

CONAMA2016

IGNIS FUNGUS

Obtención de lodos de EDAR de alto poder calorífico mediante enriquecimiento de hongos oleaginosos

Autor: Francisco J. Navarro Sánchez (Aguas de Murcia)

Institución: Aguas de Murcia

Otros autores: Natividad Moya Sánchez (Aguas de Murcia), Alicia Gadea Gadea (Aguas de Murcia), Elisa Rodríguez Gómez (Aquambiente)



RESUMEN

El objetivo general del proyecto IGNIS FUNGUS ha sido el desarrollo experimental de un proceso de depuración de aguas residuales mediante la aplicación de hongos oleaginosos, obteniendo por un lado agua, con una calidad adecuada para poder ser devuelta al cauce público, y una biomasa residual, que será utilizada como materia prima para la producción de un nuevo tipo de biocombustible. Este biocombustible estará constituido por mezclas de biomasa vegetal y lodos fúngicos.

El proyecto, iniciado en 2015, ha sido liderado por la Empresa Municipal de Aguas y Saneamiento de Murcia, S.A. (Aguas de Murcia), responsable de la gestión del Ciclo Integral del Agua en el municipio de Murcia, con la colaboración de la universidad de Murcia (UM), el Centro Tecnológico del Medioambiente (CETENMA) y Aqualogy, y dispone de financiación del Centro para el Desarrollo Tecnológico e Industrial (CDTI).

Los resultados indican que el hongo *Mucor circinelloides* presenta un adecuado crecimiento en aguas residuales y consigue desarrollarse en el reactor biológico, reduciendo la carga orgánica y el contenido en amonio (NH_4^+) del agua, mejorando la tasa de biomasa y reduciendo la producción neta de fango, sin embargo no permite la eliminación efectiva de los nitratos (NO_3^-). Además el fango IGNIS FUNGUS muestra unas características adecuadas para su aprovechamiento energético, un alto poder calorífico y un menor contenido en cenizas que las corrientes de fango resultantes de otros procesos.

PALABRAS CLAVE: Poder calorífico, Estación Depuradora de Aguas Residuales, hongos oleaginosos, valorización energética.



1.	Introducción	4
2.	Descripción del proyecto.....	4
3.	Resultados.....	5
4.	Conclusiones	17
5.	Bibliografía.....	17
6.	Listado de acrónimos.....	18



1. Introducción

La biomasa constituye un importante recurso energético por su abundancia y la posibilidad de producir energía de forma flexible. Una de las principales fuentes de biomasa es el lodo generado en estaciones depuradoras de aguas residuales (EDAR), recurso que se espera experimentará un aumento gradual en las próximas décadas, debido al incremento de la población y la industrialización. De acuerdo con las estimaciones publicadas por el Instituto Nacional de la Energía (IDAE) en 2011, en 2015 se producirán en España 1.288.616 toneladas materia seca (ton MS) al año y esta cantidad se incrementará en un 10% anual hasta alcanzar en 2020 las 1.417.478 ton MS/año.

El Plan Nacional Integrado de Residuos (PNIR), de acuerdo con la Directiva 2008/98/CE, establece que el orden de prioridades para la prevención y la gestión de residuos debe de pasar por: (1) Prevenir, (2) Reutilizar, (3) Reciclar, (4) Valorizar y (5) Eliminar.

De acuerdo con este principio de jerarquía, las principales vías de gestión de los lodos de EDAR son fundamentalmente la utilización con fines agronómicos, regulada por la Directiva 86/278/CEE, la valorización energética y la eliminación en vertedero. Así el PNIR establece que en 2015 el 67% de los lodos de depuradora sean destinados a aplicación agrícola, esto significa que el 33% restante estaría disponible para su valorización energética.

A pesar del enorme potencial disponible y la amenaza de que se endurezcan los requisitos para el uso agrícola (menor contenido en metales pesados, contaminantes orgánicos, patógenos y necesidad de suelo apto para la aplicación), la valorización energética de lodos está escasamente desarrollada en España. Su uso permite abordar dos grandes retos, la explotación de una nueva fuente de energía, con el valor añadido de que el 100% puede considerarse como renovable, y subsanar los problemas derivados de la gestión, pero el lodo por sí mismo no es un buen combustible; presenta un elevado contenido en agua y en cenizas y un Poder Calorífico Inferior (PCI) bajo.

Los hongos filamentosos han demostrado en estudios previos su capacidad para favorecer la floculación de materia en suspensión, la reducción de sólidos y patógenos, y la eliminación o degradación de compuestos tóxicos. Las ventajas de la utilización de hongos con respecto a los tratamientos convencionales con bacterias radican en que: (i) Se podrían obtener subproductos de alto valor añadido (amilasa, quitina, quitosano, glucosamina, ácido láctico y diversos compuestos antimicrobianos), (ii) Contienen un grupo de enzimas extracelulares que facilitan la biodegradación de compuestos refractarios como los fenólicos, tintes o PHAx, mucho menos sensibles a la degradación bacteriana y (iii) Tienen una mayor resistencia a los compuestos inhibitorios y mejor adaptación ambiental. Entre las especies de hongos filamentosos se encuentran los hongos oleaginosos, que se caracterizan por ser capaces de acumular bajo determinadas condiciones cantidades significativas de lípidos en su estructura interna.

2. Descripción del proyecto

El objetivo general del proyecto IGNIS FUNGUS es el desarrollo experimental de un proceso de depuración de aguas residuales mediante la aplicación de hongos oleaginosos. Así, al tiempo que se obtiene un agua con una calidad adecuada para poder



ser devuelta al cauce público, se genera una biomasa residual que será utilizada como materia prima para la producción de un nuevo tipo de biocombustible. Este biocombustible estará constituido por mezclas de biomasa vegetal y lodos fúngicos.

