

VIABILIDAD DE LA VALORIZACIÓN ENERGÉTICA DE LODOS PROCEDENTES DE DISTINTOS TIPOS DE DEPURADORAS

F.J. Colomer Mendoza, M. Carlos Alberola,
L. Herrera Prats, A. Gallardo Izquierdo, M.D. Bovea
Universitat Jaume I
INGRES (Ingeniería de Residuos)

Summary

This work analyses the energy balance of digested sludge from six treatment plants from different sectors of production. To this end, in the first place it was necessary to determine the humidity in order to calculate the energy invested in the sludge drying process. Then, with the use of an isoperibolic calorimeter, the superior calorific power (SCP) and the inferior calorific power (ICP) of the sample were measured. With the humidity and the ICP data, the energy balance was obtained and the energy and economic yield of the energy recovery process of each type of sludge could be analyzed. Last of all, the samples were calcinated and the ash content of each type of sludge was determined. Together with the foregoing data, the essential elements (C, H, O, N, S) content was also revealed in order to study their possible use as a fertilizer.

Resumen

La eliminación de lodos estabilizados generados en las estaciones depuradoras de aguas residuales es una tarea que entraña una cierta dificultad. La normativa al respecto recomienda su aplicación como fertilizante, aunque el contenido en metales pesados puede limitar su aplicación. Esta limitación es todavía más acuciante en el caso de depuradoras de efluentes industriales.

Otra de las posibles soluciones es su compostaje mezclándolos con otros materiales con elevado contenido en carbono hasta llegar a una relación C/N aceptable. Sin embargo, la puesta en mercado de este material se ve entorpecida por entrar en clara competencia con el compost producido a partir de residuos sólidos urbanos y de residuos agropecuarios. Además con la mezcla no se evita el problema de los metales pesados.

La tercera vía para su eliminación es la valorización energética, para lo cual es necesario secar el lodo y

asimilarlo a un combustible derivado de residuos, siempre que su poder calorífico sea atractivo frente a otros combustibles.

En este trabajo se analiza el balance energético de lodos digeridos procedentes de seis depuradoras de diferentes sectores productivos. Para ello, en primer lugar, es necesario determinar la humedad para calcular la energía invertida en el proceso de secado del lodo. A continuación, mediante un calorímetro isoperibólico, se calcula el poder calorífico superior (PCS) y el inferior (PCI) de la muestra. Con el dato de la humedad y del PCI se puede realizar el balance energético y así poder analizar la rentabilidad energética y económica del proceso de valorización de cada lodo. Por último, se calcinan las muestras y se determina el contenido en cenizas de cada lodo. Junto a los datos anteriores se muestra también el contenido en elementos esenciales (C, H, O, N y S) para estudiar su posible uso como fertilizante.

INTRODUCCIÓN

La gestión de lodos de las depuradoras de aguas residuales, código CER 190805, tiene la peculiaridad de que ciertos usos y posibilidades de reciclaje están regulados por normas específicas, con el objeto de limitar el posible efecto nocivo sobre factores ambientales como agua, suelo, vegetación, animales y ser humano. Algunas de estas normas son de carácter agronómico, como es el caso de los lodos utilizados como enmienda orgánica en suelos [1, 2].

Por otra parte, se ha observado un incremento continuado en la generación de lodos de depuradoras debido al importante aumento de caudal de la depuración de aguas residuales, de forma que mientras que en el año 1998 se generaban en España alrededor de 800.000 toneladas de lodos [3], en el año 2005 esta cantidad se había incrementado en un 39% [4].

