

M.M. Delgado, J.V. Martín, C. Rodríguez, R. Miralles de Imperial

**EVALUACIÓN DE UN LODO SECADO TÉRMICAMENTE
EN LA FERTILIZACIÓN DE CULTIVO DE CEREAL**

Separata ITEA

INFORMACIÓN TÉCNICA ECONÓMICA AGRARIA, VOL. **108** N.º 3 (357-375), 2012

Evaluación de un lodo secado térmicamente en la fertilización de cultivo de cereal

M.M. Delgado¹, J.V. Martín, C. Rodríguez, R. Miralles de Imperial

INIA, Departamento de Medio Ambiente. Ctra. de La Coruña Km. 7.5, 28040 Madrid, España

Resumen

Se realizaron estudios de campo sobre los efectos producidos después de la aplicación del lodo secado térmicamente a varias dosis, comprobando la fertilidad de un cultivo de cereal de un suelo representativo de un agroecosistema semiárido. El diseño experimental constó de parcelas con cebada (*Hordeum vulgare* L.), avena (*Avena sativa*) y trigo (*Triticum aestivum*) enmendadas con 5000 (L 1), 8000 (L 2) y 12000 (L 3) kg/ha de lodo secado térmicamente, que se compararon con un suelo control (Testigo) y con un tratamiento de fertilización mineral (Mineral) consistente en 300 kg/ha de un abono triple 15-15-15 (N; P; K). En términos generales, la fertilización con el lodo secado térmicamente mejora la respuesta del cultivo, aumentando los valores de producción respecto al control y a la fertilización mineral, sin que se adviertan problemas de contaminación por metales pesados ni en grano ni en paja. El estudio de índices de eficiencia fertilizante revela que el empleo de la dosis más elevada (L 3) consigue un aprovechamiento más eficaz del nitrógeno aplicado.

Palabras clave: Cebada (*Hordeum vulgare* L.), avena (*Avena sativa*), trigo (*Triticum aestivum*), residuo orgánico.

Summary

Assessment of a thermally-dried sewage sludge in the fertilization of cereal crops

This research deals with the study of sewage sludge used in agriculture, with the aim of providing a suitable solution for the increasing production of this waste and improving soil fertility in a sustainable way. Effects of sewage sludge application to soil at different rates were studied in a semiarid agroecosystem. The experimental design included plots cropped to barley, oat and wheat and amended with sewage sludge thermally dried at rates 5000 (SW 1), 8000 (SW 2) y 12000 (SW 3) kg/ha and were compared to an unamended soil (control) and a soil treated with mineral fertilization (Mineral) with 300 kg/ha of 15-15-15 (N; P; K).

In general, fertilization with sewage sludge thermally dried improved crop response, increasing yield with respect to control soil and mineral treatment. No heavy metal pollution was observed in grain or straw. The study of fertilizer efficiency indexes revealed that the use of thermally-dried sewage sludge at high rates achieved more efficient use the applied N.

Key words: Barley (*Hordeum vulgare* L.), oat (*Avena sativa*), wheat (*Triticum aestivum*), organic waste.

1. Autor para correspondencia: delgado@inia.es

Introducción

La pérdida de materia orgánica del suelo se relaciona estrechamente con la merma del potencial agrícola y con el riesgo creciente de erosión. Este problema se hace más acuciante en la región mediterránea, donde las condiciones climáticas, unidas a prácticas agrícolas inadecuadas, han favorecido un agravamiento de los procesos degradativos del suelo, acelerando los riesgos de erosión y desertificación (Porta *et al.*, 2003, Fernández *et al.*, 2007).

La aplicación de lodos secado térmicamente se contempla como una opción eficaz para mejorar la calidad de los suelos e incrementar su fertilidad. En este contexto, la utilización de lodos secado térmicamente como fertilizantes o enmendantes orgánicos de suelos agrícolas está siendo ampliamente usada como sistema de gestión más económica, ya que contiene elementos nutrientes como: N, P, K, Ca y Mg en ciclos naturales agrícolas (Delgado *et al.*, 2002, Antolín *et al.*, 2005).

Hoy en día en España, el Plan Nacional Integrado de Residuos (PNIR) para el periodo 2008-2015, refleja que en 2006 se generaron 1.064.972 t de materia seca de lodos de depuradora de los que 68.7037 t se destinaron a valorización agrícola (MMA, 2006).

Los efectos de la adición de cualquier materia orgánica al suelo depende de las características de ambos, de la dosis, la época de aplicación y de las condiciones ambientales, por lo que los experimentos de campo están sujetos a una serie de variables difíciles de controlar y que repercuten indiscutiblemente en los resultados que se obtengan (Miralles de Imperial *et al.*, 2002, Plaza *et al.*, 2005). A pesar de estas limitaciones, la realización de estudios de campo a largo plazo proporciona una información extremadamente valiosa acerca de la capacidad fertilizante del residuo aplicado y la influencia que ejerce sobre el suelo y las plantas en condiciones reales (Delgado *et al.*, 1999, Fernández *et al.*, 2008).

En 2006 se inició un experimento de campo en la Finca "La Canaleja", situada en Alcalá de Henares (Madrid). El objetivo fundamental de este trabajo fue estudiar en condiciones de campo, los efectos de la aplicación del lodo secado térmicamente a varias dosis, sobre la fertilidad y los posibles riesgos de contaminación de un agroecosistema semiárido representativo.

Materiales y métodos

El experimento se ha desarrollado en la finca experimental "La Canaleja" perteneciente al INIA situada en el término municipal de Alcalá de Henares (Madrid). Sus coordenadas geográficas son 40°30' de latitud norte y 3°17' de longitud oeste y se encuentra a una altitud media de 600 m sobre el nivel del mar. El suelo se asienta sobre un material originario de arenas, cantos y gravas, con presencia de un horizonte cálcico a menos de un metro de profundidad. Se puede clasificar como Haploxeralf calciortidico según criterios USDA (MAPA, 1994). El suelo tiene textura franco arcillosa, con un contenido en carbonatos en torno al 5% y cuyas características químicas se reflejan en la tabla 1. Los datos meteorológicos se tomaron de la estación existente en la propia finca.