Este proyecto, iniciado en 2015 y con una duración prevista de dos años, está siendo financiado por el CDTI y es liderado por la empresa Aguas de Murcia, responsable de la gestión del Ciclo Integral del Agua en el municipio de Murcia. Aguas de Murcia cuenta a su vez para el desarrollo del proyecto con la colaboración del grupo de investigación de genómica y biotecnología molecular de hongos del Departamento de Genética y Microbiología de la Facultad de Biología de la UM, el CETENMA y Aqualogy.

El proyecto ha incluido las siguientes fases:

1. Definición en laboratorio de las condiciones adecuadas para la generación de biomasa fúngica oleaginosas utilizando aguas residuales/fangos de EDAR como sustratos.

Esta tarea ha incluido, por un lado, la identificación de las especies de hongos que presentan las mejores tasas de crecimiento en el agua residual y/o en el fango generado en EDAR y el aislamiento de las especies para posibilitar su uso posterior y, por otro lado, la optimización de las condiciones de operación para alcanzar los mejores resultados posibles en cuanto a crecimiento del hongo y rendimientos del proceso de depuración.

2. Evaluación a escala piloto de un proceso para la aplicación de hongos oleaginosos al tratamiento del agua residual urbana (ARU).

Esta tarea ha consistido en el diseño y construcción de una instalación a escala piloto en la que validar los resultados obtenidos en los ensayos en laboratorio. Aunque existen referencias de la aplicación de hongos al tratamiento de ARU con resultados satisfactorios, no se dispone de información en detalle de su funcionamiento a escala real. Para determinar la viabilidad de su uso es necesario determinar rendimientos de eliminación, parámetros como la producción de biomasa en relación a la Demanda Química de Oxígeno (DQO) eliminada, y el efecto de factores tales como pH, temperatura (T), presencia de nutrientes y disponibilidad de oxígeno.

3. Preparación y caracterización de muestras de combustible a escala laboratorio.

Se han preparado biocombustibles compuestos de distintas fracciones de fango y biomasa y se han caracterizado mediante la determinación de los siguientes parámetros: contenido en humedad, materia volátil y ceniza; Poder Calorífico Superior (PCS) y (PCI); y análisis elemental, Carbono (C), Hidrógeno (H), Nitrógeno (N) y Azufre (S).

Una vez finalizado el proyecto, se estudiarán los resultados obtenidos para valorar la viabilidad técnica y económica de la implantación de esta tecnología a escala industrial.

3. Resultados

Definición en laboratorio de las condiciones adecuadas para la generación de biomasa fúngica oleaginosas utilizando aguas residuales/fangos de EDAR como sustratos.

Se han inoculado de forma directa esporas de siete estirpes distintas de *Mucor circinelloides* (3629, WJ11, CBS969.68, CBS172.27, NRRL3631, CBS277.49 y NRRL1443) en tres corrientes distintas de la EDAR: salida del pretratamiento, salida del decantador primario y fango del reactor biológico. La observación de los cultivos al microscopio permitió comprobar que la mayoría de las esporas no germinaban,



probablemente algún elemento del agua residual inhibe su crecimiento, así que se decidió germinarlas previamente, para facilitar su desarrollo. La germinación previa (Figura 1) se realiza en matraces con un medio rico en nutrientes (Glucosa, Peptona, Extracto de levadura), pH 4,5 durante 6-7 horas, a 26°C y con agitación (250 rpm).

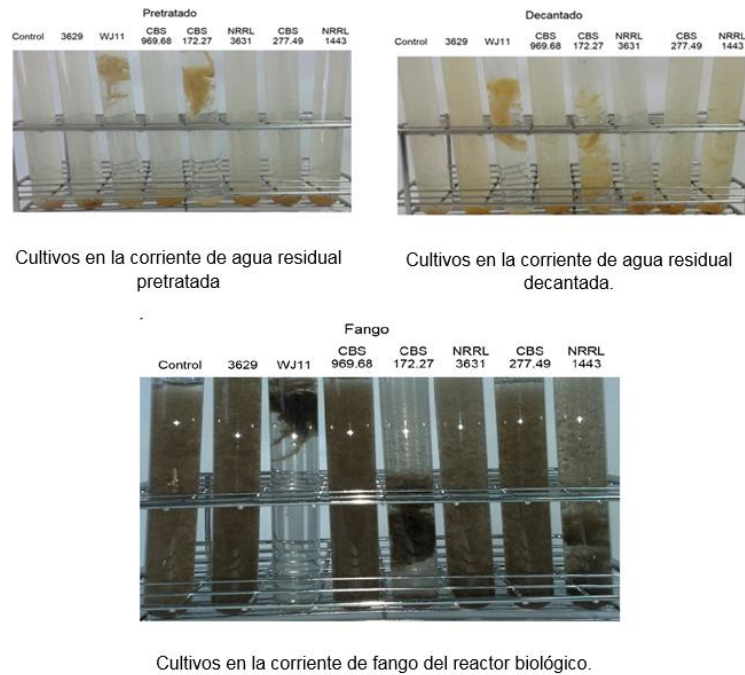


Figura 1. Cultivos de *Mucor* en las diferentes corrientes de la EDAR Murcia Este.

Una vez alcanzado el nivel de germinación óptimo, se inoculó cada una de las corrientes de la EDAR consideradas, en matraces con un volumen de cultivo equivalente al 10% del volumen final, manteniéndolo durante 72 horas a 26°C y 250 rpm.