Sin embargo, aunque la opción favorable desde el punto de vista económico y ambiental de los lodos es la utilización como enmienda agrícola (preferiblemente compostado y estabilizado), es necesario considerar que estos materiales tienen riesgos de contaminación del medio ambiente, especialmente suelos, por lo que las dosis de aplicación deben fijarse en función de las características agronómicas y edafoló-

LA COMBUSTIÓN CONTROLADA ES UN PROCESO EN EL QUE LA FRACCIÓN ORGÁNICA DE LOS LODOS SE TRANSFORMA EN MATERIA INERTE.

gicas del suelo, de la presencia de patógenos, de las semillas que contienen y de las exigencias nutricionales de los cultivos [4, 5]. Pero además de estabilizar el producto, es necesario conocer previamente el contenido y las formas químicas de los metales pesados que contiene, es decir, su biodisponibilidad, ya que estos elementos además de no ser biodegradables pueden ser tóxicos a muy bajas concentraciones [6, 7] y tienden a acumularse a lo largo de la cadena alimentaria humana [8, 9], lo que hace que lodos con estas características deban ser gestionados como residuos peligrosos.

Por ello, hay ocasiones en que, por no cumplir con los requisitos que marca la ley para considerar el lodo como fertilizante estabilizado, es necesario utilizar otro mé-

Lodo	Humedad (%)	PCI (cal/g) (smh)	PCI (cal/g) (sms)
Lodo 1	69,97	574,17	2.979,14
Lodo 2	58,99	1.176,97	3.511,49
Lodo 3	77,10	355,18	2.769,80
Lodo 4	70,75	719,83	3.675,19
Lodo 5	72,63	352,82	2.650,39
Lodo 6	52,55	481,29	1.532,62

todo de eliminación, ya sea depósito en vertedero, biometanización o combustión controlada.

La combustión controlada es un proceso en el que la fracción orgánica de los lodos se transforma en materia inerte. Como es evidente, no se trata de un sistema de eliminación total, genera cenizas y gases, pero también produce una significativa reducción de peso y volumen del material original, por lo que puede ser tratado como combustible derivado de residuos (CDR) si su poder calorífico es adecuado. Si este tipo de transformación se produce de forma incontrolada [10, 11] puede originar problemas medioambientales debido

a las características propias de los lodos, que pueden tener carácter ácido, básico o salino, y por otra parte pueden contener elementos de transición y no metálicos que pueden favorecer la generación de sustancias tóxicas durante el proceso de combustión [12].

Aparte de los problemas ambientales y sanitarios hay que tener en consideración que los lodos con secado mecánico procedentes de las depuradoras suelen tener contenido en agua bastante elevado, próximo al 70-75%, lo cual incrementa los costos de manipulación y transporte y dificulta su incineración. De hecho el Plan Nacional de Lodos de Depuradora PNLD [3] recomienda seguir el principio de proximidad en el tratamiento de eliminación de los lodos, de forma que en

lo posible se evite su transporte a grandes distancias.

Sin embargo y pese a lo anterior, el II Plan de Lodos de Depuradora establece como objetivo que en el año 2010 un 15% de lodos de depuradora sean valorizados energéticamente, presupuestando una inversión de 6 millones de euros en la adaptación y modernización de las plantas de incineración de lodos de depuradora existentes [3, 4].

En este trabajo se han estudiado seis tipos diferentes de lodo de depuradora, determinando su humedad, su poder calorífico en base seca y en base húmeda y su contenido en cenizas. Con estos datos será posible evaluar la rentabilidad energética que supondría una incineración con recuperación de energía a partir de lodo húmedo y de lodo seco. Así mismo, se valorará la posibilidad de someter previamente el lodo a un secado térmico. Por último se proporcionarán datos sobre el contenido en cenizas de cada tipo de lodo y del contenido en elementos esenciales (C, H, O, N y S).

En principio se ha descartado la biodigestión ya que son lodos ya digeridos y, por tanto, sometidos a fermentación anaerobia.

PROCEDIMIENTO OPERATIVO

Toma de muestra

Personal técnico de las estaciones depuradoras envían al laboratorio de Residuos Sólidos del grupo de investigación INGRES (INGeniería de RESiduos), de la Universitat Jaume I de Castellón, dos muestras de unos 15 kg de cada uno de los lodos digeridos pertenecientes a las actividades siguientes:

- Lodo 1: procedente de una estación

Figura 1 molturación del lodo seco



Figura 2 aspecto de los distintos lodos



depuradora de aguas residuales (EDAR) urbanas.