Las figuras 1 y 2 muestran las temperaturas y las precipitaciones medias mensuales de cada uno de los cuatro años hidrológicos de experimentación. Estas condiciones meteorológicas específicas de cada campaña tienen un efecto muy marcado sobre los cultivos, de manera que para una misma variedad, zona de producción y manejo de cultivo, la producción es muy variada en función de la meteorología.

Respecto a las temperaturas medias mensuales registradas durante el periodo estudiado cabe destacar que durante la primavera las

Tabla 1. Características del suelo
 Table 1. Soil Characteristics

Suelo	pH 1:2,5 H ₂ O	N Total %	N-NO ₃ ⁻ mg/Kg	N-NH ₄ ⁺ mg/Kg	C/N	Orgánico Oxidable %	C.E. dSm ⁻¹ 25°C	METALES PESADOS mg/Kg					
								Cu	Zn	Pb	Ni	Cr	Cd
	8,42	0,089	2,27	2,71	4,5	0,4	0,17	9	50	9	75	3	0,005

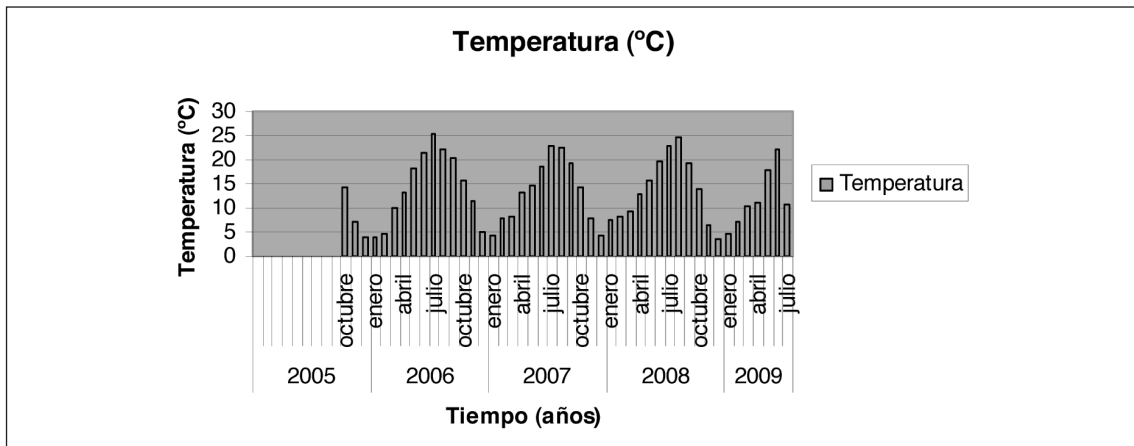


Figura 1. Temperaturas medias mensuales de cada uno de los cuatro años hidrológicos de experimentación.

Figure 1. Monthly average temperatures for each of the four hydrological years of experimentation.

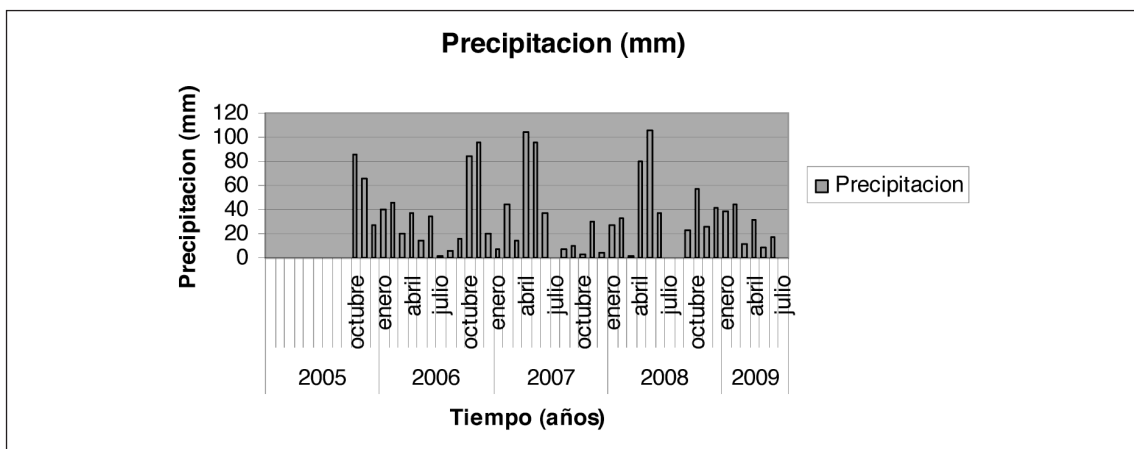


Figura 2. Precipitaciones medias mensuales de cada uno de los cuatro años hidrológicos de experimentación.

Figure 2. Monthly average rainfall for each of the four hydrological years of experimentation.

temperaturas medias mensuales fueron superiores a las correspondientes al año medio en los cuatro años estudiado, aunque de manera más pronunciada en la cosecha de 2008, coincidiendo con el final del ciclo del cultivo.

Las precipitaciones medias registradas en los cuatro años objeto de estudio 2005, 2006, 2007 y 2008 han sido: 394, 521, 345 y 274 mm respectivamente. En la primera campaña, las lluvias son más abundantes en otoño, mientras que la primavera es relativamente seca, con lluvias concentradas en octubre y noviembre. En la segunda campaña estudiada, los meses de primavera y otoño presentan precipitaciones abundantes. En la tercera campaña la situación es inversa a la primera campaña las precipitaciones aparecen en primavera concretamente los meses de abril y mayo. En la última campaña, las precipitaciones son escasas y se reparten de manera muy uniforme a lo largo del ciclo del cultivo.

Diseño experimental

El experimento constó de parcelas de 100 m² (20 x 5 m) con una rotación de cultivos de cereales: cebada/avena/trigo. La labor de alzado para levantar el rastrojo de cereal se realizó con arado de vertedera, una profundidad de 25-30 cm con tempero del suelo en los meses de septiembre- octubre. Después de alzar se dio un pase de cultivador con el que se incorporó el abonado. Se aplicaron 5000 (Lodo 1), 8000 (Lodo 2) y 12000 (Lodo 3) kg/ha de lodo secado térmicamente. Se compararon con un conjunto de parcelas no tratadas (testigo) y con un tratamiento de fertilización mineral (mineral) consistente en 300 kg/ha de un abono triple 15-15-15 (N; P; K).

El diseño experimental fue mediante bloques al azar con tres repeticiones.

