

ESCOLA SUPERIOR DE AGRICULTURA DE BARCELONA

UPC



**RESTAURACIÓN DE CANTERAS DE CALIZA CON  
LODOS DE DEPURADORA: EFECTOS EN LOS  
LIXIVIADOS**

Sonia García Gutiérrez

Especialidad: Explotaciones Agropecuarias

Profesores Tutores: Teresa Balanyà i Martí, Ramon Josa i March

Castelldefels, julio de 2008

ESCOLA SUPERIOR DE AGRICULTURA DE BARCELONA

UPC



**RESTAURACIÓN DE CANTERAS DE CALIZA CON  
LODOS DE DEPURADORA: EFECTOS EN LOS  
LIXIVIADOS**

Sonia García Gutiérrez

Especialidad: Explotaciones Agropecuarias

Profesores Tutores: Teresa Balanyà i Martí, Ramon Josa i March

Castelldefels, julio de 2008

**TÍTOL:**

***RESTAURACIÓ DE PEDRERES DE CALCÀRIA AMB FANGS DE DEPURADORA: EFECTES EN ELS LIXIVIATS.***

**AUTOR/A:** Garcia Gutierrez, Sònia.

**PROFESORS TUTORS:** Balanyà Martí, Teresa i Josa March, Ramon.

**RESUM:**

Les operacions de restauració sovint es realitzen sobre vessants (o talussos) amb fortes pendents sota condicions geomorfològiques poc estables, que de forma quasi inevitable generen aigües de escorrentia i de lixiviació que ingressen en els cursos d'aigua de la zona. D'aquesta forma l'aplicació de fangs rics en substàncies potencialment contaminants, s'ha de fer de forma que es minimitzin els riscos, per tant utilitzant materials de restauració segurs. Tant els fangs compostats com els assecats tèrmicament representen potencialment una millora front als fangs deshidratats d'ús més freqüent en l'agricultura.

Mitjançant l'anàlisi de metalls pesats i espècies iòniques en els lixiviats, s'ha analitzat el risc de contaminació dels sistemes aquàtics adjacents a la pedrera, sobretot les aigües superficials i freàtiques.

S'han avaluat els resultats obtinguts en els lixiviats i s'ha determinat que la utilització de fangs de depuradora compostats o assecats tèrmicament en la restauració de pedreres calcàries, no presenta un risc important de contaminació per metalls pesats i salinitat de les aigües superficials i subterrànies.

**PARAULES CLAU:**

Restauració de pedreres, Fangs de depuradora sotmesos a assecatge tèrmic, Fangs de depuradora sotmesos a compostatge, Substrats extracció, Substrat trituració, Lixiviats, Metalls pesats, Cations i anions.

**TÍTULO:*****RESTAURACIÓN DE CANTERAS DE CALIZA CON LODOS DE DEPURADORA:  
EFECTOS EN LOS LIXIVIADOS***

**AUTOR/A:** García Gutiérrez, Sonia.

**PROFESORES TUTORES:** Balanyà Martí, Teresa y Josa March, Ramon.

**RESUMEN:**

Las operaciones de restauración a menudo se realizan sobre vertientes (o taludes) con fuertes pendientes y en condiciones geomorfológicas poco estables, que de forma casi inevitable generan aguas de escorrentía y de lixiviación que ingresan en los cursos de agua de la zona. De esta forma la aplicación de lodos ricos en sustancias potencialmente contaminantes, debe hacerse de forma que se minimicen los riesgos, por tanto utilizando materiales de restauración seguros. Tanto los lodos compostados como los secados térmicamente representan potencialmente una mejora frente a los lodos deshidratados de uso más frecuente en agricultura.

Mediante el análisis de metales pesados y especies iónicas en los lixiviados, se ha analizado el riesgo de contaminación de los sistemas acuáticos adyacentes a la cantera, sobretodo las aguas superficiales y freáticas.

Se han evaluado los resultados obtenidos en los lixiviados y se ha determinado que la utilización de lodos de depuradora compostados o secados térmicamente en la restauración de canteras calcáreas, no presenta un riesgo importante de contaminación por metales pesados y salinidad de las aguas superficiales y subterráneas.

**PALABRAS CLAVE:**

Restauración de canteras, Lodos de depuradora sometidos a secado térmico, Lodos de depuradora sometidos a compostaje, Sustrato extracción, Sustrato trituración, Lixiviados, Metales pesados, Cationes y aniones.

**TITLE:*****RESTORATION OF LIMESTONE QUARRIES WITH SEWAGE SLUDGE:  
EFFECTS ON LEACHATES*****AUTHOR:** García Gutiérrez, Sonia.**TUTORS:** Balanyà Martí, Teresa and Josa March, Ramon.**ABSTRACT:**

Restoration work is often carried out on steep quarry slopes that are geomorphologically unstable. In these cases, the generation of runoff and leachates is almost inevitable. Such water enters the watercourses in the area. When sludge that is rich in potential contaminants is used, the risks should be minimised. Only safe materials should be used to restore quarries. Both composted and thermally dried sludge are potentially better options than the dewatered sludge that is commonly used in agriculture.

The risk of contaminating the aquatic systems adjacent to a quarry was assessed through an analysis of heavy metals and ionic species in the leachates, above all in the surface waters and aquifers.

It was found that the use of thermally dried and composted sludge to restore limestone quarries does not present a significant risk of heavy metal contamination or increased salinity of superficial and subterranean waters.

**KEY WORDS:**

Quarry restoration, Thermally dried sewage sludge, Composted sewage sludge, Leachates, heavy metals, Cations and anions.

## **AGRADECIMIENTOS**

Dedico este proyecto a mi Familia y Amigos, sin ellos la vida no tendría significado.

En las siguientes líneas me gustaría expresar mi más profundo agradecimiento a todas aquellas personas e instituciones que han colaborado para que sea posible este proyecto:

En primer lugar agradecer muy especialmente a mis profesores tutores Teresa Balanyà i Martí y Ramon Josa i March, por su inestimable ayuda, consejos, paciencia y dedicación.

También quiero expresar mi más sincero agradecimiento a los técnicos Enric Centelles y Toñy Torres por su ayuda en la realización del trabajo analítico.

Asimismo agradezco también a la profesora Agnès Hereter por la ayuda prestada en el estudio estadístico.

Finalmente, agradecer también la financiación económica aportada por el Ministerio de Medio Ambiente y a la Agencia Catalana del Agua al proyecto “Estudio de la aplicabilidad de los lodos de EDAR secados térmicamente en la rehabilitación de áreas degradadas por la minería de piedra caliza: comparación con la de lodos de EDAR compostados 1, 2 y 3” (226/2006/1-413, 236/2005/2-B413 y EXPCV05000094), sin la que no hubiera podido ser posible realizar este trabajo final de carrera.

## INDICE

<b>1.- INTRODUCCIÓN</b>	<b>1</b>
1.1.- Restauración de canteras de calcárea con lodos de depuradora	2
1.2.- Lodos de depuradora	4
1.3.- Legislación aplicable sobre lodos	5
1.4.- Producción de lodos	7
1.5.- Gestión de lodos y destino final	9
1.6.- Situación en Cataluña	12
1.7.- Posibles riesgos ambientales de la aplicación de lodos de depuradora en la restauración de canteras de calcárea	16
1.7.1.- Aspectos generales	16
1.7.2.- Contaminaciones posibles por la presencia de metales pesados en los lixiviados	17
1.7.3.- Posibles riesgos ambientales causados por la presencia de sales en los lixiviados	18
1.7.4.- Resumen de los resultados obtenidos en lixiviados de aplicación de lodos de depuradora deshidratados en anteriores proyectos de la ESAB (Escola Superior d'Agricultura de Barcelona)	19
<b>2.- OBJETIVOS</b>	<b>20</b>
<b>3.- MATERIAL Y METODOS</b>	<b>22</b>
3.1.- Diseño de la experiencia	23
3.2.- Situación geográfica de la experiencia	24
3.3.- Cálculo de la dosis de fango	24
3.4.- Realización de la experiencia	25
3.5.- Muestreo y conservación de la muestra	28
3.5.1.- Muestras realizados	28
3.5.2.- Metodología del muestreo	28

3.5.3.- Conservación de las muestras	29
3.6.- Metodología analítica	30
3.6.1.- Determinación de metales pesados	30
3.6.2.- Determinación de cationes y aniones	34
3.7.- Estudio estadístico mediante el programa SAS	36
<b>4.-RESULTADOS</b>	<b>37</b>
4.1.- Concentración media de los metales para cada uno de los lixiviados	38
4.2.- Concentración media de Cationes y Aniones	41
4.2.1.- Concentración media de Cationes	42
4.2.2.- Concentración media de Aniones	45
<b>5.- DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS</b>	<b>48</b>
5.1.- Pluviometria y recogida de volúmenes lixiviados	49
5.2.- METALES PESADOS	49
5.2.1.- Estudio individual de los diferentes lixiviados	49
5.2.2.- Comparación entre el tratamiento térmico y el compostado	60
5.2.3.- Evolución del contenido de metales en los lixiviados a lo largo del tiempo	61
5.2.4.- Estimación de pérdidas de metales por lixiviación	64
5.2.5.- Evaluación del posible impacto ambiental de los lixiviados	69
5.3.- CATIONES Y ANIONES	71
5.3.1.- Estudio individual de Cationes y Aniones en los diferentes lixiviados	71
5.3.2.- Evolución del contenido de Cationes y Aniones en los lixiviados a lo largo del tiempo	78
5.3.3.- Evolución del SAR (Relación de adsorción de Sodio)	89
<b>6.- CONCLUSIONES</b>	<b>94</b>
<b>7.- BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>97</b>
<b>8.- ANEJO</b>	<b>CD</b>



## **1.- INTRODUCCIÓN**



### **1.1.- Restauración de canteras de calcárea con lodos de depuradora.**

Las actividades extractivas a cielo abierto, graveras, canteras, minas, etc., suponen la aparición de suelos degradados, caracterizados por un bajo contenido en materia orgánica y nutrientes, así como por la ausencia de vegetación que pueda retener y proteger al suelo de la erosión y pérdidas de suelo. Por tal motivo, constituyen emplazamientos óptimos para la aplicación de enmiendas orgánicas como los lodos de depuradora, que sirven de fuente de materia orgánica y nutrientes para estos suelos degradados.

La restauración de estos espacios degradados debe comenzar por la regeneración de las propiedades del medio edáfico, que creen las condiciones adecuadas para la posterior restitución gradual de la cubierta vegetal natural de cada zona concreta. En la restauración de estos espacios, en los que el objetivo es la regeneración de la vegetación natural, es más importante la buena preparación del suelo que la propia siembra o plantación (Alcañiz et al. 1996).

La opción más recomendable es guardar el suelo original de la cantera haciendo un decapado del terreno al inicio de la explotación. Entendemos por decapado la separación y conservación del suelo, sin mezclarlo con otros materiales residuales, previamente al inicio de la explotación de una zona, después de haber retirado los árboles y arbustos. De esta manera se puede aprovechar un sustrato para las plantas, muy parecido al suelo natural, que facilita la rápida evolución de la vegetación. No obstante, el decapado no es siempre posible o bien no proporciona suficiente volumen de suelo para toda la restauración.

Las pruebas piloto realizadas hasta ahora permiten conocer los principales condicionantes para aplicar lodos de depuradora urbana en la restauración de canteras de calcárea. Este tipo de explotación, cuando dispone de tierra o material residual suficiente, es muy adecuado para reciclar lodos ya que compensan las deficiencias del sustrato y permiten un buen desarrollo de las plantas (Alcañiz et al. 1996).

La utilización de lodos de depuradora en la restauración de actividades extractivas amplía las posibilidades de reciclaje de estos residuos como complemento en su aplicación agrícola. El uso de los lodos en la restauración de espacios degradados, se plantea básicamente como una enmienda orgánica a diferencia de lo que se acostumbra a considerar en las aplicaciones agrícolas que es el aporte de nutrientes. Este criterio da lugar a aportaciones relativamente altas, pero únicas, por unidad de superficie. Por otro lado no existe un marco legal que regule su aplicación en este contexto, por eso se permite aplicar mayores dosis en una sola vez. No obstante, las dosis a aplicar no habrían de superar las cantidades máximas de metales pesados que según la normativa de aplicación agrícola (RD 1310/90) se podrían aportar en un suelo en un periodo de 10 años. Estas aplicaciones tienen poca dependencia estacional y limitan la dispersión de contaminantes ya que se aplican en áreas muy localizadas. Todo esto hace que la aplicación en la restauración de actividades extractivas se complemente bien con las aplicaciones agrícolas.

El desarrollo de la tecnología de tratamiento de lodos permite hoy disponer de enmiendas orgánicas más saneadas y en principio, más seguras para su aplicación al suelo, como son los lodos secados térmicamente (LT) y los lodos compostados (LC),



especialmente si se combinan con un material mineral adecuado, como son los residuos procedentes de la extracción de materiales calizos para cementeras, materiales para la construcción y obra pública.

Con la utilización de lodos de depuradora en la restauración de zonas degradadas por la actividad minera se complementan dos objetivos importantes: aprovechamiento de residuos tanto minerales como orgánicos y reducción de los costes de restauración ambiental.

Cataluña ha sido pionera en el inicio de la restauración de los espacios afectados por actividades extractivas (Generalitat Catalunya 1997). El elevado número de explotaciones, más de 650, principalmente de materiales calcáreos, y de empresas implicadas ha dado lugar a un bagaje importante de experiencias con resultados diversos, que pueden servir de base para mejorar los futuros proyectos de restauración.

Después de la publicación de la ley 12/81 (DOG, nº 189, 31 de diciembre de 1981) y de los correspondientes Decretos 343/83 de 15 de julio (DOGC 356, 19 de agosto de 1983) y 202/94 de 14 de junio (DOGC 1931, 8 de agosto de 1994), donde se especifica el contenido de los programas de restauración, el mecanismo de tramitación de las propuestas técnicas y el establecimiento de la fianza; se puede comenzar a hacer una evaluación retrospectiva de si las actuaciones llevadas a cabo producen una regeneración del sistema natural del entorno de las canteras, tal y como establece la mencionada ley, o bien conducen a otras situaciones no previstas (Alcañiz y Ortiz 2003).

La tabla 1 resume la situación de las zonas afectadas por actividades extractivas donde se puede apreciar que una tercera parte de la superficie está pendiente de restauración, otro tercio coordina los trabajos de explotación con los de restauración (restauración integrada), y cerca de un 20 % ya está restaurada (Alcañiz y Ortiz 2003).