- Lodo 2: procedente de una EDAR de una industria papelera.
- Lodo 3: procedente de una EDAR urbana.
- Lodo 4: procedente de una EDAR de una industria de curtidos.
- Lodo 5: procedente de una EDAR de una industria textil.
- Lodo 6: procedente de una EDAR de una industria láctea.

Cada una de estas dos muestras de cada procedencia es enviada en distintas épocas del año a lo largo de 12 meses. De estas muestras se seleccionan por cuarteo unos 100 g para ser secados mediante estufa. Para cada determinación se ha calculado el promedio de 8 muestras de cada lodo (4 de cada procedencia) y se calcula el dato medio de cada tipo de lodo.

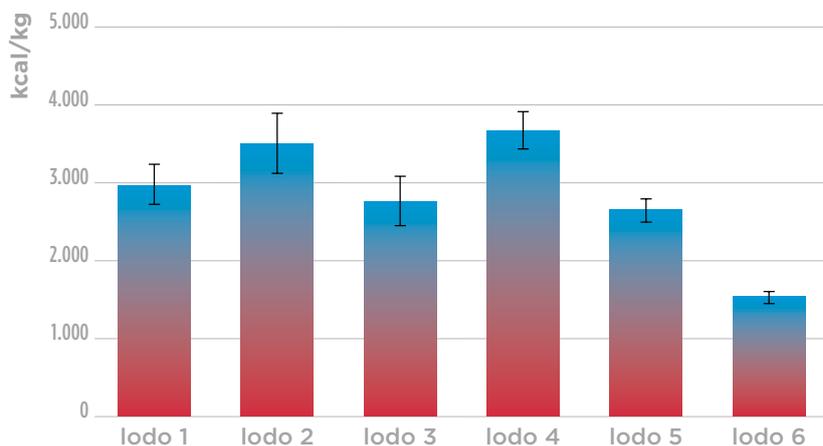
Determinación de la humedad

Mediante el secado de los lodos en estufa

Tabla 2 Contenido en cenizas de los lodos en base seca y en base húmeda

Lodo	Cenizas (%) (sms)	Cenizas (%) (smh)
Lodo 1	39,10	11,74
Lodo 2	28,30	11,61
Lodo 3	36,47	8,35
Lodo 4	24,95	7,30
Lodo 5	24,44	6,69
Lodo 6	54,24	25,74

Figura 3 gráfica comparativa del PCI medio sobre masa seca de los distintos tipos de lodos con su correspondiente desviación típica



se determina su humedad. Para ello se sigue el procedimiento descrito en la norma UNE 32-002 [13, 14]. La humedad media obtenida se representa en la tabla 1.

Una vez que las distintas muestras están secas se trituran en mortero hasta alcanzar una granulometría de 1-2 mm (figuras 1 y 2).

Cálculo del poder calorífico inferior (PCI)

Los lodos procedentes de la depuradora no están secos sino que tienen una elevada humedad en torno al 60-70%. Con estos datos se ha calculado el PCI correspondiente al lodo húmedo (smh), tal y como se obtendría de la depuradora (tabla 1) tras un secado exclusivamente mecánico, y al lodo seco (sms).

El poder calorífico de un combustible es la energía liberada por unidad de peso por combustión con oxígeno. Siguiendo el procedimiento descrito en la norma UNE

32 006:1995 [13, 15], se introducen ocho de cada una de las muestras secas en la bomba calorimétrica y se obtiene el poder calorífico superior (PCS). En este valor se incluye el calor de condensación del hidrógeno (alrededor del 5%) y del agua contenida en el lodo seco después de la combustión, por lo que hay que restarlo, obteniéndose el poder calorífico inferior (PCI), que es el dato que interesa desde el punto de vista práctico. Los datos medios se muestran en la tabla 1 y se representan en la figura 3.