Para valorar la capacidad de desarrollo de cada una de las estirpes en el medio se ha cuantificado la biomasa producida en cada ensayo, filtrando para recuperar el micelio y determinando el peso seco (mg/ml).

Tal y como se puede observar en la Figura 2 las estirpes WJ11 Y CBS172.27 fueron las que presentaron una mayor capacidad de crecimiento, alrededor de 1 mg/ml de cultivo, identificándose como las más adecuadas para las siguientes fases del estudio.

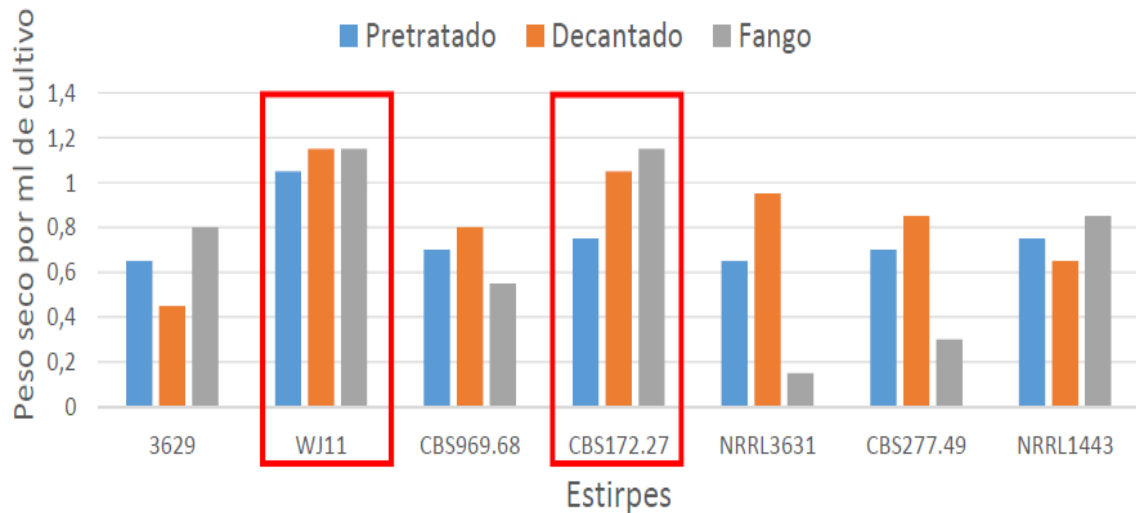


Figura 2. Peso seco en cultivo de 20 ml de estirpes de *Mucor circinelloides* crecidas en distintas corrientes de la EDAR.

Se ha tratado de optimizar el crecimiento del hongo mediante la modificación del pH de las corrientes estudiadas. El *Mucor* es capaz de crecer en una gama muy variada de pH, aunque como la mayoría de hongos está muy adaptado a un ambiente ácido, mientras el pH de los medios considerados está entre 7 y 8. Se modificó el pH de las tres corrientes mediante la adición de ácido clorhídrico 1N hasta alcanzar pH comprendidos entre 4,5 y 5,0 y se procedió a repetir los ensayos en estas condiciones y a los valores normales de pH de las muestras (7-8).

En la Figura 3 se puede observar que la estirpe que presenta una mayor tasa de crecimiento es la WJ11 en un rango de pH comprendido entre 7 y 8.

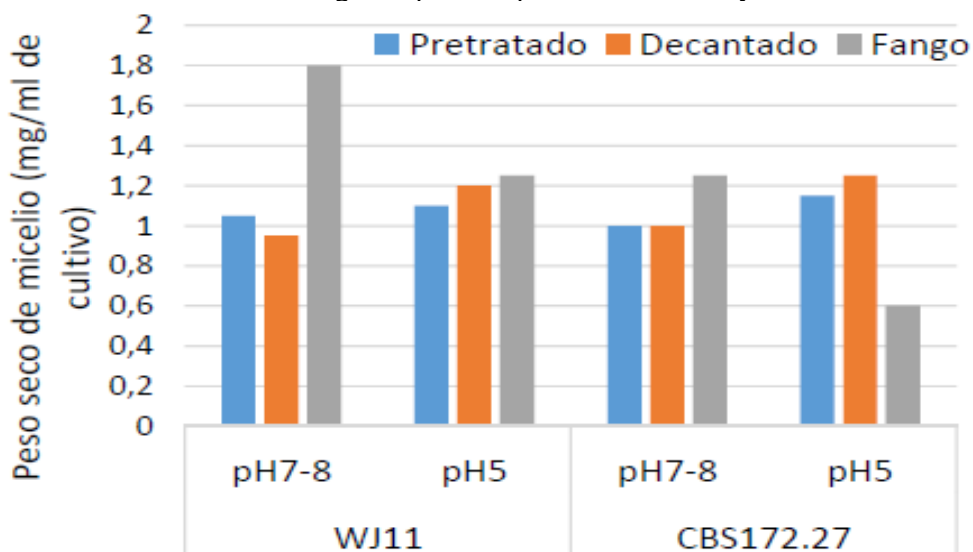


Figura 3. Peso seco en cultivo de 20 ml de las estirpes WJ11 y CBS172.27 crecidas en distintas corrientes de la EDAR a distintos pH.



Se han realizado también ensayos para intentar reducir el volumen relativo de precultivo con el que se inoculan los medios, lo cual representaría un aumento de la eficacia y una reducción de costes. Partiendo del mismo procedimiento que en los casos anteriores, se inocularon los medios con 3 proporciones diferentes (10%, 5% y 2,5%) de precultivos de las estirpes WJ11 y CBS172.27. Transcurridas 72 horas de crecimiento, se recuperó el micelio por filtración y se determinó el peso seco. Los resultados más favorables, en todos los medios y para las dos especies, se han obtenido utilizando un volumen de precultivo del 10%.