**Tabla 1: Resumen de la situación actual de las actividades extractivas en Cataluña**

**Actividades extractivas a cielo abierto según el estado de restauración. 2007**

Estado de restauración	Expedientes		Superficie	
	Número	%	Ha	%
Actividades extractivas informadas autorizadas y/o que no consta que han iniciado la explotación	392	14,3	1.257	9,8
Actividades extractivas en explotación con restauración no iniciada	772	28,1	4.798	37,6
Actividades extractivas en explotación y con restauración integrada	416	15,1	4.156	32,6
Actividades extractivas restauradas en periodo de garantía	243	8,8	1.211	9,5
Actividades extractivas restauradas: con fianza devuelta (467 actividades) o de DPH <sup>(1)</sup> (459 actividades)	926	33,7	1.342	10,5
<b>Total</b>	<b>2.749</b>	<b>100</b>	<b>12.764</b>	<b>100</b>

<sup>(1)</sup> Dominio Público Hidráulico.

**Fuente:** Departament de Medi Ambient i del Habitatge 2007.



## 1.2.- Lodos de depuradora

Los tipos principales de fangos son:

- **Primarios:** Se originan en el decantador primario y están formados de materia orgánica e inorgánica sedimentada del agua cruda.
- **Físico-químicos:** Se obtienen en la separación de los flóculos del tratamiento físico-químico, pueden llamarse también primarios si se separan en el proceso de decantación primaria.
- **Secundarios o biológicos:** Se obtienen en el decantador secundario después del proceso biológico, es la biomasa en exceso.
- **Mixtos:** Mezcla de primarios y biológicos.

Por tal de facilitar su manipulación y reducir su peligrosidad se deben de someter a tratamientos. Además de los tratamientos que habitualmente se llevan a cabo en una EDAR, se pueden realizar otros que frecuentemente están fuera de la instalación que se llaman postratamientos.

Teniendo en cuenta que hay fangos de características diversas y por cada tipo de tratamiento existen diferentes sistemas, el producto obtenido al final puede tener características bastante variadas. Si además se añade el postratamiento realizado, el abanico de posibilidades todavía se amplía más.

Los tratamientos de fangos tienen dos objetivos básicos que son los siguientes:

- Disminuir el volumen de fangos producidos para facilitar su manipulación (transporte, disposición en vertedero).
- Estabilizar la materia orgánica para evitar descomposiciones incontroladas que puedan causar producción de lixiviados y olores no deseables y lograr un cierto grado de higienización, es decir, reducción de patógenos.

Los tratamientos principales son: **espesamiento, estabilización y deshidratación**. Según la EDAR se llevarán a cabo todos, algunos o ninguno de ellos.

En las plantas de postratamiento de lodos, se logra una reducción de la masa y del volumen del fango, mediante la reducción del contenido de agua y procesos para la descomposición de la materia orgánica (Moliner 2008). Dos de los procesos más utilizados son el compostaje y el secado térmico.

En el caso del **compostaje** se produce una reducción de la materia orgánica. Al mismo tiempo, el postratamiento del fango proporciona la higienización del material. En las plantas de **compostaje** se realiza la descomposición biológica, aerobia y termófila, bajo condiciones controladas, de una parte de la materia orgánica contenida en los fangos. El proceso descrito logra reducir la masa y el volumen del fango y permite obtener un producto (**compost: Fig. 1**) estable e higienizado, apto para su aplicación en el suelo.

En las plantas de **secado térmico** se reduce el agua contenida en los fangos por evaporación mediante la aportación de calor. De esta forma se logra disminuir la masa y el volumen del fango y obtener un producto (**peletizado o en polvo: Fig. 2**) estable y higienizado, apto para su aplicación en el suelo con utilidades agrícolas, en depósito

controlado o como fuente energética. El calor necesario para el desarrollo del proceso de secado descrito puede proceder de calderas o de los gases de combustión de motores de generación de energía eléctrica asociados a la planta (*cogeneración*).



**Figura 1: Lodo compost**



**Figura 2: Secado térmico “peletizado o en polvo”**

**Fuente:** Agencia Catalana del Agua 2007.

### 1.3.- Legislación aplicable sobre lodos

Los lodos procedentes de estaciones depuradoras de aguas residuales urbanas son residuos líquidos, que mediante el oportuno tratamiento, deshidratación, puede llegar a considerarse residuo sólido, siéndoles de aplicación la **Ley 10/98**, de 21 de abril, de Residuos.

La composición de los lodos es función de la calidad en origen del agua residual y determina su gestión y posibles usos, en particular, su aplicación en agricultura.

A nivel nacional, actualmente está en vigor el **Plan Nacional de Lodos de Depuradoras de Aguas Residuales (2001-2006)**, aprobado por Acuerdo del Consejo de Ministros, el 1 de junio de 2001.

La **Directiva de la Unión Europea 86/278/CEE**, 12 de junio de 1986, relativa a la protección del medio ambiente y, en particular, de los suelos, en la utilización de lodos de depuradora en agricultura, estableció los principios que deben presidir las regulaciones nacionales sobre la utilización de lodos en la agricultura, buscando un equilibrio entre el interés agrario y el ambiental.

El **Real Decreto 1310/1990**, de 29 de octubre, incorpora la Directiva mencionada anteriormente (**86/278/CEE**) al ordenamiento jurídico español, estableciendo la forma y dosis de aplicación, a fin de prevenir los actos perjudiciales sobre el suelo, el agua, la cubierta vegetal y la salud humana, con especial atención a determinadas especies químicas inorgánicas, como los denominados metales pesados. Dicho Real Decreto fue



desarrollado por **Orden de 26 de octubre de 1993**, del Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación (MAPA), al objeto de dictar las normas sobre la información que se debe remitir a la Administración General de Estado, relativa a los controles que deben realizar las Comunidades Autónomas para el seguimiento de la utilización de los lodos de depuración en la actividad agraria y sobre el Registro Nacional de Lodos, adscrito a este Ministerio, para establecer los cauces de recopilación final de la información, de forma que pueda también cumplirse con el mandato de la Comisión Europea de elaborar un informe de síntesis sobre el empleo de los lodos en la agricultura (MAPA 2006).

Desde hace años está abierto un proceso de elaboración de una nueva normativa para el establecimiento de nuevos criterios para la valorización agrícola de los fangos de depuradora en el marco de la Unión Europea. Como resultado de este proceso, se ha redactado el documento Working document of sludge, 3r Draft, ENV.E.3/LM (Bruselas, 27 de abril de 2000), que pretende, además de exigir umbrales más restrictivos de metales pesados, la máxima valorización de los fangos, la minimización del volumen de aquellos que deben ir a parar a vertedero y el aprovechamiento de las posibles aplicaciones para corregir, de forma segura, los bajos niveles de materia orgánica de los suelos, es decir su utilización como enmienda. Sin embargo, el borrador de la normativa en cuestión está en fase de discusión desde el año 2000 y no se dispone de información relativa a los plazos de su aprobación ni de las modificaciones que se incorporarán (Moliner 2008). Este borrador, fija limitaciones en mg de metal por kg de materia seca en función de tres horizontes temporales, inmediato, medio término y largo término (sin especificar los periodos de tiempo que comprenden los mismos). En la tabla 4 se recogen estos límites de metales pesados.

**Tabla 4: Límites de Metales pesados del documento Working document of sludge, 3r Draft, ENV.E.3/LM**

Normativa aplicable	Zn	Cu	Ni	Pb	Cr	Cd	Hg
RD 1310/1990 pH >7	4000	1750	400	1200	1500	40	25
RD 1310/1990 pH < 7	2500	1000	300	750	1000	20	16
Directiva. Esborry. Curt Termini	2500	1000	300	750	1000	10	10
Directiva. Esborry. Mig Termini	2000	800	200	500	800	5	5
Directiva. Esborry. Llarg Termini	1500	600	100	200	600	2	2

**Fuente:** Agencia Catalana del Agua (III Jornades Tècniques de Gestió de Sistemes de Sanejament d'Aigües Residuals 2007).

Otras posibles leyes que pueden afectar a la gestión de lodos y que no han sido anteriormente mencionadas, se resumen a continuación (Moliner 2008):

- **Unió Europea**
- Directiva 91/271/CE, de 21 de Mayo, sobre el tratamiento de aguas residuales urbanas.



- Directiva 1999/31/CE, de 26 de Abril, relativa al destino de los residuos al vertedero.
- Directiva 2004/35/CE sobre la responsabilidad medioambiental en relación con la prevención y reparación de daños medioambientales.
- Directiva 2006/21/CE sobre la gestión de residuos de industrias extractivas y por la que se modifica la Directiva 2004/35/CE.

▪ **España**

- Real decreto 11/1995, de 28 de Diciembre, sobre el que se establecen las normas aplicables al tratamiento de las aguas residuales urbanas.
- Real decreto 509/1996, de 15 de Marzo, de desarrollo del Real decreto 11/1995, de 28 de Diciembre, por el que se establecen las normas aplicables al tratamiento de las aguas residuales urbanas.

▪ **Cataluña**

- Decreto legislativo 3/2003, de 4 de Noviembre, por el que se aprueba el texto renovado de legislación en materia de aguas en Cataluña. DOGC 21/011/2003, modificado por la Ley 12/2004, de 27 de Diciembre, de medidas financieras (DOGC 4292 de 31.12.04), modificado por la Ley 21/2005, de 29 de Diciembre, de medidas financieras (DOGC 4541 de 31.12.05).
- Resolución MAB/2370/2006, de 3 de Julio, por la que se hace publico el acuerdo del gobierno de 20 de Junio de 2006, por el que se aprueba el programa de Saneamiento de aguas residuales urbanas 2005 (DOGC 19/07/2006).

#### **1.4.- Producción de lodos**

La cantidad de fangos producidos en Europa, en España y en Cataluña se ha ido incrementando en los últimos años. Gran parte de este incremento se ha producido por la implantación por parte de todos y cada uno de los estados miembros de la UE, de la Directiva 91/271/CE de saneamiento y depuración de aguas residuales, agudizando notablemente el problema por la gestión adecuada de los lodos de EDAR. Ello es debido a que esta Directiva ha obligado a prácticamente todas las aglomeraciones urbanas de la UE a dotarse antes del año 2005 de sistemas colectores que recojan sus aguas residuales urbanas y de estaciones depuradoras que las sometan a un tratamiento adecuado. Se entra así en la conocida dinámica «problema - solución - nuevo problema», ya que se logra depurar una de las principales fuentes contaminantes de las aguas (los vertidos de aguas residuales) para generar mayores cantidades de fangos (Apodaca 2008).

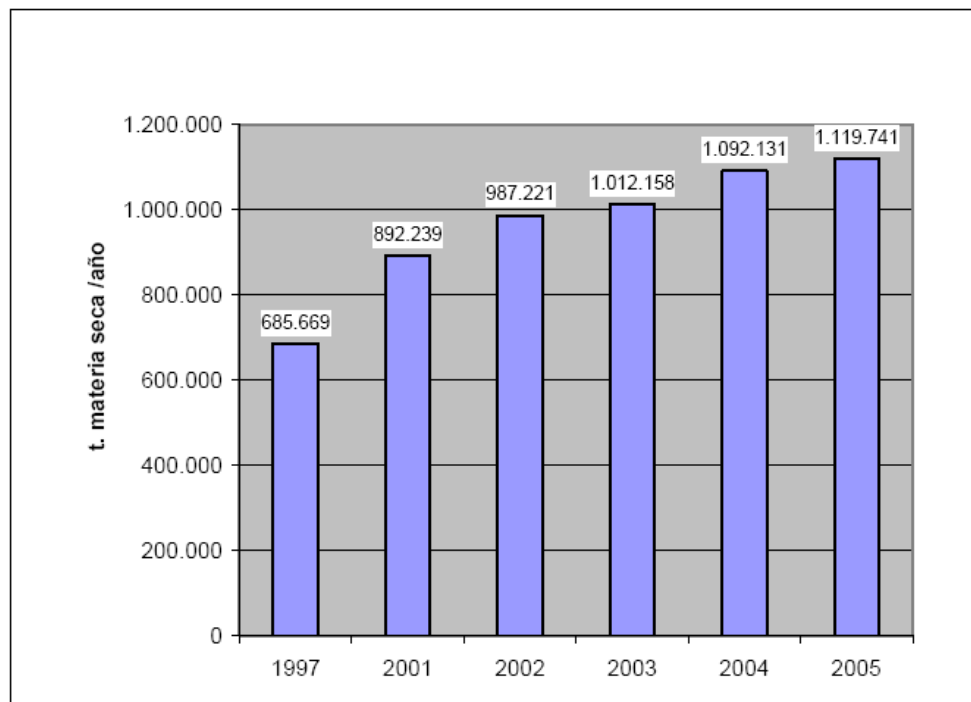
El proceso de depuración de aguas residuales produce una gran cantidad de fangos. En consecuencia, actualmente se generan más de 8 millones de toneladas anualmente en Europa (en el mundo, más de 30 millones), mientras que en España y Cataluña la generación supera los 1,5 millones toneladas/año y los 0,15 millones toneladas/año, respectivamente. Por otro lado, hay que añadir que, además, en España, esta cantidad casi se ha doblado desde el 1998, principalmente debido al incremento en el número de estaciones de depuración y en la capacidad de las mismas (Mata 2008).





Según datos del Registro Nacional de Lodos (RNL) del Ministerio de agricultura Pesca y Alimentación (MAPA) la producción de lodos se ha incrementado en un 39 %, desde el año 1997 al 2005 (Gráfico 1).

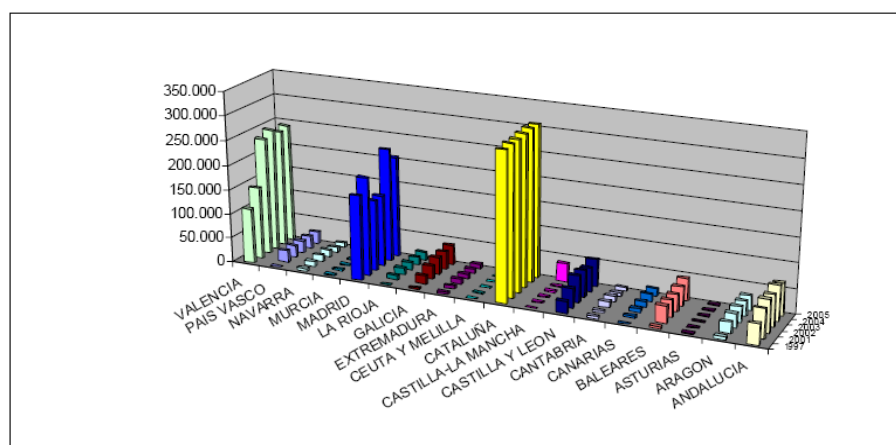
**Gráfico 1: Evolución de la generación anual de lodos (t de materia seca/año) en España.**



**Fuente:** Registro Nacional de Lodos del MAPA 2006.

Las Comunidades Autónomas (CCAA) que más lodos producen son Cataluña, Madrid y la Comunidad Valenciana (Gráfico 2).