Determinación del contenido en cenizas

El cálculo del porcentaje en cenizas en la incineración de un lodo es importante para conocer las cantidades de inquemados que se pueden generar y prever así su gestión. El procedimiento seguido para la determinación del contenido en cenizas es el dictado por la norma UNE 32-004-84 [13, 16], es decir, introducir aproximadamente 2 gramos de 4 mues-

Figura 4
muestras de lodos introducidas en horno mufla a 900 °C



Figura 5
aspecto de las cenizas de cada muestra de lodos después de su calcinación



tras de cada uno de los lodos en horno mufla a 900 °C durante 60 minutos (figuras 4 y 5).

Sin embargo, para conocer el porcentaje real de cenizas que se obtendrían en caso de incinerar los lodos al salir de la depuradora (con el 70% de humedad aproximadamente), hay que proporcionar los datos correspondientes a muestras húmedas (tabla 2).

Los datos obtenidos de porcentaje en peso de cenizas base seca después de la calcinación de la muestra se resumen en la tabla 2 y figura 6.

Análisis elemental de los lodos

Por medio de los analizadores correspondientes se determina para cada uno de los lodos los contenidos en carbono, hidrógeno, oxígeno, nitrógeno y azufre (tabla 3). De estos datos se calcula la relación C/N, que se usa para definir el contenido en nutrientes de los lodos

Figura 6
gráfica comparativa del contenido en cenizas medio sobre masa seca de los distintos tipos de lodos con su correspondiente desviación típica

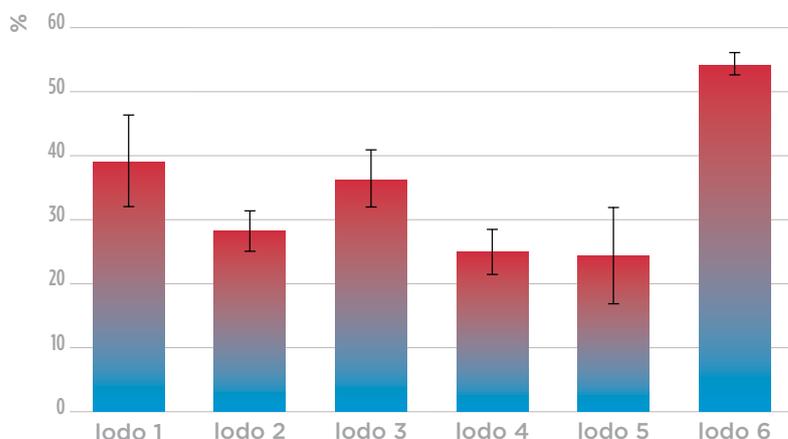


Tabla 3 Análisis elemental de los lodos; contenido en nutrientes

Muestra seca	C (%)	H (%)	O (%)	N(%)	S (%)	C/N
Lodo 1	26,62	4,18	17,05	3,33	1,55	7,99
Lodo 2	37,17	4,46	28,97	1,29	0,35	28,82
Lodo 3	32,69	3,62	20,85	3,91	1,45	8,35
Lodo 4	41,59	5,02	21,75	4,84	1,31	8,60
Lodo 5	30,40	5,13	28,74	5,71	1,58	5,32
Lodo 6	19,45	4,68	25,33	1,71	0,08	11,37

como fertilizante y además servirá para estimar la composición de los gases que serán liberados en el proceso de incineración. El azufre provoca la formación de SO₂ (causante de la lluvia ácida), el carbono genera emisiones de CO₂ (gas de efecto invernadero) y el nitrógeno en condiciones adecuadas forma óxidos de nitrógeno (causante del smog fotoquímico y de lluvia ácida).

DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Los datos obtenidos de PCI de los cinco primeros lodos secos son lo suficientemente altos como para que su valorización energética por incineración sea viable, no así del lodo 6. Sin embargo, debido a la elevada humedad que contienen al salir del secado mecánico, su transporte encarecería mucho el proceso.