Para determinar la evolución del cultivo a lo largo del tiempo, se realizó la curva de crecimiento para las estirpes WJ11 y CBS172.27. En idénticas condiciones que en los casos anteriores, se inocularon los medios con un volumen de precultivo del 10% del volumen final, incubando de forma independiente durante 24, 48, 72 y 96 horas. Los resultados muestran que, en las muestras de agua decantada y pretratada, WJ11 alcanza el máximo crecimiento a las 24 horas y CBS172.27 lo alcanza transcurridas 48/72 horas.

Se decidió utilizar la especie WJ11 en la planta piloto, se observó que la especie permite nitrificar, de tal manera que oxida el amonio del agua hasta nitrato, haciendo que los niveles totales de nitrógeno se mantengan constantes. Así que se decidió continuar trabajando a escala laboratorio, para identificar, las estirpes con mejor crecimiento en medios con alto contenido en nitrato.

Todas las estirpes de laboratorio utilizadas hasta la fecha fueron capaces de crecer en medio sólido con nitrato potásico como única fuente de nitrógeno, por lo tanto, todas las estirpes son capaces de consumir nitratos. Sin embargo, cuando este análisis se repitió utilizando cultivos líquidos con nitrato como única fuente de carbono (materia seca) en cultivos líquidos con nitrato sódico como única fuente de carbono (glucosa 10 g/l, nitrato sódico 1,5 g/l, Tiamina 1 mg/l y niacina 1mg/l), la única estirpe capaz de crecer tras 96 horas a 26°C y a 250 rpm fue CBS277.49.

2. Evaluación a escala piloto de un proceso para la aplicación de hongos oleaginosos al tratamiento del agua residual urbana.

En 2015 se ha construido una planta piloto (Figura 4) en la EDAR Murcia Este, con capacidad para tratar hasta 2 m³/h de agua residual, que incluye las siguientes etapas: (i) Pretratamiento, rototamiz para la eliminación de sólidos; (ii) Dosificación de reactivos para ajuste de pH y nutrientes; (iii) Tanque de homogeneización; (iv) Reactor biológico; (v) Decantación secundaria, decantador cuadrado con deflector para la salida del agua tratada; y (vi) Concentrador de fango, depósito con un filtro previo para facilitar la retirada del fango producido.



Figura 4. Vista de la planta piloto IGNIS FUNGUS.

En la Tabla 1 se han recogido las principales características de los equipos y unidades instalados en la planta piloto. La planta incluye también un sistema de control y adquisición de datos que permite establecer consignas de funcionamiento y el registro de datos de proceso para su posterior análisis.

Tabla 1. Características de los equipos y unidades que componen la planta piloto IGNIS FUNGUS.

ETAPA	UNIDADES	PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS
PRETRATAMIENTO	Tamiz rotativo	0,5 mm tamaño de paso, Q=210 l/h
	Depósitos para el almacenamiento de base, ácido y nutrientes	V=100 l; dosificación de la bomba (Q=50 l/h)
ALIMENTACIÓN	Tanque de alimentación	V=500 l, sonda de pH para regulación
	Bomba	Q=250 l/h
TRATAMIENTO BIOLÓGICO	Biorreactor	V=1.000 l, sonda de Oxígeno (0,1-20 mg/l), y sonda de Temperatura/pH (-5 -70 °C).
DECANTACIÓN SECUNDARIA	Decantador	V=300 l
	Bomba de recirculación	Q=250 l/h
CONCENTRADOR DE FANGO	Concentrador de fango	V=50 l

El arranque de la planta se ha realizado siguiendo las indicaciones de la UM y estableciendo las condiciones de operación previamente identificadas en los ensayos de



laboratorio. La primera estirpe inoculada ha sido WJ11, fijando inicialmente en el reactor biológico una concentración de Oxígeno Disuelto (OD) de 6 ppm.

En la Figura 5 se observa el estado del hongo antes de ser añadido al reactor biológico y en la Figura 6 el estado del hongo en el reactor biológico tras 24 horas de crecimiento.