Los tratamientos fueron:

- Mineral: 300 kg/ha 15-15-15 (N; P; K)

- Lodo 1: 5000 kg/ha lodo secado térmicamente
- Lodo 2: 8000 kg/ha lodo secado térmicamente
- Lodo 3: 12 000 kg/ha lodo secado térmicamente
- Testigo: sin fertilización

La incorporación del lodo secado térmicamente: Lodo 1 (5000 kg/ha), Lodo 2 (8000 kg/ha) y Lodo 3 (12000 kg/ha) que corresponde al nitrógeno aportado por el lodo y el necesario para la planta se realizó en los años 2005 y 2007 en la segunda quincena de octubre.

La fertilización mineral fue incorporada todos los años mediante un abonado de fondo (300 kg/ha) triple 15-15-15 (N; P; K).

El sistema de aplicación consistió en la distribución del lodo sobre surcos previamente preparados en el suelo con el propósito de evitar la contaminación de parcelas adyacente. Inmediatamente después el lodo fue incorporado al suelo mediante labores con cultivador. Posteriormente se realizó la siembra del cereal mecánicamente, con una sembradora a chorrillo de 6 botas, para parcelas experimentales a inicios de noviembre con una densidad de 140 kg/ha de semilla, equivalente a una 300 plantas/m².

Se seleccionó cebada (*Hordeum vulgare* L.) variedad Kika R-2, avena (*Avena sativa*) variedad Prevision R-1 y trigo blando (*triticum aestivum*) variedad Astral R-1 todas ellas de Agrosa, por su buena adaptación a las condiciones bioclimáticas y por ser un cultivo frecuente en la zona de estudio. En primavera se aplicó un tratamiento herbicida con glifosato en todas las parcelas. En junio de cada año se realizó la recolección de la cosecha con una cosechadora apropiada para trabajar con parcelas como las de este experimento.

Antes de cosechar las parcelas se recogieron muestras de planta en cada unidad experi-

mental para determinar los siguientes parámetros: rendimiento de materia seca, rendimiento de grano, índice de cosecha, número de espigas por unidad de superficie, número de granos por espiga, calidad de grano (peso específico y peso de 1000 granos), composición mineral (nitrógeno, fósforo y potasio) del grano y de la paja e índices de eficiencia fertilizante.

Las muestras de suelo se tomaron antes y después de la cosecha con un equipo de barrenas Eijkelkamp de media caña para muestreo seccionado. Los análisis realizados, tras secado al aire y tamizado a 2 mm de luz de malla, fueron: el pH se midió en una suspensión suelo/agua (1:2,5) mediante un electrodo de vidrio y realizando la medida en un pH-metro CRISON micro pH 2001 con compensación automática de temperatura, para la medida de la conductividad eléctrica (dS/m^{-1}), se utilizó un conductímetro CRISON micro CM 2201 en un extracto acuoso (1:5,0) (MAPA, 1994). El carbono orgánico oxidable, por el método de Walkley-Black consistente en la oxidación de la muestra con dicromato potásico por vía húmeda, utilizando un factor de oxidación de 1,29 ya que se supone que sólo el 77% del carbono orgánico presente en la muestra fue oxidado en las condiciones experimentales empleadas, *i. e.* mezclado de $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ 1 N y H_2SO_4 concentrado en proporción 2:1 y media hora digerido a temperatura ambiente (APHA, AWWA, WPCF. 2005). La concentración de nitrógeno total se determinó siguiendo el método Kjeldahl, que consiste en la digestión de la muestra con ácido sulfúrico concentrado. El nitrógeno orgánico se mineraliza, pasando a forma amoniacal, que junto con el amonio ya existente en la muestra se valora por colorimetría (Hesse, 1971). El contenido de P, K, Ca y Mg, así como los metales pesados (Pb, Ni, Cr, Cu, Pb y Cd) se midieron por espectrofotometría de emisión de plasma previa digestión ácida (HNO_3/HCL , 1:3) (Sims y Kline 1991).

El lodo de secado térmicamente que fue suministrado por el Ayuntamiento de Madrid, que se ha obtenido tratando los lodos procedentes de sus estaciones regeneradoras de aguas residuales con técnicas de secado térmico por cogeneración energética mediante un turbogenerador. Con este proceso se obtuvo un producto granulado seco, estable e higienizado, que reduce el transporte, mejora el almacenamiento y facilita la aplicación directa al terreno.

Los procesos de secado implican una reducción del peso y volumen del lodo generado, sin pérdida de sus componentes básicos, materias orgánicas y nutrientes esenciales para las plantas (De Castro 2004). Este lodo fue añadido a los campos de ensayo en las campañas 2005-2006 y 2007- 2008 y en tabla 2 se muestran las características químicas del lodo empleado (media de dos años 2005 y 2007). Los métodos utilizados para sus análisis son los mismos que los expuestos para el suelo.

Las muestras de vegetal fueron recogidas al final de la cosecha (julio) y después de molerlas se procedió a estudiar la distribución en la planta (grano y paja) de los nutrientes (N, P y K) según lo distintos tratamientos en los diferentes cultivos. La concentración de nitrógeno total se determinó siguiendo el método Kjeldahl y el contenido de P, K, fue medido por espectrofotometría de emisión de plasma previa digestión ácida (HNO_3/HCL , 1:3).

Análisis estadístico

En cada experimento los tratamientos se replicaron tres veces y se distribuyeron al azar. Los datos obtenidos fueron sometidos a análisis de varianza de múltiple rango (ANOVA) y prueba estadística LSD para comparar su media ($P \leq 0,05$), utilizando el programa estadístico Statgraphics (SAS Institute Inc.1999).

