



**Congreso Nacional del Medio Ambiente**  
Cumbre del Desarrollo Sostenible

**COMUNICACIÓN TÉCNICA**

## Valorización de lodos digeridos de depuradora. Balance energético

Autor: Francisco J. Colomer Mendoza

Institución: Depto. Ingeniería Mecánica y Construcción, Universitat Jaume I  
E-mail: fcolomer@emc.uji.es

Otros autores: Antonio Gallardo Izquierdo (Depto. Ingeniería Mecánica y Construcción, Universitat Jaume I); M<sup>a</sup> Dolores Bovea Edo (Depto. Ingeniería Mecánica y Construcción, Universitat Jaume I); Mar Carlos Alberola (Depto. Ingeniería Mecánica y Construcción, Universitat Jaume I); Nicolas Chaumontet (Universitat Jaume I).



## **RESUMEN:**

La eliminación de los lodos estabilizados generados en las estaciones depuradoras es una tarea complicada. Los procedentes de estaciones depuradoras de aguas residuales urbanas suelen utilizarse como fertilizante en uso directo, aunque el contenido en metales pesados suele 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. 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 5 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) de la muestra. Con el dato de la humedad y del PCS se puede realizar el balance energético con el objeto de analizar la rentabilidad energética y económica del proceso de valorización de cada lodo. Por último, se calcina las muestras y se determina el contenido en cenizas de cada lodo.



## 1. 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 regular el posible efecto nocivo sobre los factores ambientales agua, suelo, vegetación, animales y ser humano. Algunas de estas normas son de carácter agronómico como 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 depuradora debido al importante aumento en 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 edafológicas 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 método 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 que puede ser tratado como cualquier tipo de residuo 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 PNLD 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].

En este trabajo se han estudiado cinco 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.

## 2. PROCEDIMIENTO OPERATIVO

### 2.1. 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 distintas muestras de unos 15 kg de cada uno de los lodos digeridos pertenecientes a las actividades siguientes:

- Lodo 1: procedente de una estación depuradora de aguas residuales (EDAR) urbanas
- Lodo 2: procedente de una EDAR de una industria papelera
- Lodo 3: procedente de una EDAR urbanas
- Lodo 4: procedente de una EDAR de una industria de curtidos
- Lodo 5: procedente de una EDAR de una industria textil

Cada una de ellas es enviada en distintas épocas del año a lo largo de 5 meses. De estas muestras se selecciona por cuarteo unos 100 g para ser secados mediante estufa.

### 2.2. DETERMINACIÓN DE LA HUMEDAD

Mediante el secado de los lodos en estufa 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.

Tabla 1: Humedad de las muestras recogidas

	Humedad (%)
Lodo 1	72,84
Lodo 2	61,70
Lodo 3	75,15
Lodo 4	70,62
Lodo 5	68,70

Una vez que las distintas muestras están secas se trituran en mortero hasta alcanzar una granulometría de 10-20 mm (figura 1 y 2)



Figura 1: Molturación del lodo seco

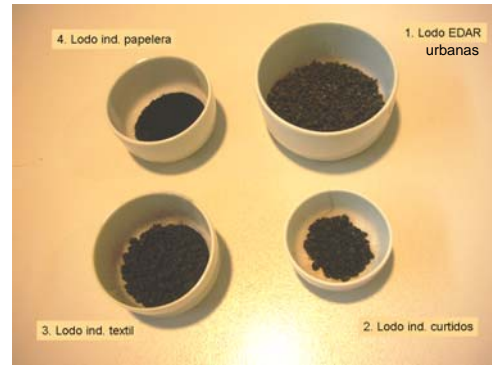


Figura 2: Aspecto de los distintos lodos

### 2.3. CÁLCULO DEL PODER CALORÍFICO

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 tres 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 de 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 2 y se representan en la figura 3.