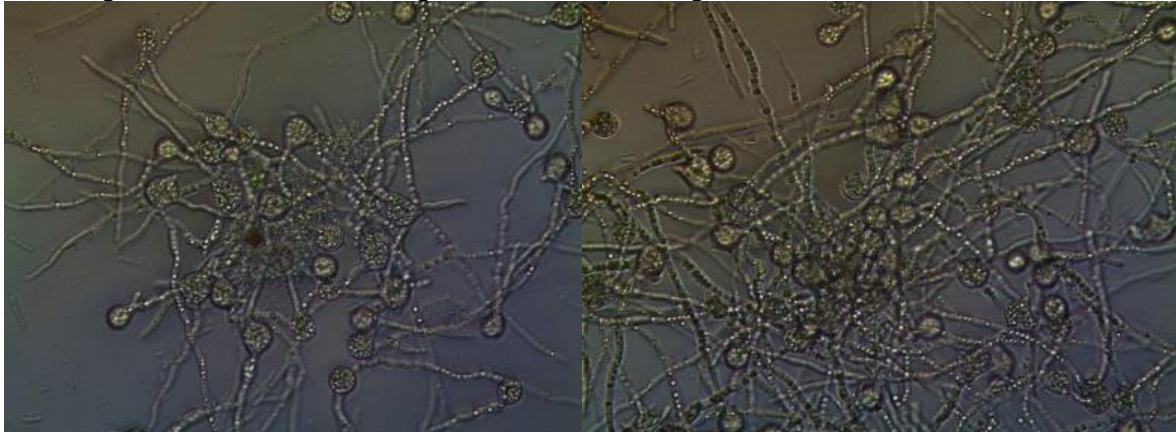


Figura 5. *Mucor circinelloides* WJ11 en el precultivo

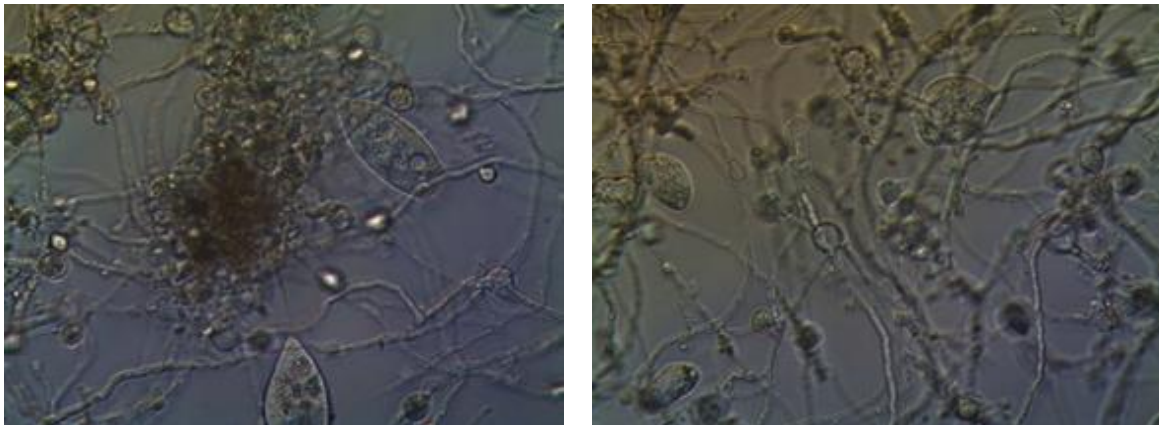


Figura 6. *Mucor circinelloides* WJ11 en el reactor biológico, conviviendo con microorganismos presentes en los fangos activos

Los parámetros estudiados a lo largo del proyecto han sido: (i) En corrientes de agua: DQO, pH, Nitrógeno Total (N_T), NH_4^+ y NO_3^- , y (ii) En corrientes de fango: Materia Seca (MS), Materia Volátil (MV) y Sólidos Suspendidos en el Licor Mezcla (MLSS). Los métodos analíticos utilizados han sido los definidos en Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (AWWA, 2012).

Los criterios de calidad que determinan si los resultados obtenidos en la planta piloto son aceptables vienen determinados por los límites de emisión del efluente definidos en la Autorización de Vertidos (AV) de la EDAR Murcia Este: (i) $DQO < 150$ mg/l, (ii) $N_T < 150$ mg/l, (iii) $NH_4^+ < 15$ mg/l y (iv) $NO_3^- < 15$ mg/l.

Las condiciones en las que se han realizado los ensayos con la estirpe de *Mucor circinelloides* WJ11 son las que se recogen en la Tabla 2. En la Tabla 3 se recogen los valores promedio de los parámetros analizados en las corrientes de entrada y de salida del reactor biológico, y rendimientos del proceso en términos de eliminación de nutrientes



y DQO, registrados durante 3 meses de funcionamiento continuo con la estirpe *Mucor circinelloides* WJ11

Tabla 2. Condiciones en las que se han desarrollado los ensayos con la estirpe de *Mucor circinelloides* WJ11.

	Caudal entrada (l/día)	pH (Ud. PH)	T (°C)	OD (mg/l)
Mes 1	565	7,59	26,0	6,2
Mes 2	847	7,00	25,7	6,1
Mes 3	615	7,49	27,9	6,1

Tabla 3. Resultados de los ensayos con la estirpe de *Mucor circinelloides* WJ11.

	DQO		pH		NT		NO ₃ ⁻		NH ₄ ⁺	
	i	b	i	b	i	b	i	b	i	b
	(mg/l)		(ud.pH)		(mg/l N)		(mg/l)		(mg/l)	
Mes 1	595	72	7,38	7,59	58	50	1,17	27	25,6	7
Mes 2	619	82	7,6	7,25	57	44	0,6	2,9	38,3	28
Mes 3	524	64	7,8	7,49	73	41	0,4	16	46,3	14
Rend.	87-88%				14-44%				27-73%	

*Los rendimientos están calculados con los datos del influente (i) y reactor biológico(b)

En la Figura 7 se representa la evolución de la DQO en el reactor biológico durante un periodo de 75 días, se aprecia la estabilidad del proceso y la gran capacidad del hongo para consumir materia orgánica.

