

Opciones de valorización de lodos de distintas estaciones depuradoras de aguas residuales

Colomer Mendoza, F. J.^{1,3}, Gallardo Izquierdo, A.^{1,3}, Robles Martínez, F.^{2,3}, Bovea, Ma. D.^{1,3},
Herrera Prats, L.¹

Fecha de recepción: 2 de diciembre de 2010 – Fecha de aprobación: 10 de enero de 2011

RESUMEN

La legislación actual en la Unión Europea recomienda que los lodos de depuradora de aguas residuales se utilicen como fertilizante. Sin embargo, la presencia de metales pesados puede limitar esta aplicación, lo cual es más probable en caso de lodos de aguas residuales industriales. Por lo tanto, una segunda opción es la recuperación energética de los lodos. En el presente trabajo, se han analizado lodos digeridos procedentes de siete distintas depuradoras de aguas residuales españolas y se ha estudiado su viabilidad para usarse como fertilizantes, como combustible derivado de residuos o ser enviados a vertedero. Para determinar el poder fertilizante se ha realizado el análisis elemental (C, H, O, N y S) además del contenido en carbono orgánico asimilable, metales pesados, PO₄ y potasio. El poder calorífico (Poder Calorífico Inferior) y el contenido en cenizas se han determinado también para evaluar la posibilidad de recuperación energética. Además, conocer el contenido en metales pesados, Cl, F, C, N y S es fundamental para estimar las emisiones atmosféricas generadas durante su incineración. Por otro lado, se incluye una comparación de estos lodos con otros tipos de combustibles.

Palabras clave: combustible derivado de residuos (CDR), fertilizante, lodo, recuperación energética

Possibilities of recovery for different digested sewage sludges

ABSTRACT

The current European legislation regarding digested sludge from wastewater treatment plants recommends its use as a fertilizer. The presence of heavy metals, however, may limit this application and this clearly becomes even more important in the case of industrial wastewater treatment plants. Therefore, another option is the recovery of energy from the sludge. In this work, digested sludge coming from seven different wastewater treatment plants belong to an industrial estate in Spain are analysed. These sludges, either separately or altogether, can be used as fertilizers or refuse-derived fuel or sent to a landfill. In order to determine the fertilizing power, an elementary analysis (C, H, O, N and S) was conducted to establish the content in readily assimilated organic carbon, heavy metals, PO₄ and potassium. The calorific value (lower heating value) and the ash content must be known in order to assess the possibility of energy recovery. Furthermore, analysis of heavy metal, Cl, F, C, N and S content is compulsory to be able to estimate atmospheric emissions generated during their incineration. A comparison of the sludges with other sorts of fuels is also provided.

Keywords: fertilizer, recovery, RDF (Refuse-Derived Fuel), sludge.

¹Universidad Jaume I, Castellón (España), fcolomer@emc.uji.es

²Instituto Politécnico Nacional, México DF (México)

³REDISA, Red de Ingeniería en Saneamiento Ambiental www.redisa.uji.es

1. INTRODUCCIÓN

Los lodos de depuración de aguas residuales se pueden generar durante los tratamientos primario (físico y/o químico), secundario (biológico) y terciario. Representan un residuo acuoso, más o menos diluido, con una amplia variedad de coloides y otras partículas en diferentes formas. Pueden existir también varios contaminantes peligrosos, como sales, contaminantes orgánicos y metales pesados (Hartman *et al.* 2003). La fuente de sólidos en una planta de tratamiento varía en función del tipo de instalación y su método de operación.

Para realizar correctamente el tratamiento y eliminación del lodo es fundamental conocer sus características (Fytili y Zabaniotou 2008). La cantidad de lodo producida depende de la eficiencia, del tipo de tratamiento (los fisicoquímicos y los biológicos aerobios producen más lodo que los biológicos anaerobios) y de la carga contaminante inicial del agua residual (Fytili y Zabaniotou 2008; Carbonell *et al.* 2009).

Debido a que la producción de lodos de depuradora está incrementándose continuamente, el procesamiento y vertido de tal cantidad de residuos supone uno de los retos más importantes desde el punto de vista ambiental relacionados con la depuración de aguas residuales (Fytili y Zabaniotou 2008; Seames *et al.* 2002; Seyssiecq *et al.* 2003; Hartman *et al.* 2005).

En Europa, el peso seco *per capita* de lodos resultante de los tratamientos primario, secundario y terciario se sitúa en torno a 90 g por persona y día (Davis 1996). En la Unión Europea, países como Dinamarca, Luxemburgo y Alemania tienen la mayor tasa de generación por habitante equivalente. Alemania, Reino Unido, Francia y España son los países que más aprovechan los lodos como enmienda orgánica en agricultura (> 500,000 t/año). Irlanda, Finlandia y Reino Unido son los que tienen un mayor porcentaje de aprovechamiento de los lodos en agricultura (> 70%) (Langenkamp y Part 2001). La cantidad total de lodos generados en plantas de tratamiento de aguas residuales urbanas ha aumentado en Europa de 5.5 millones (año 1992) a 10 millones de toneladas de residuo seco en 2007. En España, alrededor de 800,000 toneladas de lodos fueron producidas en el año 1998 (PNLD 2001). En el año 2005, esta cantidad había aumentado un 39% (PNIR 2008).

El reciclado de lodos y su valorización energética son procesos que, desde el punto de vista ambiental, son preferibles al depósito en vertedero (Hara y Mino 2008). Sin embargo, existen multitud de métodos para

la eliminación segura de los lodos, entre ellos el vertedero controlado, solidificación-vitrificación, incineración, lagunaje, inyección en profundidad, vertido al mar o aplicación en agricultura (Hara y Mino 2008; Bridle y Skrypski-Mantele 2000; Cui *et al.* 2006; Gupta y Garg 2008; Jamali *et al.* 2008). Entre los anteriores, la solidificación-vitrificación y la inyección en profundidad suelen ser procesos muy costosos que se limitan a lodos con sustancias tóxicas y peligrosas.

