

# BIOSÓLIDOS GENERADOS EN LA DEPURACIÓN DE AGUAS (I): PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

**Manuel Mahamud López,**

Área de Ingeniería Química. Universidad de Burgos. 09001 - *Burgos*.

**Antonio Gutiérrez Lavín y Herminio Sastre Andrés**

Departamento de Ingeniería Química y Tecnología del Medio Ambiente.

Universidad de Oviedo. 33071- Oviedo.

**RESUMEN:** En el presente artículo se pretende dar una visión amplia, aunque no exhaustiva, de la problemática originada por la gestión de los biosólidos obtenidos en los procesos de depuración de aguas residuales urbanas. La introducción al tratamiento de aguas residuales continúa con la exposición de los diferentes motivos que justifican la importancia de un adecuado tratamiento y gestión de los biosólidos. Se abordan las cuestiones de tipo legal concernientes a la utilización y destino de biosólidos tanto en Europa como en Estados Unidos y se plantean algunos de los condicionantes futuros que posiblemente afectarán al uso y destino de los biosólidos. Se pasa revista a las diferentes opciones de utilización y vertido y se recogen datos de uso, destino y calidad de biosólidos a nivel nacional, europeo y algunas referencias a otros países del mundo. Se concluye destacando la necesidad de un correcto planteamiento de la gestión de biosólidos desde las primeras etapas de diseño de los sistemas de depuración de aguas.

## INTRODUCCIÓN. GENERALIDADES SOBRE LOS LODOS DE DEPURADORA

En el proceso de tratamiento de aguas residuales urbanas o asimilables, se obtienen como subproductos el material retenido en los dispositivos de desbaste (comparable a residuos sólidos urbanos), arenas, grasas y biosólidos (conocidos también como fangos o lodos de depuración), siendo estos últimos los que suponen la mayor parte del volumen y presentan importantes problemas de tratamiento y evacuación.

Una definición amplia de lodo de depuración podría ser la siguiente: *Cualquier sólido, semi-sólido o líquido de desecho generado por una planta municipal, comercial o industrial de tratamiento de aguas residuales, de aguas de consumo o instalaciones de control de la contaminación atmosférica u otra clase de desechos de similares características y efectos.* La producción de

lodos por parte de una instalación de depuración de aguas residuales es una consecuencia inherente al funcionamiento de la misma. La utilización del término biosólido es consistente por cuanto, en general, estos lodos son materiales orgánicos ricos en nutrientes que son susceptibles de ser reintegrados a la cadena trófica.

Los biosólidos se obtienen por separación de la fase líquida en dos etapas del proceso de depuración convencional:

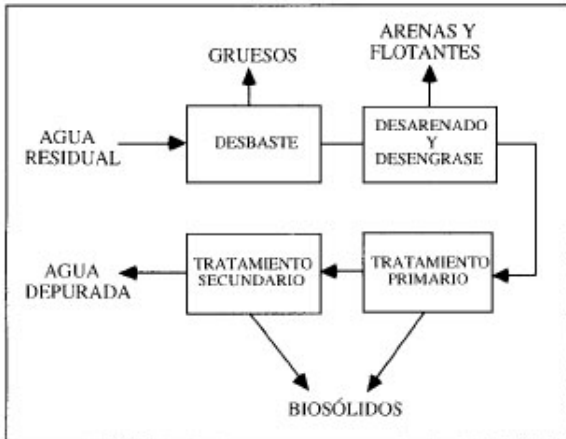
- En la cadena de decantación primaria, por gravedad se separan parte de las partículas que lleva en suspensión el agua residual a la entrada de la planta.
- En la decantación secundaria se separan del efluente los flóculos de microorganismos formados a partir del licor de mezcla existente en el reactor

---

Artículo recibido el **22 de enero de 1996** y aceptado para su publicación el **24 de mayo de 1996**. Pueden ser remitidas discusiones sobre el artículo hasta seis meses después de la publicación del mismo. En el caso de ser aceptadas, las discusiones serán publicadas conjuntamente con la respuestas de los autores en el primer número de la revista que aparezca una vez transcurrido el plazo indicado

biológico. Una parte se recircula al citado reactor para mantener la biomasa necesaria y el resto se extrae, constituyendo los lodos secundarios.

La Figura 1 muestra un diagrama esquemático de una estación depuradora de aguas residuales (EDAR) con las etapas principales y la obtención de los correspondientes productos de depuración.



**Figura 1.** Diagrama esquemático de una EDAR convencional con indicación de las principales etapas y corrientes de flujo.

Las características del lodo obtenido están condicionadas por el origen de las aguas residuales, el proceso de tratamiento de las mismas, la época del año y el proceso al que los lodos sean sometidos. Ello hace conveniente el establecimiento de un calendario analítico que permita obtener una composición media representativa del periodo en el que se ha generado. Dichas características determinan el posterior tratamiento del biosólido y su gestión final. Por otro lado, la definición de la línea de tratamiento del lodo también está condicionada por el destino final de dicho lodo, ya que se exige unas características adecuadas del biosólido resultante.

**EL PROBLEMA GENERADO POR LOS BIOSÓLIDOS DE DEPURADORA**

La problemática asociada a los biosólidos aparece cuando éstos dejan de ser un producto para convertirse en un residuo. Por ello es preciso buscar tratamientos adecuados que permitan, preferentemente, una utilización racional de los citados biosólidos y sólo en caso de ser inviable esta alternativa, proceder al procesado de los mismos como residuo de la forma más conveniente, tanto desde el punto de vista económico como ambiental. La importancia de una conveniente

gestión de los biosólidos es fundamental para el funcionamiento de cualquier instalación de depuración. Además, debe tenerse en cuenta que más de un 40% de los costes de tratamiento de aguas residuales corresponden a los tratamientos y evacuación de los lodos generados (Rich, 1982; Cazorra, 1994; Sastre, 1995; David, 1994).

Los problemas que plantean los lodos de depuradora, dependen en gran medida de su composición química y, en especial, de la concentración de metales pesados. La presencia de determinadas sustancias por encima de ciertos límites puede hacer que el lodo no sea adecuado para ciertos usos o que se tengan que adoptar precauciones especiales en su procesado posterior.

**Principales razones para proceder a un procesado adecuado de los biosólidos**

Existen diferentes motivos para proceder a un tratamiento adecuado de los lodos, que pueden resumirse en seis fundamentales:

- Motivaciones concernientes a la salud pública*
- Opinión pública*
- Aspectos legales*
- Consideraciones económicas*
- Aspectos medioambientales*
- Incremento de la producción de biosólidos*

**Motivaciones concernientes a la salud pública**

Está generalmente aceptada la existencia potencial de patógenos en los lodos y se ha constatado que el manejo de los mismos ha de ser realizado por operarios con la suficiente preparación y medios para evitar el riesgo de contraer enfermedades (Kuchenrither, 1992). Por ello se comprende la necesidad de reducir el número de patógenos previamente a la eliminación del lodo en zonas donde la población pueda entrar en contacto con él. Los procesos más comunmente utilizados con tal fin son la *digestión aerobia*, *digestión anaerobia*, *compostaje* y *estabilización química*. Mediante tales procedimientos se consiguen reducciones de entre tres y cuatro órdenes de magnitud. Con el concurso de procedimientos térmicos se pueden llevar a cabo *pasteurizaciones*, reduciendo el número de patógenos a niveles no detectables. El éxito de estos procedimientos viene avalado por la ausencia de casos de infección cuando los lodos han sido tratados convenientemente. El contenido en metales pesados que presentan los lodos es asimismo objeto de atención debido a los problemas que pudieran presentar por introducción en la cadena trófica y de esta manera afectar al hombre.

## Opinión pública

Existe además otra razón importante para llevar a cabo un tratamiento del lodo: el reducir su capacidad para producir olores. La producción de olores determina en gran medida la aceptación o rechazo de la población ante una instalación de tratamiento de aguas. Los principales compuestos productores de olores son compuestos sulfurados y amoníaco. Operaciones tales como el compostaje de lodos o su procesado térmico requieren una cuidadosa atención, ya que son una fuente potencial de olores desagradables. El método tradicionalmente usado para controlar las emisiones de productos causantes de olor en procesos de secado térmico es el uso de cámaras de postcombustión, que son equipos que reúnen las etapas de recuperación de calor y de destrucción térmica en la misma unidad.