**Gráfico 2: Evolución de la generación de Lodos, por CCAA (1997-2005)**



**Fuente:** Registro Nacional de Lodos del MAPA 2006.

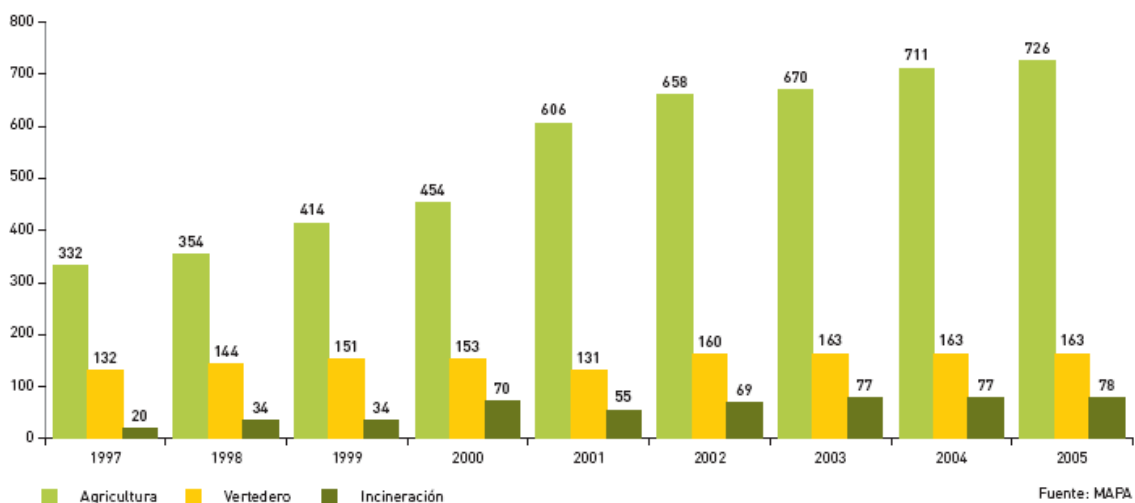


### 1.5.- Gestión de lodos y destino final

Para la gestión de cualquier residuo, en una primera instancia hay que minimizar esta generación. En el caso de los fangos, las opciones para cumplir este requisito son más bien complicadas, y a corto plazo no se prevé que la cantidad de fangos producidos disminuya. La aplicación de nuevas tecnologías poco conocidas es complicada y solo pueden tener viabilidad en nuevas instalaciones o en renovaciones de las antiguas. Aún así, hay otras opciones para alcanzar un cierto grado de minimización de los fangos generados en una EDAR, como por ejemplo la aplicación de unas buenas prácticas de operación en la planta de depuración. Al margen de las posibilidades de reducción, son muchas las opciones que hay para gestionar la gran cantidad de fangos producidos. Estas opciones se pueden clasificar en tres grandes grupos (Gráfico 3):

- Aplicación en agricultura o como enmienda del suelo, después de varios tratamientos, desde el más básico, que sería una deshidratación (tratamiento insuficiente en muchas legislaciones), hasta el más completo, que comprende una digestión anaerobia y un compostaje. Si la distancia es grande y no se hace compostaje, la secuencia sería una digestión anaerobia (opcional) seguida de una deshidratación y un secado térmico.
- Aprovechamiento térmico después de un secado, que comprende varias opciones y que van desde la combustión en incineradoras dedicadas (exclusivas para los fangos) hasta el aprovechamiento térmico en cementeras.
- Destino al vertedero después de varias opciones, desde la más básica, que es una deshidratación, hasta la más completa, que sería un compostaje, pasando por un secado térmico. Esta posibilidad es la menos favorable y, en principio, sólo tendría que ser utilizada cuando se han agotado todas las otras alternativas.

**Gráfico 3: Destino de los lodos (miles de t de materia seca) en España.**



**Fuente:** Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación 2006.

El sector agrario sigue siendo el principal destino de los lodos de depuración, empleándose en el año 2005 más de 726.000 toneladas de lodos con fines agrícolas.



El depósito en vertedero se mantuvo en los términos de los últimos años, mientras que subió ligeramente la cantidad de lodos que se incineran.

La tabla 2 muestra de manera simplificada las posibilidades mencionadas anteriormente y, añade, como complemento, para España y Europa, los porcentajes medios, a grandes rasgos, de las tres destinaciones más importantes.

**Tabla 2: Destinaciones principales en porcentaje para los lodos producidos en España y la Unión Europea y los objetivos del I y II Plan nacional de lodos de depuradora (PNLD)**

DESTINOS LODOS	AÑO 2005		OBJETIVOS	
	U.E. (%)	ESPAÑA (%)	I PNLD 2001-2006	II PNLD 2007-2011
Aplicación agrícola	54	54 (1)	65 (2)	70
Valorización energética	18	7	15	15
Vertedero	25	34	20	15
Otros	3	5	-	-

(1) De acuerdo al II PNLD a este destino en 2005 fue el 65% del lodo producido en España.

(2) El 40% aplicación directa de lodos tratados y el 25% con compostaje.

**Fuente:** Jornadas Universidad de Barcelona (Mata 2007).

Como se puede ver, el Plan Nacional de Lodos de Depuradora (PNLD), publicado el 2001, ha alcanzado en ciertos aspectos sus objetivos para el 2007, excepto en el apartado de valorización energética en el marco español, a causa, principalmente, del déficit de infraestructuras para este fin (Mata 2008).

**Tabla 3: Posibles opciones de eliminación y destino de los fangos.**

Eliminación	con transformación	Compostaje	a vertedero si no hay mercado
		Secado térmico	a vertedero
		Incineración	cenizas a vertedero aprovechamiento térmico
	sin transformación		a vertedero
Reutilización Recuperación	con transformación	Compostaje	agricultura jardinería restauración de canteras restauración de espacios de minería a cielo abierto restauración de escombreras de mina recuperación de tierras baldías/ abandonadas ajardinamiento en obra civil silvicultura
		Secado térmico	ajardinamiento alternativas ecológicas
		Tecnologías nuevas	ladrillos cerámicas bases de asfalto combustibles
	sin transformación	Aplicación directa	agricultura jardinería restauración de canteras restauración de espacios de minería a cielo abierto restauración de escombreras de mina recuperación de tierras baldías/ abandonadas ajardinamiento en obra civil silvicultura hidrosiembra

**Fuente:** Miquel Salgot 1996 (Modificado).

Como se puede observar en la tabla 3, el secado térmico es una opción que se puede utilizar como paso intermedio para las opciones mayoritarias de aplicación en el suelo, de valorización térmica y de vertedero (Mata 2008).

Debido al decreto de *cogeneración*, actualizado hace pocos años (RD 436/2004), en España la opción de secado ha sido muy aplicada y se ha hecho atractiva desde el punto de vista económico (Mata 2008).

En la resolución del problema «qué hacer con los fangos de las depuradoras de aguas residuales» han aparecido variables nuevas en los últimos años que dificultan la gestión de su eliminación. Hay dos vectores opuestos que complican la solución: por una parte, el aumento importante en la cantidad de fango producido año tras año a medida que se han ido construyendo depuradoras, y por otra, el incremento de las exigencias ambientales que regulan su eliminación.

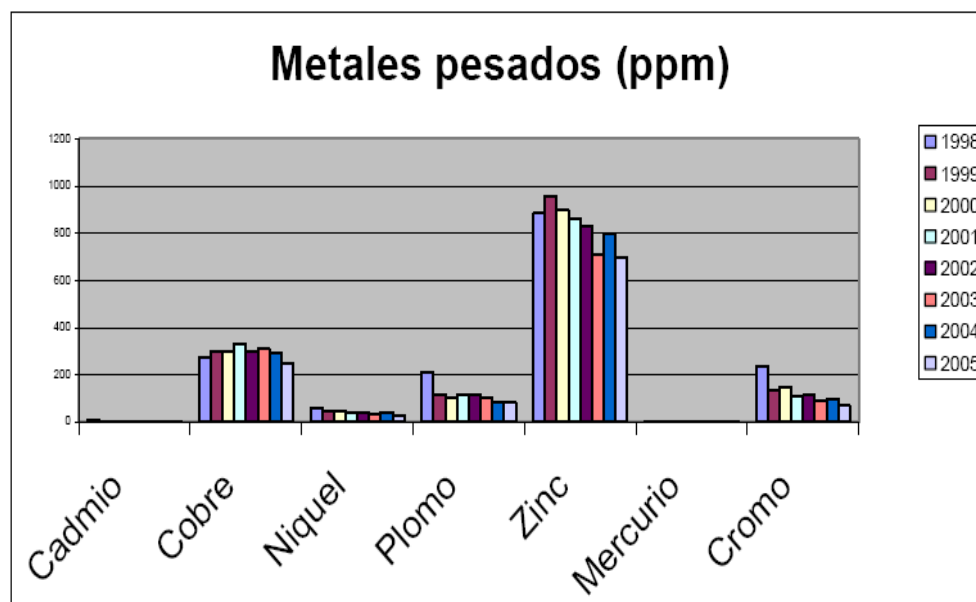
Entre las regulaciones medioambientales que restringen los destinos del fango están el mismo transporte, cada vez más caro y complicado, y el uso de vertederos que de



acuerdo con la Directiva 1999/31 CE (relativa al vertido de residuos) se restringe la humedad. El secado térmico minimiza este impacto ambiental ya que en muchos casos el hecho de enviar los fangos a un vertedero, con tan solo un 10% de humedad, elimina los lixiviados que pudiera generar y alarga la vida útil del vertedero al reducir el volumen ocupado por el agua que contenía (Cazurra 2008).

El Ministerio de Medio Ambiente, medio rural y marino (2006) en colaboración con el Comité de Fertilización del MAPA, han llevado a cabo trabajos para la elaboración del Real Decreto 824/2005, sobre productos fertilizantes, en el que se establecen varias clases de compost, según su calidad (a,b,c), lo que constituye un paso adelante en la introducción de criterios de calidad ecológica en las normas agronómicas de fertilización. Este Real Decreto incluye los fangos como posible material orgánico para la fabricación de fertilizantes. En el año 2005 el 65% de los lodos se destinaron a uso agrícola, una parte de ellos compostados. El contenido en algunos metales (Ni, Pb, Zn y Cr) de los lodos aplicados al suelo ha disminuido (Gráfico 4).

**Gráfico 4: Contenidos medios de metales pesados en el periodo 1997-2005**



**Fuente:** Registro Nacional de Lodos del MAPA 2006.

Resumiendo, cada vez se producen más toneladas de fango porque el número de depuradoras y su capacidad de tratamiento aumentan y, al mismo tiempo, las nuevas reglamentaciones medioambientales imponen criterios cada vez más restrictivos en los destinos habituales de los fangos. Así pues, es necesario encontrar tecnologías relativas a su tratamiento que permitan encontrar soluciones para gestionar los fangos de una forma medioambiental correcta (Cazurra 2008).

### 1.6.- Situación en Cataluña

La Agencia Catalana del Agua (ACA), administración competente en materia de saneamiento en Cataluña, ha planificado y ha llevado a cabo la gestión del fango de depuración de aguas residuales urbanas en el marco legal vigente. Concretamente, la gestión del material se ha basado en las directrices siguientes:



- ***Reducción de la producción de fango (en producción y contenido de agua) y adecuación del material a sus destinaciones finales.***
- ***Aplicación en provecho de la agricultura del fango apto para esta destinación.***
- ***Reducción de la aplicación del fango destinado a depósito controlado.***
- ***Estudio y adquisición de experiencia de varios sistemas de gestión del fango.***

La reducción de la producción del fango se lleva a cabo mediante varias actuaciones:

- Control de los vertidos industriales en la red de saneamiento de agua urbana.
- Reducción y estabilización de la materia orgánica del fango mediante la implantación en las EDAR de sistemas de aeración y digestión.
- Implantación de sistemas de deshidratación mecánica con capacidad para tratar la totalidad del fango generado en Cataluña y mejora continua de los sistemas existentes para reducir la cantidad de agua que hay que gestionar con el fango.
- Implantación de plantas de postratamiento de fango (secados térmicos y compostajes).

Las actuaciones anteriores también tienen un efecto de adecuación del fango a su destinación final, para permitir que la gestión se realice en mejores condiciones y a un coste económico reducido.

El principal objetivo de la gestión del fango en Cataluña hasta el 2007, ha sido reducir al mínimo posible la cantidad de fango destinada a depósito controlado. Este objetivo se ha concretado en dos líneas de actuación:

- Evitar la destinación a vertedero de fango apto para su aplicación en provecho de la agricultura.
- Reducir la masa de fango no apto para la valorización agrícola, mediante la implantación de plantas de secado térmico de fango con capacidad suficiente para el tratamiento del fango que se destina a vertedero. Mediante el secado térmico se logra la eliminación de la práctica totalidad del agua contenida en el fango. Con la mencionada actuación se reduce el volumen de depósito utilizado, así como los costes de gestión.

La práctica totalidad del fango generado por las EDAR urbanas es deshidratado. Una vez deshidratado, el fango es enviado, en función de sus características, a las siguientes destinaciones: agricultura, plantas de postratamiento –secados térmicos y compostajes públicos o compostajes externos-, y vertederos.

En el año 2005 se generaron en Cataluña 539.000 toneladas de fango deshidratado con una sequedad media del 26,6%, que equivalen a 143.000 t MS/año. De estas 143.000 t MS/año un 43,7% corresponden a las depuradoras del Besòs y del Prat de Llobregat (Agencia Catalana del Agua 2005).