Por otro lado, el contenido en nutrientes de los lodos es destacable, ya que pueden contener materia biodegradable, nitrógeno, fósforo y otros micronutrientes como B, Mn, Cu, Mb y Zn que lo convierten en una interesante enmienda agrícola. Además, también mejora la estructura de los suelos (Dolgen *et al.* 2004; USEPA 1983; Sree Ramulu 2002). En España, el 65% en peso de los lodos generados es utilizado como fertilizante agrícola (Carbonell *et al.* 2009).

Sin embargo, el contenido en metales pesados, sustancias químicas y bioquímicas, detergentes, pesticidas, etc., puede limitar este uso agrícola (Directive 91/271/EEC) ya que los lixiviados que forman y la escorrentía pueden afectar aguas subterráneas y organismos acuáticos ya que además de ser tóxicos a bajas concentraciones, se acumulan en los organismos y afectan a la cadena alimentaria (MAPA 1990; Dudka y Miller 1999; Parkpian *et al.* 2002; Ministerio de la Presidencia 2005; Amir *et al.* 2005; PNIR 2008; Ingelmo *et al.* 2008; Fytili y Zabaniotou 2008). En estos casos, es necesario buscar otros métodos de eliminación como el vertedero o la incineración (Hsiau y Lo 1998).

La incineración no es un método de eliminación total, pero reduce el volumen en un 90% y el peso en un 70%. Además, si su poder calorífico es adecuado, puede ser tratado como un combustible derivado de residuos (CDR), siempre que ésta se realice de una forma adecuada (Shen y Zhang 2005; Principi *et al.* 2006), a la temperatura requerida e instalando los pertinentes sistemas de depuración de gases para evitar la emisión excesiva de dioxinas, furanos, NO_x, N₂O, SO_x, HCl, HF, COVs y cenizas volantes (Ramírez *et al.* 2007, Chin *et al.* 2008).

A pesar de los problemas ambientales, hay que considerar que, después de un tratamiento mecánico, el lodo tiene una humedad en torno al 70-75%, lo cual encarece los costes de transporte y gestión (Dennis *et al.* 2005). Por esta razón, en España, el Plan Nacional de Lodos de Depuradora (PNLD 2001) recomienda atender a criterios de proximidad en la gestión de lodos.

No obstante, uno de los objetivos del II Plan Nacional de Lodos de Depuradora en España es que en el año 2010, al menos un 15% de los lodos sea valorizado con recuperación de energía (PNIR 2008). En el resto de Europa, hay países como Dinamarca que valorizan energéticamente el 24% de los lodos, 20% en Francia, 15% en Bélgica y 14% en Alemania, mientras que en EE.UU llegan al 25% y en Japón al 55% (Lundin *et al.* 2004).

Según Houillon y Jolliet (2005), la incineración en lecho fluidizado y el uso agrícola son los procesos más atractivos desde una perspectiva energética. Además, la incineración tiene el mejor balance de emisión de gases efecto invernadero, sobre todo si ésta se hace en hornos de la industria cementera ya que se evita el uso de un combustible fósil.

En este trabajo se han analizado siete tipos diferentes de lodos de depuradora, determinándose su humedad, valor calorífico, análisis elemental (C, H, O, N, S), poder fertilizante (carbono asimilable, P₂O₅ y K₂O), metales pesados, contenido en cloro y flúor. A partir de esos datos, fue valorada la posibilidad de aprovechar energéticamente la incineración de los lodos. Además, se valoró el vertido y la aplicación agrícola. La digestión anaerobia se ha descartado ya que los lodos han sido ya digeridos en la planta de tratamiento. Además de los resultados obtenidos, se presentan los datos obtenidos a partir de la bibliografía existente.

2. METODOLOGÍA

Para la realización de los análisis y determinaciones se ha recurrido a normas internacionales estándar. En la mayoría de los casos a normas ISO. No obstante, estas normas son semejantes a otras comúnmente utilizadas en países americanos como son las normas ASCE (American Society of Civil Engineers).

2.1. Muestreo

Dos muestras de 15 kg cada una, de lodo digerido, de cada una de las siete plantas de tratamiento fueron recibidas en distintas épocas del año. Estas muestras llegaron al laboratorio de Residuos Sólidos del grupo de investigación (INGeniería de RESiduos) de la Universidad Jaume I de Castellón (España). Las siete muestras distintas se han recibido de las siguientes estaciones depuradoras de aguas residuales (EDAR):

- Lodo 1: EDAR urbanas
- Lodo 2: EDAR de industria papelera
- Lodo 3: EDAR urbanas

- Lodo 4: EDAR de industria de curtidos
- Lodo 5: EDAR de industria textil
- Lodo 6: EDAR de industria alimentaria (láctea)
- Lodo 7: EDAR de industria alimentaria (cervecera)

El muestreo ha consistido en seleccionar por cuarteo 100 g de cada muestra recibida (14 muestras).

2.2. Contenido en humedad

El contenido en humedad de cada muestra se determinó mediante secado del lodo, siguiendo la norma ISO 5068-1 estándar (Gallardo 2002). Cuando las muestras están secas, son molidas hasta un tamaño de partícula de 1-2 mm. Los resultados se muestran en la Tabla 1.

2.3. Poder calorífico inferior (PCI)

El lodo recibido de la planta de tratamiento no estaba seco y tenía un contenido en humedad elevado (60-70%).

El PCI de un combustible corresponde a la energía liberada por unidad de peso cuando éste es quemado en presencia de oxígeno. Se sigue la norma estándar DIN EN 15170:2009 y ISO 1171:1997. El poder calorífico superior (PCS) se obtiene mediante un calorímetro isoperibólico (PARR 1261 Bomb Calorimeter®). Conociendo el contenido en hidrógeno puede calcularse el PCI. Los datos se muestran en la Tabla 1 y se representan en la Figura 2 en el apartado de “Resultados”.

2.4. Contenido en cenizas

Para conocer el contenido en inquemados de un combustible es necesario determinar el contenido en cenizas. Para ello se aplica la norma ISO 1171:1997, lo cual supone introducir 2 g de muestra en horno mufla durante 60 minutos a 900°C (Figura 1). La comparación del contenido en cenizas de los siete distintos lodos se muestra en la Figura 3.