El tratamiento de olores en procesos de compostaje es especialmente difícil debido a las bajísimas concentraciones umbrales productoras de olor de muchos dimetil-disulfuros y la dificultad de controlar los niveles de terpenos, componentes estos últimos, derivados de los productos forestales añadidos al lodo durante los procesos de compostaje. Por ello en tales procesos, para un eficaz control de los olores producidos puede ser preciso llevar a cabo un lavado de gases en tres etapas: Una etapa ácida para eliminar el amoníaco, posteriormente se lleva a cabo una oxidación con cloro para eliminar el sulfuro de hidrógeno, siendo la tercera etapa la encargada de eliminar los compuestos terpénicos por medio de un detergente o un surfactante. De todos modos, la observancia de buenas prácticas de diseño y operación de este tipo de instalaciones reducen grandemente el problema de la producción de olores (Benedict, 1986; Einstein, 1986; Mancomunidad de la Comarca de Pamplona, 1994).

Otro importante aspecto en lo referente a la aceptación por la población está relacionado con la apariencia externa del lodo. Existen una serie de procesos después de los cuales, el aspecto final de los lodos no delata su origen. Así, el compostaje es posiblemente la técnica más eficaz en lo referente a la conversión del lodo en un material de aspecto similar al suelo agrícola. Una visita a una instalación moderna de compostaje permite verificar este extremo. El secado térmico produce también materiales de apariencia asimilable a la de la mayoría de los fertilizantes habituales (Alpha, 1993). La estabilización química no altera apreciablemente el aspecto de los lodos.

## Aspectos Legales

En lo referente a la disposición y utilización de los lodos, las consideraciones de tipo legal cobran especial relevancia puesto que las diferentes legislaciones

implementan mecanismos de control como consecuencia del desarrollo técnico-científico y de la creciente preocupación social en lo referente a temas medioambientales. En el apartado correspondiente de este artículo se abordan las cuestiones legales con más detalle.

## Consideraciones económicas

Por otro lado, una razón importante para llevar a cabo el tratamiento de los lodos es la reducción de los costes asociados con su utilización o eliminación, que suponen un porcentaje importante del coste de depuración de las aguas.

Puesto que los lodos obtenidos en los decantadores primarios tienen un contenido en sólidos que varía entre el 2 y el 7% y los obtenidos en los clarificadores secundarios contienen un porcentaje de sólidos entre el 0.5 y 1.5%, es preciso someter los lodos a una etapa de espesamiento (para poder alcanzar conjuntamente porcentajes entre el 2 y el 8 por ciento) y posteriormente llevar a cabo etapas de deshidratación adicionales para llegar hasta contenidos en sólidos del orden del 30% o superiores. Conseguir lodos con contenido más elevado de sólidos hace posible el uso de menores tamaños de equipos o instalaciones para las operaciones posteriores a realizar (compostaje, por ejemplo) así como cinéticas de reacción más rápidas. El progreso en sistemas de deshidratación, cada vez más eficientes, es continuo, así, por ejemplo, se ha determinado que la operación de centrifugado llevada a cabo a temperaturas moderadamente elevadas, aumenta el contenido en sólidos en aproximadamente 4 ó 5 puntos porcentuales (WEF, 1992). Considerando incluso el balance energético correspondiente, el precalentamiento de los lodos antes de la centrifugación resulta económicamente satisfactorio. Cuando el destino final del lodo sea su depósito en un vertedero, una reducción de la masa a transportar y depositar tendrá también una repercusión positiva en el balance económico de la gestión de los biosólidos.

El coste económico del tratamiento de los biosólidos es continuo objeto de estudio tanto desde el punto de vista académico como práctico (Bruce, 1989; Hahn, 1987; Dobson, 1990; Sastre, 1994) y puede ser determinante junto con factores de tipo legal en la elección del método de tratamiento, uso y disposición de los lodos (Crohn, 1995).

## Aspectos medioambientales

La problemática medioambiental reside en conseguir un destino final de los biosólidos que no produzca consecuencias adversas en el medio ambiente o que, incluso, pueda contribuir de manera positiva a la preservación y/o recuperación del mismo. Esta

motivación medioambiental entendida en sentido amplio puede englobar los cuatro aspectos antes mencionados ya que la calidad medioambiental está inexorablemente ligada al bienestar humano, a los condicionantes económicos y, por supuesto, en estrecha relación con las disposiciones legales al efecto. El tratamiento y uso de los lodos ha de ser llevado a cabo preferiblemente utilizando la mejor opción medioambiental posible (Davis, 1994).

### **Incremento de la producción de biosólidos**

El tratamiento de las aguas residuales es una práctica cada vez más generalizada ya que resulta ser un elemento fundamental para la salvaguarda del medio ambiente. Además, los procesos de tratamiento son cada día más eficaces, es decir, son capaces de eliminar una mayor cantidad de contaminantes con la consecuencia directa de una mayor producción de biosólidos. Si a esto unimos la necesidad legal de cumplir con la normativa europea en materia de tratamiento de aguas residuales urbanas recogida en la directiva 91/271/CEE (Consejo CE, 1991), transpuesta recientemente a la legislación española (Jefatura del Estado, 1995), se aprecia en el horizonte cercano un importante aumento en la cantidad de lodos generados. Para el año 2000 se estima una producción total de lodos en la Unión Europea en el intervalo 7,6-8,9 millones de toneladas/año (expresadas como sólidos secos) lo que supone un incremento entre el 14 y el 27% sobre la producción actual de 6,5 millones (Hall, 1994).

En el caso de España, en el año 1989 un 37% de la población llevaba a cabo la depuración de sus aguas residuales (Cajigas, 1991) y, según datos disponibles, en 1991/92 (Hall, 1994) este porcentaje se cifraba en un 59%. Según la directiva comunitaria anteriormente citada se impone en todo caso como fecha límite el año 2005 para implantar el tratamiento secundario de las aguas residuales de aglomeraciones que representen más de 10.000 habitantes equivalentes (2.000 hab. eq. si se vierte en estuarios o aguas dulces) y al menos la existencia de un tratamiento adecuado para el resto de los vertidos. Es de esperar, por ello, que la producción actual de biosólidos en España (que en el año 1992 se estimaba en unas 350.000 t) se incremente notablemente (en principio, con una tasa de crecimiento por encima de la media europea) en el plazo de diez años.

### **Aspectos legales**

Tanto en Europa como en Estados Unidos, las restricciones asociadas al procesamiento y utilización de los lodos tienden a incrementarse conforme aumenta la probabilidad de contacto con la población. Por ello, los requisitos legales para las diferentes opciones

de utilización/disposición son distintos. A continuación se indican algunas consideraciones legales en lo que respecta al depósito de biosólidos en vertederos, uso agrícola de los mismos e incineración.

### **Depósito de biosólidos en vertedero**

Para el depósito de biosólidos en vertedero junto con residuos domésticos donde el contacto con la población en general es virtualmente inexistente, los requisitos exigidos al lodo son mínimos, debiendo solamente no estar clasificado como un residuo peligroso de acuerdo con la legislación (Jefatura del Estado, 1986; MOPU, 1988, Consejo CE; 1991a; Comisión CE, 1993a) y no contener agua libre (contenido en sólidos mayor que el 16%). Nuevas disposiciones de la Comunidad Económica Europea respecto a las características que los lodos han de cumplir para su depósito en vertederos, hacen cada vez más difícil que puedan ser depositados con la misma facilidad que hasta el presente (Comisión CE, 1991).

### **Utilización de biosólidos con fines agrícolas**

La utilización en agricultura de los lodos procedentes de todo tipo de estaciones depuradoras de aguas residuales urbanas está supeditada, además de a otros requisitos, a que la concentración en metales pesados en el terreno se mantenga por debajo de límites considerados peligrosos. Para ello se pueden adoptar tres criterios:

- Limitar la concentración de metales pesados en los biosólidos.
- Limitar la cantidad de biosólidos aplicados.
- Limitar la concentración de metales pesados en el suelo donde se aplican los biosólidos.

En la Tabla 1 se recogen los valores de concentraciones máximas de metales pesados en los biosólidos para que, de acuerdo con la legislación europea, puedan considerarse aptos para uso agrícola. Asimismo se indica el aporte máximo de metales pesados por hectárea y año y se comparan ambos valores con los correspondientes de la normativa estadounidense.