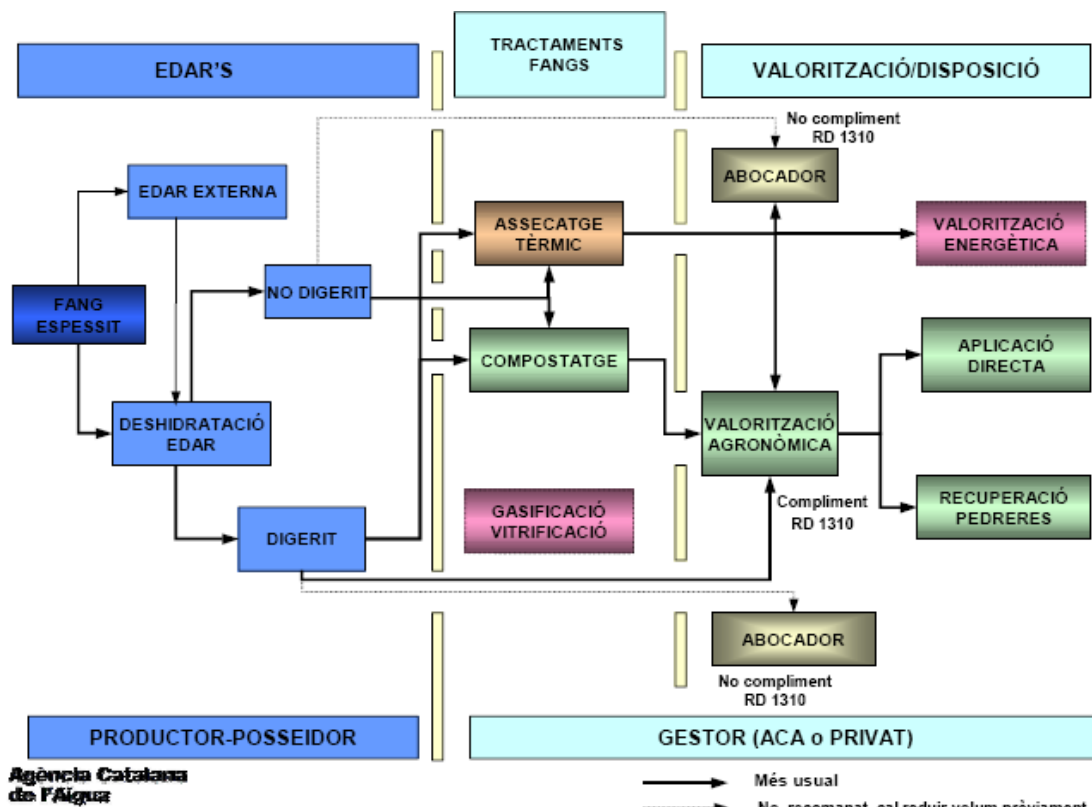
Para el tratamiento del fango, en Cataluña se dispone de las siguientes plantas de titularidad pública: cinco plantas de compostaje –Manresa, Vilaseca, Teià, Blanes y Olot– y nueve secados térmicos –Sabadell, Montornès del Vallès, Banyoles, Besòs, Rubí, Mataró, Granollers, el Prat de Llobregat y Vic (Moliner 2008).

Para poder ser aplicado en provecho de la agricultura, el fango debe cumplir los umbrales de concentración de contaminantes establecidos por la normativa vigente y ser tratado. En Cataluña se establece que el fango tratado debe haber sido sometido a un proceso de digestión aeróbica o anaeróbica en la EDAR o haber sido compostado o secado térmicamente. Finalmente la secuencia final en la gestión de fangos en Cataluña se muestra en la figura 3.

En el caso de Cataluña, se ha constatado una excelente aceptación de la utilización del fango en la agricultura de producción. Al mismo tiempo, la utilización de fango como abono permite evitar el uso de fertilizantes químicos, hecho que comporta notables beneficios energéticos y ambientales.

Tal y como se observa en la tabla 5, la aplicación agrícola ha sido la forma de gestión mayoritaria de los lodos en Cataluña en los últimos años, y en segundo lugar lo ocupa la deposición en vertedero, con clara tendencia a la disminución. Lo más destacable, es el aumento de los lodos tratados, sobretodo los sometidos a compostaje y a secado térmico.

**Figura 3: Secuencia de gestión de fangos según la jerarquía (establecida por la Ley 15/2003 de modificación de la ley 6/1993) y el RD 1310/1990**



**Fuente:** Agència Catalana del Aigua (III Jornades Tècniques de Gestió de Sistemes de Sanejament d'Aigües Residuals 2007).

**Tabla 5: Evolución del tratamiento y destinación de los lodos generados en las depuradoras (toneladas de materia fresca) en Cataluña.**

	2001	2002	2003	2004	2005	2006
<b>Lodo eliminado según la destinación</b>	<b>401.784</b>	<b>384.358</b>	<b>326.860</b>	<b>312.792</b>	<b>366.399</b>	<b>388.422</b>
Agricultura y jardinería	267.281	248.459	222.663	219.678	272.125	150.510
Restauración de canteras	4.966	2.661	-	-	-	527
Vertederos	126.744	133.223	104.197	93.115	70.509	45.688
Ecobrick y otros	2.793	15	-	-	-	-
Valorización energética	-	-	-	-	23.765	-
Compostaje externo	-	-	-	-	-	181.978
Otros destinos <sup>(1)</sup>	-	-	-	-	-	9.719
<b>Lodos tratados</b>	<b>73.015</b>	<b>199.680</b>	<b>335.348</b>	<b>296.874</b>	<b>471.248</b>	<b>472.365</b>
Secado térmico	18.883	33.270	61.940	55.115	202.732	182.364
Compostaje <sup>(2)</sup>	54.132	113.781	145.383	136.955	179.272	219.596
Digestión aeróbica/ anaeróbica	-	143.463	128.025	104.804	89.244	-
Deshidratación <sup>(3)</sup>	-	-	-	-	-	70.405

(1) Tratamientos especiales.

(2) Incluye compostaje de secado térmico, como enmienda orgánica o como tratamiento complementario.

(3) Otras EDAR.

**Fuente:** Departament de Medi Ambient i del Habitatge 2007.

A partir de las caracterizaciones que la Agencia Catalana del Agua (ACA 2007) ha realizado entre los años 1997 y 2006 sobre el contenido de metales pesados presentes en los fangos generados en sus EDARS, se ha observado que la proporción de lodos apto para la aplicación en el suelo respecto el total de lodo generado aumenta sensiblemente en el periodo (1997-2006). Dicha proporción se sitúa en el 95 % en el año 2006, con los límites de la normativa vigente RD 1310/1990 para suelos básicos (la mayor parte de los suelos en Cataluña tienen pH básico). La eventual implantación del borrador de la Directiva para la aplicación de lodos de depuradora para a usos agrícolas en los términos actuales, supondría a corto término una disminución de la aplicación de lodos en el suelo, cuya estimación se situaría en un 78,2 % del total de la producción. En líneas generales, los resultados obtenidos sugieren una buena adaptación de los contenidos de metales pesados de los lodos tanto a la normativa vigente (RD 1310/1990) como al borrador de la nueva Directiva (Working document of sludge, 3r Draft, ENV.E.3/LM 2000) a corto plazo (Uceda 2007).

Con el objetivo de disponer de conocimiento directo de nuevos sistemas de gestión de fango y poder diversificar las líneas de tratamiento, durante los últimos años se han realizado diversos estudios de envío del fango a las destinaciones siguientes (algunos de los cuales se han acompañado de experiencias prácticas):

- 1) restauración de canteras,
- 2) incorporación en la fabricación de materiales de construcción,
- 3) valorización energética en plantas cementeras en sustitución del combustible habitualmente empleado,
- 4) valorización energética en centrales térmicas de producción eléctrica en sustitución del combustible habitualmente empleado,
- 5) gasificación.





## **1.7.- Posibles riesgos ambientales de la aplicación de lodos de depuradora en la restauración de canteras de calcárea.**

### **1.7.1.- Aspectos generales**

Los fangos de depuradora son subproductos con un alto contenido en materia orgánica y con cantidades importantes de nutrientes (nitrógeno, fósforo y oligoelementos). Es por este motivo que son de gran interés en la restauración de suelos degradados, ya que mejoran algunas de sus propiedades, tanto químicas, como físicas y biológicas: aumentan la resistencia a la erosión, incrementan la concentración de nutrientes y son una aportación de materia orgánica. El objetivo principal del aprovechamiento de los fangos en la restauración es preparar un sustrato edáfico que posibilite, en una sola intervención, la revegetación de la zona sin que se tengan que volver a aplicar más fertilizantes (Departament de Medi Ambient i del Habitatge 2006).

La utilización de lodos de depuradoras en trabajos de restauración ha permitido reconocer el importante papel que juegan estos materiales en la obtención de unos sustratos bastante fértiles que faciliten el desarrollo de la vegetación a corto plazo evitando la erosión de las zonas restauradas (Alcañiz et al. 1996).

Mediante diversos estudios se ha podido comprobar que los lodos de depuradora (deshidratados), bien incorporados en las tierras utilizadas en la restitución de la cubierta edáfica, mejoran las propiedades físicas del suelo formando agregados estables, incrementando la porosidad y favoreciendo de esta manera la capacidad de retención de agua (Ortiz y Alcañiz 2001, Alcañiz y Ortiz 2003).

Los post-tratamientos (compostaje, secado térmico) a los que se someten los fangos influyen en sus propiedades físico-químicas y disponibilidad de nutrientes (Tarrasón 2004). A diferencia de la abundante información sobre la aplicación de fango deshidratado, los fangos sometidos a compostaje o secados térmicamente son materiales relativamente nuevos, y sus efectos en aplicaciones de campo son todavía poco conocidos.

Aún así, en trabajos más recientes se ha comparado la aplicación de lodos de depuradora deshidratados respecto los lodos sometidos a compostaje o a un secado térmico. Los resultados obtenidos indican que al aplicar estos lodos tratados reducen la escorrentía y la erosión del suelo, tanto por efectos directos, como por la mayor cobertura vegetal en las zonas restauradas (Tarrasón 2004, Ojeda 2005).

No obstante, los lodos a menudo contienen cantidades considerables de metales pesados y compuestos orgánicos tóxicos, que debido a su persistencia y toxicidad, su aplicación en el suelo puede suponer un riesgo para el ecosistema. Además, se añade la gran cantidad de nitrógeno presente en la mayoría de los lodos de origen urbano, en forma orgánica y amoniacal, que pueden llegar a ser un problema acumulativo en el suelo y de una posible lixiviación posterior de nitratos (Tarrasón 2004).

La restauración se debe de plantear de manera que quede garantizada la sostenibilidad del ecosistema. En ningún caso se debe de plantear la incorporación de los fangos en el suelo únicamente como una vía de eliminación de residuos. Es importante, por tanto, seguir haciendo estudios de campo y laboratorio que nos permita conocer las





propiedades, el comportamiento y las potencialidades de estos residuos, así como cuantificar los riesgos que supone su aplicación al suelo.

### 1.7.2.- Contaminaciones posibles por la presencia de metales pesados en los lixiviados.

La concentración de metales pesados en la solución del suelo está controlada por una serie de procesos interrelacionados, entre los que destacan la formación de complejos de naturaleza orgánica e inorgánica, reacciones de oxidación-reducción, de precipitación disolución y de adsorción-desorción. Al mismo tiempo, los metales en la disolución del suelo están sometidos a posibles pérdidas por lixiviación, absorción por las plantas o volatilización. De este modo, las formas químicas en las que se encuentren los metales pesados en las enmiendas orgánicas y su evolución en el tiempo una vez incorporados al suelo, van a ser determinantes en el grado de asimilabilidad por las diferentes especies vegetales (García-Gil 2001).

Aunque muchos de los elementos metálicos son necesarios para el desarrollo de los organismos vivos, al exceder de una determinada concentración pueden resultar perjudiciales (tabla 6). Muchos de estos elementos tienen afinidad por el azufre, con lo que atacan los enlaces que conforman este elemento en las enzimas produciendo su inmovilización. Otros, como el cadmio, el cobre o el plomo (en forma iónica) forman complejos estables con los grupos amino y carboxílico, dificultando los procesos de transporte a través de las paredes celulares (Hernández 2007).

**Tabla 6: Efectos nocivos que pueden ocasionar los metales pesados.**

Metal pesado	Origen	Toxicidad (individuo de 80 kg)	Efectos nocivos
Cadmio	Medio geológico, minería, electrodeposición, tuberías	<i>Dosis letal 9 g</i>	Reemplaza bioquímicamente al Zn, causa elevada presión en la sangre y problemas renales, destruye el tejido testicular y los glóbulos rojos, tóxico para la biota acuática, afecta a enzimas importantes; acumulativo en hígado, riñón y páncreas
Cromo	Electrodeposición, curtido	<i>Dosis letal 0.5 g</i>	Efectos corrosivos en el intestino. Posible cancerígeno como Cr(VI)
Cobre	Medio geológico, minería, electrodeposición, residuos industriales		Elemento esencial para la hemoglobina. Baja toxicidad para animales (vómitos a elevadas concentraciones), tóxico para plantas y algas a niveles moderados No acumulativo
Níquel	Residuos industriales		Posiblemente esencial, interfiere con la absorción
Plomo	Medio geológico, minería, fundiciones, gasolina, tuberías	<i>Veneno acumulativo</i>	Sabor desagradable. Inhibición de la síntesis de hemoglobina. Tóxico (anemia, riñones, sistema nervioso). Posiblemente relacionado con encefalitis a elevadas concentraciones
Zinc	Medio, geológico, residuos industriales		Esencial en algunas metalo-enzimas, ayuda a cicatrizar heridas

**Fuente:** Hernández 2007 (Universidad Autónoma de Madrid).



La presencia de metales pesados en suelos de cantera calcárea no se considera un problema grave, ya que los valores de pH siempre son superiores a la neutralidad, presentando a la vez elevadas concentraciones de carbonatos que hacen que los metales precipiten o queden inmovilizados (Milan 1994, Carrera y Quevedo 1997). Esto ocurre porque la aplicación de los lodos a suelos calizos mejora la retención de los metales, ya que el proceso de hidrólisis queda contrarrestado por la presencia del carbonato de calcio, el cual previene el descenso del pH impidiendo la movilización de metales y permitiendo la precipitación del carbonato correspondiente (Chicón 2000).

### **1.7.3.- Posibles riesgos ambientales causados por la presencia de sales en los lixiviados.**

Los elementos nutritivos contenidos dentro de las partículas de la materia orgánica no son disponibles directamente por las plantas y tienen que ser transformados en formas minerales. El conjunto de procesos que se producen en la transformación de estos compuestos orgánicos a formas inorgánicas ( $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ) se llama mineralización.