Tabla 2. Características del lodo secado térmicamente (media de 2005 y 2007)
 Table 2. Sewage sludge thermally- dried characteristics (average of 2005 and 2007)

Parámetro	Valor medio	Límites UE pH >7
Humedad (%)	7,3	
pH (1:2,5 H ₂ O)	7,2	
C.E. (dS/m 1:5,0 H ₂ O)	2,3	
Mat. Orgánica (%)	54,0	
Carbono Oxidable (%)	28,6	
Nitrógeno Kjeldahl (%)	4,2	
Fósforo -P- (%)	0,8	
Potasio -K- (%)	0,5	
Calcio -Ca- (%)	3,2	
Sodio-Na (%)	0,07	
Hierro -Fe- (%)	1,7	
Magnesio -Mg- (%)	0,8	
Cobre -Cu- (mg/kg)	241,5	1750,0 (mg/kg)
Plomo -Pb- (mg/kg)	30,0	1200,0 (mg/kg)
Cromo -Cr- (mg/kg)	31,6	1500,0 (mg/kg)
Zinc -Zn- (mg/kg)	930,5	4000,0 (mg/kg)
Níquel -Ni- (mg/kg)	40,6	400,0 (mg/kg)
Cadmio -Cd- (mg/kg)	0,2	40,0 (mg/kg)

Resultados y discusión

Efectos sobre el cultivo

El rendimiento de una cosecha puede considerarse en términos biológicos o agronómicos. El rendimiento biológico se define como la producción total de material vegetal, mientras que el agronómico tiene en cuenta aquella parte de la planta que resulta de interés para el cultivo que en caso del cereal es la producción de grano.

Con el fin de analizar conjuntamente el efecto ejercido en los años de experimento sobre

el rendimiento de cosecha, se ha calculado la producción total, tanto de grano como de materia seca, de cada uno de los tratamientos, así como el porcentaje de variación respecto al control y a la fertilización mineral (tablas 3, 4 y 5).

Los resultados indican que la cantidad total de grano y de materia seca aumenta con la adición consecutiva de dosis crecientes de lodo, hasta alcanzar el máximo con Lodo 3 (12000 kg/ha). Cuando se compara con la fertilización mineral, el rendimiento de materia seca se incrementa para todos los tratamientos, aunque el rendimiento total de

Tabla 3. Rendimiento de materia seca y de grano de cebada (Kg/Ha) en los diferentes tratamientos (media de los cuatro años) y variación respecto al testigo (%T) y a la fertilización mineral (% M)
Table 3. Dry matter yield and grain yield of barley (Kg/Ha) according to the different treatments (average of four years) and variation compared with the control (%T) and mineral fertilization (%M)

Tratamiento	Rendimiento de materia seca			Rendimiento de grano		
	Total	%T	%M	Total	%T	%M
Testigo	12993a		-12	5696a		-13
Mineral	14690b	13		6542b	15	
L1	15647c	20	6	7030c	23	7
L2	16652d	28	13	7596d	33	16
L3	16820e	29	14	8078e	42	23
Valor p	*			*		

* $p < 0,05$ significativo. ns; no significativo ($p > 0,05$).

Valores seguidos de la misma letra en la misma columna no difieren significativamente según el test de LSD ($p < 0,05$).

Tabla 4. Rendimiento de materia seca y de grano de avena (Kg/Ha) en los diferentes tratamientos (media de los cuatro años) y variación respecto al testigo (%T) y a la fertilización mineral (% M)
Table 4. Dry matter yield and grain yield of oat (Kg/Ha) according to the different treatments (average of four years) and variation compared with the control (%T) and mineral fertilization (%M)

Tratamiento	Rendimiento de materia seca			Rendimiento de grano		
	Total	%T	%M	Total	%T	%M
Testigo	13069d		1	3114a		-30
Mineral	12936c	-1		4427b	42	
L1	14055e	7	9	4779c	53	8
L2	11705ab	-10	-9	5597d	80	26
L3	12597c	-4	-3	6948e	123	57
Valor p	*			*		

* $p < 0,05$ significativo. ns; no significativo ($p > 0,05$).

Valores seguidos de la misma letra en la misma columna no difieren significativamente según el test de LSD ($p < 0,05$).

Tabla 5. Rendimiento de materia seca y de grano de trigo (Kg/Ha) en los diferentes tratamientos (media de los cuatro años) y variación respecto al testigo (%T) y a la fertilización mineral (% M)
Table 5. Dry matter yield and grain yield of wheat yield (Kg/Ha) according to the different treatments (average of four years) and variation compared with the control (%T) and mineral fertilization (%M)

Tratamiento	Rendimiento de materia seca			Rendimiento de grano		
	Total	%T	%M	Total	%T	%M
Testigo	20893a		-10	4766a		-15
Mineral	23259e	11		5608b	18	
L1	22556c	8	-3	6015c	26	7
L2	23113d	11	-1	6686d	40	19
L3	21399b	10	-8	7940e	67	42
Valor p	*			*		

* $p < 0,05$ significativo. ns; no significativo ($p > 0,05$).

Valores seguidos de la misma letra en la misma columna no difieren significativamente según el test de LSD ($p < 0,05$).

grano solo es significativamente superior en los suelos que recibieron 12000 kg/ha.

Numerosos estudios indican que la aplicación de lodo de depuradora puede lograr rendimientos de cosecha satisfactorios, siendo posible sustituir la fertilización mineral parcial o totalmente. Sin embargo, la aplicación de dosis superiores a la óptima, calculada en función de las necesidades de fertilización del cultivo, las características del suelo y las condiciones ambientales, no siempre supone un aumento significativo de la producción, sino que conlleva un riesgo de contaminación.

La relación entre producción biológica y agronómica se define mediante el índice de cosecha (Mengel y Kirkby, 2001, Hernández 2006). Este parámetro representa la fracción de peso seco total de la planta que se encuentra en forma de grano. Refleja la eficacia del cultivo en el uso del fertilizante, ya que un índice de cosecha elevado indica una distribución mejor de compuestos asimila-

dos dentro de la planta, mayor en el grano que en el paja (Molina, 1989).

En las tablas 6, 7 y 8 se muestran el índice de cosecha para los tres cultivos cebada, avena y trigo respectivamente. En todas ellas se observa que el año que se ha obtenido mayor índice de cosecha ha sido en el año 2008 con la mayor eficacia del cultivo para la fertilización con lodo de mayor dosis (L3, 12000 kg/ha).

El estudio estadístico de las figuras anteriores se pueden observar que solamente aparecen diferencias significativas en el cultivo de cebada en el año 2007 y para el cultivo de avena y de trigo aparecen dos años con diferencias significativas el 2007 y 2009.