Así pues sería recomendable un secado térmico previo a su transporte hacia la

planta incineradora, ya que el secado térmico permite eliminar la mayor parte del agua intracelular de los lodos mediante la aplicación de calor externo. El producto resultante del secado mantiene su contenido en material sólido pero su humedad queda reducida a un 10-15%. En estas condiciones de mayor sequedad se mejoran las posibilidades de eliminación del lodo y se abarata su transporte [17]. El consumo energético para el secado térmico de lodos puede oscilar según el rendimiento de la instalación pero se sitúa entre 0,35-0,50 kWh/litro de agua evaporada.

En estas condiciones y con los datos medios de humedad de los lodos analizados se obtendría el PCI de los lodos con una humedad de alrededor del 10% (tabla 4), que es la humedad máxima permitida en los hornos de incineración. Así pues, a los lodos digeridos procedentes de la EDAR sería muy aconsejable realizar, en la misma instalación, un secado mecánico hasta una

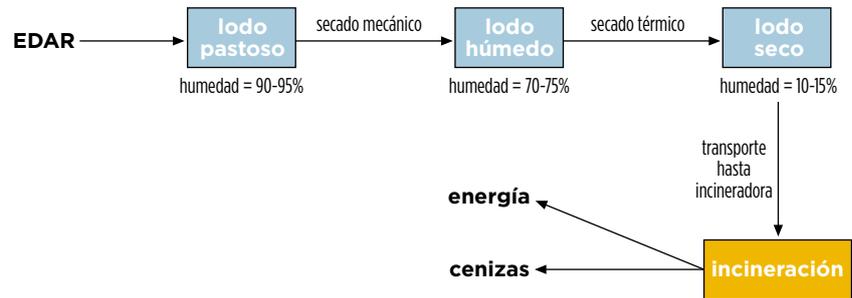
Tabla 4 Poder calorífico inferior de los lodos analizados con un contenido en humedad del 10%

Muestra con una humedad del 10%	PCI (cal/g)
Lodo 1	2.635,42
Lodo 2	3.115,74
Lodo 3	2.456,62
Lodo 4	3.257,47
Lodo 5	2.334,05
Lodo 6	1.332,56

Tabla 5 Peso de combustible necesario para producir 1.800 kWh de electricidad en una central térmica con un rendimiento medio del 35%

Combustible	Peso necesario
Lodo 1	1.680,7 kg
Lodo 2	1.421,6 kg
Lodo 3	1.830,1 kg
Lodo 4	1.359,7 kg
Lodo 5	1.897,7 kg
Lodo 6	3.324,1 kg
Antracita	661,08 kg
Lignito	2.034,6 kg

Figura 7 representación gráfica del procedimiento recomendado para los lodos digeridos procedentes de EDAR



humedad de alrededor del 70-75%, y a continuación un secado térmico hasta un contenido en agua del 10-15%; con ello se reduciría alrededor del 70-75% el peso de los lodos.

El procedimiento operativo recomendado para los lodos procedentes de las distintas EDAR sería el representado en la figura 7.

Una vez incinerado el lodo quedarían las cenizas, por lo que el peso final se reduciría alrededor de un 45-75% con respecto a la muestra seca (tabla 2) y alrededor de un 75-90% con respecto a la muestra húmeda inicial (tabla 1).

En cuanto a las diferencias de PCI entre los distintos tipos de lodo con el 10% de humedad, se observa que el lodo cuyo balance energético final es más favorable es el procedente de la industria de curtidos (lodo 4), cuyo PCI es un 5% superior al de la industria papelera (lodo 2), un 24% superior al lodo 1, un 33% superior al lodo 3, un 40% superior al de la industria textil (lodo 5), y un 144% superior al lodo de la industria láctea. Es consecuencia de este bajo PCI del lodo 6 el hecho de que

este lodo también es el que genera mayor porcentaje de cenizas.

Si se hiciera la comparación de estos lodos como combustible derivado de residuos con otros combustibles como la antracita (PCI = 6.700 cal/g) y el lignito (2.177 cal/g), se puede decir que, suponiendo una humedad media del lodo del 10%, la incineración de una tonelada de lodo equivaldría a quemar una cierta cantidad de combustible fósil (lignito o antracita) tal y como se resume en la tabla 5.