2.5. Análisis elemental y oxígeno

El análisis elemental es una técnica que proporciona el contenido total de carbono, hidrógeno, nitrógeno y azufre presente en un amplio rango de muestras de naturaleza orgánica e inorgánica tanto sólidas como líquidas. El contenido en nitrógeno se analiza mediante el equipo de conductividad térmica (LECO FP-528®). Carbono y azufre se analizan con equipo de espectrometría infrarroja (LECO SC 144 DR®). Oxígeno e hidrógeno se determinan por espectrometría atómica de masas (Tabla 2).



Figura 1. Aspecto de las cenizas de los lodos después de ser sometidos a calcinación.

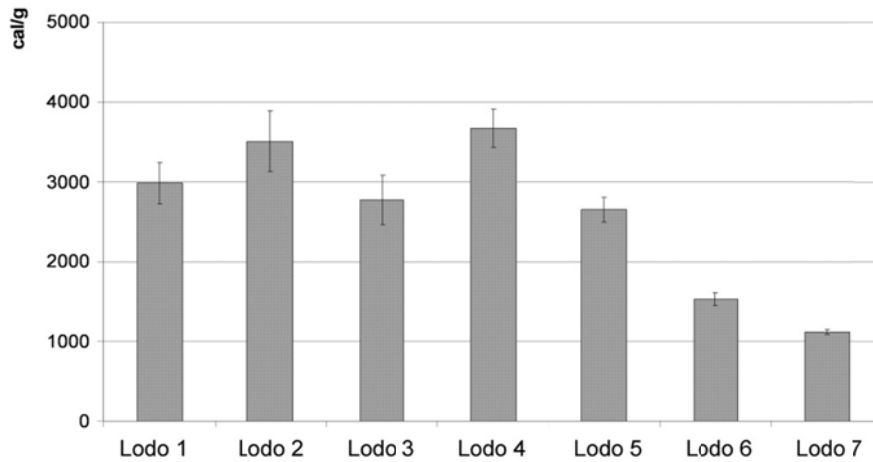


Figura 2. PCI de los distintos lodos en base seca con su desviación típica.

El carbono y el nitrógeno son dos constituyentes esenciales en la materia orgánica y por lo tanto, la relación C/N tiene que estar bien balanceada para asegurar la calidad del fertilizante. Además, el contenido de esos componentes en el lodo determinará la composición de los gases que serán liberados en el proceso de incineración. El azufre, en presencia de vapor de agua atmosférico, forma SO_2 (causante de lluvia ácida). El carbono genera CO_2 (gas de efecto invernadero) y, bajo ciertas condiciones se genera CO y NO_x (causante del *smog* fotoquímico

y lluvia ácida).

2.6. Uso como fertilizante

Un fertilizante mineral contiene nutrientes de forma inorgánica. Los fertilizantes orgánicos son sustancias que contienen nutrientes de forma orgánica e inorgánica. Así pues, los lodos pueden ser considerados como fertilizantes orgánicos. Su contenido en nutrientes no es fácil de determinar, sobre todo en las EDAR urbanas ya que su composición depende de numerosos factores.

Sin embargo, para asegurar la buena calidad de los fertilizantes orgánicos, no sólo deben contar con un correcto contenido en nutrientes (C, H, O, N, P, K y S), sino que adicionalmente, esos elementos tienen que ser fácilmente asimilados por las plantas. Además del análisis elemental de la Tabla 2 (C, H, O, N, y S), los parámetros que influyen en la capacidad fertilizante son P₂O₅, K₂O, materia orgánica y carbono en forma asimilable (Tabla 3). El contenido en P₂O₅ ha sido analizado mediante el método del amonio molibdovanadato y análisis colorimétrico. El K₂O se determinó por medidas turbidimétricas. La materia orgánica total y el carbono orgánico total se analizó por el método de Walkey y Black.

2.7. Contenido en metales pesados

Los metales pesados se clasifican como contaminantes químicos inorgánicos que pueden presentarse de forma iónica o molecular. Están presentes en muchos tipos de lodos como consecuencia de la actividad humana y/o industrial. El límite de las emisiones atmosféricas de la incineración de residuos se regula en Europa mediante la Directiva 2000/76/CE (Anexo IV). Los metales pesados que están regulados por la citada Directiva son el Cd, Tl, Hg, Sb, As, Pb, Cr, Co, Cu, Mn, Ni y V. Las concentraciones de metales pesados de los lodos se muestran en la Tabla 4.

Por otro lado, EURITS (European Association of Waste Thermal Treatment Companies for Specialized Waste) (Gendebien *et al.* 2003) y el NPR-CEN/TS 15358 EN estándar establecen los requisitos mínimos necesarios para que los CDR sean utilizados como combustible en las fábricas de cemento. Además, conociendo el contenido en metales pesados de un lodo podrá determinarse la posibilidad de aplicar este lodo como fertilizante, según marca la Directiva 86/278/CEE de la Unión Europea. La proporción de metales pesados de los lodos se ha analizado mediante una digestión inicial por microondas y posteriormente espectrometría atómica de masas (ICP).

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Después de aplicar la metodología detallada en el epígrafe anterior, se muestran a continuación los resultados obtenidos. Seguidamente, en el epígrafe 3.4., se plantea una serie de posibles aplicaciones como alternativas de eliminación a estos lodos.

3.1. Humedad, poder calorífico y cenizas.

El contenido en humedad promedio, el poder calorífico y las cenizas se muestran en la Tabla 1. En las Figuras 2 y 3 se comparan mediante un diagrama de barras los datos de PCI en base seca y de cenizas en base seca, respectivamente, con su correspondiente desviación típica.