La producción de grano en los diferentes cultivos estudiados puede ser considerada como resultado del producto de ciertos parámetros, lo que permite estudiar la contribución de distintas partes de la planta a la producción de grano y la causa de variación en la cosecha final (Molina, 1989, Hernández, 2006). El ren-

Tabla 6. Índice de cosecha de cebada en los diferentes tratamientos
 Table 6. Index oat harvest according to the different treatments

Tratamiento	2006	2007	2008	2009
Testigo	0,38a	0,36a	0,79a	0,42a
Mineral	0,35a	0,32ab	0,76a	0,38a
L1	0,36a	0,28a	0,76a	0,42a
L2	0,37a	0,30ab	0,71a	0,40a
L3	0,32a	0,28a	0,67a	0,36a
Valor p	ns	*	ns	ns

Tabla 7. Índice de cosecha de avena en los diferentes tratamientos
 Table 7. Index barley harvest according to the different treatments

Tratamiento	2006	2007	2008	2009
Testigo	0,55a	0,71b	0,64a	0,25b
Mineral	0,37a	0,27a	0,66a	0,08a
L1	0,37a	0,11a	0,62a	0,03a
L2	0,37a	0,06a	0,67a	0,24a
L3	0,37a	0,17a	0,69a	0,04a
Valor p	ns	*	ns	*

Tabla 8. Índice de cosecha de trigo en los diferentes tratamientos
 Table 8. Index wheat harvest according to the different treatments

Tratamiento	2006	2007	2008	2009
Testigo	0,21a	0,29ab	0,66a	0,35b
Mineral	0,26a	0,31b	0,70a	0,25a
L1	0,17a	0,27ab	0,64a	0,28ab
L2	0,16a	0,22a	0,74a	0,24a
L3	0,18a	0,27ab	0,70a	0,19a
Valor p	ns	*	ns	*

dimiento de grano puede expresarse como el producto entre el número de espigas por unidad de superficie, el número de granos por espiga y el peso medio del grano. El producto de los dos primeros se denomina factor de acumulación o capacidad de almacenamiento y equivale al número de granos por unidad de superficie, mientras que el peso medio por grano indica la medida en que esta capacidad se transforma en rendimiento final.

En las tablas 9, 10 y 11 se presentan los resultados obtenidos en el número de espigas, nú-

mero de granos por espiga y factor de acumulación (número de granos/m²) respectivamente. En el cultivo de cereal, el número final de espigas depende tanto de la cantidad de tallos formados durante el ahijado como de la proporción de los mismos que sobrevivan y que puedan diferenciarse para desarrollar un espiga viable (García del Moral *et al.*, 2002). Por otra parte, los granos por espiga resultan del número de primordios florales formados, de la cantidad de ellos que den una espiguilla fértil y del porcentaje de estas que originen granos viables (Antolín *et al.*, 2005).

Tabla 9. Número de espigas de cebada, avena y trigo (espigas/m²) en los diferentes tratamientos (media de los cuatro años)
Table 9. Number of spikes of barley, oat and wheat (spikes/m²) according to the different treatments (average of four years)

Tratamiento	Cebada	Avena	Trigo
Testigo	145a	86a	329a
Mineral	335bc	92a	303a
L1	418c	124a	346a
L2	282b	96a	347a
L3	350bc	101a	261a
Valor p	*	ns	ns

Tabla 10. Número de granos por espiga de cebada, avena y trigo (granos/espiga) en los diferentes tratamientos (media de cuatro años)
Table 10. Number of grains per spike of barley, oat and wheat (grains/spike) according to the different treatments different (average of four years)

Tratamiento	Cebada	Avena	Trigo
Testigo	20ab	27a	22a
Mineral	20a	29a	26ab
L1	23b	28a	30b
L2	22ab	23a	30b
L3	23b	32a	28b
Valor p	*	ns	*

* $p < 0,05$ significativo. ns; no significativo ($p > 0,05$).

Valores seguidos de la misma letra en la misma columna no difieren significativamente según el test de LSD ($p < 0,05$).

Tabla 11. Factor de acumulación (número de granos/m²) de cebada, avena y trigo en los diferentes tratamientos (media de cuatro años)
 Table 11. Accumulation factor (grains/ m²) of barley, oat and wheat according to the different treatments (average of four years)

Tratamiento	Cebada	Avena	Trigo
Testigo	2922a	2399a	7378a
Mineral	6846bc	2334a	7886a
L1	9701c	3816a	10792a
L2	6043ab	2099a	10464a
L3	8102bc	3296a	7171a
Valor p	*	ns	ns

Calidad del grano

La evaluación de la calidad del grano obtenido en cada cosecha se ha realizado en función de dos parámetros relacionados con el tamaño y el peso del grano: el peso específico y el peso de mil granos. Los valores medios se muestran en las tablas 12 y 13.

Los resultados encontrados sobre el peso específico de grano se encontró que para el cultivo de avena y trigo no fueron estadísticamente significativos solamente se encontró diferencias para el cultivo de cebada.

Respecto al peso de mil granos, solamente aparecen diferencias significativas en el cul-

Tabla 12. Peso específico del grano de cebada, avena y trigo (kg/m³) en los diferentes tratamientos (media de cuatro años)
 Table 12. Specific weight of barley, oat and wheat grain ((kg/m³) according to the different treatments (average of four years)

Tratamiento	Cebada	Avena	Trigo
Testigo	605b	428a	546a
Mineral	534ab	451a	526a
L1	466a	415a	543a
L2	536ab	426a	504a
L3	531ab	412a	511a
Valor p	*	ns	ns

* p < 0,05 significativo. ns; no significativo (p > 0,05).

Valores seguidos de la misma letra en la misma columna no difieren significativamente según el test de LSD (p < 0,05).

Tabla 13. Peso de mil granos de cebada, avena y trigo (g) en los diferentes tratamientos (media de cuatro años)
 Table 13. Thousand grains of barley, oat and wheat (g) according to the different treatments (average of four years)

Tratamiento	Cebada	Avena	Trigo
Testigo	36a	22ab	24a
Mineral	34a	28b	25a
L1	29a	15a	19a
L2	32a	14a	21a
L3	32a	17a	20a
Valor p	ns	*	ns

* $p < 0,05$ significativo. ns; no significativo ($p > 0,05$).

Valores seguidos de la misma letra en la misma columna no difieren significativamente según el test de LSD ($p < 0,05$).

tivo de avena. Según Molina, 1989 el peso del grano es función de la etapa de maduración y de la velocidad de crecimiento de grano y se considera un componente de la cosecha relativamente estable bajo condiciones normales de cultivo. Un peso de grano menor indica un descenso en los aportes de compuestos asimilado; debido especialmente a condiciones ambientales desfavorables como una mayor sequedad y temperatura al final del ciclo del cultivo (Hernández, 2006).