Tabla 2: Poder calorífico inferior de la muestra seca

<i>muestra seca</i>	PCI (cal/g)
Lodo 1	2978,34
Lodo 2	3541,17
Lodo 3	2424,61
Lodo 4	3484,62
Lodo 5	2605,24

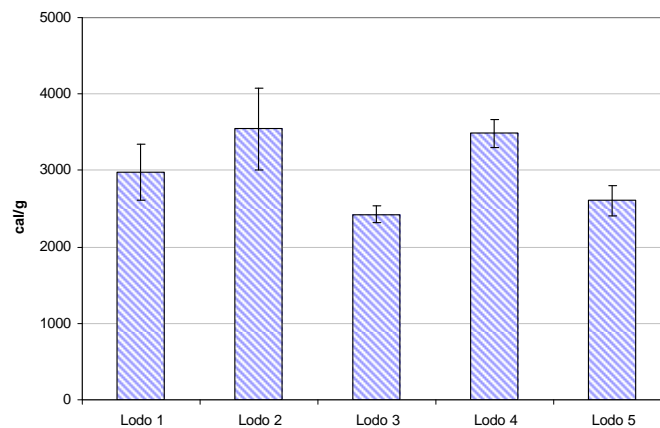


Figura 3: Gráfica comparativa del PCI medio sobre masa seca de los distintos tipos de lodos con su correspondiente desviación típica

Al comparar los datos obtenidos de PCI de los distintos tipos de lodos secos y someterlos a tratamiento estadístico (programa STATGRAPHICS Plus 5.1) se obtiene lo siguiente; la tabla ANOVA descompone la varianza de los datos en dos componentes: un componente entre grupos y un componente dentro de cada grupo. El F-ratio, que en este caso es igual a 7,11198, es el cociente de la estimación entre grupos y la estimación dentro de los grupos. Puesto que el p-valor del test F es inferior a 0,05 hay diferencia estadísticamente significativa entre las medias de las 5 variables a un nivel de confianza del 95,0%.

Sin embargo, los lodos procedentes de la depuradora no están secos sino que tienen una elevada humedad en torno al 70% (tabla 1). Con estos datos se ha calculado el PCI correspondiente al lodo húmedo, tal y como se obtendría de la depuradora (tabla 3) tras un secado exclusivamente mecánico.

Tabla 3: Poder calorífico inferior de la muestra húmeda

<i>muestra húmeda</i>	PCI (cal/g)
Lodo 1	408,30
Lodo 2	1016,92
Lodo 3	189,19
Lodo 4	635,37
Lodo 5	437,59

## 2.4. DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO EN CENIZAS

El cálculo del porcentaje de 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 tres muestras de cada uno de los lodos en horno mufla a 900°C durante 60 minutos (figuras 4 y 5).



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

Los datos obtenidos de porcentaje en peso de cenizas base seca después de la calcinación de la muestra se resumen en la tabla 4 y figura 6.

Tabla 4: Contenido en cenizas de las muestras secas

<i>muestra seca</i>	% cenizas
Lodo 1	33,65
Lodo 2	30,44
Lodo 3	35,97
Lodo 4	24,64
Lodo 5	17,94

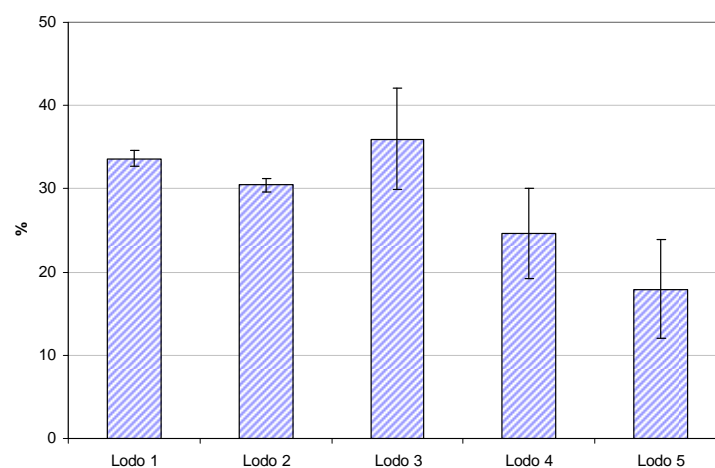


Figura 6: Gráfica comparativa del contenido en cenizas medio sobre masa seca de los distintos tipos de lodos con su correspondiente desviación típica