Según la legislación de la Comunidad Europea (Consejo CE, 1986) y la específica del Estado Español (MAPA, 1990; MAPA, 1993) se exige además que lodos hayan sido sometidos a un tratamiento previo por vía biológica, química o térmica, mediante almacenamiento a largo plazo o por cualquier otro procedimiento apropiado, de manera que se reduzcan, de manera significativa, su poder de fermentación y los inconvenientes sanitarios de su utilización. Si bien la legislación comunitaria deja a discreción de los estados

miembros la utilización de lodos no tratados cuando estos se inyecten o entierren en el suelo, la normativa española no contempla tal supuesto, exigiendo, que todo lodo destinado a la agricultura sea tratado previamente. Aunque esta exigencia de tratamiento no está suficientemente precisada a nivel técnico en la legislación, es evidente la necesidad de someter los lodos a algún tipo de tratamiento previo a su utilización agrícola. Antes de la existencia de la directiva comunitaria, ya existía cierta regulación en algunos

estados miembros. Por ejemplo, el Reino Unido (Matthews, 1992) contaba desde principios de los años 70 con recomendaciones de uso (completadas en 1981) y la legislación alemana correspondiente (Moller, 1983), que tiene su origen en 1972 (ley sobre eliminación de residuos, modificada en 1982) es incluso más restrictiva que la posterior normativa comunitaria.

**Tabla 1.** Comparación de los valores máximos permitidos de contenido en metales pesados en los lodos utilizados en agricultura y valores anuales máximos de aporte de metales pesados a tierras cultivadas, según la legislación europea (CE) (Consejo CE, 1986) y estadounidense (EUA) (USEPA, 1993).

METAL	Concentración en el biosólido (mg/kg)		Aporte de contaminante (kg/ha/año)	
	CE*	EUA	CE	EUA
Arsénico	-	75	-	2.0
Cadmio	20-40	85	0.15	1.9
Cromo	1000-1500	3000	3.0	150
Cobre	1000-1750	4300	12	75
Plomo	750-1200	840	15	15
Mercurio	16-25	57	0.1	0.85
Molibdeno	-	75	-	(0.90)
Níquel	300-400	420	3	21
Selenio	-	100	-	5.0
Zinc	2500-4000	7500	30	140

(\*) La legislación europea indica dos valores máximos de concentración, correspondiendo el primero a suelos con pH menor que 7 y el segundo para aplicación a terrenos con pH superior a 7. La norma estadounidense considera un número mayor de elementos a determinar.

La legislación de los Estados Unidos (Kuchenrither, 1992; Bastian, 1994; Goldstein, 1989; USEPA, 1993), es más concreta (y por ende, más restrictiva) en lo referente a las características microbiológicas de los lodos destinados a usos agrícolas, definiendo dos niveles de calidad de biosólidos en función de la concentración de patógenos existente. Incluye asimismo una lista de procesos y formas de uso para reducir el contacto con organismos vectores.

Por el contrario, los valores límites impuestos al contenido en metales pesados y al aporte anual de los mismos al terreno son en general superiores a los recogidos en la normativa comunitaria al efecto. Sin embargo, la lista de metales considerados es más amplia (véase Tabla 1). Este actual marco legal en lo que al tratamiento y uso de los lodos se refiere está regulado por la normativa de la Environmental Protection Agency 40 CFR Part 503 "Standards for the Use or Disposal of Sewage Sludge" publicada en febrero

de 1993 (USEPA, 1993). Esta reglamentación está siendo cuestionada y algunos estudios estiman que el impacto de los metales tóxicos provenientes de la aplicación de biosólidos en cantidades cercanas a los límites impuestos por la USEPA puede ser potencialmente nocivo (McBride, 1995).

Como ya se ha indicado, es en el terreno de las especificaciones microbiológicas de los lodos donde la norma estadounidense presenta un grado de elaboración más detallado. Ya los antiguos estándares basados en la tecnología distinguían:

- Tratamientos que producen una reducción notable en el número de patógenos (procesos PSRP, en la literatura en lengua inglesa) tales como digestión aerobia, digestión anaerobia, estabilización con cal (pH>12, 2 horas), secado con aire o compostaje.
- Para lodos en los que el contacto con el hombre va a ser altamente probable las restricciones eran más estrictas, precisando los lodos un tratamiento para una mayor reducción de patógenos (tratamientos PFRP según la literatura en inglés). Procesos de este tipo son el compostaje en condiciones más controladas, el secado por calor a t>80°C, tratamiento térmico (180°C, 30 min), digestión aerobia termófila (55°C, 10 días), pasteurización

(70°C, 30 min) e irradiación por rayos beta o gamma.

Actualmente las normas imperantes en Estados Unidos recogidas en la USEPA 40 CFR Part 503 (USEPA 1993) están basadas en estándares de calidad (entendida como medida de resultados). Estos estándares de calidad microbiológica definen dos niveles, Clase A y Clase B cuyas especificaciones se indican en la Tabla 2. Para que un biosólido sea utilizable en agricultura ha de cumplir, al menos, las especificaciones Clase B. Algunos estados como Canadá no tienen una normativa nacional global, existiendo regulaciones a nivel provincial que presentan entre si marcadas diferencias en los contenidos máximos permitidos de metales (Gies, 1995).

La legislación está continuamente sujeta a revisión en función de la dinámica socio-medioambiental y en estrecha relación con el desarrollo científico-técnico. Así existen propuestas firmes para incluir nuevos contaminantes en las regulaciones de la EPA (Bastian, 1994) y las directivas comunitarias se encuentran también sujetas a posibles modificaciones. Asimismo, los estados miembros de la CE pueden disponer de cierto margen de maniobra para la aplicación de la ley en sus respectivos territorios si así lo estiman conveniente.

**Tabla 2.** Estándares de calidad microbiológica de biosólidos según la USEPA.

Clasificación	Coliformes fecales (NMP ó UFC/g)	Salmonella (NMP/4g)	Otros (UFP ó uds/4g)
Clase A	1000	3	Enterovirus < 1 Huevos viables de helmintos < 1
Clase B	2x10 <sup>6</sup>	-	

**Incineración de biosólidos**

La incineración de los biosólidos está sujeta a las normativas legales correspondientes para las instalaciones de incineración. Al igual que en el caso del depósito en vertedero, si las características del lodo lo catalogaran como residuo peligroso, la normativa aplicable para su incineración sería más estricta, estando sujeta a la legislación correspondiente a la incineración de residuos peligrosos (Sastre, 1993; Comisión CE, 1992; Comisión CE, 1993) que es mucho más exigente que las normas aplicables a incineradoras de residuos municipales y a otras

instalaciones de combustión (Consejo CE, 1988; Consejo CE, 1989; Consejo CE, 1989a).

**MÉTODOS DE VERTIDO Y APROVECHAMIENTO DE LODOS**

Como ya se ha indicado, los métodos de utilización/eliminación de lodos son variados y dependen en gran medida de los condicionantes particulares de cada planta de tratamiento de agua. A continuación se hará una revisión de los principales métodos de vertido y aprovechamiento de lodos y su aplicación en la práctica.

### Vertido al mar de los lodos

El vertido al mar de los lodos, puede ser realizado bien desde barcos o por medio de emisarios submarinos a través de los cuales se bombea lodo con un bajo contenido en sólidos. En muchos casos el vertido al mar de las aguas residuales se realiza directamente (Jordao, 1990).

En Europa, el vertido al mar representa aproximadamente el 5% de la producción total de lodos de depuradora (Bruce, 1989; Matthews, 1992). En Estados Unidos, este porcentaje es de alrededor de un 4% según algunas fuentes (Webber, 1986). En el caso de los países en vías de desarrollo, este porcentaje es muchísimo mayor, ya que es una de las alternativas que menos problemas operacionales comporta.

Tanto el vertido al mar de aguas residuales sin depurar como la deposición en el mismo de lodos de depuradora, no son en la actualidad alternativas ecológicamente justificables (Masón, 1992) dada la elevada cantidad de residuos producidos. La justificación para este tipo de vertidos que se recoge en la bibliografía (Jordao, 1990) se basa, por ejemplo, en que medidas de la contaminación actualmente existente (tras la instalación de un emisario submarino), muestran una mejora con respecto a la situación anterior (vertido directo). Por lo tanto toda mejora observada se deberá probablemente a un fenómeno de dispersión.