En la tabla 5 se hace una comparación del peso necesario de cada uno de los lodos (con 10% de humedad) para producir 1.800 kWh de electricidad en una central térmica. También se compara con combustibles fósiles utilizados en este tipo de instalaciones como la antracita (PCI = 6.700 kcal/kg) y el lignito (PCI = 2.177 kcal/kg). La energía obtenida de la incineración depende de la eficacia energética de las instalaciones de valorización [18, 19].

Si este poder calorífico se empleara en una planta cementera se podrían producir alrededor de 5.000 kg de clinker.

CONCLUSIONES

El II Plan Nacional de Lodos de Depuradoras de Aguas Residuales recomienda como opción más favorable desde el punto de vista ambiental, la utilización de los lodos como enmienda orgánica en agricultura una vez que se han compostado. No obstante, la posibilidad de encontrar elementos tóxicos o metales pesados en estos lodos, obliga a realizar análisis frecuentes previos al vertido

en terreno agrícola. En caso de encontrar contenidos elevados de metales pesados o sustancias tóxicas, la incineración con recuperación de energía o la biometanización sería la opción más recomendable.

En este trabajo se analizan lodos ya digeridos, por lo que la biometanización no resultaría viable. Así pues, la investigación se ha centrado en analizar la viabilidad de realizar una incineración con

recuperación de energía para los seis tipos de lodos.

Los datos aportados demuestran que el poder calorífico de cinco de los lodos secos o con un contenido en humedad próximo al 10%, después de haber sido sometidos a secado mecánico y térmico, es aceptable para su incineración, ya que se sitúa en torno a 2.000-3.000 kcal/kg. De hecho se demuestra que su valorización térmica aportaría, para los lodos 1 al

5 una energía mayor o igual a la del lignito que es un combustible usado normalmente en centrales térmicas.

Por otro lado, de estos cinco lodos, la reducción en peso tras el secado mecánico y térmico es considerable (60-75%), con lo cual el transporte de los lodos desde la EDAR hasta la planta de incineración se abarataría sensiblemente. La recuperación de energía que se obtendría de su incineración podría compensar los costes de secado y de transporte, siempre que la

planta incineradora estuviese a una distancia no excesiva de los lugares de generación. Este último aspecto sería el objetivo de futuros trabajos.

Los trabajos realizados muestran también una pequeña diferencia entre los distintos tipos de lodos. El lodo que aporta un mayor poder calorífico inferior es el procedente de la industria de curtidos y el que menos energía desprende en su combustión es el de la industria láctea. De hecho, la incineración no resulta viable para este

último, tanto por su escaso PCI como por su elevado contenido en cenizas.

Así pues, con la valorización energética de estos lodos (1 al 5) se obtendrían fundamentalmente dos ventajas. La primera es que se podría eliminar un residuo de manera sostenible siempre que la planta cumpliera la legislación vigente en materia de emisiones. La segunda ventaja es que al tener un poder calorífico aceptable podría evitarse la extracción de materiales fósiles no renovables.