La comparación de los datos obtenidos de cenizas de los lodos secos y sometidos igualmente a tratamiento estadístico (programa STATGRAPHICS Plus 5.1) se obtiene lo siguiente; la tabla ANOVA descompone la varianza de los datos en dos componentes: un componente entre grupos y un componente dentro de cada grupo. El F-ratio, que en este caso es igual a 7,5541, es el cociente de la estimación entre grupos y la estimación dentro de los grupos. Puesto que el p-valor del test F es inferior a 0,05, hay diferencia estadísticamente significativa entre las medias de las 5 variables a un nivel de confianza del 95,0%.

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 5).

Tabla 5: Contenido en cenizas de las muestras húmedas

<i>Muestra húmeda</i>	% cenizas
Lodo 1	9,14
Lodo 2	11,66
Lodo 3	8,94
Lodo 4	7,24
Lodo 5	5,62

### 3. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Los datos obtenidos de PCI de los cinco lodos secos son lo suficientemente altos como para que su valorización energética por incineración sea viable. 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 alrededor del 10% (tabla 6) 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 humedad 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.



Tabla 6: Poder calorífico inferior de los lodos analizados con un contenido en humedad de 10%

humedad 10%	PCI (cal/g)
Lodo 1	2625,51
Lodo 2	3132,06
Lodo 3	2127,15
Lodo 4	3081,16
Lodo 5	2289,72

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

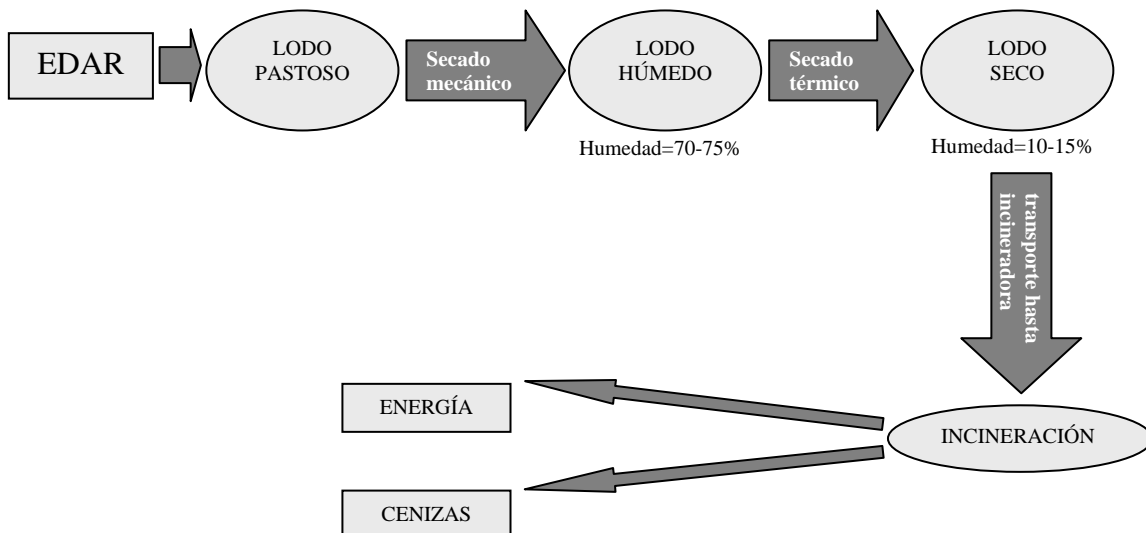


Figura 7: representación gráfica del procedimiento recomendado para los lodos digeridos procedentes de EDAR

Una vez incinerado el lodo quedarían las cenizas, por lo que el peso final se reduciría alrededor de un 65-85% con respecto a la muestra seca (tabla 4) y alrededor de un 85-90% con respecto a la muestra húmeda inicial (tabla 5).