Por encima de todo tipo de consideraciones que puedan hacerse sobre la idoneidad de los vertidos al mar de las aguas residuales o de los lodos procedentes de su depuración, encontramos que la legislación comunitaria prohíbe tal tipo de vertidos mas allá de 1998 (Matthews, 1992; Garvey, 1992; Consejo CE, 1991; Guiver, 1992). Cruzando datos de diferentes fuentes bibliográficas, se ve claramente en el caso del Reino Unido, por ejemplo, un descenso en el porcentaje de biosólidos vertidos al mar en beneficio de su utilización en agricultura. En otro ámbito geográfico y legislativo como es el caso de los Estados Unidos, se encuentran ya en el año 1972 las Leyes Públicas 92-532 y 95-153 que sólo permiten los vertidos al océano de lodos u otro tipo de residuos industriales en situaciones extraordinarias o de emergencia (Vaccaro, 1981). Estudios recientemente publicados (Jin, 1994) basados en incertidumbre de costes y de riesgos aceptables justifican la prohibición del vertido de lodos al mar.

### Depósito en vertederos

Esta alternativa supone, el llevar a cabo un depósito de los lodos en unos emplazamientos destinados a tal fin. Este proceder ha sido objeto de crítica ya que no

potencia otros usos alternativos. Los lodos pueden ser depositados en vertederos especialmente dedicados para ello o bien ser codispuestos junto con residuos sólidos urbanos u otro tipo de materiales de desecho.

El 43% de los lodos producidos en Europa son depositados en vertederos. Esta media varía sensiblemente en función del país, así en el Reino Unido, por ejemplo, esta opción representa tan solo un 15% de la producción de lodos y éstos son a menudo depositados junto con basuras domésticas. Esta opción presenta ciertas ventajas al servir el lodo de regulador de la etapa acida de la descomposición anaerobia de las basuras lo que permite que la metanogénesis ocurra varios meses antes de lo que ocurriría en ausencia de lodo (Grandolla, 1992; Matthews, 1992). Por ello, la codisposición de lodos con RSU puede resultar atractiva cuando la recuperación de metano es un objetivo perseguido.

En Alemania el porcentaje destinado a vertederos es del 63% y por ejemplo, en Grecia, es prácticamente la única opción. España deposita en vertederos la mitad de los lodos de depuradora producidos. En 1991, en Estados Unidos esta alternativa supuso aproximadamente un 22% del total de lodos generados (Garvey, 1992; Matthews, 1992). En Japón, el porcentaje de lodos depositados directamente en vertederos es aproximadamente de un 24%. Si se le suma los depósitos de cenizas de los lodos sometidos a combustión, este porcentaje se elevaría hasta un 82%.

Esta opción, clásicamente utilizada, presenta una serie de inconvenientes. Por una parte, la escasez de espacio disponible, la oposición popular a contar con este tipo de vertederos en las proximidades de zonas habitadas unido a la cada día mayor producción de lodos, hacen que sea una alternativa con unas limitadas posibilidades de expansión. El depósito en vertederos se considera va a seguir siendo importante pero cada vez sujeto a mayores costes (Bruce, 1989). Por otra parte, las nuevas disposiciones de la Comunidad Económica Europea respecto a las características que los lodos han de cumplir para su depósito en vertederos (Comisión CE, 1991) van a hacer más difícil esta opción en las condiciones actuales. Se constata que el depósito de biosólidos en vertederos exclusivamente dedicados a tal fin es en general problemático, debiendo el lodo de presentar contenidos en sólidos de al menos el 40-60% para permitir la operación de maquinaria sobre los mismos y tener además un elevado grado de estabilidad (Grandolla, 1992). Según las normas estadounidenses el depósito de biosólidos que se está llevando a cabo en unos pocos casos en vertederos dedicados sólo a los mismos, está abocado a su desaparición (Hemphill, 1992).

Existe el problema añadido de la clasificación de los lodos, es decir, su consideración como residuos, puesto que aquellos lodos no tratados así como los no utilizables, podrían ser clasificados como Residuos Peligrosos aplicando rigurosamente la directiva correspondiente (1991/689/CEE) (Matthews, 1992; Sastre, 1993).

### **Utilización en agricultura**

Esta forma de utilizar los lodos consiste en incorporar éstos a las tierras de cultivo mediante diferentes técnicas (esparcimiento, inyección) con el consiguiente aporte de nutrientes y mejora de la textura del suelo, siendo en muchos casos este último el principal fin perseguido. Esta utilización agrícola de los biosólidos estaría en línea con el nuevo propósito que habrían de cumplir las plantas de tratamiento: la recirculación de nutrientes existentes en agua residual (Palm, 1992), que se uniría a la clásica finalidad de evitar la contaminación de las aguas.

Teóricamente, esta sería quizás la forma más adecuada de utilización de los lodos ya que se aprovecharía su contenido en elementos esenciales para el desarrollo vegetal (nitrógeno y fósforo), de oligoelementos y de materia orgánica que constituye una fuente de nutrientes a largo plazo (Costa, 1992). Resulta, pues, una alternativa ecológica y económicamente razonable en principio. Ahora bien la aplicación de los lodos de depuradora a la agricultura no puede realizarse sin ningún tipo de control ya que existen determinados componentes que deben ser tenidos en cuenta, estos son fundamentalmente la presencia de microorganismos patógenos y el contenido en metales pesados. Aparte de los aspectos concernientes a la composición de los biosólidos, pueden añadirse consideraciones tales como la facilidad de aplicación práctica y aspectos estéticos de cara al uso de los mismos. La cantidad de biosólidos empleados en agricultura representa aproximadamente un 38% del total de los producidos en la Comunidad Europea y del orden del 10% de los generados en España. Es posible incrementar esta utilización siempre que las características del producto lo permitan ya que, por ejemplo, si todos los lodos generados en el Reino Unido fueran utilizados en agricultura, sólo representarían un 5% de las necesidades de nitrógeno y un 10% de las de fósforo. En Suiza, Portugal y Luxemburgo, esta utilización va del 60 al 81%. La utilización de los lodos en el sector agrícola parece incrementarse con el tiempo, así, datos concernientes al Reino Unido publicados entre 1987 y 1990 (Bowen, 1988; Dobson, 1990) indican valores de un 39% y los aparecidos en 1992 (Matthews, 1992) muestran que este porcentaje es de un 53%.

Para llevar a cabo una reducción en el número de microorganismos patógenos, los lodos empleados en agricultura deben ser sometidos a un proceso previo de tratamiento como los anteriormente expuestos. En lo que hace referencia a las características químicas que los lodos empleados en agricultura han de cumplir, se debe prestar especial atención a los metales pesados ya que existe el riesgo de acumulación en el hombre a través del consumo de vegetales cultivados en terrenos con elevado contenido en tales metales. Por ello la Comunidad Económica Europea ha establecido mediante una directiva (Consejo CE, 1986) las cantidades máximas de metales pesados que pueden encontrarse en las tierras de cultivo así como las cantidades de lodo a aplicar y los niveles máximos de estos metales en los mismos. Esta disposición comunitaria se halla traspuesta a la legislación española mediante el Real Decreto 1310/1990 (MAPA, 1990).

La utilización de lodos con fines agrícolas podría ser considerada una alternativa con bastantes posibilidades en nuestro país por las siguientes razones:

- En primer lugar, España, con un 10% (Garvey, 1992; Matthews, 1992; Matthews, 1992a) es el país europeo que ocupa el penúltimo lugar en cuanto al porcentaje de utilización de lodos en el sector agrícola, lo cual indica unas perspectivas ciertas de expansión. Como promedio, el 37% de los lodos producidos en Europa, se utilizan en agricultura (Bruce, 1989; Garvey, 1992; Hall, 1994). Existen algunas fuentes que indican porcentajes mucho mayores de aplicación agrícola de biosólidos en nuestro país (Amorena, 1994). Contactos mantenidos con personal de diferentes instalaciones de depuración, nos hacen considerar más cercano a la realidad el valor del 10%.
- Una utilización racional de los lodos de depuradora está presentando resultados satisfactorios para varios tipos de cultivos.
- Plantas depuradoras que procesan mayoritariamente carga contaminante procedente de la industria, con un potencial contaminante elevado, producen lodos cuya composición permite utilizarlos en agricultura (EDAR de Burgos, 1993). Por ello es fundado suponer que la mayoría de las EDAR con un predominio de aguas residuales urbanas produzcan lodos con incluso mejores características. Estudios realizados sobre la composición de lodos de decantación primaria digeridos, provenientes del tratamiento de aguas residuales urbanas (Costa, 1992) muestran contenidos en metales pesados por debajo de los límites legales.