La mineralización puede generar sales que se incorporaran al agua del suelo. El exceso de salinidad en la zona de enraizamiento reduce o impide el crecimiento de las plantas sensibles, ya que la planta debe invertir gran cantidad de energía para adquirir el agua del suelo y realizar los ajustes bioquímicos necesarios para sobrevivir. Otro efecto importante es que puede aumentar la concentración de algunos iones que afectan a la fisiología de la planta, al resultar tóxicos o provocar desequilibrios en el metabolismo de nutrientes.

De entre los riesgos asociados a la aplicación de lodos de depuradora en el suelo, destaca muy especialmente una producción acusada de nitratos, que provienen de la mineralización de los compuestos orgánicos nitrogenados y que pueden contaminar los sistemas adyacentes, sobretodo las aguas freáticas y superficiales (Tarrasón 2004).

Las aguas subterráneas o freáticas suele ser más difíciles de contaminar que las superficiales, pero cuando esta contaminación se produce, es más difícil de eliminar. Las aguas subterráneas son una de las principales fuentes de suministro para uso doméstico y para el riego en muchas partes de España y del mundo. En España alrededor de la tercera parte del agua que se usa en las ciudades y la industria y la cuarta parte de la que se usa en agricultura son aguas subterráneas (Echarri 1998).

Una excesiva carga de nutrientes nitrogenados en cuencas vertientes a lagos o embalses puede provocar la eutrofización de los mismos, o en los ríos con la posible incidencia sobre las aguas subterráneas (Carrera y Quevedo 1997, Hernández 2007).

En las *III Jornadas Técnicas: Tratamiento y Valorización de fangos* (2007), se presentó un estudio donde se demostró que las mezclas con lodo secado térmicamente producen un retraso en la liberación de nitratos comparados con las mezclas con lodos deshidratados, favoreciéndose la capacidad de absorción por las plantas y al mismo tiempo la menor toxicidad de los lixiviados (Mejía y Comellas 2007).



#### **1.7.4.- Resumen de los resultados obtenidos en lixiviados de aplicación de lodos de depuradora deshidratados en anteriores proyectos de la ESAB (Escola Superior d'Agricultura de Barcelona).**

En la **ESAB (Escola Superior d'Agricultura de Barcelona)** se han llevado a cabo diversos proyectos (Milan 1994, Buján y González 1996, Carrera y Quevedo 1997) en donde se ha estudiado la posible contaminación de los lixiviados al aplicar diferentes dosis de lodos (deshidratados) de depuradora en la restauración de canteras de calcáreas. Entre los resultados obtenidos se destaca:

En general la composición de los lixiviados durante el primer año de experiencia, esta muy influenciada por las diferentes fluctuaciones temporales importantes. A partir del segundo año de experiencia comienza una etapa de estabilización en la mayoría de los casos.

- En el primer año de experiencia, se produce un incremento de la concentración de sales de los tratamientos con lodo, especialmente importante durante las primeras lluvias. Este factor se agrava si las condiciones de pluviosidad de la zona son bajas con lluvias puntuales en época primaveral, ya que, es el momento en el que la mineralización es máxima. No obstante, se observa una disminución importante de las sales solubles en el segundo año de experiencia, debido a una estabilización del fango a lo largo del tiempo.
- No se han encontrado concentraciones notorias de metales pesados, hecho lógico, dadas las características físico-químicas del suelo (pH elevados y altos contenidos en carbonatos).
- La concentración de nitratos en los lixiviados es muy elevada al inicio de la aplicación de los fangos, sobretodo el primer año, hecho que refleja una rápida mineralización inicial de la materia orgánica. Posteriormente, a partir del segundo año la concentración disminuye rápidamente.

## **2.- OBJETIVOS**



Con el uso de lodos de depuradora en la restauración de la cantera de Begues, se quiere evaluar el riesgo ambiental del uso de un sustrato apto para la restauración ecológica. Las operaciones de restauración a menudo se realizan sobre vertientes (o taludes) con fuertes pendientes y en condiciones geomorfológicas poco estables, que de forma casi inevitable generan aguas de escorrentía y de lixiviación que ingresan en los cursos de agua de la zona. De esta forma la aplicación de lodos, ricos en sustancias potencialmente contaminantes, debe hacerse de forma que se minimicen los riesgos, por tanto utilizando materiales de restauración seguros. Tanto los lodos compostados como los secados térmicamente representan potencialmente una mejora frente a los lodos deshidratados de uso más frecuente en agricultura. El presente estudio utiliza exclusivamente sustratos minerales de extracción de materiales calizos, ya que estos suponen un menor riesgo de movilización de metales pesados.

Mediante el análisis sistemático en las aguas de lixiviación se pretende conocer:

- El riesgo de movilización de los metales pesados y el riesgo de contaminación del nivel freático (acuíferos y aguas subterráneas) o de las aguas superficiales.
- El riesgo de salinización de las aguas

Finalmente la evaluación de los resultados obtenidos, permitirá determinar la viabilidad y seguridad ambiental de la aplicación de lodos compostados y secados térmicamente, a lo largo del periodo experimental.

### **3.- MATERIAL Y METODOS**



### 3.1.- Diseño de la experiencia

Como se ha indicado en los objetivos, se pretende evaluar el interés de sustratos baratos y fáciles de obtener que sean aptos para la restauración ecológica de canteras. Ésta es una práctica que se viene aplicando ya en el sector desde hace tiempo. Este sustrato se obtiene a partir de los residuos minerales generados por la misma explotación, enmendados con lodos de EDAR, que en éste caso serán lodos tratados térmicamente (**LT**) y lodos compostados (**LC**).

En concreto se propuso la utilización de lodos de EDAR tratados, procedentes de 6 plantas distintas: tres compostados y otros 3 sometidos a secado térmico. Estos tipos de lodos se añadieron a los dos tipos de residuos de la minería de la caliza: restos del proceso de extracción de roca y que por tanto pueden contener cualquier tipo de material mineral que no es adecuado a los fines mineros (**Extracción**) y el material resultante del proceso de trituración para generar áridos (**Trituración**). Las características mínimas de ambos materiales se presentan en la tablas 7.

Con esta finalidad se prepararon, 12 sustratos distintos con los materiales anteriormente mencionados y según las características recogidas en la tabla 7.

Los sustratos, una vez preparados se dispusieron en contenedores de 200 L de capacidad (0,3 m<sup>2</sup> de superficie), instalados en la explotación minera, por tanto bajo sus mismas condiciones climáticas, durante un periodo de 14 meses. Se prepararon 48 contenedores (6 lodos x 2 residuos mineros x 4 réplicas) y 8 contenedores más sólo con material mineral (2 materiales x 4 réplicas) que se utilizaron como controles.

En cada uno de los contenedores, se ha añadido un dispositivo de recogida de lixiviados (*depósitos lisimétricos*), que consiste en una manguera, cuyo final acaba en una garrafa de 30 L, envuelta en una bolsa oscura para evitar la llegada de la luz y la proliferación de algas, que podrían afectar a la composición química de estas aguas de lixiviación. Para poder determinar los posibles riesgos ambientales, se recogieron lixiviados en diversos momentos de la experiencia.

Los contenedores se sembraron con herbáceas que se utilizaron para evaluar la eficacia de la restauración.

Los lixiviados recogidos en momentos concretos de la experiencia se analizaron, midiendo el contenido de metales pesados, aniones y cationes.



### 3.2.- Situación geográfica de la experiencia

El proyecto se ha realizado en una de las dos canteras que existen cerca del municipio de Begues (figura 4), la cantera *Las Cubetas*. Esta cantera se dedica a la extracción a cielo abierto de Caliza y Dolomía. En las figuras 5 y 6 queda especificada su situación geográfica exacta (Google Maps España 2008).

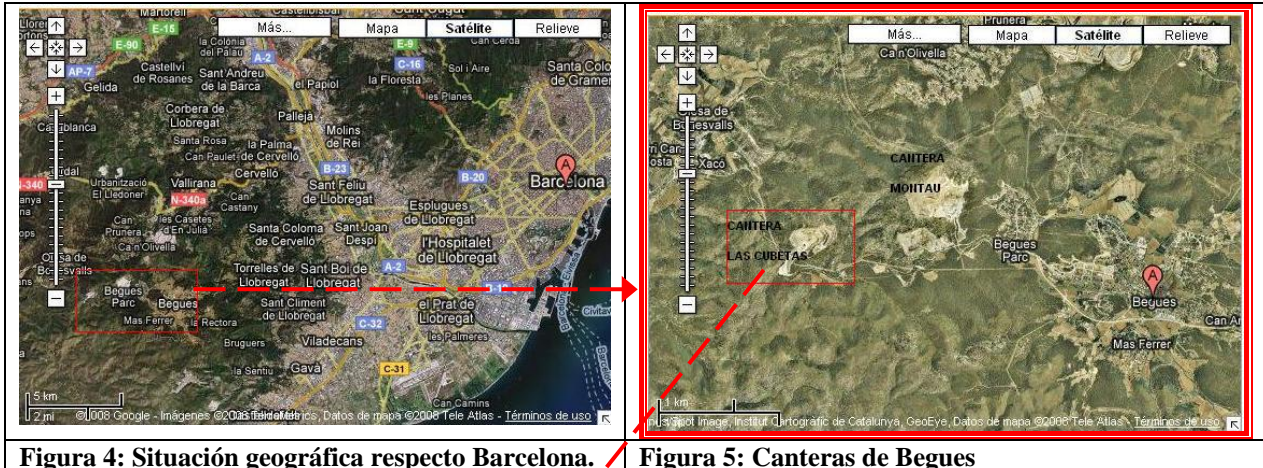


Figura 4: Situación geográfica respecto Barcelona.

Figura 5: Canteras de Begues



Figura 6: Cantera Las Cubetas (SIGPAC 2008).

#### Coordenadas ED-50

UTM  $x$ : 405327.59

$y$ : 4577152.24

Huso: 31

Geo Lat: 41° 20' 22.48" N

Long: 1° 52' 6.75" E

### 3.3.- Cálculo de la dosis de fango

En la tabla 7 se muestra de forma breve los parámetros utilizados para calcular la dosis de lodo que se ha utilizado en el presente proyecto. Para los sustratos minerales y los lodos hay características que para este cálculo previo se estimaron a partir de datos de experiencias anteriores.



**Tabla 7: Datos para la preparación de los sustratos**

	Descripción	Unidades	R. Trituración		R. Extracción	
Material mineral	% Tierra Fina (estimado)	(%) kgTF/kg Sustrato mineral	20,2		34,9	
	D. Aparente (estimado)	tm/ ha	1650		1650	
	Volumen Sustrato en el Contenedor	m <sup>3</sup>	0,0995		0,0995	
			<b>Secado Térmico</b>	<b>Compostado</b>	<b>Secado Térmico</b>	<b>Compostado</b>
	Materia seca lodo (estimado)	(%) kg Materia Seca / kg lodo(lodo húmedo)	85	66,5	85	66,5
	Dosis de lodo a aplicar (peso/peso)	kg lodo Materia Seca / kg TF sustrato (lodo incorporado)	0,052	0,065	0,052	0,065
	% Dosis de lodo a aplicar	kg lodo húmedo / kg Sustrato (lodo incorporado)	0,012	0,020	0,021	0,034
Tipo de lodo	Dosis de lodo (peso/superf)	tm/ha	61	98	106	170

**3.4.- Realización de la experiencia**

- 24 de Febrero del 2005: Preparación de mezclas (sustrato mineral + fango de depuradora).
- 25 de Febrero del 2005: Preparación de mezclas (sustrato mineral + fango de depuradora).
- 3 de Marzo del 2005: Preparación de mezclas (sustrato mineral + fango de depuradora).
- 11 de Marzo del 2005: Preparación de mezclas (sustrato mineral + fango de depuradora).
- 3 de mayo del 2005: Preparación de las últimas mezclas (fango térmico de Mataró). Las mezclas hasta el momento del riego se han mantenido cubiertas con plástico. En ausencia de lluvia se procede a realizar un riego de 5 L de agua mineral embotellada (principalmente Agua de Ribes) por contenedor, ya que el agua disponible en la cantera es salina. Como se recogen muy pocos lixiviados se programa una nueva sesión de riego.
- Mayo del 2005: Se siembra y se riega con dos litros de agua para facilitar la germinación de las semillas.
- 9 de Mayo del 2005: Se riega con 10 L (mineral embotellada de Ribes) por contenedor.



- 10 de Mayo del 2005: Se procede a la recogida de los lixiviados. Recogida del primer lixiviado.
- 24 de Mayo del 2005: Recogida del segundo lixiviado.
- 15 de Septiembre del 2005: Se han recogido lixiviados de todo el verano (tercer lixiviado). La mayoría de los depósitos estaban llenos, los valores obtenidos son volúmenes mínimos de lixiviación acumulados.
- 2 de Noviembre del 2005: Recogida del cuarto lixiviado.
- 15 de Diciembre del 2005: Recogida del quinto lixiviado.

- **Contenedores**

En la figura 7 queda reflejada la adición del material de drenaje más la mezcla de sustrato más el lodo de depuradora.



**Figura 7: Fotografía en detalle del contenedor utilizado (antes y después de añadir el sustrato).**

Las características de los contenedores utilizados en la experiencia se describen a continuación:

- Contenedores de 200L,
- *Altura de contenedor:* 0,60 m.
- *Diámetro del contenedor:* 0,65 m.
- *Superficie del contenedor:* 0,3 m<sup>2</sup>.
- *Volumen total útil:* 0,199 m<sup>3</sup>.
- *Volumen ocupado por el drenaje o por la mezcla,* que corresponde a la mitad del volumen útil; es decir, 0,0995 m<sup>3</sup>

Los 56 contenedores se distribuyeron según se muestra en la figura 8.

**Figura 8: Situación de los contenedores**

C A R R E T E R A	T A L U D	8	9	43	T A L U D
		21	42	22	
		20	12	23	
		7	44	24	
		19	10	5	
		41	6	11	
		39	29	40	
		17	57	31	
		32	58	38	
		59	37	60	
		45	50	30	
		18	47	52	
		48	49	51	
		1	46	3	
		2	4	26	
			25	27	
			28	36	
			34	35	
			33	16	
			15	14	
	13				
ENTRADA					

▪ **Dispositivo de recogida de lixiviados (depósitos lisimétricos)**



**Figura 9: Fotografía de los dispositivos de recogida de lixiviados de los diferentes contenedores.**



**Figura 10: Fotografía en detalle del dispositivo de recogida de lixiviados (garrafa de 30 L + bolsa oscura negra).**



### **3.5.- Muestreo y conservación de la muestra**

#### **3.5.1.- Muestras realizadas**

La recogida de las muestras de lixiviación se hizo los días siguientes:

- 1º Lixiviado: 10 de Mayo del 2005.
- 2º Lixiviado: 24 de Mayo del 2005.
- 3º Lixiviado: 15 de Septiembre del 2005.
- 4º Lixiviado: 2 de Noviembre del 2005.
- 5º Lixiviado: 15 de Diciembre del 2005.