BIBLIOGRAFÍA

1. "Directiva 86/278/CEE del Consejo, de 12 de junio de 1986, relativa a la protección del medio ambiente y, en particular, de los suelos, en la utilización de los lodos de depuradora en agricultura".
2. "Directiva 91/692/CEE del Consejo, de 23 de diciembre de 1991, sobre la normalización y la racionalización de los informes relativos a la aplicación de determinadas directivas referentes al medio ambiente".
3. Plan Nacional de Lodos de Depuradoras de Aguas Residuales-EDAR (PNLD)-(2001-2006) según Resolución de 14 de junio de 2001, de la Secretaría General de Medio Ambiente, por la que se dispone la publicación del Acuerdo de Consejo de Ministros, de 1 de junio de 2001, por el que se aprueba el Plan Nacional de Lodos de Depuradoras de Aguas Residuales 2001-2006.
4. Plan Nacional Integrado de Residuos (PNIR) 2008-2015, Anexo 5 (II Plan Nacional de Lodos de Depuradoras de Aguas Residuales EDAR 2008-2015).
5. Ingelmo, F.; Molina, M^a.J.; Soriano, M^a.D.; Gallardo, A.; Lapeña, L. 'Efecto del tiempo de compostaje en la biodisponibilidad de metales pesados en un compost elaborado con lodos de depuradora y virutas de madera' "I Simposio Iberoamericano sobre Ingeniería de Residuos" isbn: 9788480216654, Ed. Universitat Jaume I, Castellón (2008).
6. MAPA. "R.D. 1310/1990 de 29 de octubre por el que se regula la utilización de los lodos de depuración en el sector agrario" BOE (1990) 262: pp 32339-32340.
7. Ministerio de la Presidencia. "R.D. 824/2005, de 8 de julio, sobre productos fertilizantes" BOE (2005) 171: pp 25592-25654.
8. Dudka, S.; Miller, W.P. 'Accumulation of potentially toxic elements in plants and their transfer to human food chain' *J. Environ. Sci. Health B.* (1999) 34: pp 681-708.
9. Amir, S.; Hafidi, M.; Merlina, G.; Revel, J.C. 'Sequential extraction of heavy metals during composting of sewage sludge' *Chemosphere* (2005) 59: pp 801-810.
10. Lilly Shen, Dong-ke Zhang. 'Low-temperature pyrolysis of sewage sludge and putrescible garbage for fuel oil production' *Fuel* (2005) 84 (7-8) pp. 809-815.
11. Principi, P.; Villa, F.; Bernasconi, M.; Zanardini, E. 'Metal toxicity in municipal wastewater activated sludge investigated by multivariate analysis and in situ hybridization' *Water Research* (2006) 40, pp 99-106.
12. Ramírez, M.C.; Larrubia, M.A.; Herrera, M.C.; Guerrero-Pérez, M.O.; Malpartida, I.; Alemany, L.J.; Palacios, C. 'Valorización energética de biosólidos: algunos aspectos económicos y ambientales en la EDAR Guadalhorce (Málaga)' *Residuos* (2007) 98, pp 60-67.
13. Gallardo, A. "Análisis de Residuos Sólidos" Ed. Publicación de la Universitat Jaume I, Castellón (2002).
14. "Norma UNE 32-002 Combustibles minerales sólidos. Determinación de la humedad de la muestra para análisis".
15. "Norma UNE 32-006. Combustibles minerales sólidos. Poder calorífico mediante determinación en calorímetro automático".
16. "Norma UNE 32-004-84. Combustibles minerales sólidos. Determinación de cenizas".
17. Ochera, L.; Permuy, D. 'Lodos industriales a pequeña escala: mejoras en su gestión, haciendo uso de un proceso de secado térmico de los fangos' *Residuos* (2003) 75, pp 36-41.
18. Gallardo, A.; Bovea M.D.; Ochera, L.; Beltrán, M.; Albarrán, F. 'Aprovechamiento de la fracción mezcla de la planta de reciclaje y compostaje de residuos sólidos urbanos de Onda (Castellón) (I)' *Residuos* (2006) 90, pp 52-60.
19. Bovea, M.D.; Gallardo, A.; Beltrán, M.; Ochera, L. 'Aprovechamiento de la fracción mezcla de la planta de reciclaje y compostaje de residuos sólidos urbanos de Onda (Castellón) (II)' *Residuos* (2006) 92, pp 38-44.

Agradecimientos

El grupo de investigación INGRES agradece la financiación concedida por la Generalitat Valenciana (Conselleria de Educación, D.G. de Política Científica), en su programa de fomento de la investigación científica y el desarrollo tecnológico en la Comunitat Valenciana (DOCV n^o 5689, de 28/01/2008), en su anexo VI "Ayudas para la realización de proyectos precompetitivos de I+D para equipos de investigación", con el proyecto código GVPRE/2008/090.