En la Tabla 3 se indican concentraciones de metales pesados en biosólidos procedentes de diferentes plantas de tratamiento tanto nacionales como extranjeras.

Se puede comprobar en general que los lodos permiten, salvo alguna excepción, su aplicación agrícola, al menos en lo que concierne a su contenido en metales pesados según la legislación actual.

Tabla 3. Concentración de metales pesados en lodos de diferente procedencia,

Procedencia del lodo	Concentración (mg/kg)							
	Pb	Cd	Cr	Cu	Ni	Hg	Zn	Fe
Salamanca (Costa, 1992)	500	-	-	200	<100	-	1200	-
Vitoria (Valores aprox.) (Alonso, 1992)	290 455	15,5 37,5	905 700	435 280	225 -	- -	5400 8750	- -
Reus (Vitores, 1990)	369	8,5	905	815	353	-	5607	-
Urbano (Fraja, 1992)	213	8	605	262	51	-	2588	20984
Bibliografía (Solmaz, 1992)	170	3,1	95	310	50	1,9	1180	-
Alemania (Solmaz, 1992)	137	1,7	165	460	60	1,2	1510	-
Holanda (Solmaz, 1992)	400	8	60	440	30	1	2200	-
Burgos (Sufi, 1995)	154	1,2	796	796	61	61	-	-

El principal problema práctico de cara a la utilización de los lodos en agricultura reside en los prejuicios existentes en ciertas zonas y en la inexistencia de experiencia en este campo. Así, en algunos municipios españoles, los lodos de depuración no sólo no representan una carga sino que se procede incluso a su subasta. La aceptación popular de los biosólidos se ha comprobado que es uno de los factores clave en la implementación de programas de utilización en el área agroforestal (Henry, 1994).

El comportamiento de las diferentes especies vegetales frente a la concentración de metales pesados depende en gran medida del pH del suelo así como del tipo de cultivo (Bowen, 1988, 1989, 1992). Así, por ejemplo, entre los muchos ejemplos citados en la bibliografía, encontramos cómo la estabilización con cal de un lodo hace disminuir la asimilación de cadmio por parte de lechugas y repollos pero no se ve afectada en los cultivos de patatas. Cuando los biosólidos se aplican a terrenos de pasto se ha de prestar especial importancia al contenido en cadmio, metal que se acumula en las vísceras de los animales (Bruce, 1989). Por todo ello, la aplicación de lodos al sector agrícola debe hacerse de forma controlada y aplicando lodos que no sólo respeten la legalidad vigente sino que tengan un contenido en metales pesados y en microorganismos viables tan bajos como sea posible.

Resulta de vital importancia llevar a cabo un seguimiento de los efectos de la aplicación de biosólidos a largo plazo

(McBride, 1995) ya que la capacidad y calidad de producción de los suelos debe mantenerse con carácter permanente.

Los cultivos forestales y las tareas de reforestación pueden ser uno de los potenciales campos de aplicación de los lodos puesto que la mayoría de los cultivos arborícolas se llevan a cabo en terrenos pobres y es la escasez de nutrientes lo que limita el crecimiento. Por ello se han llevado a cabo experiencias en Europa y América (Henry, 1994, 1994a; Gallier, 1993; Geertsema, 1994; Crohn, 1995) que muestran que diferentes lodos de depuradora pueden ser un adecuado sustitutivo de los abonos tradicionales. No obstante, se ha constatado en algunas investigaciones que asociado a una mayor velocidad de crecimiento se encuentra que la madera obtenida en terrenos sobre los que se han aplicado lodos es de peor calidad, entendiéndose por ello una disminución de su densidad (Henry, 1994). Se han llevado a cabo experimentos de aplicación masiva de biosólidos en áreas arboladas y se ha comprobado que el contenido en C, N, P y S en las capas superficiales de los terrenos tratados es muy superior al de los suelos no tratados

incluso después de un periodo de 15 años. Los valores de pH pueden ser incluso inferiores en una unidad en los suelos tratados que en los terrenos sin tratar. Aunque no presentan diferencias tan grandes, los contenidos en Ca y K son también superiores (Harrison, 1994).

Algunas investigaciones llevadas a cabo mediante aplicación de biosólidos a terrenos forestales indican que desde el punto de vista técnico, el criterio limitante fundamental para el uso de biosólidos se encuentra en la lixiviación de los nitratos. Esta facilidad de lixiviación depende no sólo de la cantidad de lodos aportados sino del tipo y etapa de crecimiento de las especies vegetales (Henry, 1994). Puesto que los problemas derivados de la aplicación de biosólidos a los terrenos han de ser considerados a muy largo plazo, se han desarrollado también modelos que simulan junto con otros fenómenos, la dinámica del nitrógeno en el caso de la aplicación sobre áreas forestales (Crohn, 1995). Estos modelos pueden dar una idea de la cantidad de lodos que se puede aplicar de forma sostenida aunque su validez ha de ser contrastada con experimentos a largo plazo.

Algunos de los mayores problemas para la viabilidad de esta alternativa residen en aspectos logísticos (Principado de Asturias, 1993; Hall, 1992), ya que por una parte los terrenos forestales se suelen encontrar alejados de los puntos de producción de lodos (grandes concentraciones urbanas) y además, el acceso a los mismos resulta difícil o incluso imposible para los vehículos de transporte.

### **Rehabilitación y recuperación de terrenos**

El lodo es un excelente agente para revitalizar la capa superior de vertederos y de otros lugares que como consecuencia de actividades mineras o de movimiento de tierras han quedado sin un sustrato adecuado para el desarrollo de una cubierta vegetal. Se han llevado a cabo estudios en zonas semiáridas que demuestran que la aplicación de biosólidos es beneficiosa en cuanto reduce la erosión, aumenta la capacidad productiva del terreno así como su potencial de retención de agua, reduciendo drásticamente la escorrentía (Gallier, 1993).

Las características microbiológicas exigidas a los lodos aplicados a este tipo de terrenos no tienen, en principio, que ser tan severas como las aplicadas a lodos de uso agrícola común ya que el potencial contacto con el hombre es bajo salvo, claro está, en el caso de tratarse de bosques o zonas de recreo. Aunque el riesgo de infección por contacto con el hombre sea bajo, se considera conveniente que la carga microbiana no sea excesiva de modo que se produzca la menor

contaminación posible del medio ambiente por organismos indeseables. Así, aunque la legislación comunitaria al efecto (Consejo CE, 1986) deja en manos de los Estados miembros el poder autorizar en ciertos casos el empleo de lodos sin tratar, ya antes de 1983, la legislación alemana prohibía (aludiendo razones epidemiológicas) la aplicación de lodos frescos sin excepción (Moller, 1983) tanto a terrenos forestales como agrícolas. La legislación alemana también incluye ciertas restricciones temporales para el uso agrícola de lodos aunque éstos hayan sufrido procesos de desinfección. La normativa española al respecto (MAPA, 1990) tampoco contempla la posibilidad de cualquier uso agrícola de lodos no tratados.

### **Otras aplicaciones y métodos de procesado de biosólidos**

Aparte de los métodos de disposición y uso de lodos que podríamos denominar clásicos (aunque no por ello totalmente optimizados) ya descritos que poseen un grado apreciable de utilización, se pueden reseñar una serie de procesos novedosos que llevan a cabo una utilización y/o tratamiento no convencional de los biosólidos

El sistema de **combustión con fusión de escorias** produce una escoria fundida que tras un proceso adecuado de solidificación da lugar a productos con diferentes propiedades, utilizables como materiales de relleno, como aditivos en la fabricación de productos cerámicos o como materiales agregados en productos derivados del cemento (Smith, 1992; Yashiki, 1991; Tay, 1992). Cenizas producidas mediante otros métodos de combustión de lodos son asimismo aplicadas para la producción de este tipo de agregados o incluso para el acondicionamiento de suelos en el caso de que el lodo haya sido acondicionado con cal previamente a su deshidratación (Aziz, 1990).