#### **3.5.2.- Metodología del muestreo**

El material utilizado en el muestreo es:

- Vasos de precipitados de 5 L
- Potes de polipropileno de 100 mL
- Garrafas de 30 L
- Guantes de látex
- Rotulador de vidrio
- Cuaderno de recogida de datos

La recogida del líquido lixiviado contenido en las garrafas de 30 L se realizó in situ. Se midió el volumen de lixiviado por vertido a un vaso de precipitados de 5 L. Se homogeneizó la muestra y se guardaron 100 mL de muestra en un recipiente de un sólo uso.

En la tabla 8 se muestra la nomenclatura de los diferentes contenedores.

**Tabla 8: Nomenclatura de los contenedores**

Contenedor	Sustrato	Tratamiento lodo	Origen lodo	Réplica	Lodo	Contenedor	Sustrato	Tratamiento lodo	Origen lodo	Réplica	Lodo
5	Trituración	Térmico	Besós	a	TTBE1	29	Extracción	Térmico	Sabadell	a	ETS1
6	Trituración	Térmico	Besós	b	TTBE2	30	Extracción	Térmico	Sabadell	b	ETS2
7	Trituración	Térmico	Besós	c	TTBE3	31	Extracción	Térmico	Sabadell	c	ETS3
8	Trituración	Térmico	Besós	d	TTBE4	32	Extracción	Térmico	Sabadell	d	ETS4
9	Trituración	Térmico	Sabadell	a	TTS1	33	Extracción	Térmico	Mataró	a	ETMT1
10	Trituración	Térmico	Sabadell	b	TTS2	34	Extracción	Térmico	Mataró	b	ETMT2
11	Trituración	Térmico	Sabadell	c	TTS3	35	Extracción	Térmico	Mataró	c	ETMT3
12	Trituración	Térmico	Sabadell	d	TTS4	36	Extracción	Térmico	Mataró	d	ETMT4
13	Trituración	Térmico	Mataró	a	TTMT1	37	Extracción	Térmico	Besós	a	ETBE1
14	Trituración	Térmico	Mataró	b	TTMT2	38	Extracción	Térmico	Besós	b	ETBE2
15	Trituración	Térmico	Mataró	c	TTMT3	39	Extracción	Térmico	Besós	c	ETBE3
16	Trituración	Térmico	Mataró	d	TTMT4	40	Extracción	Térmico	Besós	d	ETBE4
17	Trituración	Compostado	Blanes	a	TCBL1	45	Extracción	Compostado	Blanes	a	ECBL1
18	Trituración	Compostado	Blanes	b	TCBL2	46	Extracción	Compostado	Blanes	b	ECBL2
19	Trituración	Compostado	Blanes	c	TCBL3	47	Extracción	Compostado	Blanes	c	ECBL3
20	Trituración	Compostado	Blanes	d	TCBL4	48	Extracción	Compostado	Blanes	d	ECBL4
21	Trituración	Compostado	Manresa	a	TCMN1	49	Extracción	Compostado	Manresa	a	ECMN1
22	Trituración	Compostado	Manresa	b	TCMN2	50	Extracción	Compostado	Manresa	b	ECMN2
23	Trituración	Compostado	Manresa	c	TCMN3	51	Extracción	Compostado	Manresa	c	ECMN3
24	Trituración	Compostado	Manresa	d	TCMN4	52	Extracción	Compostado	Manresa	d	ECMN4
25	Trituración	Compostado	Vilaseca	a	TCV1	1	Extracción	Compostado	Vilaseca	a	ECV1
26	Trituración	Compostado	Vilaseca	b	TCV2	2	Extracción	Compostado	Vilaseca	b	ECV2
27	Trituración	Compostado	Vilaseca	c	TCV3	3	Extracción	Compostado	Vilaseca	c	ECV3
28	Trituración	Compostado	Vilaseca	d	TCV4	4	Extracción	Compostado	Vilaseca	d	ECV4
41	Trituración	no		a	T1	57	Extracción	no		a	E1
42	Trituración	no		b	T2	58	Extracción	no		b	E2
43	Trituración	no		c	T3	59	Extracción	no		c	E3
44	Trituración	no		d	T4	60	Extracción	no		d	E4

### 3.5.3.- Conservación de las muestras

La muestra recogida en campo se dividió en dos volúmenes: uno para determinación de metales y otro para determinar las especies iónicas. A cada uno de ellos se le aplicó un pretratamiento diferente:

- **Contenido en sales (cationes y aniones)**

De los 100 mL recogidos por contenedor, se separaron 30 mL en recipientes de un sólo uso que sirvieron para analizar aniones y cationes (contenido en sales) y se guardaron a -25 °C (muestras congeladas).

- **Metales**

Se acidificó el volumen restante con ácido nítrico 60 %, en una proporción del 1% (600 µL) y se guardaron en recipientes de un sólo uso a -25 °C (muestras congeladas).





### 3.6.- Metodología analítica

#### 3.6.1.- Determinación de metales pesados

##### ▪ Preparación de la muestra

Las muestras fueron descongeladas durante 24h

Una vez descongeladas las muestras para no perder todas sus propiedades se mantenían a una temperatura que oscila entre los 5-7 °C.

Antes del proceso de filtración, se dejaban las muestras unos minutos a temperatura ambiente. A posteriori se realizó la filtración para todas las muestras del correspondiente lixiviado a analizar. Para la filtración se utilizó papel de filtro sin cenizas de diámetro 90 mm.

Todo el material utilizado para filtrar, embudos de decantación y recipientes, fueron sometidos a un sistema de limpieza específico. Éste sistema de limpieza consiste en la preparación de una solución de HNO<sub>3</sub> al 10%, en la que se sumergió todo el material anteriormente mencionado durante un tiempo mínimo de una hora. Antes y después de sumergir el material en la solución de HNO<sub>3</sub> al 10 %, fue aclarado este material tres veces con agua destilada, secado con estufa a menos de 100 °C y finalmente se dejó enfriar a temperatura ambiente.

Después de filtrar, las muestras fueron transportadas al laboratorio 109 (unidad de análisis), dónde se realizaron las lecturas directas por *espectrofotometría de absorción atómica*.

##### ▪ Espectrofotometría de Absorción atómica

El **Espectrómetro de absorción atómica** utilizado fue el modelo: Spectra AA-110 de la marca Varian.

##### ➤ Fundamento

La Espectrofotometría constituye la base del análisis Espectro-químico, en el que la interacción de la radiación electromagnética con la materia se utiliza para obtener información cualitativa y cuantitativa acerca de la composición de una muestra.

La Espectrofotometría de Absorción Atómica se basa en la absorción de radiación electromagnética por las partículas atómicas. Para ello, es necesario atomizar la muestra, es decir, convertir las moléculas constituyentes de la muestra en partículas gaseosas elementales. El espectro de absorción de un elemento atomizado está constituido por una cantidad limitada de líneas o bandas discretas a longitudes de onda características para cada elemento.

En la Espectrofotometría Atómica, las muestras se vaporizan a temperaturas muy altas y la concentración de los átomos del elemento de interés se determina midiendo la absorción a sus longitudes de onda características.



Su alta sensibilidad y la facilidad con la que se pueden analizar muchas muestras, ha hecho de la Absorción Atómica una de las principales herramientas de la Química Analítica.

La sensibilidad (concentración característica) del método se define como la concentración necesaria de un elemento para producir el 99 % de transmitancia, lo que corresponde al 0,0044 de absorbancia.

Directamente relacionado con la sensibilidad se encuentra el límite de detección, que corresponde a la concentración necesaria de un elemento para producir una señal con una intensidad triple del ruido de fondo. Por ruido de fondo se entiende toda señal observable cuando el elemento a analizar se encuentra ausente de la llama y es debido a la absorción molecular y a la dispersión de las partículas en la llama.

En el presente proyecto la concentración característica para la Espectrofotometría de Absorción Atómica, coincide con el límite de detección.

Como todas las técnicas instrumentales, la Espectrofotometría de llama es una técnica relativa. Por consiguiente, es necesario establecer experimentalmente una curva (o función matemática), que relacione la señal analítica obtenida con la concentración del elemento analito en las soluciones a analizar. En el caso más directo, la concentración de una solución incógnita se obtiene por interpolación gráfica a partir de una curva de calibración, obtenida con varios estándares (patrones) adecuadamente espaciados, que cubren el ámbito de concentraciones requerido (Departamento de Química Física y Analítica de la Universidad de Oviedo 2007).

En la mayoría de los casos es necesario que la composición de las soluciones patrón sea similar a la de la muestra a analizar (tabla 9).

**Tabla 9: Rango de concentraciones requerido para las soluciones patrón**

Metales Pesados	Soluciones Patrón
<b>Cu, Cr, Ni, Pb</b>	0,5 ppm 1 ppm 2 ppm 4 ppm 5 ppm
<b>Zn, Cd</b>	0,1 ppm 0,2 ppm 0,5 ppm 1 ppm 2 ppm



### ➤ Instrumentación

Los componentes básicos de un Espectrofotómetro de Absorción Atómica son fundamentalmente:

1. Una fuente de radiación, generalmente una lámpara de cátodo hueco o vacío, que emite las líneas atómicas características del elemento a analizar. La desventaja de estas bandas o líneas atómicas, es que solo se puede medir un elemento a la vez. También se requiere que la radiación de la fuente sea modulada (encendido y apagado rápido de la misma) para suministrar una forma de amplificar selectivamente la luz de la lámpara e ignorar la emisión de la llama.
2. Un sistema de vaporización y atomización de la muestra, la llama, generalmente producida en un mechero de premezcla en el cual se aspira de manera continua la disolución de la muestra a través de un nebulizador que genera un aerosol fino dentro de una cámara de mezcla. La continua aspiración de la muestra, requiere de 2–5 ml de muestra.  
Aquí, el aerosol de la muestra se mezcla con los gases combustibles (acetileno) y oxidantes (aire) y luego es llevado al cabezal del mechero, es decir, a la llama, en donde ocurre la combustión y la atomización de la muestra, a una temperatura de 2400 a 2700 K.
3. Un monocromador que dispersa las distintas longitudes de onda de la radiación emitida por la fuente seleccionando la línea particular que se desea medir.
4. Un detector (tubo foto-multiplicador) que transforma la radiación en corriente eléctrica.
5. Un sistema amplificador y de medida de la corriente eléctrica generada en el detector.

Según el esquema básico, la radiación proveniente de la lámpara de cátodo hueco del elemento a analizar se hace pasar a través de la llama del mechero y se mide su intensidad. A continuación, se vaporiza la muestra con el elemento a analizar en la llama, el vapor atómico del elemento absorbe parte de la radiación emitida por la lámpara de modo que lo que se mide ahora es la reducción en la intensidad de la radiación producida por dicho vapor atómico, esto es, la absorción atómica.

Cuando una radiación monocromática atraviesa una muestra que contiene especies absorbentes, la intensidad de la energía radiante disminuye progresivamente a medida que las partículas de aquellas especies absorben esta energía. La **transmitancia** de la muestra se define como la fracción de radiación incidente transmitida por la misma ( $T=P/P_0$ ). La disminución de la potencia de radiación depende de la concentración de absorbente y de la longitud del camino recorrido por el haz. Estas relaciones se recogen en la Ley de Beer:

**Transmitancia:**  $T=P/P_0$

**Absorbancia:**  $A=\log P_0/P= -\log T = \epsilon.b.C$





En donde,  $\epsilon$  es una constante característica entre otros factores de la naturaleza de la especie absorbente a una longitud de onda determinada;  $b$  es el paso óptico y  $C$  es la concentración de la especie absorbente.

Así pues, la absorbancia medida presenta una dependencia lineal con el número de átomos de la especie absorbente presentes en la llama y, como consecuencia, con la concentración de dicha especie en la disolución aspirada (Departamento de Química Física y Analítica de la Universidad de Oviedo 2007).

### ➤ Procedimiento

Antes de proceder con la lectura directa de las muestras se siguieron unos pasos previos para poder encender el espectrofotómetro por absorción atómica, que se repitió cada vez que se analizaron los diferentes lixiviados:

- Antes de conectar el aparato, se debe encender el aire comprimido y el acetileno.
- Se enciende el espectrofotómetro.
- Mediante un cartón se comprueba los ajustes vertical y horizontal, éste posee una  $x$  en el centro, se ha de procurar que la llama pase justo por el centro, que tenga la altura y la profundidad adecuadas. El ajuste horizontal es necesario para asegurarse que la llama está alineada con la trayectoria de los instrumentos ópticos. El ajuste vertical es necesario para ajustar la altura dentro de la llama en el que la absorbancia es monitoreada.
- A partir de aquí, se mantiene encendido unos 10 min para que la llama esté perfectamente acondicionada y el flujo de aire comprimido y acetileno sea el correcto. Siempre se trabaja sobre los mismos valores para el aire comprimido, lo único que podemos regular es el acetileno. Estos valores quedan registrados en dos medidores existentes justo delante del aparato, que debemos ir controlando en estos 10 min de encendido.
- Después de los 10 min de espera, es necesario pasar las diferentes soluciones patrón por lectura directa. Estas soluciones patrón crean la curva de calibración.
- Gracias al el uso del sistema informático, se puede controlar las diferentes lecturas y los posibles problemas que pudieran ocurrir.

Se analizaron en total seis metales: **Cu, Cd, Cr, Ni, Pb, Zn**. Tal y como se ha indicado con anterioridad, la única desventaja al utilizar un Espectrofotómetro de Absorción Atómica por llama, es la limitación de tener que analizar cada elemento por separado. Debido a ello, las 56 muestras han sido pasadas cada vez que queríamos realizar una única lectura para cada metal analizado.

Las concentraciones características obtenidas para los seis metales se encuentran en la tabla 10.