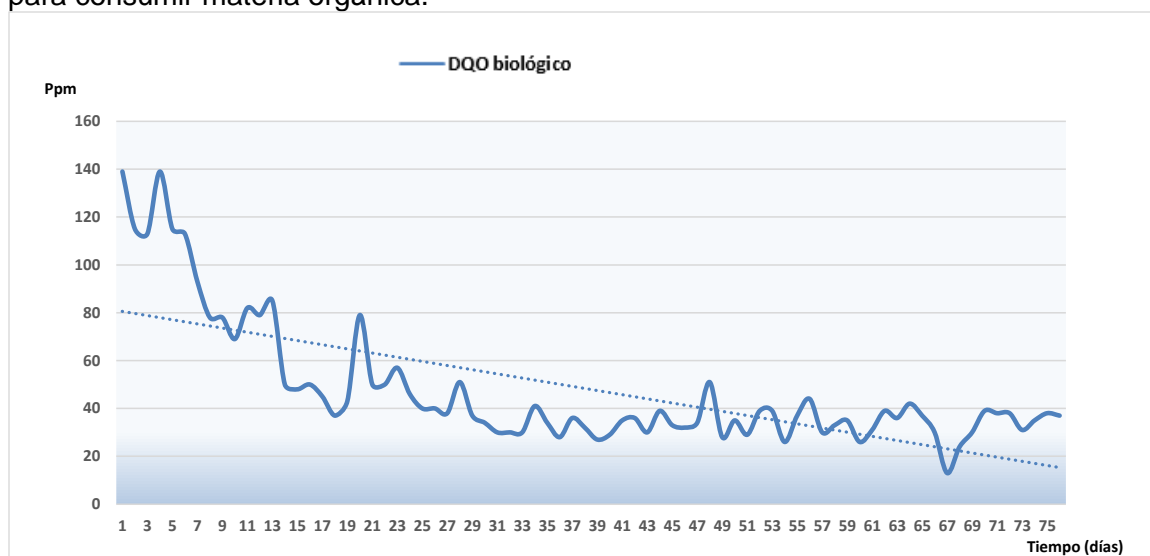


Figura 7. Evolución de la DQO en el ensayo con *Mucor circinelloides* WJ11.



Los resultados obtenidos muestran altos rendimientos en cuanto a eliminación de NH_4^+ (95%) y DQO (89%), sin embargo, de acuerdo con AV de la EDAR Murcia Este, el efluente obtenido sobrepasa los límites de concentración de nitratos (NO_3^-), establecidos en 15 mg/l.

Tal y como se ha explicado anteriormente, se continúa la experimentación inoculando en la planta piloto la estirpe *Mucor circinelloides* CBS277.49.

Las condiciones en las que se han realizado los ensayos con la estirpe de *Mucor circinelloides* CBS277.49 son las que se recogen en la Tabla 4. En la Tabla 5 se recogen los valores promedio de los parámetros analizados en las corrientes de entrada y de salida del reactor biológico, y rendimientos del proceso en términos de eliminación de nutrientes y DQO, registrados durante 3 meses de funcionamiento continuo con la estirpe *Mucor circinelloides* CBS277.49

Tabla 4. Condiciones en las que se han desarrollado los ensayos con la estirpe de *Mucor circinelloides* CBS277.49.

	Caudal (l/día)	entrada	pH (ud pH)	T(°C)	OD(mg/l)
Mes 1	385		7,67	28,1	6,1
Mes 2	891		7,61	26,8	5,39
Mes 3	881		7,64	27,7	4,32

Tabla 5. Resultados de los ensayos con la estirpe de *Mucor circinelloides* CBS277.49.

	DQO		pH		NT		NO_3^-		NH_4^+	
	i	b	i	b	i	b	i	b	i	b
	(mg/l)		(ud.pH)		(mg/l N)		(mg/l)		(mg/l)	
Mes 1	590	38	7,88	7,64	68	34	0,6	30	43,8	0,2
Mes 2	496	35	7,77	7,61	67	35	0,5	28	42,4	0,3
Mes 3	540	37	7,89	7,64	69	39	0,4	23	41,5	1,4
Rend.	93-94%				43-50%				97-99%	

* Los rendimientos están calculados con los datos del influente (i) y reactor biológico(b)

Los resultados obtenidos continúan siendo muy favorables en términos de eliminación de NH_4^+ (99%) y DQO (93%), sin embargo, seguiría sin alcanzarse el objetivo de concentración de NO_3^- definido en la AV.

Con el fin de evaluar la cantidad de fango generado en el reactor biológico inoculado con las dos estirpes de *Mucor*, se han caracterizado las corrientes de fango espesado y fango biológico (



Tabla 6):



Tabla 6. Caracterización de las corrientes de fango.

		Fango biológico	Fango espesado	
		MLSS [mg/l]	MS [%]	MV [%]
Mucor circinelloides WJ11	Mes 1	690	5,1	75
	Mes 2	779	5,5	77
	Mes 3	1.279	4,3	77
Mucor circinelloides CBS277.49	Mes 1	1.370	2,2	69
	Mes 2	1.254	5,9	79
	Mes 3	1.032	2,7	70

De acuerdo con los datos de MLSS, la cantidad final de fango producido sería inferior al que se produce en tratamiento convencionales de aireación prolongada (MLSS= 2.000-4.000 mg/l).

Para evaluar el rendimiento del proceso de depuración propuesto se plantea la comparación de los rendimientos obtenidos en el pilotaje (Tabla 3 y Tabla 5) y los rendimientos energéticos de la planta piloto (Tabla 7) con los característicos de los procesos de depuración de aguas residuales urbanas mediante fangos activados (Tabla 8).

Tabla 7. Consumos energéticos de la operación en la planta piloto Ignis Fungus (datos medios mensuales).

$E_{p.piloto}$	E_{aire}	C_{OD}	$E_{p.piloto}$	E_{aire}	$E_{p.piloto}$	E_{aire}
kWh/d	kWh/d	mg/l	kWh/m ³	kWh/m ³	kWh/kgDQ	kWh/kgDQ
					O_{eli}	O_{eli}
N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
46	20	5,5	78	34	143	62
50	24	5,9	126	61	258	124
55	23	6,0	63	26	114	48
64	25	4,2	83	32	180	70
55	27	2,5	59	29	118	58

Tabla 8. Parámetros característicos de operación de EDAR de fangos activados.