En cuanto a las diferencias de PCI entre los distintos tipos de lodo se observa que el lodo cuyo balance energético final es más favorable es el procedente de la industria papelera (lodo 2) el cual, con humedades iniciales del 61%, tiene un PCI un 60% superior al lodo de la industria de curtidos (lodo 4), un 133% superior al de la industria textil (lodo 5) y de un 149% a un 437% superior al de las EDAR urbanas (lodos 1 y 3).

En cuanto a las cenizas generadas a partir del lodo húmedo inicial con una humedad de 70-75% los análisis efectuados muestran que el lodo 2 genera entre un 28% y un 30% más cenizas que los lodos 1 y 3, un 61% más que el lodo 4 y un 107% más que el lodo 5.



#### **4. 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 campos. 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. Por lo que la investigación se ha centrado en analizar la viabilidad de realizar una incineración con recuperación de energía para los cinco tipos de lodos.

Los datos aportados demuestran que el poder calorífico 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 2000-3000 kcal/kg. Por otro lado la reducción en peso tras el secado mecánico y térmico es considerable (70-75%) 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 papelera y el que menos energía desprende en su combustión son los de EDAR urbanas.

Por otro lado, el lodo que más cenizas genera tras su incineración es también el lodo procedente de la industria papelera y el que menos el de la industria textil.

#### **5. AGRADECIMIENTOS**

El grupo de investigación INGRES agradece la financiación concedida por la Generalitat Valenciana (D.G. de Política Científica, Consellería de Educación) en su programa de fomento de la investigación científica y el desarrollo tecnológico en la Comunitat Valenciana (DOCV nº 5.689, de 28-01-2008), en su anexo VI "Ayudas para la realización de proyectos precompetitivos de I+D para equipos de investigación".

#### **6. REFERENCIAS**

- [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<sup>a</sup>. J., Soriano, M<sup>a</sup>. D., Gallardo, A., Lapeña, L., (2008). 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

[6] MAPA (1990). RD 1310/1990 de 29 de Octubre por el que se regula la utilización de los lodos de depuración en el sector agrario. BOE,; 262: 32339 – 32340.

[7] Ministerio de la Presidencia (2005). RD 824/2005, de 8 de julio, sobre productos fertilizantes. BOE; 171: 25592- 25654.

[8] Dudka S, Miller WP. (1999). Accumulation of potentially toxic elements in plants and their transfer to human food chain. J. Environ. Sci. Health B,; 34: 681–708.

[9] Amir S, Hafidi M, Merlina G, Revel JC. (2005) Sequential extraction of heavy metals during composting of sewage sludge. Chemosphere 59: 801–810.

[10] Lilly Shen, Dong-ke Zhang (2005) Low-temperature pyrolysis of sewage sludge and putrescible garbage for fuel oil production Fuel, 84 (7-8) pp. 809-815

[11] Principi, P.; Villa, F.; Bernasconi, M. y Zanardini, E. (2006) Metal toxicity in municipal wastewater activated sludge investigated by multivariate analysis and in situ hybridization, Water Research 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. (2007) Valorización energética de biosólidos: algunos aspectos económicos y ambientales en la EDAR Guadalhorce (Málaga) Residuos: Revista técnica 98, pp. 60-67

[13] Gallardo, A. (2002) Análisis de Residuos Sólidos, Ed. Publicación de la Universitat Jaume I, Castellón.

[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. (2003) Lodos industriales a pequeña escala: mejoras en su gestión, haciendo uso de un proceso de secado térmico de los fangos, Residuos: Revista técnica 75, pp. 36-41