**Tabla 10: Concentraciones Características obtenidas por Espectrofotometría de Absorción Atómica para todos los metales pesados analizados**

	LIXIVIADOS				
	CC L 1	CC L 2	CC L 3	CC L 4	CC L 5
<b>Cu</b>	0,027	0,020	0,019	0,026	0,027
<b>Cd</b>	0,012	0,010	0,005	0,010	0,012
<b>Cr</b>	0,054	0,050	0,034	0,040	0,049
<b>Ni</b>	0,050	0,034	0,034	0,043	0,050
<b>Pb</b>	0,099	0,080	0,078	0,079	0,102
<b>Zn</b>	0,009	0,007	0,005	0,008	0,008
CC	Concentración Característica obtenida para cada metal.				
L	Lixiviado.				

### 3.6.2.- Determinación de cationes y aniones

#### ▪ Preparación de la muestra

Las muestras fueron descongeladas durante 24h

Una vez descongeladas las muestras para no perder todas sus propiedades se mantenían a una temperatura que oscila entre los 5-7 °C.

Antes del proceso de filtración, se dejaban las muestras unos minutos a temperatura ambiente. A posteriori se realizó la filtración para todas las muestras del correspondiente lixiviado a analizar. Para la filtración se utilizó papel de filtro sin cenizas de diámetro 90 mm.

Después de filtrar, las muestras fueron transportadas al laboratorio 109 (unidad de análisis). A continuación, se realizó una dilución 1/5 para todas las muestras. De estas muestras diluidas se colocaron de 1 a 2 ml en un vial. Finalmente todos los viales se sometieron a lectura directa por *electroforesis capilar*.

#### ▪ Electroforesis Capilar

Para la realización de esta técnica se utilizó el modelo 3DCE de Hewlett-Packard.

#### ➤ Fundamento

La electroforesis capilar es una técnica de separación basada en la diferente movilidad de las sustancias bajo la acción de un campo eléctrico. Combina el poder de separación de la electroforesis convencional con el apoyo instrumental propio de la cromatografía de líquidos de alta eficacia (HPLC). La separación de las sustancias se lleva a cabo en el interior de un tubo capilar, normalmente de sílice fundida, cuyas dimensiones oscilan entre 10-100 cm de longitud y 25-100  $\mu\text{m}$  de diámetro interno, lleno de una solución tampón. Una fuente de alimentación de corriente continua suministra una elevada diferencia de potencial (5-30 kV) y gracias a la conductividad eléctrica del tampón se origina una corriente eléctrica entre los extremos del tubo. Cada sustancia introducida en el capilar se desplaza por su interior a una velocidad que depende de su carga



eléctrica global, su estructura, la viscosidad del medio y la diferencia de potencial aplicado, que son los principales responsables de la separación (Aguilar 2002).

La Electroforesis Capilar proporciona elevada rapidez de análisis, altas eficacias, facilidad de automatización, es aplicable a una amplia gama de compuestos, requiere volúmenes de muestra pequeños y un mínimo consumo de reactivos lo que hace que cada análisis tenga un bajo coste y afecte mínimamente al medio ambiente.

Aunque las primeras y principales aplicaciones de la Electroforesis Capilar se encuentran en la separación de proteínas, péptidos y secuencias de ADN, cada vez se ha ido ampliando su aplicación a otros campos, especialmente al del análisis medioambiental. En este sentido, se ha demostrado que la Electroforesis Capilar, en sus diferentes modalidades, es una técnica complementaria de las técnicas habituales de análisis para la separación y determinación de especies químicas nocivas para el medio ambiente como los contaminantes orgánicos e inorgánicos (Hernández 2005).

### ➤ **Instrumentación**

Las partes fundamentales que componen un equipo de electroforesis capilar son las siguientes:

1. Una fuente de alta tensión, que permite establecer diferencias de potencial de varias decenas de kilovoltios (normalmente de hasta 30 kV con una corriente eléctrica máxima del orden de 200  $\mu$ A) entre los extremos del capilar.
2. Una columna capilar, normalmente de sílice fundida. Como en cromatografía, ésta es la parte fundamental del equipo puesto que en su interior se produce la separación.
3. Dos recipientes que contienen generalmente el mismo tampón que el capilar, que permiten establecer la diferencia de potencial entre los extremos del tubo. Para la inyección se sustituye uno de estos recipientes por otro que contenga la muestra a analizar y se aplica presión, vacío o una pequeña diferencia de potencial, con lo que se introduce en el capilar una banda de muestra (casi siempre de anchura inferior a 10 mm)
4. Dos electrodos con los que se establece el contacto eléctrico entre el capilar y los recipientes llenos de tampón de separación, y la fuente de tensión.
5. Un detector, de función idéntica a los utilizados para cromatografía. La detección suele hacerse en columna, es decir, en un punto del mismo capilar de separación (Aguilar 2002).

Las distintas modalidades de Electroforesis Capilar se diferencian principalmente en la naturaleza del medio de separación que se introduce en el interior del capilar y también en las características de los analitos que se pretenden separar, siendo la instrumentación prácticamente la misma para todas ellas (Pérez. P, Instituto de Ciencia y Tecnología de Polímeros (CSIC) 2007).



### **3.7.- Estudio estadístico mediante el programa SAS**

El estudio estadístico solo se ha realizado para la concentración de metales pesados.

El estudio estadístico aplicado para cada tipo de tratamiento con lodo y tratamiento control, ha sido el de ANOVA (análisis de la varianza) con una significación del 5% con el factor lodo y la posterior separación de medias por el método Student-Newman-Keuls. De los resultados obtenidos en dicho análisis, se han realizado las tablas estadísticas (tablas nº 26-33), dónde se puede observar claramente que por cada tipo de sustrato existen o no diferencias entre lodos teniendo en cuenta como comparativos los tratamientos control.

Para saber si existen diferencias significativas entre tratamientos dentro de un mismo sustrato se realizó otro ANOVA (sin tener en cuenta los tratamientos control), cuyos resultados obtenidos en dicho análisis, quedan reflejados en la tabla estadística nº 34.

## **4.- RESULTADOS**



#### 4.1.- Concentración media de los metales para cada uno de los lixiviados

En las tablas siguientes se muestran los valores medios obtenidos y la desviación estándar de las concentraciones de los metales estudiados, para cada uno de los cinco lixiviados.

Las concentraciones medias de los metales, han sido calculadas a partir de las cuatro réplicas por tratamiento. No obstante, en algunos muestreos, por problemas técnicos no se han podido recoger muestras de todas los contenedores, por lo que, el número de réplicas por tratamiento es inferior; esto queda reflejado en el valor N.

Hay muestras en la que la concentración del metal estudiada ha sido muy baja y por lo tanto, únicamente se puede afirmar que esa concentración está por debajo de la concentración característica de trabajo.

**Tabla 11: Concentración media de metales en el lixiviado 1 (10/05/2005).**

CONCENTRACIÓN MEDIA DE METALES									
Tratamiento	N	X Cu	SD Cu	X Cd	X Cr	X Ni	X Pb	X Zn	SD Zn
T	4	(1)	0,000	(2)	(3)	(4)	(5)	0,023	0,011
TTS	4	0,067	0,027	(2)	(3)	(4)	(5)	0,094	0,023
TTMT	3	0,032	0,005	(2)	(3)	(4)	(5)	0,126	0,051
TTBE	4	0,032	0,006	(2)	(3)	(4)	(5)	0,080	0,018
TCBL	4	0,033	0,004	(2)	(3)	(4)	(5)	0,196	0,156
TCMN	4	(1)	0,000	(2)	(3)	(4)	(5)	0,083	0,020
TCV	4	0,062	0,050	(2)	(3)	(4)	(5)	0,061	0,014
E	4	(1)	0,000	(2)	(3)	(4)	(5)	0,044	0,032
ETS	2	0,133	0,081	(2)	(3)	(4)	(5)	0,162	0,103
ETMT	3	(1)	0,000	(2)	(3)	(4)	(5)	0,053	0,014
ETBE	4	0,032	0,000	(2)	(3)	(4)	(5)	0,090	0,042
ECBL	4	0,035	0,000	(2)	(3)	(4)	(5)	0,041	0,026
ECMN	4	0,031	0,000	(2)	(3)	(4)	(5)	0,070	0,034
ECV	4	0,048	0,014	(2)	(3)	(4)	(5)	0,126	0,055
X	Promedio de metal expresado en mg/L								
SD	Desviación estándar poblacional								
N	Nº de muestras								
(1)	Concentración inferior a 0,027								
(2)	Concentración inferior a 0,012								
(3)	Concentración inferior a 0,054								
(4)	Concentración inferior a 0,05								
(5)	Concentración inferior a 0,099								



Tabla 12: Concentración media de metales en el lixiviado 2 (24/05/2005).

CONCENTRACIÓN MEDIA DE METALES										
Tratamiento	N	X Cu	SD Cu	X Cd	X Cr	X Ni	SD Ni	X Pb	X Zn	SD Zn
T	4	(1)	0,000	(2)	(3)	0,057	0,002	(5)	0,030	0,012
TTS	4	0,058	0,039	(2)	(3)	0,096	0,023	(5)	0,117	0,063
TTMT	3	0,024	0,002	(2)	(3)	0,090	0,012	(5)	0,392	0,400
TTBE	4	0,038	0,012	(2)	(3)	0,076	0,010	(5)	0,102	0,070
TCBL	4	0,038	0,005	(2)	(3)	0,076	0,003	(5)	0,089	0,028
TCMN	4	0,022	0,000	(2)	(3)	0,067	0,001	(5)	0,076	0,050
TCV	4	0,047	0,013	(2)	(3)	0,072	0,005	(5)	0,098	0,068
E	4	(1)	0,000	(2)	(3)	0,048	0,001	(5)	0,057	0,008
ETS	4	0,109	0,033	(2)	(3)	0,120	0,016	(5)	0,159	0,106
ETMT	4	0,034	0,022	(2)	(3)	0,071	0,012	(5)	0,140	0,046
ETBE	4	0,032	0,012	(2)	(3)	0,107	0,012	(5)	0,077	0,043
ECBL	3	0,027	0,005	(2)	(3)	0,065	0,003	(5)	0,111	0,025
ECMN	4	0,042	0,009	(2)	(3)	0,067	0,008	(5)	0,146	0,118
ECV	4	0,052	0,005	(2)	(3)	0,067	0,005	(5)	0,140	0,031
X	Promedio de metal expresado en mg/L									
SD	Desviación estándar poblacional									
N	Nº de muestras									
(1)	Concentración inferior a 0,020									
(2)	Concentración inferior a 0,010									
(3)	Concentración inferior a 0,050									
(5)	Concentración inferior a 0,08									

Tabla 13: Concentración media de metales en el lixiviado 3 (15/09/2005).

CONCENTRACIÓN MEDIA DE METALES										
Tratamiento	N	X Cu	SD Cu	X Cd	X Cr	X Ni	SD Ni	X Pb	X Zn	SD Zn
T	4	(1)	0,000	(2)	(3)	0,047	0,003	(5)	0,013	0,008
TTS	4	0,032	0,008	(2)	(3)	0,053	0,007	(5)	0,034	0,011
TTMT	4	0,030	0,000	(2)	(3)	0,046	0,005	(5)	0,043	0,020
TTBE	4	0,021	0,000	(2)	(3)	0,041	0,006	(5)	0,055	0,045
TCBL	4	(1)	0,000	(2)	(3)	0,042	0,002	(5)	0,055	0,035
TCMN	4	(1)	0,000	(2)	(3)	0,046	0,002	(5)	0,045	0,036
TCV	4	(1)	0,000	(2)	(3)	0,053	0,003	(5)	0,044	0,013
E	4	(1)	0,000	(2)	(3)	0,049	0,004	(5)	0,025	0,013
ETS	3	(1)	0,000	(2)	(3)	0,056	0,003	(5)	0,037	0,016
ETMT	4	(1)	0,000	(2)	(3)	0,062	0,010	(5)	0,070	0,043
ETBE	4	(1)	0,000	(2)	(3)	0,059	0,008	(5)	0,027	0,010
ECBL	4	(1)	0,000	(2)	(3)	0,048	0,003	(5)	0,015	0,005
ECMN	4	(1)	0,000	(2)	(3)	0,047	0,004	(5)	0,026	0,023
ECV	4	(1)	0,000	(2)	(3)	0,054	0,004	(5)	0,049	0,016
X	Promedio de metal expresado en mg/L									
SD	Desviación estándar poblacional									
N	Nº de muestras									
(1)	Concentración inferior a 0,019									
(2)	Concentración inferior a 0,005									
(3)	Concentración inferior a 0,034									
(5)	Concentración inferior a 0,078									



Tabla 14: Concentración media de metales en el lixiviado 4 (02/11/2005).

CONCENTRACIÓN MEDIA DE METALES										
Tratamiento	N	X Cu	SD Cu	X Cd	X Cr	X Ni	SD Ni	X Pb	X Zn	SD Zn
T	4	(1)	0,000	(2)	(3)	(4)	0,000	(5)	0,013	0,008
TTS	4	0,048	0,005	(2)	(3)	(4)	0,000	(5)	0,040	0,021
TTMT	4	0,034	0,009	(2)	(3)	(4)	0,000	(5)	0,037	0,036
TTBE	3	0,030	0,005	(2)	(3)	(4)	0,000	(5)	0,072	0,037
TCBL	4	0,034	0,005	(2)	(3)	(4)	0,000	(5)	0,059	0,034
TCMN	4	0,030	0,002	(2)	(3)	(4)	0,000	(5)	0,041	0,028
TCV	4	0,041	0,007	(2)	(3)	(4)	0,000	(5)	0,041	0,032
E	4	0,041	0,003	(2)	(3)	0,044	0,000	(5)	0,022	0,007
ETS	4	0,077	0,036	(2)	(3)	0,058	0,013	(5)	0,108	0,129
ETMT	4	0,046	0,003	(2)	(3)	0,045	0,003	(5)	0,034	0,025
ETBE	4	0,063	0,008	(2)	(3)	0,060	0,010	(5)	0,038	0,028
ECBL	4	0,044	0,006	(2)	(3)	0,043	0,000	(5)	0,031	0,016
ECMN	4	0,061	0,013	(2)	(3)	0,051	0,006	(5)	0,172	0,211
ECV	3	0,064	0,003	(2)	(3)	0,047	0,004	(5)	0,026	0,012
X	Promedio de metal expresado en mg/L									
SD	Desviación estándar poblacional									
N	Nº de muestras									
(1)	Concentración inferior a 0,026									
(2)	Concentración inferior a 0,010									
(3)	Concentración inferior a 0,040									
(4)	Concentración inferior a 0,043									
(5)	Concentración inferior a 0,079									

Tabla 15: Concentración media de metales en el lixiviado 5 (15/12/2005).