Tabla 1. Humedad, PCI y cenizas

| Lodo | Humedad (%) | PCI (MJ/kg) (lodo húmedo) | PCI (MJ/kg) (lodo seco) | Cenizas (%) (lodo seco) | Cenizas (%) (lodo húmedo) |
|--|-------------|------------------------------|-----------------------------|----------------------------|------------------------------|
| Lodo 1 | 67.10 | 2.81 | 12.45 | 39.10 | 11.74 |
| Lodo 2 | 56.29 | 5.37 | 14.68 | 28.30 | 11.61 |
| Lodo 3 | 79.05 | 1.23 | 11.58 | 36.47 | 8.35 |
| Lodo 4 | 70.88 | 2.99 | 15.36 | 24.95 | 7.30 |
| Lodo 5 | 76.55 | 0.96 | 11.08 | 24.44 | 6.69 |
| Lodo 6 | 52.55 | 2.02 | 6.41 | 54.24 | 25.74 |
| Lodo 7 | 70.94 | 0.15 | 4.67 | 76.96 | 22.36 |
| Datos en referencias bibliográficas | | | | | |
| Hartman <i>et al.</i> 2003 | | | 6.73 – 10.24 ⁽¹⁾ | | |
| Hartman <i>et al.</i> 2005 | | | 6.73 | 67.79 | |
| Gupta y Garg 2008 | | | | 59.22 | |
| Metcalf y Eddy 1991 | | | 9 – 13 | | |
| Thipkhunthod <i>et al.</i> 2005 | | | 3.5 - 13.9 ⁽¹⁾ | | |
| Murakami <i>et al.</i> 2009 | | | 20.1 | | |

(1) No digerido

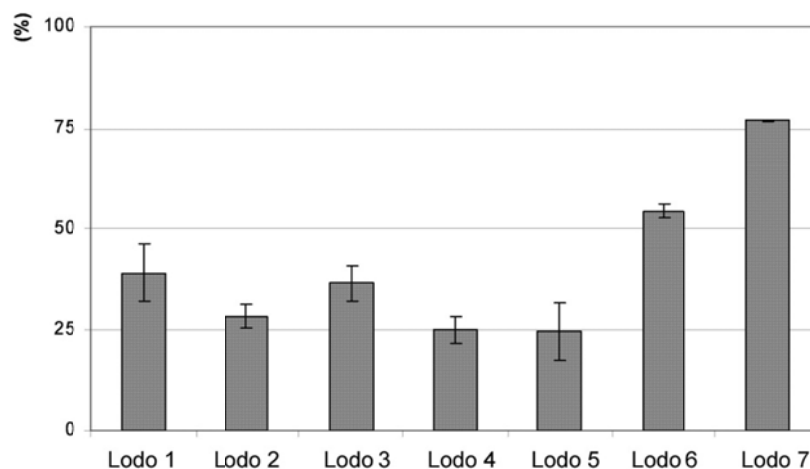


Figura 3. Contenido en cenizas en base seca de los lodos con su desviación típica

3.2. Datos del análisis elemental y del poder fertilizante de los lodos

El resultado de las determinaciones de C, H, N, S y O,

realizadas según la metodología detallada en el apartado 2.5., se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2. Resultados del análisis elemental. Contenido en nutrientes de los lodos.

| Muestra seca | C (%) | H (%) | O(%) | N (%) | S (%) | C/N | Cl (mg/kg) | F (mg/kg) |
|--|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------------|-----------|
| Lodo 1 | 26.62 | 4.18 | 17.05 | 3.33 | 1.55 | 7.99 | 1170 | 5.1 |
| Lodo 2 | 37.17 | 4.46 | 28.97 | 1.29 | 0.35 | 28.82 | 510 | <0.5 |
| Lodo 3 | 32.69 | 3.62 | 20.85 | 3.91 | 1.45 | 8.35 | 2440 | 1.7 |
| Lodo 4 | 41.59 | 5.02 | 21.75 | 4.84 | 1.31 | 8.60 | 3020 | 1.5 |
| Lodo 5 | 30.40 | 5.13 | 28.74 | 5.71 | 1.58 | 5.32 | 3100 | 1.5 |
| Lodo 6 | 19.45 | 4.68 | 25.33 | 1.71 | 0.08 | 11.37 | 2200 | 0.8 |
| Lodo 7 | 12.32 | 4.06 | 4.03 | 2.13 | 0.30 | 5.71 | 440 | 1.7 |
| Datos en referencias bibliográficas | | | | | | | | |
| Hartman <i>et al.</i> 2003 | 14.40 | 2.07 | 1.63 | 12.60 | 0.26 | 8.83 | 5 | |
| Cui <i>et al.</i> 2006* | 54.8 | 7.8 | 28.6 | 8.7 | 0.1 | 6.30 | | |
| Cui <i>et al.</i> 2006* | 52.5 | 6.4 | 31.1 | 9.2 | 0.8 | 5.71 | | |
| Gupta y Garg 2008 | | | | | | 16.1 | | |
| Dolgen <i>et al.</i> 2004 | | | | 0.09 | | | | |
| Chin <i>et al.</i> 2008 | | | | | | | 2000 | |
| Houillon y Jolliet 2005 | 33.86 | 4.47 | 22.43 | 3.39 | 0.31 | 9.99 | | |
| Murakami <i>et al.</i> 2009 | 43.7 | 6.84 | 26.1 | 7.5 | 0.96 | 5.83 | | |
| Bennet y Knapp 2002 | | | | | | | 3800 | |

*Lodo no digerido

Para conocer la capacidad fertilizante de los lodos, además de los datos correspondientes al N, C, S y

C/N, es necesario conocer otros nutrientes importantes para el desarrollo y crecimiento de las

plantas. Estos son el P₂O₅, el K₂O, el contenido total de materia orgánica, de materia orgánica fácilmente

asimilable por las plantas y el carbono fácilmente oxidable (Tabla 3).