Existen una serie de investigaciones en torno a la utilización directa de los lodos en la **manufactura de materiales de construcción** produciendo cementos a partir de mezclas de lodos digeridos con caliza (Tay, 1992), ladrillos a partir de mezclas de arcilla y lodos urbanos estándar (Alleman, 1990), mostrando incluso la posibilidad de utilizar lodos con una notable carga en metales pesados si los estudios de lixiviación que se realicen sobre el producto acabado son satisfactorios.

Asimismo, se están llevando a cabo en planta piloto estudios de **licuefacción de lodos** que operarían de forma autotérmica con un balance neto de producción de energía en forma de aceite pesado (Itoh, 1992). Existen procesos de **secado térmico** de lodos que, a partir de lodos deshidratados producen granulados con bajo

contenido en humedad (entre el 12 y el 4%). Este producto, de fácil manejo, es susceptible de ser utilizado como abono (su textura es similar a la de cualquier abono químico comercial) o combustible. Es de destacar la ventaja que representa este sistema de cara a la aplicación agrícola de los biosólidos ya que permite un fácil almacenamiento (necesario debido a la estacionalidad en la aplicación de los mismos al terreno) y transporte (Alpha, 1993; Gies, 1995).

**Utilización de lodos en Europa**

En la Tabla 4 (Garvey, 1992) se resumen los datos de población, producción de lodos y empleo de los

mismos en diferentes países europeos (los pertenecientes a la CE además de Austria y Suiza). Datos más recientes correspondientes a 1991/92 (Hall, 1994) indican un ligero incremento en la cantidad de biosólidos producidos (2,5%) en los países de la Comunidad Europea, manteniéndose casi constantes los porcentajes globales de utilización de los mismos. Según la información disponible (Paulsrud, 1990), en Noruega, por ejemplo, las alternativas contempladas por las autoridades medioambientales en el año 1982 para la utilización de lodos incluían principalmente los usos agrícolas y forestales así como el depósito en vertederos

*Tabla 4. Producción, usos y destino de los lodos en Europa*

País	Población (10 <sup>6</sup> hab.)	Lodo generado (10 <sup>3</sup> t/año)	Porcentaje de usos de los lodos			
			Agricultura	Vertedero	Incineración	Otros
Austria	7,8	320	13	56	31	0
Bélgica	9,9	75	31	56	9	4
Dinamarca	5,1	130	37	33	28	2
Francia	56	700	50	50	0	0
Alemania	62	2500	25	63	12	0
Grecia	-	15	3	97	0	0
Irlanda	-	24	28	18	0	54
Italia	57	800	34	55	11	0
Luxemburgo	0,4	15	81	18	0	1
Holanda	15	282	44	53	3	0
Portugal	-	200	80	13	0	7
España	39	280	10	50	10	30
Suiza	6,4	2	60	30	20	0
Reino Unido	57	1075	51	16	5	28
Total	316	6631	38	43	10	9

### Opciones en la gestión de los lodos

Ya se ha visto que el lodo puede ser procesado bien como un recurso con un potencial aprovechable o como un residuo. Paralelamente, los procesos de tratamiento de lodos pueden dividirse en dos grandes categorías. Por un lado, existen una serie de tratamientos que podríamos denominar de estabilización de los lodos, es decir, consisten fundamentalmente en someterlos a un tratamiento con vistas a su utilización posterior. Por otra parte se utilizan también una serie de procesos conducentes a una casi total eliminación de la materia orgánica del lodo, obteniendo así un residuo más manejable y prácticamente inerte.

Indicar una opción única satisfactoria para el tratamiento y/o disposición final de los biosólidos no es tarea fácil y a menudo, excepto para pequeñas plantas de tratamiento, se implementan diferentes alternativas de forma simultánea (Garber, 1989; Sastre, 1994; Coca, 1994).

### TENDENCIAS FUTURAS EN EL TRATAMIENTO DE BIOSÓLIDOS.

En los países desarrollados, aparte del importante incremento que tendrá lugar en la cantidad de lodos generados, existen dos motivos principales por los cuales las exigencias que atañen a los biosólidos van a ser cada vez mayores (Kuchenrither, 1992):

- Cuando se considere la **aplicación agrícola** de los biosólidos se ha de tener presente que está siendo cada vez más común la existencia de tierras de labor colindantes con espacios habitados, debido a la expansión de las ciudades. Ello conlleva la necesidad de disponer de productos para el abonado y acondicionamiento del terreno que no produzcan malos olores, teniendo en cuenta que no son equiparables los estándares de buen o mal olor en el entorno urbano y el medio rural.
- Por otra parte, cada día se incrementan más las **dificultades para trasladar los lodos fuera** de la jurisdicción del **lugar donde se han producido**. Es por ello que la mayoría de los grandes núcleos urbanos cada día encuentran más dificultades para enviar sus lodos a lugares distantes para su utilización. Esta tendencia probablemente se va a acentuar en el futuro. Por ello las grandes ciudades se van a ver forzadas a depositar o utilizar cantidades cada vez mayores de lodo en sus alrededores, significando un mayor requerimiento de espacio y/o una más elevada

probabilidad de exposición para el contacto humano.

Por todo ello, procesos que produzcan una eficaz y económica reducción del nivel de patógenos, unido a una eliminación de los olores, tendrán una considerable demanda en el futuro. En situaciones en las que la utilización de los lodos en agricultura no sea posible y si además la disponibilidad de terreno para el establecimiento de vertederos es muy limitada, aquellos procesos que tengan como producto último la menor cantidad posible de un material inerte, serán los que se utilizarán preferentemente. Así, la oxidación con aire en fase acuosa y la incineración serán las alternativas indicadas en estos casos. De todas formas, el estudio de los métodos de utilización-disposición de biosólidos ha de hacerse preferiblemente teniendo no sólo en cuenta los condicionamientos de tipo práctico-legal sino fundamentalmente buscando la mejor opción desde el punto de vista medioambiental (Davis, 1994).

### CONCLUSIONES

Como se desprende de la revisión de métodos de uso y eliminación de lodos de depuración, no se puede proponer una alternativa única al problema de los lodos. La solución óptima, si es que existe, dependerá grandemente de los condicionantes de cada caso particular. Han de tenerse en cuenta factores tales como la situación geográfica, climatología, grado de industrialización, características geológicas del terreno, situación económica, cultura ecológica e industrial de la población y por supuesto, quizá la más importante, las características del lodo en cuestión. Obviamente, muchos de estos factores pueden estar relacionados y además variar con el tiempo. Por ello determinar el proceder más aconsejable a seguir en cada caso es una cuestión puntual de cada zona (al margen del establecimiento de políticas de carácter general), teniendo además que considerar el factor tiempo ya que una buena solución en el momento presente puede no serlo dentro de unos años. Existen procedimientos sistemáticos para la determinación de la mejor solución desde el punto de vista medioambiental que sea factible económicamente, incluyendo siempre etapas de auditoría del proceso y monitorización de la operación (Davis, 1994). Esta flexibilidad y capacidad de adaptación es considerada fundamental desde hace años (Walker, 1982) y debe ser tenida en cuenta tanto en las líneas generales de las políticas relativas a la gestión de los lodos como en el diseño de las plantas de tratamiento de aguas residuales.

## LISTA DE SÍMBOLOS, ABREVIATURAS Y SIGLAS

CE:	Comunidad Europea.
CFR:	Code of Federal Regulations.
Comisión CE:	Comisión de las Comunidades Europeas.
Consejo CE:	Consejo de las Comunidades Europeas.
EDAR:	Estación depuradora de aguas residuales.
EPA:	United States Environmental Protection Agency.
FR:	Federal Register.
ha:	Hectárea (10.000 m <sup>2</sup> ).
hab:	Habitante.
kg:	Kilogramo (10 <sup>3</sup> g).
MAPA:	Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación.
m <sup>3</sup> :	Metro cúbico.
mg:	miligramo (10 <sup>-3</sup> g).
MOPU:	Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo.
NMP:	Número más probable.
t:	Tonelada métrica.
uds:	Unidades.
UFC:	Unidades formadoras de colonias.
UFP:	Unidades formadoras en placa.
USEPA:	United States Environmental Protection Agency.
WEF:	Water Environment Federation.
°C:	Grado centígrado.