Composición mineral

Se puede estudiar la distribución en la planta de los nutrientes según lo distintos tratamientos en los diferentes cultivos. El nitrógeno es, en general, el macronutriente más afectado por la adición de lodo, especialmente en grano ya que la cantidad de nitrógeno en el grano conduce a la estimación de contenidos proteicos ($\text{gN/kg} \times 0,64$) del orden de 8,7-13,6% (Tarrasón et al., 2008).

En la tabla 14 se muestra la concentración de nitrógeno en el grano y en la paja para el cul-

tivo de cebada en la que la concentración de nitrógeno aumenta con la dosis más elevadas de lodo y ha resultado que existen diferencias significativas en todos los años a excepción del año 2007 para el grano y en los años 2007 y 2009 para la paja.

La tabla 15 muestra la concentración de nitrógeno en el grano y en la paja para el cultivo de avena. La concentración de nitrógeno en grano aumentó con la dosis más elevada de lodo excepto los años 2007 y 2008 que disminuyó con el aumento de dosis y no aparecieron diferencias significativas. Para la paja no existen diferencias significativas en ningún año excepto para el año 2007.

En las tabla 16 se muestra la concentración de nitrógeno en el grano y en la paja para el cultivo de trigo en la que la concentración de nitrógeno aumenta con la dosis más elevadas de lodo excepto en el año 2006 que disminuyó con el aumento de dosis y no existiendo diferencias significativas en este año y en el 2008 en el grano. Para la paja no existen diferencias significativas solamente para el año 2007.

Tabla 14. Concentración de nitrógeno en grano y paja de cebada (g/Kg) en los diferentes tratamientos

Table 14. Nitrogen concentration in grain and straw of barley (g/Kg) according to the different treatments

Tratamiento	grano	paja	grano	paja	grano	paja	grano	paja
	2006		2007		2008		2009	
Testigo	17,9a	4,3a	16,4a	2,2a	17,2a	4,8a	10,9ab	3,5a
Mineral	21,0a	5,5ab	16,6a	2,8a	19,2a	6,2ab	7,1a	3,5a
L1	19,8a	4,5a	16,6a	3,5a	20,1a	10,1ab	9,9ab	3,2a
L2	30,5b	6,2ab	19,2a	4,0a	8,71a	11,6bc	15,5b	4,9a
L3	24,0ab	9,4b	17,2a	4,1a	27,6b	16,8c	25,3c	6,5a
Valor p	*	*	ns	ns	*	*	ns	ns

* $p < 0,05$ significativo. ns; no significativo ($p > 0,05$).

Valores seguidos de la misma letra en la misma columna no difieren significativamente según el test de LSD ($p < 0,05$).

Tabla 15. Concentración de nitrógeno en grano y paja de avena (g/Kg) en los diferentes tratamientos

Table 15. Nitrogen concentration in grain and straw of oat (g/Kg) according to the different treatments

Tratamiento	grano	paja	grano	paja	grano	paja	grano	paja
	2006		2007		2008		2009	
Testigo	21,7ab	4,4a	16,4a	2,2a	18,9a	4,5a	16,5ab	7,8a
Mineral	18,9a	5,3a	16,6a	2,8a	20,0a	9,0b	7,5a	10,9ab
L1	21,1ab	6,7ab	19,2a	3,5a	20,3a	9,4b	10,9ab	13,9ab
L2	22,5b	9,5bc	19,2a	4,0a	20,3a	11,7b	10,9ab	13,8ab
L3	23,3b	11,0c	17,2a	4,1a	15,5a	9,3b	19,6b	16,1b
Valor p	*	*	ns	ns	ns	*	*	*

* $p < 0,05$ significativo. ns; no significativo ($p > 0,05$).

Valores seguidos de la misma letra en la misma columna no difieren significativamente según el test de LSD ($p < 0,05$).

Tabla 16. Concentración de nitrógeno en grano y paja de trigo (g/Kg) en los diferentes tratamientos
 Table 16. Nitrogen concentration in grain and straw of wheat (g/Kg) according to the different treatments

Tratamiento	grano	paja	grano	paja	grano	paja	grano	paja
	2006		2007		2008		2009	
Testigo	29,3a	5,1a	19,9ab	3,6a	18,6a	2,6a	13,6a	3,7a
Mineral	29,3a	8,5ab	11,4a	3,1a	20,6a	3,7a	18,4ab	7,9b
L1	35,2a	11,0b	17,9ab	5,3a	1,96a	3,8ab	25,3abc	6,5b
L2	36,2a	10,0b	24,7b	4,0a	20,0a	3,4a	29,6bc	7,7b
L3	34,9a	11,0b	26,2b	6,2a	22,3a	7,1b	34,0c	12,4c
Valor p	ns	*	*	ns	ns	*	*	*

* $p < 0,05$ significativo. ns; no significativo ($p > 0,05$).

Valores seguidos de la misma letra en la misma columna no difieren significativamente según el test de LSD ($p < 0,05$).

La tabla 17 muestra la concentración de fósforo en el grano y en la paja para el cultivo de cebada. En el año 2006, la concentración de fósforo en grano para el cultivo de cebada, aumentó en el tratamiento mineral, no obstante el tratamiento estadístico no revela diferencias significativas entre los valores medios. En los años siguientes la concentración de fósforo aumento ligeramente con la adición de lodo presentando niveles significativamente diferentes en los años 2007 y 2008. Por el contrario, la concentración de fósforo en la paja de cebada apenas se ve afectada por los diferentes tratamientos y no se observan variaciones significativas en ninguno de los años estudiados.

El lodo de depuradora aporta elevadas cantidades de fósforo, en su mayor parte presente en forma inorgánica (Sánchez y González, 2005 Beltrán et al., 2005). Sin embargo, su absorción por el cultivo puede verse no-

tablemente disminuida como consecuencia del incorporación de calcio, también presente en los lodos de depuradora, y del incremento del pH del suelo, que favorecen la formación de formas no asimilables por la planta (Whalen y Chang, 2001).

En el caso del cultivo de avena (tabla 18) existen diferencias significativas en el grano y en la paja en todos los años excepto en el año 2006 en la paja. Al contrario es lo que sucede para el cultivo de trigo que en la paja existe diferencias significativas en todos los años y en el grano solo los años 2008 y 2009 (tabla 19).