Tabla 3. Composición de nutrientes en los lodos en forma asimilable por las plantas

| Lodos | P ₂ O ₅ (mg/kg) | K ₂ O (mg/kg) | Materia orgánica total (%) | Materia orgánica fácilmente oxidable (%) | Carbono fácilmente oxidable (%) |
|--|--|-----------------------------|----------------------------|--|---------------------------------|
| Lodo 1 | 6008.46 | 226.46 | 31.13 | 23.97 | 13.90 |
| Lodo 2 | 1488.08 | 64.97 | 39.32 | 30.27 | 17.56 |
| Lodo 3 | 3319.06 | 404.03 | 34.57 | 26.62 | 15.44 |
| Lodo 4 | 2336.58 | 181.65 | 42.92 | 33.05 | 19.17 |
| Lodo 5 | 4753.08 | 245.63 | 16.81 | 12.94 | 7.51 |
| Lodo 6 | 1195.32 | 396.27 | 25.72 | 19.80 | 11.49 |
| Lodo 7 | 2068.64 | 96.67 | 20.47 | 15.77 | 9.14 |
| Datos en referencias bibliográficas | | | | | |
| Carbonell <i>et al.</i> 2009 | 123.9 | --- | 61.97 | --- | 25.24 |
| Jamali <i>et al.</i> 2008 | | | 32.57 | | 19.0 |
| Dolgen <i>et al.</i> 2004 | 4200 | 5273 | 25.2 | --- | --- |
| López-Mosquera <i>et al.</i> 2000 | 2400 | 400 | | | |

3.3. Contenido en metales pesados

Según los métodos analíticos mencionados en el apartado 2.7., en la tabla 4 se muestran los resultados obtenidos en los análisis.

3.4. Discusión de los resultados obtenidos

El compostaje de lodos de depuradora para su utilización como enmienda agrícola está regulado en función de su contenido en metales pesados. La concentración en Cromo del lodo 4 (1846 mg/kg) excede los límites de la Unión Europea, por lo que no es posible su uso como fertilizante (Tabla 4). Por otra parte, el resto de los lodos analizados podrían utilizarse en agricultura, aunque sería recomendable

el mezclado previo con otro tipo de residuo (restos de poda o de jardinería) para aumentar su proporción C/N, cuyo valor debe situarse preferentemente entre 15 – 20.

Según los datos obtenidos, no es viable su uso como combustible en fábricas de cemento debido al elevado valor de PCI exigido por EURITS (> 15 MJ/kg) y al mínimo contenido en cenizas y metales pesados. Ninguno de los siete lodos analizados cumple este aspecto. Su clasificación como CDR (NPR-CEN/TS 15359), según su PCI, concentración de cloro y concentración de mercurio se muestra en la Tabla 5.

Tabla 4. Concentración de metales pesados en cada lodo

| Muestra seca (mg/kg) | V | Cr | Mn | Co | Ni | Cu | Zn | As | Cd | Sb | Hg | Tl | Pb |
|--|-----|--------|-------|-----|------|-------|-------|-----|------|-----|------|-----|------|
| Lodo 1 | 2.2 | 34.2 | 57.6 | 1.0 | 17.4 | 71.6 | 227.4 | 1.0 | 0.3 | 2.6 | 2.5 | 0.0 | 8.1 |
| Lodo 2 | 0.5 | 0.6 | 21.3 | 0.0 | 0.5 | 548.6 | 27.5 | 0.3 | 0.0 | 0.8 | 4.1 | 0.3 | 0.6 |
| Lodo 3 | 2.2 | 257.2 | 38.6 | 0.5 | 6.7 | 28.2 | 80.4 | 0.6 | 0.6 | 0.8 | 1.2 | 0.1 | 5.4 |
| Lodo 4 | 2.5 | 1846.6 | 26.1 | 0.3 | 1.7 | 10.8 | 22.3 | 0.3 | 1.2 | 0.4 | 0.4 | 0.1 | 4.9 |
| Lodo 5 | 0.2 | 12.4 | 36.1 | 0.9 | 1.8 | 28.1 | 614.0 | 1.5 | 0.0 | 9.1 | 0.3 | 0.1 | 0.6 |
| Lodo 6 | 1.5 | 3.4 | 35.5 | 0.3 | 4.8 | 7.0 | 44.6 | 0.4 | 0.0 | 0.9 | 0.4 | 0.1 | 0.6 |
| Lodo 7 | 4.2 | 9.8 | 20.9 | 0.1 | 2.3 | 4.4 | 51.6 | 0.2 | 0.0 | 3.9 | 0.6 | 0.0 | 0.8 |
| Límites | [a] | 1000 | | | 300 | 1000 | 2500 | | 20 | | 16 | | 750 |
| Unión Europea | [b] | 1500 | | | 400 | 1750 | 4000 | | 40 | | 25 | | 1200 |
| Datos en referencias bibliográficas | | | | | | | | | | | | | |
| Carbonell et al. 2009 | --- | 27.1 | 147.2 | --- | 14.7 | 205.3 | 429.5 | --- | 0.4 | --- | 778 | --- | 29.0 |
| Dolgen et al. 2004 | --- | 30 | 36 | --- | 40 | 42 | 62 | --- | 0.7 | --- | --- | --- | --- |
| Fjälborg y Dave 2003 | --- | 39 | --- | --- | 22 | 430 | 680 | 5.5 | 1.4 | --- | 1.2 | --- | --- |
| Fytli et al. 2008 | --- | 500 | 260 | 30 | 80 | 800 | 1700 | 10 | 10 | --- | 6 | --- | 500 |
| Gupta y Garg 2008 | | 18.6 | | | | 316.8 | 437.4 | | | | | | 14.7 |
| López-Mosquera et al. 2000 | | 15.9 | | | 11.0 | 58.5 | 289.7 | | 0.11 | | 0.08 | | 10.1 |

[a] si el pH del suelo < 7

[b] si el pH del suelo > 7

Tabla 5. Clasificación del lodo como combustible derivado de residuos según la norma NPR-CEN/TS 15359

| | Valor calórico neto (NCV) | Cloro (Cl) | Mercurio (Hg) | Código |
|--------|---------------------------|-------------|------------------|-------------------|
| Lodo 1 | > 10 MJ/kg → 4 | < 0.2 % → 1 | < 0,5 mg/MJ → 5 | NCV 4; Cl 1; Hg 5 |
| Lodo 2 | > 10 MJ/kg → 4 | < 0.2 % → 1 | < 0,5 mg/MJ → 5 | NCV 4; Cl 1; Hg 5 |
| Lodo 3 | > 10 MJ/kg → 4 | < 0.6 % → 2 | < 0,15 mg/MJ → 4 | NCV 4; Cl 2; Hg 4 |
| Lodo 4 | > 15 MJ/kg → 3 | < 0.6 % → 2 | < 0,03 mg/MJ → 2 | NCV 3; Cl 2; Hg 2 |
| Lodo 5 | > 10 MJ/kg → 4 | < 0.6 % → 2 | < 0,03 mg/MJ → 2 | NCV 4; Cl 2; Hg 2 |
| Lodo 6 | > 3 MJ/kg → 5 | < 0.6 % → 2 | < 0,08 mg/MJ → 3 | NCV 5; Cl 2; Hg 3 |
| Lodo 7 | > 3 MJ/kg → 5 | < 0.2 % → 1 | < 0,15 mg/MJ → 4 | NCV 5; Cl 1; Hg 4 |