Parámetro/Variable	EDAR > 20.000m ³ /d	EDAR < 20.000m ³ /d
Rend. Eliminación DQO, %	80 - 90	85 - 92
TRH, h	6 - 12	12 - 24
MLSS, mg/l	2.500 – 3.500	3.000 – 6.000
TRS, d	8 - 12	15 - 30
Consumo O ₂ , kgO ₂ /m ³	0,2 – 0,6	0,6 – 0,9
Consumo aireación, kWh/m ³	0,1 – 0,2	0,3 – 0,6
Prod. fangos biológicos, kgSSV/m ³	0,05 – 0,2	0,05 - 0,15
Prod. fangos biológicos, kgSSV/kgDBO _{eli}	0,3 – 0,6	0,3 – 0,4
Prod. fangos total, kgSST/m ³	0,25 – 0,35 *	0,3 – 0,4



Consumo específico, kWh/m ³	0,4 – 0,7	0,8 – 1,8
Consumo específico, kWh/kgDBO _{elim}	1 - 2	1,5 – 3,0

* Antes de la digestión

La baja producción de lodos apreciada es lógica si se tienen en cuenta los resultados obtenidos al analizar los fangos de la planta piloto, y en especial de los indicadores energéticos de la biomasa, como son el contenido en grasas y el poder calorífico inferior, PCI. Como podrá verse con más detalle, los fangos de la planta piloto mostraron valores de estos parámetros significativamente superiores a los de los fangos de EDAR “tradicionales” analizados. Aplicando un balance energético simple, la producción biológica de un fango más energético, a partir de una misma cantidad de Demanda biológica de oxígeno (DBO) oxidada supone una menor cantidad neta de nueva biomasa producida. Este fango además, como se verá posteriormente, es mucho más adecuado desde el punto de vista de su valorización energética.

Tomando como referencia los valores medidos de DQO, y realizando similares cálculos a los indicados en el apartado se obtienen los consumos de la planta en relación a la DBO eliminada. Dichos resultados se muestran en la Tabla 9.

Tabla 9. Consumos energéticos de la planta piloto respecto a la DBO eliminada

$E_{p.piloto}$	E_{aire}
kWh/kgDBO _{eli}	kWh/kgDBO _{eli} .
N.D.	N.D.
241	105
461	221
204	85
319	124
208	102

Si se observan los consumos energéticos de la planta piloto se comprueba que están muy alejados de los de las EDAR actuales, si bien se observa una tendencia positiva de reducción de consumos conforme avanza la fase experimental; en especial en los últimos 3 meses.

3. Preparación y caracterización de muestras de combustible a escala laboratorio.

Se han seleccionado, de acuerdo con criterios de disponibilidad y precio, y caracterizado tres tipos de biomasa de origen vegetal: a) Biomasa leñosa de cítricos; b) Residuos de poda de pino carrasco; c) Biomasa herbácea procedente de cereal.

También se han caracterizado tres corrientes de fango que pueden encontrarse habitualmente en las EDAR: a) Fango estabilizado procedente de un proceso de aireación prolongada; b) Fango mixto procedente de mezcla de fango de decantación primaria y fango biológico de proceso de aireación convencional; c) Fango estabilizado procedente de digestión anaerobia, y el fango generado en la planta piloto IGNIS FUNGUS (fango IGNIS FUNGUS).

A las 7 muestras se les determina, en primer lugar, su contenido en humedad y cenizas, y posteriormente, tras unos tratamientos de secado, triturado, molido y tamizado, se mide el PCS y el PCI, cenizas y la composición elemental de carbono (C), Hidrógeno (H), nitrógeno (N) y azufre (S). En la Tabla 10 se recogen los resultados de las caracterizaciones de las muestras de fango y biomasa vegetal:



Tabla 10. Resultados de las caracterización de las muestras de fango y de biomasa vegetal.

Parámetro	Uds.	Paja cereal	Poda pino carrasco	Troncos cítricos	Fango mixto	Fango digerido	Fango de aireación prolongada	Fango IGNIS FUNGUS
Humedad	%	8,1	11,8	9,9	96,8	82	97-98	95,3
Cenizas (b.h.)*	%	5,6	0,6	2,6	0,8	6	31 (b.s.)**	23 (b.s.)**
Cenizas (b.s.)**	%	6,1	0,7	2,9	25	33	31	16
PCS (M.S.)***	cal/g	3.954	4.757	4.375	3.623	3.567	3.638	4.458
PCI (M.S.)***	cal/g	3.632	4.397	4.053	3.360	3.298	3.375	4.146
C	%	43,5	54	47,7	35,3	33	37,2	42
H	%	6	6,7	6	4,9	5	4,9	5,8
N	%	0,5	0,2	0,6	4,7	5	5,3	7,5
S	%	0,1	0,1	0,1	1,1	2	0,9	1,3

* Base húmeda/ **Base seca/ *** Materia seca

Los resultados recogidos de las diferentes muestras de fango de la planta piloto (Tabla 11) muestran que a mayor apariencia de fango fúngico, mayor poder calorífico, lo cual concuerda con los contenidos en cenizas y grasas. Este hecho se aprecia especialmente que conforme avanza la edad de fango se reducen PCS y PCI, y aumenta el contenido en cenizas. Al comparar el contenido en cenizas y grasas también se observa un empeoramiento en la calidad de combustible del fango con el tiempo. En general, se ha observado tanto a nivel visual como tras la caracterización de las muestras que tras la inoculación del reactor predomina la presencia de hongos en el fango biológico, y conforme avanza el tiempo, este fango es sustituido por fango biológico bacteriano convencional, con una calidad de combustible inferior.