El contenido de potasio en grano y paja de los cultivos de cebada, avena y trigo aparecen reflejados en las tablas 20, 21 y 22. El cultivo de trigo es el que más diferencia significativa presenta y en los demás cultivos apenas presentan variaciones significativas con los distintos tratamientos.

Tabla 17. Concentración de fósforo en grano y paja de cebada (g/Kg) en los diferentes tratamientos
Table 17. Phosphorus concentration in grain and straw of barley (g/Kg) according to the different treatments

	grano	paja	grano	paja	grano	paja	grano	paja
Tratamiento	2006		2007		2008		2009	
Testigo	3,8a	0,8a	2,7a	0,41a	3,5a	0,8a	2,9a	0,9a
Mineral	5,3a	1,3a	2,8ab	0,7a	3,8a	1,3a	3,6a	1,1a
L1	4,0a	1,0a	2,5ab	0,5a	3,6a	1,1a	4,2a	1,1a
L2	3,2a	1,1a	3,1ab	0,7a	3,6a	1,1a	3,2a	1,3a
L3	3,4a	1,1a	3,2b	0,7a	3,8a	1,1a	3,4a	1,4a
Valor p	ns	ns	*	ns	*	ns	ns	ns

* $p < 0,05$ significativo. ns; no significativo ($p > 0,05$).

Valores seguidos de la misma letra en la misma columna no difieren significativamente según el test de LSD ($p < 0,05$).

Tabla 18. Concentración de fósforo en grano y paja de avena (g/Kg) en los diferentes tratamientos
Table 18. Phosphorus concentration in grain and straw of oat (g/Kg) according to the different treatments

	grano	paja	grano	paja	grano	paja	grano	paja
Tratamiento	2006		2007		2008		2009	
Testigo	2,7a	0,4a	2,7a	0,4a	2,7a	0,4a	2,7a	0,4a
Mineral	2,8ab	0,7a	2,7a	0,7ab	2,8a	0,7ab	2,8ab	0,5ab
L1	2,8ab	0,5a	2,9ab	0,6ab	2,8a	0,5ab	2,8ab	0,7ab
L2	3,1ab	0,7a	3,1ab	0,7ab	3,1ab	0,7ab	3,1b	0,7ab
L3	3,2b	0,7a	3,3b	0,8b	3,2b	0,8b	3,2b	0,8b
Valor p	*	ns	*	*	*	*	*	*

* $p < 0,05$ significativo. ns; no significativo ($p > 0,05$).

Valores seguidos de la misma letra en la misma columna no difieren significativamente según el test de LSD ($p < 0,05$).

Tabla 19. Concentración de fósforo en grano y paja de trigo (g/Kg) en los diferentes tratamientos
Table 19. Phosphorus concentration in grain and straw of wheat (g/Kg) according to the different treatments

	grano	paja	grano	paja	grano	paja	grano	paja
Tratamiento	2006		2007		2008		2009	
Testigo	3,21a	0,5a	3,1a	0,5a	2,2a	0,5a	2,3a	0,5a
Mineral	3,2a	0,7ab	3,2a	0,7ab	2,3a	0,6a	2,7a	0,7a
L1	3,7a	0,9ab	3,7a	1,0bc	3,0b	0,9ab	3,7b	0,9ab
L2	3,7a	1,3c	3,7a	1,1bc	3,6bc	1,3bc	3,9b	1,2b
L3	3,9a	1,0bc	3,8a	1,2c	3,8c	1,4c	4,0b	1,3b
Valor p	ns	*	ns	*	*	*	*	*

* $p < 0,05$ significativo. ns; no significativo ($p > 0,05$).

Valores seguidos de la misma letra en la misma columna no difieren significativamente según el test de LSD ($p < 0,05$).

Tabla 20. Concentración de potasio en grano y paja de cebada (g/Kg) en los diferentes tratamientos
Table 20. Potassium concentration in grain and straw of barley (g/Kg) according to the different treatments

	grano	paja	grano	paja	grano	paja	grano	paja
Tratamiento	2006		2007		2008		2009	
Testigo	6,8a	14,6a	3,6a	11,5a	6,6a	13,9a	4,9a	13,1a
Mineral	9,6a	17,2a	3,9a	11,5a	8,9a	15,3ab	5,9a	12,4a
L1	6,7a	14,3a	3,7a	14,8a	6,5a	16,4ab	5,6a	13,9a
L2	5,1a	19,5a	4,2a	11,2a	5,2a	19,0b	5,9a	19,2b
L3	5,7a	17,8a	4,3a	12,4a	5,8a	19,3b	6,4a	20,1b
Valor p	ns	ns	ns	ns	ns	*	ns	*

* $p < 0,05$ significativo. ns; no significativo ($p > 0,05$).

Valores seguidos de la misma letra en la misma columna no difieren significativamente según el test de LSD ($p < 0,05$).

Tabla 21. Concentración de potasio en grano y paja de avena (g/Kg) en los diferentes tratamientos
Table 21. Potassium concentration in grain and straw of oat (g/Kg) according to the different treatments

	grano	paja	grano	paja	grano	paja	grano	paja
Tratamiento	2006		2007		2008		2009	
Testigo	3,7a	11,4a	3,6a	11,0a	3,6a	10,5a	3,6a	7,8a
Mineral	3,9a	11,1a	3,8a	11,2a	3,7a	10,6a	3,8ab	11,1a
L1	3,8a	11,5a	3,9a	12,5a	3,9a	12,0a	3,8ab	12,1a
L2	4,2a	11,2a	4,2a	11,9a	4,1a	11,9a	4,1ab	11,2a
L3	4,4a	12,4a	4,4a	13,2a	4,4a	12,4a	4,6b	12,4a
Valor p	ns	ns	ns	ns	ns	ns	*	ns

* $p < 0,05$ significativo. ns; no significativo ($p > 0,05$).

Valores seguidos de la misma letra en la misma columna no difieren significativamente según el test de LSD ($p < 0,05$).