Sin embargo, los lodos 1, 2, 3, 4 y 5 tienen un PCI relativamente elevado, siendo el lodo 4 el mejor posicionado en este parámetro. Los lodos 6 y 7 tienen el peor PCI y mayor contenido en cenizas. No obstante, el alto contenido inicial de humedad que tienen los lodos al salir de la EDAR encarecería considerablemente los costes de transporte hasta la planta de incineración.

Así pues, sería conveniente un secado mecánico y/o térmico previamente a su transporte hasta la planta

incineradora. El secado térmico y los filtros-banda permiten extraer el agua intracelular. El lodo resultante mantiene el contenido en sólidos pero su humedad se llega a reducir hasta un 70-75% (Ochera y Permuy 2003). El consumo energético de este secado varía de una instalación a otra, pero en promedio suele situarse alrededor de 0,35-0,50 kWh/L de agua evaporada. El PCI de los lodos con un 10% de humedad se muestra en la Tabla 6. Este porcentaje de humedad es el máximo permitido por las plantas incineradoras.

Tabla 6. PCI de los lodos con un contenido en humedad del 10% y emisiones gaseosas en el proceso de combustión.

| Contenido en humedad 10% | PCI (MJ/kg) | Nm ³ lodo | | CO ₂ /kg | | Nm ³ lodo | | NO ₂ /kg | | Nm ³ SO ₂ /kg lodo | |
|--------------------------|-------------|----------------------|-----------|---------------------|-----------|----------------------|-----------|---------------------|-----------|--|--|
| | | Lodo húmedo | Lodo seco | Lodo húmedo | Lodo seco | Lodo húmedo | Lodo seco | Lodo húmedo | Lodo seco | | |
| Lodo 1 | 11.02 | 0.497 | 0.552 | 0.062 | 0.069 | 0.029 | 0.032 | | | | |
| Lodo 2 | 13.02 | 0.694 | 0.771 | 0.024 | 0.027 | 0.007 | 0.007 | | | | |
| Lodo 3 | 10.27 | 0.610 | 0.678 | 0.073 | 0.081 | 0.027 | 0.030 | | | | |
| Lodo 4 | 13.61 | 0.776 | 0.863 | 0.090 | 0.100 | 0.024 | 0.027 | | | | |
| Lodo 5 | 9.76 | 0.567 | 0.631 | 0.107 | 0.118 | 0.029 | 0.033 | | | | |
| Lodo 6 | 5.59 | 0.363 | 0.403 | 0.032 | 0.035 | 0.001 | 0.002 | | | | |
| Lodo 7 | 4.03 | 0.230 | 0.256 | 0.040 | 0.044 | 0.006 | 0.006 | | | | |

Una vez que los lodos se han incinerado su peso disminuye alrededor de un 45-75% en relación con la muestra seca y un 75-90% con respecto a la muestra húmeda (Tabla 1).

El volumen de gases contaminantes en el proceso de combustión (CO₂, NO₂ y SO₂) se presentan en la Tabla 6. Como se observa en la tabla, los valores no son excesivos ya que no alcanzan los límites legales (Directiva 2000/76/EC). Sin embargo, es obligatorio en las plantas de incineración instalar un sistema de depuración de gases.

El siguiente paso en este trabajo ha consistido en comparar los distintos lodos considerándolos como CDR con una humedad del 10% con otros combustibles típicos no renovables como la antracita (PCI = 33,30 MJ/kg) y el lignito (PCI = 9,50 MJ/kg). En la Tabla 7 se presenta un análisis comparativo del peso de combustible necesario para generar 1800 kWh en una central térmica. El índice de eficiencia energética depende de la central térmica, aunque se ha tomado un rendimiento promedio del 35% (Gallardo et al. 2006; Bovea et al. 2006). Si esta potencia se utilizara en el horno de una fábrica de cementos se podrían fabricar unos 5.000 kg de clinker.

Tabla 7. Peso de combustible necesario para conseguir 1800 kWh en una central térmica con un rendimiento del 35%.

| Combustible | Peso necesario (kg) |
|-------------|---------------------|
| Lodo 1 | 1680.7 |
| Lodo 2 | 1421.8 |
| Lodo 3 | 1803.6 |
| Lodo 4 | 1360.5 |
| Lodo 5 | 1896.9 |
| Lodo 6 | 3311.9 |
| Lodo 7 | 4594.2 |
| Antracita | 555.9 |
| Lignito | 1991.2 |

Finalmente, atendiendo a la normativa vigente, en la Tabla 8 se muestran los métodos recomendados de eliminación de los 7 diferentes lodos. Los lodos no son el mejor fertilizante ni el mejor combustible, pero las crecientes cantidades de lodos generados

diariamente en las grandes ciudades generan una urgencia en su eliminación. Por lo tanto, el reto es conseguir la manera más sostenible de eliminar estos lodos, para lo cual su aprovechamiento y/o valorización es fundamental.