Tabla 11. Resultados obtenidos de diferentes muestras de fango fúngico a lo largo de la experimentación

PCS cal/g	Cenizas %	C %	H %	N %	S %	PCI cal/g	Grasas %
4.414	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
4.458	16	42,1	5,8	7,5	1,3	4.147	N.D.
4.289	24	39,2	4,9	5,4	1,4	3.951	5,9-6,5
4.185	25	37,5	5,9	5,6	1,3	3.797	N.D.
3.444	26	36,4	6,1	5,4	1,2	3.047	N.D.
4.024	25	37,3	5,9	5,5	1,3	3.654	4,9-5,7
3.821 ^[1]	21	31,7	6,7	4,7	1,3	2,832	N.D.
2.694 ^[1]	17	26,1	7,5	3,9	1,3	2,114	N.D.
1.542 ^[1]	14	20,5	8,2	3,0	1,2	830	N.D.
3.934	29	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	4,0-4,2
3.717	33	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	3,7-3,9

N.D. No determinado; P.D. Por determinar; ^[1] Base húmeda



4. Conclusiones

- Se ha demostrado la capacidad del hongo no solo de crecer en aguas residuales sino también de clarificar el medio ayudando al posterior filtrado. En este sentido, se ha comprobado que *Mucor* tiene la capacidad de consumir materia orgánica del agua residual, obteniéndose los mejores rendimientos, con un consumo del 80% de materia orgánica, en el agua pretratada. Además, se han conseguido mejoras para aumentar el crecimiento del hongo en las aguas residuales y para reducir el coste del precultivo utilizado. Por otro lado, se han aislado estirpes silvestres, probablemente de *Mucorales*, a partir de las corrientes de aguas residuales con mejores crecimientos que las estirpes de laboratorio, que pueden ser utilizados en futuros proyectos para optimizar el proceso de depuración con *Mucor*. Así mismo, se ha aislado un mutante con un consumo preferente por nitratos, que podría ser muy útil en la reducción de los niveles de nitrato de las aguas.

- El sistema de depuración propuesto ofrece unos rendimientos de depuración elevados, similares a los de los sistemas actuales basados en depuración bacteriana aerobia, tanto en términos de rendimientos de eliminación de DQO como de tiempos de residencia. Además, estos rendimientos van asociados a una producción de biomasa muy inferior a la de los sistemas implantados actualmente. Frente a ello, el principal limitante observado son los elevados consumos energéticos asociados al proceso, debidos a un exceso de aireación del reactor y al calentamiento del agua. En este aspecto hay sin embargo margen de mejora, ya que estos consumos son en gran parte debidos a las operaciones realizadas durante los primeros meses del pilotaje, durante la fase crítica de crecimiento y estabilización del hongo. Es de esperar que una vez estabilizado el proceso, puedan reducirse dichos consumos.

- La caracterización de las mezclas fango:biomasa preparadas ha mostrado que el fango procedente del proceso de tratamiento con hongos es claramente el que mejores propiedades de combustible tiene y que, por lo tanto, podría utilizarse en mayor proporción en mezclas con biomasa vegetal. En el más favorable de todos los casos estudiados (mezcla de este tipo de fango con pino) se podría secar todo el fango producido por la EDAR desde un 78% hasta un 5% de humedad, utilizando como combustible una mezcla de ese mismo fango seco (62,5%) y pino (37,5%). El fango seco sobrante podría llegar a gestionarse a un coste de 15 €/Tm si el coste de adquisición de la biomasa utilizada fuera de 150 €/Tm o inferior. De cualquier forma, el fango seco producido, además de estar estabilizado, podría llegar a venderse en lugar de pagar por su retirada, ya que tendría muy buenas propiedades de combustible. Por último, la aplicación de los costes de amortización, debidos a la instalación de un sistema de secado de fangos en la misma EDAR, al balance realizado, supondría un incremento de 7,2 €/Tm en los costes de gestión de este producto.

5 Bibliografía

Estudio de prospectiva: Consumo energético en el sector del agua. Publicaciones del Instituto para la diversificación y el ahorro de la energía (IDAE). Disponible en: <http://www.idae.es> (Última consulta: 08/10/2014).



Chudova, P., Sardet, C., Palko, G. y Guibelin, E. (2011). *Main Factors influencing Anaerobic Digestion of Sludge and energy efficiency at several large WWTP in Central Europe. Journal of Residual Science & Technology*, núm. 8(2), 87-94.

Lazarova, V., Peregrina, C. y Dauthuille, P. (2012). *Toward energy self sufficiency of wastewater treatment. Water-Energy Interactions in Water Reuse, IWA Publishing*, cap. 6, pág. 87-126.

Jeniceck, P., Kutil, J., Benes, O., Todt, V., Zabranska, J. y Dohanyos, M. (2013). *Energy self-sufficient sewage treatment plant: is optimized anaerobic sludge digestion the key? Water Science and Technology*, núm.68 (8), pág.1739-1744.

Plan de Energías Renovables (PER) 2011-2020. Publicaciones del Instituto para la Diversificación y el Ahorro de la Energía (IDAE). Disponible en: <http://www.idae.es>

6 Listado de acrónimos

C _{OD}	Concentración de oxígeno disuelto en el reactor biológico
DQO _{af.}	DQO del afluente
DQO _{ef.}	DQO del efluente
DQO _{eli.}	DQO eliminada
E _{aire}	Energía consumida por la aireación de la planta piloto
E _{p.piloto}	Energía total consumida por la planta piloto
MS _{f.exc.}	Materia seca de los fangos en exceso
Prod _{f.exc}	Producción de fangos en exceso
Q _{air.}	Caudal de aire de soplante
TRH	Tiempo de retención hidráulico