Tabla 22. Concentración de potasio en grano y paja de trigo (g/Kg) en los diferentes tratamientos
Table 22. Potassium concentration in grain and straw of wheat (g/Kg) according to the different treatments

	grano	paja	grano	paja	grano	paja	grano	paja
Tratamiento	2006		2007		2008		2009	
Testigo	3,6a	11,0a	3,6a	6,7a	2,7a	5,3a	3,0a	6,5a
Mineral	3,3a	10,1a	3,2a	10,6ab	3,0ab	9,6ab	3,1a	6,7a
L1	3,3a	9,5a	3,3a	11,5ab	3,3bc	10,0ab	3,3a	9,5a
L2	3,5a	13,9a	3,4a	13,6b	3,4bc	12,8b	3,5a	13,7ab
L3	3,7a	14,8a	3,7a	14,5b	3,7c	14,4b	3,7a	14,7b
Valor p	ns	ns	ns	*	*	*	ns	*

* $p < 0,05$ significativo. ns; no significativo ($p > 0,05$).

Valores seguidos de la misma letra en la misma columna no difieren significativamente según el test de LSD ($p < 0,05$).

Conclusiones

Los resultados de este estudio permiten recomendar dosis adecuadas para el aprovechamiento agronómico de los lodos secado térmicamente procedente de estaciones depuradoras de la zona centro de España para cultivo de cereal.

En general, la fertilización con el lodo secado térmicamente mejora la respuesta del cultivo de cereal, aumentando los valores de producción respecto al control y a la fertilización mineral, sin que se adviertan problemas de contaminación por metales pesados ni en grano ni en paja. El estudio de índices de eficiencia fertilizante revela que el empleo de la dosis más elevada (L 3) consigue un aprovechamiento más eficaz del nitrógeno aplicado.

Agradecimientos

Este estudio se realizó gracias al proyecto RTA2008-00040-00-00 financiado por el Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria (INIA-FEDER). Los autores agradecen a Jesús García, María Isabel González y Ángela García por su colaboración en las tareas de campo y laboratorio.

Bibliografía

- Antolín MC, Pascual J, Garcia C, Polo A, Sanchez-Diaz M, 2005. Growth, yield and soluble contents of barley in soils treated with sewage sludges under semiarid Mediterranean conditions, *Field Crops Research*, 94: 224-237.
- APHA, AWWA, WPCF, 2005. *Standard Methods for the Examination of water and Wastewater*. 21st ed. American Public Health Association, American Water Works Assotiation and Water Environment Federation, Washington, 874 p.
- Beltrán EM, Miralles de Imperial R, Porcel MA, Beringola L, Martín JV, y Delgado M, 2005. Influencia de la fertilización con lodos de depuradora compostados en las propiedades químicas del suelo de dos olivares. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 21: 143-150.
- De Castro J, 1994. El secado térmico de los lodos de depuración. *Tecnoambiente*, 142: 27-32.
- Delgado M, Miralles de Imperial R, Porcel M, Bigueriego M, 1999. Mineralización del nitrógeno procedente de residuos orgánicos. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 15: 19-25.
- Delgado M, Porcel MA, Miralles de Imperial R, Beltrán EM, Beringola L, Martín JV, 2002. Sewage sludge compost fertilizer effect on maize yield and soil heavy metal concentration. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 18: 147-150.
- Fernández J M., Hernández D, Plaza C, Polo A, 2007. Organic matter in degraded agricultural soils amended with composted and thermally-dried sewage sludge. *Science of the Total Environment*, 378: 75-80.
- Fernández J M., Hockaday WC, Plaza C, Polo A, Hatcher PG, 2008. Effects of long term soil amendment with sewage sludges on soil humic acid thermal and molecular properties. *Chemosphere*, 73: 1838-1844.
- García del Moral F, Miralles DF, Slafer GA, 2002. *Initiation and appearance of vegetative and reproductive structures thought barley development*. En: Slafer, G.A. (Ed.), *barley Science: recent advances from molecular biology to agronomy on yield and quality*. Food Products JK Press, Nueva York, pp. 243-267.
- Hernández D, 2006. Utilización del purín de cerdo com enmienda orgánica en suelos degradados: valorización agronómica y ambiental. Tesis Doctoral. Madrid, 257 p.
- Hesse PR, 1971. *Total nitrogen: the Kjeldahl Process*. A Texbook of soil chemical analysis. Murray, Gran Bretaña. 520 p.
- MAPA 1994. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Métodos Oficiales de Análisis. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, Madrid. Tomo III, 662 p.
- MMA 2006. Ministerio de Medio Ambiente: II Plan Nacional de lodos de depuradora de aguas residuales-EDAR IIPNLD (2007-2015). Plan nacional integrado de residuos (PNIR).

- Miralles de Imperial R, Beltrán EM, Porcel MA, Beringola ML, Martín JV, Calvo R, Delgado MM, 2002. Influencia de tres tipos de lodo de estaciones depuradoras en el desarrollo de estaquillas de olivo. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 18: 163-169.
- Mengel K, Kirkby E, 2001. Principles of plant nutrition. 5th ed. Kluwer Academic publishers, Dordrecht (The Netherlands), 256 p.
- Molina JL, 1989. *La cebada. Morfología, fisiología, genética, agronomía y usos industriales*, Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Madrid, 321 p.
- Plaza C, Brunetti G, Senesi N, Polo A, 2005. Proton binding to humic acids from organic amendments and amended soils by the NICA-Donnan model. *Environmental Science and Technology*, 39: 6692-6697.
- Porta J, López-Acevedo M, Roquero C, 2003. *Edafología para la agricultura y el medio ambiente*. 3^a ed. Ediciones Mundi Prensa, Madrid, 210 p.
- Sánchez M, González JL, 2005. The fertilizer value of pig slurry. I. Values depending on the type of operation. *Bioresearch Technology*, 96: 117-123.
- SAS Institute Inc. 1999. *User's guide*. Cary, North Carolina, 891-996.
- Sims JT, Kline JS, 1991. Chemical fractionation and plant uptake of heavy metals in soils amended with co-composted sewage sludge. *Journal Environmental Quality*, 20: 387-395.
- Tarrasón D, Ojeda G, Ortiz o, Alcañiz JM, 2008. Differences on nitrogen availability in a soil amended with fresh, composted and thermally-dried sewage sludge. *Bioresouce technology*, 99: 252-259.
- Whalen JK, Chang C, 2001. Phosphorus accumulation in cultivated soils from long-term annual applications of cattle feedlot manure. *Journal Environmental Quality*, 30: 229-237.

(Aceptado para publicación el 22 de marzo de 2012)