## REFERENCIAS

- Alleman, J.E., Bryan, E.H., Stumm, T.A., Marlow, W.W., Hocesvar, R.C. (1990), *Sludge-Amended Brick Production: Applicability for Metal-Laden Residues*, Water Science and Technology, 22(12), 309-317.
- Alonso, A., Estibalez, J.J. (1992), *Estudio Comparativo de Cuatro Métodos de Mineralización de Muestras de Lodos de Depuradora de Aguas Residuales*, Tecnología del Agua, 100, 17-19.
- Alpha, Environmental Technology (1993), Informe publicitario.
- Amorena Udabe, A. (1994), *Valorización Agrícola de los Fangos de Depuradora en la Comarca de Pamplona*. Jornadas Técnicas: Biosólidos y Aguas Depuradas Como Recursos. R. Mujeriego y L. Sala (Eds.). Pág. 53-66. Sant Feliu de Guíols, Gerona.
- Aziz, M.A., Koe, L.C.C. (1990), *Potential Utilization of Sewage Sludge*, Water Science and Technology, 22(12), 277-285.
- Bastian, R.K. (1994), *United States Regulations and Practical Experience on Biosolids Reuse and Disposal*, Jornadas Técnicas: Biosólidos y Aguas Depuradas Como Recursos. R. Mujeriego y L. Sala (Eds.). Pág. 169-192. Sant Feliu de Guíols, Gerona.
- Bowen, P.T., Entwistle, J.M., Hendrick, J.E., Quillin, J.S., Tyagi, U.N. (1988), *Sludge Treatment, Utilization, and Disposal*, Journal of the Water Pollution Control Federation, 60(6), 837-844.
- Bowen, P.T., Hendrick, J.E., Woodward, T.A., Mitchell, L.C., Lahlou, M. (1989), *Sludge Treatment, Utilization, and Disposal*, Journal of the Water Pollution Control Federation, 61(6), 821-829.
- Bowen, P.T., Jackson, M.K., Corbitt, R.A., Gonce, N. (1992), *Sludge Treatment, Utilization, and Disposal*, Water Environment Research, 64(4), 378-386.
- Bruce, A.M., Davis, R.D. (1989), *Sewage Sludge Disposal: Current and Future Options*, Water Science and Technology, 21, 1113-1128.
- Cajigas Delgado, A. (1991), *Directiva Comunitaria Sobre Tratamientos de Aguas Residuales Municipales*, 147-152. Ingeniería Química, julio 1991.
- Cazurra Pérez, T. (1994), *Programa de Saneamiento de las Aguas Residuales Urbanas de Cataluña: Línea de Fangos*, Jornadas Técnicas: Biosólidos y Aguas Depuradas Como Recursos. R. Mujeriego y L. Sala (Eds.). Pág. 31-43. Sant Feliu de Guíols, Gerona.
- Coca Prados, J. y Mahamud López, M. (1994), *Dirección del Proyecto Fin de Carrera Diseño de una E.D.A.R. y Alternativas de Gestión de Lodos*. Universidad de Oviedo.
- Comisión de las Comunidades Europeas (1991), *Propuesta de Directiva del Consejo Sobre Vertido de Residuos*, C190/5, 22 de julio de 1991.
- Comisión de las Comunidades Europeas (1992), *Propuesta de Directiva (CEE) del Consejo relativa a la incineración de residuos peligrosos*. COM(92) final- SYN 406, 19 de marzo de 1992.
- Comisión de las Comunidades Europeas (1993), *Propuesta modificada de Directiva del Consejo relativa a la incineración de residuos peligrosos*. COM(93) final- SYN 406, 22 de junio de 1993.
- Comisión de las Comunidades Europeas (1993a), *Propuesta de Directiva del Consejo por la que se modifica la Directiva 91/689 CEE relativa a los*

- residuos peligrosos. COM(93) 425 final, 21 de Septiembre de 1993.
- Consejo de las Comunidades Europeas (1986), *Directiva del Consejo 86/278/CEE 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*, Diario Oficial de las Comunidades Europeas de 4 de julio de 1986.
- Consejo de las Comunidades Europeas (1988), *Directiva del Consejo 88/609/CEE de 24 de noviembre de 1988, sobre limitación de emisiones a la atmósfera de determinados agentes contaminantes procedentes de grandes instalaciones de combustión*. Diario Oficial de las Comunidades Europeas de 7 de diciembre de 1988.
- Consejo de las Comunidades Europeas (1989), *Directiva del Consejo 89/369/CEE de 8 de junio de 1989, relativa a la prevención de la contaminación atmosférica procedente de nuevas instalaciones de incineración de residuos municipales*. Diario Oficial de las Comunidades Europeas de 14 de junio de 1989.
- Consejo de las Comunidades Europeas (1989a) *Directiva del Consejo 89/429/CEE de 21 de junio de 1989, relativa a la reducción de la contaminación atmosférica procedente de instalaciones existentes de incineración de residuos municipales*. Diario Oficial de las Comunidades Europeas de 15 de julio de 1989.
- Consejo de las Comunidades Europeas (1991), *Directiva del Consejo 91/271/CEE de 21 de mayo de 1991, Sobre el Tratamiento de las Aguas Residuales Urbanas*. Diario Oficial de las Comunidades Europeas de 30 de mayo de 1991.
- Consejo de las Comunidades Europeas (1991a), *Directiva del Consejo 91/689/CEE de 12 de diciembre de 1991, relativa a los residuos peligrosos*. Diario Oficial de las Comunidades Europeas de 31 de diciembre de 1991.
- Costa Pérez, C., Márquez Moreno, M.C., Martín Sánchez, J.L., Catalán Cancho, J. (1992), *Estudio y Caracterización de un Lodo de Depuradora: su Aplicación como Fertilizante y Acondicionador del Suelo*, Tecnología del Agua, 100, 51-56.
- Crohn, D.M. (1995), *Sustainability of Sewage Sludge Land Application to Northern Hardwood Forests*. Ecological Applications, 5(1), 53-62.
- Davis, R.D. (1994), *Planning the Best Strategy for Sludge Treatment and Disposal Operations*, Water Science and Technology, 30(8), 149-158.
- Dobson, J.N. (1990), *A Sludge Disposal Strategy for Dumfries and Galloway Regional Council*, Journal of the Institution of Water and Environmental Management, 4, 371-378.
- EDAR de Burgos (1993). Información obtenida en una visita a las instalaciones.
- Fraja Frangipane, Andreottola, G., Brunetti, F., Canziani, R. (1992), *Spécifications Relatives à la Gestion des Boues par l'utilisation Energetique de ces Dernières*, Gestion des Boues d'Eaux Résiduaires, Bruselas.
- Gallier, T.H., Brobst, R., Aguilar, R., Barbarick, K., Hegeman, P., Janonis, B., Salahub, D. y Wilson, S. (1993), *R<sub>x</sub> for Rangelands*. Water Environment & Technology, octubre, 1993.
- Garber, W.F. (1989), *Sewage Sludge Disposal in Southern California, U.S.A.*, Water Science and Technology, 21, 1431-1440.
- Garvey, D., Davis, R.D., Guarino, C., Carlton-Smith, C.H. (1992), *Treatment and Disposal of Sewage Sludge - Corrent Practices*, Sludge 2000 Conference, Paper 5, Cambridge.
- Geertsema, W.S., Knocke, W.R., Novak, J.T. y Dove, D. (1994), *Long-term Effects of Sludge Application to Land*. Journal of American Water Works Association, noviembre 1994, 64-74.
- Gies, G. (1995), *Beneficial Use of Biosolids Expands in Canada*. Biocycle 36(3), 79-82.
- Goldstein, N. (1989), *EPA Sludge Disposal Regulation Proposed*, Biocycle 30(3), 44-47.
- Gandolla, M. y Dugnani, L. (1992), *Eliminación de Fangos en Vertederos Controlados de Residuos Sólidos Urbanos*. Residuos, Revista Técnica, septiembre-octubre, 1992.
- Guiver, K. (1992), *Proceedings of Enviroscot '92 Symposium on 'Sewage Sludge Disposal: the Commercial Opportunities'*, Journal of the Institution of Water and Environmental Management, 6, 636.
- Hahn, H.H. (1987), *Regional Sludge Treatment and Disposal Optimizing Reliability and Cost*, Water Science and Technology, 19, 847-857.
- Hall, J.E. (1992), *Alternative Uses for Sewage Sludge*, Sludge 2000 Conference, Paper 18, Cambridge.