Tabla 8. Recomendaciones de eliminación de diferentes lodos

| Lodo (+++) destino recomendado (++) destino posible (+) posible pero desaconsejable (--) prohibido | Fertilizante | Incineración (recuperación energética) | vertedero* | recomendaciones |
|--|--------------|--|------------|--|
| Lodo 1 | (+++) | (++) | (+) | Baja proporción C/N; mezclar con residuos de jardinería |
| Lodo 2 | (+++) | (+++) | (+) | Alta proporción C/N; mezclar con residuos cárnicos |
| Lodo 3 | (+++) | (++) | (+) | Baja proporción C/N; mezclar con residuos de jardinería |
| Lodo 4 | (--) | (+++) | (+) | |
| Lodo 5 | (+++) | (++) | (+) | Baja proporción C/N; mezclar con residuos de jardinería |
| Lodo 6 | (++) | (+) | (++) | Bajo PCI; mezclar con residuos combustibles. Baja proporción C/N; mezclar con residuos de jardinería |
| Lodo 7 | (++) | (+) | (++) | Bajo PCI; mezclar con residuos combustibles. Baja proporción C/N; mezclar con residuos de jardinería |

*Si el lodo cumple el test de lixiviabilidad establecido en la Directiva 2003/33/CE

4. CONCLUSIONES

La legislación actual de residuos recomienda el uso de lodos en agricultura previo compostaje. Sin embargo, los lodos pueden contener concentraciones de contaminantes que limitan esta opción u obligan a constantes análisis. Si la concentración de metales pesados supera los límites establecidos por la normativa, el lodo debe ser valorizado energéticamente, o eliminado en vertedero controlado.

Los lodos de EDAR urbanas (lodos 1 y 3) presentan los resultados más heterogéneos, lo cual era esperable debido a la enorme variabilidad en su generación. No obstante, pueden ser utilizados como fertilizante si los análisis periódicos de metales pesados demuestran que no se exceden los límites legales.

El lodo de la industria de curtidos (lodo 4) no puede ser usado como fertilizante debido a la elevada proporción de cromo. Además, su PCI, concentración de cloro y nivel de mercurio, lo hacen aceptable como combustible en una planta de valorización energética.

Los lodos de la industria papelera (lodo 2) y la industria textil (lodo 5) pueden ser utilizados como fertilizantes, pero el lodo 2 debería ser mezclado con residuos cárnicos para bajar la proporción C/N y el lodo 5 mezclarse con residuos de jardinería u otros residuos con alto contenido en carbono asimilable. Su valorización energética podría mejorar si se mezclaran con otro residuo con mejor PCI (rechazos de plantas de compostaje, bolsas de plásticos, etc.) Finalmente, los lodos de la industria alimentaria

(lodos 6 y 7) tienen un alto porcentaje de cenizas y por consiguiente, su PCI es muy bajo. Su uso como fertilizante es posible pero debería ser mezclado con otro tipo de residuo para aumentar el contenido en carbono y materia orgánica asimilable.

lodos previamente a su transporte al campo o a la planta incineradora, hasta alcanzar un contenido en humedad alrededor del 10-15%. La energía recuperada al valorizar energéticamente los lodos, en algunos casos, compensaría la energía necesaria para su secado y transporte.

En cualquier caso, sería necesario un secado de los

5. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido posible gracias a la financiación de la Generalitat Valenciana (proyecto GVPRE/2008/09) en su programa de promoción de la investigación “Programa de fomento de la investigación científica y el desarrollo tecnológico en la Comunitat Valenciana de España (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”.

Los autores también agradecen la desinteresada colaboración de Sara Romero Sales (técnica de laboratorio) por su inestimable ayuda en los análisis y su colaboración en este trabajo.

6. REFERENCIAS

Amir S., Hafidi M., Merlina G., Revel J.C. (2005). *Sequential extraction of heavy metals during composting of sewage sludge*. Chemosphere, 59, 801–810.

Bennet R.L., Knapp K.T. (2002) *Characterization of particulate emissions from municipal wastewater sludge incinerators*. Environmental Science Technology, 16, 831-836.

Bovea, M.D., Gallardo A., Beltrán M., Ochera L. (2006). *Aprovechamiento de la fracción mezcla de la planta de reciclaje y compostaje de residuos sólidos urbanos de Onda (Castellón) (II)* Residuos: Revista técnica, 92, 38-44.
Bridle T., Skrypski-Mantele S. (2000). *Assessment of sludge reuse options: a life cycle approach*. Water Science and Technology, 41, 131–135.

Carbonell G., Pro J., Gómez N., Babín M.M., Fernández C., Alonso E, Tarazona J.V. (2009). *Sewage sludge applied to agricultural soil: Ecotoxicological effects on representative soil organisms*. Ecotoxicology and Environmental Safety, 72, 1309-1319.

Chin S., Jurng J., Lee J., Hur J.H. (2008). *Oxygen-enriched air for co-incineration of organic sludges*. Waste Management, 28, 2684-2689.

Council Directive 86/278/EEC of 4 July 1986 on the protection of the environment, and in particular of the soil, when sewage sludge is used in agriculture. Commission of European Communities.

Council Directive 91/271/EEC of 21 March 1991 concerning urban waste-water treatment (amended by the 98/15/EC of 27 February 1998). Commission of European Communities.

Cui H., Ninomiya Y., Masui M., Mizukoshi H., Sakano T. y Kanaoka C. (2006). *Fundamental behaviors in combustion of raw sewage sludge*. Energy and Fuels, 20, 77-83.

Davis R.D. (1996). *The impact of EU and UK environmental pressures on the future of sludge treatment and disposal*. Journal of Water Environment, 10, 65–69.

Dennis J.S., Lambert R.J., Milne A.J., Scott S.A., Hayhurst A.N. (2005). *The kinetics of combustion of chars derived from sewage sludge*. Fuel, 84, 117-126.

DIN EN 15170:2009 *Characterization of sludges - Determination of calorific value*. Directive 2000/76/EC of the European Parliament and of the Council of 4 December 2000 on the incineration of waste.

Dolgen D., Alpaslan M.N., Delen N. (2004). *Use of an agro-industry treatment plant sludge on iceberg lettuce growth*. Ecological Engineering, 23, 117-125.

Dudka S., Miller W.P. (1999). *Accumulation of potentially toxic elements in plants and their transfer to human food chain*. Journal of Environmental Science Health, 34, 681-708.

Fjälborg B., Dave G. (2003) *Toxicity of copper in sewage sludge*. Environment International, 28, 761-769.

