Desalination* 152 (2002) 315-324.
- MARTÍN SÁNCHEZ, S. "Depuración de aguas mediante lagunaje múltiple". *Revista Alcántara* nº 55. Diputación de Cáceres. Enero-abril de 2002.
- MAYNAR, H.E.; OUKI, S.K.; WILLIAMS, S.C. "Tertiary lagoons: A review of removal mechanisms and performance". *Wat. Res.* Vol. 33, nº 1 (1999), pp. 1-13.
- MILLIPORE Corporation. "Análisis de aguas", 1994. Dossier.
- OMS (Organización Mundial de la Salud). "Guidelines for the safe use of wastewater and excreta in agriculture and aquaculture". 1989.
- PANREAC, Laboratorios. "Analíticos en alimentaria. Métodos oficiales de análisis: Aguas potables de consumo público y Aguas de bebida envasadas", 1999.
- PIÉDROLA GIL, G. et al. "Medicina preventiva y salud pública". Ed. Científicas y Técnicas S.A., Masson, y Salvat Medicina. 9ª edición, 1992.
- SCHARLAB, Laboratorios. "Control microbiológico de las aguas". Dossier.
- VERHOEVEN, J.T.A.; MEULEMAN, A.F.M. "Wetlands for wastewater treatment: Opportunities and Limitations". *Ecological Engineering* 12:5-12, 1999.