- Hall, J.E. (1994), *European Regulations and Practical Experience on Biosolids Reuse and Disposal. Jornadas Técnicas: Biosólidos y Aguas Depuradas Como Recursos*. R. Mujeriego y L. Sala (Eds.), Pág. 193-205. Sant Feliu de Guíxols, Gerona.
- Harrison, R., Xue, D., Henry, C. y Cole, D.W. (1994), *Long-Term Effects of Heavy Applications of Biosolids on Organic Matter and Nutrient Content of a Coarse-Textured Forest Soil. Forest Ecology and Management*, 66, 165-177.
- Hemphill, B. (1992), *Rules and Options for Sludge Disposal. Water Engineering & Management*, 139(2), 24-26.
- Henry, C.L., Dale, W.C. y Harrison, R.B. (1994), *Use of Municipal Sludge to Restore and Improve Site Productivity in Forestry: The Pack Forest Sludge Research Program*, *Forest Ecology and Management*, 66, 137-149.
- Henry, C.L., Van Ham, M., King, R. y Leonard, P. (1994a), *Fertilizing Forests with Biosolids: Experiences in the Pacific Northwest. Proceedings of the WEF Conference "The Management of Water and Wastewater Solids for the 21st Century: a Global Perspective"*. Washington, D.C.
- Itoh, S., Suzuki, A., Nakamura, T., Yokoyama, S. (1992), *Direct Thermochemical Liquefaction of Sewage Sludge by a Continuous Plant*, *Water Science and Technology*, 26, 1175-1184.
- Jefatura del Estado (1986), Ley 20/1986, de 14 de marzo, Básica de Residuos Tóxicos y Peligrosos. B.O.E. de 20 de mayo de 1986.
- Jefatura del Estado (1995), Real Decreto-Ley 11/1995, de 28 de diciembre, por el que se establecen las normas aplicables al tratamiento de las aguas residuales urbanas. B.O.E. de 30 de diciembre de 1995.
- Jin, D. (1994), *Multimedia Waste-Disposal Under Cost Uncertainty-Application to Sewage-Sludge Management in the New-York Metropolitan-Area. American Journal of Agricultural Economics*, 76(5), 1257.
- Jordao, E.P., Leitao, J.L. (1990), *Sewage and Solids Disposal: Are Processes Such as Ocean Disposal Proper? The Case of Rio de Janeiro (Brazil)*, *Water Science and Technology*, 22(12), 33-43.
- Kuchenrither, R.D. (1992), *The Objectives of Sludge Treatment*, *Sludge 2000 Conference*, Paper 6, Cambridge.
- Mancomunidad de la Comarca de Pamplona (1994). EDAR de Arazuri, Instalaciones de compostaje.
- Mason, C.A., Häner, A., Hamer, G. (1992), *Aerobic Thermophilic Waste Sludge Treatment*, *Water Science and Technology*, 25(1), 113-118.
- Matthews, P.J. (1992), *Sewage Sludge Disposal in the UK: A New Challenge for the Next Twenty Years*, *Journal of the Institution of Water and Environmental Management*, 5, 551-559.
- Matthews, P.J. (1992a), *Sewage Sludge Management in Western Europe - An Early 1992 Perspective*, *EIW Workshop*. Bruselas.
- McBride, M.B. (1995), *Toxic Metal Accumulation from Agricultural Use of Sludge: Are USEPA Regulations Protective?*. *Journal of Environmental Quality*, 24(1), 5-18.
- Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación (1990), Real Decreto 1310/1990 de 29 de octubre, por el que se regula la utilización de los lodos de depuración en el sector agrario. B.O.E. de 1 de noviembre de 1990.
- Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación (1993), Orden de 26 de octubre de 1993 sobre utilización de lodos de depuración en el sector agrario. B.O.E. de 5 de noviembre de 1993.
- Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo (1988), Real Decreto 833/1988, de 20 de julio, por el que se aprueba el Reglamento para la ejecución de la Ley 20/1986, Básica de Residuos Tóxicos y Peligrosos. B.O.E. de 30 de julio de 1988.
- Moller, U. (1983), *German Practice in Land Disposal of Sludge Including Legislation and Health Aspects*, *Water Science and Technology*, 15, 115-133.
- Palm, O. (1992), *Use or Disposal of Sewage Sludge - A Dilemma for Policymakers, Environmentalists and Owners of Municipal Waste Water Treatment Plants. Sludge 2000 Conference*, Paper 1, Cambridge.
- Paulsrud, B. (1990), *Sludge Handling and Disposal at Small Wastewater Treatment Plants in Norway*, *Water Science and Technology*, 22, 233-238.
- Principado de Asturias (1993). Información verbal facilitada por el Servicio de Montes de la Consejería de Agricultura y Pesca.
- Rich, L.G. (1982), *A Cost-Effective System for the Aerobic Stabilization and Disposal of Waste Activated Sludge Solids*, *Water Research*, 16, 535-542.

- Sastre, H. (1995), *"Biosólidos: Problemática, Tratamientos, Alternativas de Uso y Tendencias Futuras"*. Conferencia. II Jornadas Sobre Medio Ambiente en Asturias, Jorma95, Oviedo.
- Sastre, H., Gutiérrez, A. y Mahamud, M. (1994), Evaluación Técnica y Económica de Dos Alternativas de Tratamiento de Lodos de Depuradora. Proyecto técnico, Consejería de Medio Ambiente y Urbanismo del Principado de Asturias, Oviedo.
- Sastre, H., Gutiérrez, A., Mahamud, M., Marañón, E. y Coca, J. (1993), Incineración de Lodos Originados en el Tratamiento de Efluentes Urbanos en Plantas Depuradoras. Proyecto técnico, Consejería de Medio Ambiente y Urbanismo del Principado de Asturias, Oviedo.
- Smith, P.G. (1992), *Thermal Treatment and ultimate Disposal of Sewage Sludge in Japan*, Journal of the Institution of Water and Environmental Management, 6, 653-658.
- Solmaz, S., Groeger, G. (1992), *Sewage Sludge Use and Disposal*, Sludge 2000 Conference, Paper 11, Cambridge.
- Sufi, S.A. (1995), Estudio de Impacto Ambiental para la Planta de Compostaje de Residuos Sólidos Diversos en el Término de Estepar. Junta Administrativa de Mazuelo de Muñó. Burgos.
- Tay, J.H., Show, Y. (1992), *Reuse of Wastewater Sludge in Manufacturing Non-Conventional Construction Materials - an Innovative Approach to Ultimate Sludge Disposal*, Water Science and Technology, 26, 1165-1174.
- United States Environmental Protection Agency (1993) 40 CFR Part 503 *Standards for the Use or Disposal of Sewage Sludge, Final Rules*. FR 58(32):9248-9415. Office of Science and Technology, Washington, D.C. 19 de Febrero, 1993.
- Vaccaro, R.F., Capuzzo, J.M., Marcus, N.H. (1981), *The Oceans and U.S. Sewage Sludge Disposal Strategy*, Oceanus, 24 (1), 55-59.
- Vitores i Lozano, L. (1990), *Gestión de Fangos en Depuradoras Pequeñas*, Tecnología del Agua, 69, 23-35.
- Walker, D.L. (1982), *Sludge Disposal Strategy: a UK Viewpoint*. Water Science and Technology, 14(3), 127-136.
- Water Environment Federation (1992). *Sludge Incineration: Thermal destruction of Residues. Manual of Practice Fd-19*. Water Environment Federation, Alexandria.
- Webber, M.D., Duvoort, L.E., Berglund, S. (1986), *Future Developments in Sludge Disposal Strategies*, en Factors Influencing Utilisation Practices in Europe, R.D. Davis y otros Eds., Págs. 103-116, Elsevier, Londres.
- Yashiki, D., Murakami, T. (1991), *Operational Results of Melting System for Sewage Sludge*, Water Science and Technology, 23, 1773-1781.