Fytli D., Zabaniotou A. (2008). *Utilization of sewage sludge in EU application of old and new methods—A review*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 12, 116-140.

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

Gallardo A., Bovea M.D., Ochera L., Beltrán M., Albarrán F. (2006). *Aprovechamiento de la fracción mezcla de la planta de reciclaje y compostaje de residuos sólidos urbanos de Onda (Castellón) (I)*. Residuos: Revista técnica, 90, 52-60.

Gendebien A., Leavens A., Blackmore K., Godley A., Lewin K., Whiting K.J., Davis R., Giegrich, J., Fehrenbach H., Gromke U., del Bufalo N. y Hogg D. (2003). *Refuse derived fuel, current practice and perspectives (B4-3040/2000/306517/MAR/E3)*, Final Report (2003) WRc Ref: CO5087-4 JULY 2003 European Commission – Directorate General Environment.

Gupta R., Garg V.K. (2008). *Stabilization of primary sewage sludge during vermicomposting*. Journal of Hazardous Materials, 153, 1023-1030.

Hara K., Mino T. (2008). *Environmental assessment of sewage sludge recycling options and treatment processes in Tokyo*. Waste Management, 28, 2645-2652.

Hartman M., Svoboda K., Vesely V., Trnka O., Chour J. (2003). *Sewage Sludge Thermal Processing*. Chemistry Listy, 97, 976-982.

Hartman M., Svoboda K., Pohorely M., Trnka O. (2005). *Combustion of dried sewage sludge in a fluidized-bed reactor*. Industrial and Engineering Chemistry Research, 44, 3432-3441.

Houillon G., Jolliet O. (2005). *Life cycle assessment of processes for the treatment of wastewater urban sludge: energy and global warming analysis*. Journal of Cleaner Production, 13, 287-299.

Hsiau P., Lo S. (1998). *Extractabilities of heavy metals in chemically-fixed sewage sludges*. Journal of Hazardous Materials, 58, 73-82.

Ingelmo F., Molina M.J., Soriano M.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.

ISO 1171:1997, *Solid mineral fuels - Determination of ash*

ISO 5068-1:2007, *Brown coals and lignites - Determination of moisture content - Part 1: Indirect gravimetric method for total moisture*

Jamali M.K., Kazi T.G., Arain M.B., Afridi H.I., Memon A.R., Jalbani N., Shah A. (2008). *Use of sewage sludge after liming as fertilizer for maize growth*. Pedosphere, 18, 203-13.

Langenkamp H., Part P. (2001). *Organic contaminants in sewage sludge for agricultural use*. European Commission Publications. Joint Research Centre, Institute for Environment and Sustainability, Soil and Waste Unit. <http://ec.europa.eu/environment/waste/sludge/index.htm>

López-Mosquera M.E., Moirón C., Carral E. (2000). *Use of dairy-industry sludge as fertiliser for grasslands in northwest Spain: heavy metal levels in the soil and plants*. Resources Conservation and Recycling, 30, 95-109.

Lundin M., Olofson M., Pettersson G., Zetterlund H. (2004). *Environmental and economic assessment of sewage sludge handling options*. Resource Conservation and Recycling, 41, 255-78.

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.

Metcalf y Eddy (1991) Wastewater engineering—treatment, disposal and reuse. 3rd ed. McGraw Hill, New York, USA.

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

Murakami T., Suzuki Y., Nagasawa H., Yamamoto T., Koseki T., Hirose H., Okamoto S. (2009). *Combustion characteristics of sewage sludge in an incineration plant for energy recovery*. Fuel Processing Technology, 90, 778-783.

NPR-CEN/TS 15358 EN. *Solid recovered fuels – Quality management Systems – Particular requirements for their application to the production of solid recovered fuels*.

NPR-CEN/TS 15359 EN. *Solid recovered fuels – Specifications and classes*.

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, 36-41.

Parkpian P., Klankrong K., De Launa R., Jugsujinda A. (2002). *Metal leachability from sewage sludge amended Thai soils*, Journal of Environmental Science and Health, 37, 765–791.

PNIR (Plan Nacional Integrado de Residuos) 2008-2015, Anexo 5 (II Plan Nacional de Lodos de Depuradoras de Aguas Residuales EDAR 2008-2015).

PNLD (Plan Nacional de Lodos de Depuradoras de Aguas Residuales-EDAR)-(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.

Principi P., Villa F., Bernasconi M., Zanardini E. (2006). *Metal toxicity in municipal wastewater activated sludge investigated by multivariate analysis and in situ hybridization*. Water Research, 40, 199-106.

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, 60-67.

Seames W.S., Fernandez A., Wendt J.O.L. (2002). *A study of fine particulate emissions from combustion of treated pulverized municipal sewage sludge*. Environmental Science and Technology, 36, 2772-2776.

Seyssiecq I., Ferrasse J-H., Roche N. (2003). *State-of-the-art: Rheological characterisation of wastewater treatment sludge*. Biochemistry Engineering Journal, 16, 41-56.

Shen L., Zhang D. (2005). *Low-temperature pyrolysis of sewage sludge and putrescible garbage for fuel oil production*. Fuel, 84, 809-815.

Sree Ramulu, US. (2002). Reuse of Municipal Sewage and Sludge in Agriculture. Ed. Scientific Publishers, Jorhpur, India.

Thipkhunthod P., Meto V., Rangsunvigit P., Kitiyanan B., Siemanod K., Rirksomboon T. (2005). *Predicting the heating value of sewage sludges in Thailand from proximate and ultimate analyses*. Fuel, 84, 849-857.

U.S. Environmental Protection Agency (USEPA), 1983. Process Design Manual. Land Application of Municipal Sludge. EPA-625/1- 83-016, Cincinnati, OH 45268, USA.

Este documento debe citarse como:

Colomer Mendoza, F. J., Gallardo Izquierdo, A., Robles Martínez, F., Bovea, Ma. D., Herrera Prats, L. (2010). **Opciones de valorización de lodos de distintas estaciones depuradoras de aguas residuales**. Ingeniería, Revista Académica de la FI-UADY, 14-3, pp 177-190, ISSN: 1665-529-X.