CONCENTRACIÓN MEDIA DE METALES										
Tratamiento	N	X Cu	SD Cu	X Cd	X Cr	X Ni	X Pb	X Zn	SD Zn	
T	4	(1)	0,000	(2)	(3)	(4)	(5)	0,020	0,008	
TTS	4	(1)	0,000	(2)	(3)	(4)	(5)	0,026	0,021	
TTMT	3	(1)	0,000	(2)	(3)	(4)	(5)	0,017	0,008	
TTBE	4	(1)	0,000	(2)	(3)	(4)	(5)	0,045	0,020	
TCBL	4	(1)	0,000	(2)	(3)	(4)	(5)	0,026	0,011	
TCMN	4	(1)	0,000	(2)	(3)	(4)	(5)	0,030	0,019	
TCV	4	(1)	0,000	(2)	(3)	(4)	(5)	0,026	0,012	
E	4	(1)	0,000	(2)	(3)	(4)	(5)	0,036	0,028	
ETS	4	0,030	0,005	(2)	(3)	(4)	(5)	0,024	0,003	
ETMT	4	(1)	0,000	(2)	(3)	(4)	(5)	0,029	0,008	
ETBE	4	(1)	0,000	(2)	(3)	(4)	(5)	0,025	0,010	
ECBL	4	(1)	0,000	(2)	(3)	(4)	(5)	0,051	0,040	
ECMN	4	(1)	0,000	(2)	(3)	(4)	(5)	0,048	0,014	
ECV	4	(1)	0,000	(2)	(3)	(4)	(5)	0,031	0,009	
X	Promedio de metal expresado en mg/L									
SD	Desviación estándar poblacional									
N	Nº de muestras									
(1)	Concentración inferior a 0,027									
(2)	Concentración inferior a 0,012									
(3)	Concentración inferior a 0,049									
(4)	Concentración inferior a 0,05									
(5)	Concentración inferior a 0,102									





Para todos los lixiviados, se observa tres metales que no han podido ser detectados, Cd, Cr y Pb. Por el contrario el Zn ha sido el único metal siempre detectado.

Respecto al Ni y al Cu, estos metales se detectan de forma irregular según el lixiviado. A nivel general, cabe destacar que el Zn es el metal que se presenta a mayor concentración, que corresponde al metal aportado en mayor cantidad.

#### 4.2.- Concentración media de Cationes y Aniones

En las tablas siguientes se dan los valores medios obtenidos y la desviación estándar de las concentraciones de los cationes y aniones estudiados, para cada uno de los cinco lixiviados.

Las medias inferiores al valor límite 5 mg/L, nos indican que la concentración del ión para todas las replicas de ese tratamiento, se encuentra por debajo de este límite de detección, con lo que la concentración del ión correspondiente no ha podido ser determinada con precisión.

Igual que para el resto de iones, se han calculado la media y la desviación estándar para el catión  $\text{NH}_4^+$ . Sin embargo se han obtenido algunos puntos que sobresalen de la tendencia general de las cuatro replicas de un mismo tratamiento. Para ello, se ha definido un intervalo de valores aceptables entre los límites, que resultan de sumar y restar 2,5 veces la desviación estándar a la media. Los valores de las muestras que han quedado dentro del intervalo, se han utilizado para hacer un nuevo valor medio; dicho valor se llama **promedio ajustado**.

Las concentraciones medias de los iones, han sido calculadas a partir de las cuatro réplicas por tratamiento. No obstante, en algunos muestreos, por problemas técnicos no se han podido recoger muestras de todos los contenedores, debido a esto, el número de réplicas por tratamiento es inferior; esto queda reflejado en el valor N.

**4.2.1.- Concentración media de Cationes****Tabla 16: Concentración media de cationes en el lixiviado 1 (10/05/2005).**

<b>CONCENTRACIÓN MEDIA DE CATIONES</b>										
Tratamiento	N	Xa NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	SD NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	X K <sup>+</sup>	X Na <sup>+</sup>	SD Na <sup>+</sup>	X Ca <sup>2+</sup>	SD Ca <sup>2+</sup>	X Mg <sup>2+</sup>	SD Mg <sup>2+</sup>
T	4	5,25	0,50	(1)	193,77	40,12	47,39	13,90	16,20	5,49
TTS	4	14,61	10,26	(1)	339,72	65,58	74,10	24,88	36,61	10,61
TTMT	3	34,85	8,34	(1)	114,68	32,28	53,02	13,92	25,19	4,89
TTBE	4	(1)	0,00	(1)	158,02	20,08	45,69	7,49	16,13	3,84
TCBL	4	6,50	3,00	(1)	662,25	213,94	67,75	15,20	68,00	22,11
TCMN	4	(1)	0,00	(1)	491,15	84,53	114,03	16,51	54,69	6,08
TCV	4	48,29	86,58	(1)	611,74	151,10	149,23	38,40	113,12	28,51
E	4	(1)	0,00	(1)	393,75	242,36	51,00	7,79	39,75	0,96
ETS	2	55,50	41,72	(1)	467,30	27,86	127,01	5,64	79,60	7,92
ETMT	4	18,60	6,72	(1)	181,75	57,50	37,29	8,76	27,14	9,33
ETBE	4	8,00	2,00	(1)	276,00	43,10	96,75	39,35	49,75	16,74
ECBL	4	5,25	0,50	(1)	739,78	218,88	111,71	29,08	97,11	24,84
ECMN	4	(1)	0,00	(1)	621,37	208,69	110,57	40,67	79,66	22,57
ECV	4	6,75	3,50	(1)	871,10	240,32	154,39	49,04	114,54	31,45
X	Promedio de catión expresado en mg/L									
Xa	Promedio ajustado de catión expresado en mg/L									
SD	Desviación estándar poblacional									
N	Nº de muestras									
(1)	Concentración inferior a 5									

**Tabla 17: Concentración media de cationes en el lixiviado 2 (24/05/2005).**

<b>CONCENTRACIÓN MEDIA DE CATIONES</b>										
Tratamiento	N	Xa NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	SD NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	X K <sup>+</sup>	X Na <sup>+</sup>	SD Na <sup>+</sup>	X Ca <sup>2+</sup>	SD Ca <sup>2+</sup>	X Mg <sup>2+</sup>	SD Mg <sup>2+</sup>
T	4	(1)	0,00	(1)	82,88	48,38	36,23	13,83	8,87	4,04
TTS	4	6,75	3,50	(1)	236,92	120,96	42,81	19,97	28,31	7,06
TTMT	3	26,54	4,40	(1)	49,86	14,49	33,65	6,39	12,24	3,88
TTBE	4	5,25	0,50	(1)	189,02	168,25	54,70	40,17	39,00	25,12
TCBL	4	(1)	0,00	(1)	734,00	253,50	73,25	26,85	74,25	29,74
TCMN	4	(1)	0,00	(1)	358,61	206,49	80,54	47,42	41,19	29,34
TCV	4	6,00	1,99	(1)	331,95	345,16	57,40	52,39	59,95	66,60
E	4	(1)	0,00	(1)	154,50	159,33	50,33	39,40	48,75	50,39
ETS	3	7,33	4,04	(1)	281,74	146,51	78,98	30,40	67,59	27,43
ETMT	4	11,50	7,13	(1)	54,50	49,98	31,75	29,96	28,30	22,43
ETBE	4	(1)	0,00	(1)	210,75	39,76	98,00	12,08	78,25	22,60
ECBL	3	(1)	0,00	(1)	173,97	153,09	39,86	31,73	40,87	31,31
ECMN	4	(1)	0,00	(1)	322,21	127,27	75,92	32,28	68,87	23,76
ECV	4	(1)	0,00	(1)	850,83	523,78	197,67	127,95	144,41	84,56
X	Promedio de catión expresado en mg/L									
Xa	Promedio ajustado de catión expresado en mg/L									
SD	Desviación estándar poblacional									
N	Nº de muestras									
(1)	Concentración inferior a 5									



Tabla 18: Concentración media de cationes en el lixiviado 3 (15/09/2005).

CONCENTRACIÓN MEDIA DE CATIONES										
Tratamiento	N	Xa NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	SD NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	X K <sup>+</sup>	X Na <sup>+</sup>	SD Na <sup>+</sup>	X Ca <sup>2+</sup>	SD Ca <sup>2+</sup>	X Mg <sup>2+</sup>	SD Mg <sup>2+</sup>
T	4	(1)	0,00	(1)	112,66	23,73	97,10	21,09	15,99	4,70
TTS	4	(1)	0,00	(1)	244,24	88,38	119,64	16,64	30,91	12,05
TTMT	4	(1)	0,00	(1)	252,22	110,00	123,09	41,42	54,10	23,61
TTBE	4	(1)	0,00	(1)	128,85	70,48	84,44	46,60	19,11	4,17
TCBL	4	(1)	0,00	(1)	138,72	103,43	64,90	38,72	22,33	7,77
TCMN	4	(1)	0,00	(1)	111,75	9,32	80,50	8,66	17,50	2,65
TCV	4	(1)	0,00	(1)	138,08	29,49	80,20	12,81	31,43	8,93
E	4	6,04	0,35	(1)	62,00	14,85	39,22	10,07	10,75	3,59
ETS	3	5,78	0,33	(1)	149,54	49,24	76,70	19,47	29,87	8,75
ETMT	4	6,42	0,39	(1)	98,55	29,35	75,43	19,95	22,08	6,78
ETBE	4	6,32	0,86	(1)	211,74	105,03	107,83	41,85	42,80	21,74
ECBL	4	6,67	0,35	(1)	151,00	31,28	74,74	27,99	24,85	5,93
ECMN	4	6,04	0,66	(1)	130,62	45,77	62,87	16,32	21,84	7,36
ECV	4	6,03	1,47	(1)	212,28	161,36	100,11	44,77	40,49	31,91
X	Promedio de catión expresado en mg/L									
Xa	Promedio ajustado de catión expresado en mg/L									
SD	Desviación estándar poblacional									
N	Nº de muestras									
(1)	Concentración inferior a 5									

Tabla 19: Concentración media de cationes en el lixiviado 4 (02/11/2005).

CONCENTRACIÓN MEDIA DE CATIONES									
Tratamiento	N	X NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	X K <sup>+</sup>	X Na <sup>+</sup>	SD Na <sup>+</sup>	X Ca <sup>2+</sup>	SD Ca <sup>2+</sup>	X Mg <sup>2+</sup>	SD Mg <sup>2+</sup>
T	4	(1)	(1)	54,75	6,19	68,94	9,89	12,07	1,52
TTS	4	(1)	(1)	85,64	26,22	75,44	16,60	21,85	4,18
TTMT	4	(1)	(1)	154,99	63,81	83,74	24,67	41,67	29,88
TTBE	3	(1)	(1)	96,41	42,81	82,36	14,14	24,68	7,62
TCBL	4	(1)	(1)	129,93	47,17	72,22	12,24	26,57	5,04
TCMN	4	(1)	(1)	127,93	42,89	105,94	16,31	30,30	7,44
TCV	4	(1)	(1)	153,94	31,43	102,11	4,91	50,70	3,00
E	4	(1)	(1)	79,66	28,96	49,47	21,26	24,01	9,79
ETS	4	(1)	(1)	305,54	106,26	114,93	29,13	79,42	21,55
ETMT	4	(1)	(1)	284,10	113,53	117,96	34,92	81,96	30,05
ETBE	4	(1)	(1)	361,36	138,59	155,08	36,21	97,12	33,74
ECBL	4	(1)	(1)	143,19	88,78	68,19	41,33	35,11	19,80
ECMN	4	(1)	(1)	261,73	152,79	100,10	58,49	57,61	29,91
ECV	4	(1)	(1)	201,81	110,81	85,20	49,07	51,39	26,37
X	Promedio de catión expresado en mg/L								
SD	Desviación estándar poblacional								
N	Nº de muestras								
(1)	Concentración inferior a 5								



Tabla 20: Concentración media de cationes en el lixiviado 5 (15/12/2005).

CONCENTRACIÓN MEDIA DE CATIONES									
Tratamiento	N	X NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	X K <sup>+</sup>	X Na <sup>+</sup>	SD Na <sup>+</sup>	X Ca <sup>2+</sup>	SD Ca <sup>2+</sup>	X Mg <sup>2+</sup>	SD Mg <sup>2+</sup>
T	4	(1)	(1)	31,49	7,13	24,46	8,64	6,43	1,26
TTS	4	(1)	(1)	35,00	11,40	34,54	12,75	10,01	3,74
TTMT	3	(1)	(1)	55,54	19,42	43,12	4,28	17,55	0,96
TTBE	4	(1)	(1)	37,04	10,48	47,79	10,08	11,45	2,61
TCBL	4	(1)	(1)	60,50	22,55	34,75	12,01	11,50	3,70
TCMN	4	(1)	(1)	46,52	8,50	50,80	9,89	11,51	2,38
TCV	4	(1)	(1)	61,63	17,24	53,66	10,99	22,23	5,59
E	4	(1)	(1)	100,69	40,78	49,95	16,43	24,28	11,21
ETS	4	(1)	(1)	390,96	87,80	102,39	12,01	90,74	10,04
ETMT	4	(1)	(1)	328,27	158,59	98,43	30,57	75,53	33,24
ETBE	4	(1)	(1)	210,10	31,61	117,46	10,55	56,79	9,33
ECBL	4	(1)	(1)	319,08	90,91	94,36	5,31	64,12	15,51
ECMN	4	(1)	(1)	207,50	42,02	99,75	14,97	42,00	8,68
ECV	4	(1)	(1)	324,17	107,91	107,64	27,19	66,38	23,10
X	Promedio de catión expresado en mg/L								
SD	Desviación estándar poblacional								
N	Nº de muestras								
(1)	Concentración inferior a 5								

Para todos los lixiviados se observa que el K<sup>+</sup> es el único catión, que no ha podido ser detectado. Sin embargo, el catión NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, ha sido detectado para algunos tratamientos en los tres primeros lixiviados, dejando de serlo para el 4 y 5.

A nivel general destaca el Na<sup>+</sup> como el catión detectado en mayor concentración en los tratamientos con lodos de depuradora.



## 4.2.2.- Concentración media de Aniones

Tabla 21: Concentración media de aniones en el lixiviado 1 (10/05/2005).

CONCENTRACIÓN MEDIA DE ANIONES						
Tratamiento	N	X Cl <sup>-</sup>	SD Cl <sup>-</sup>	X SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	SD SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	X NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>
T	4	27,67	25,57	(1)	0,00	(1)
TTS	4	88,16	72,07	119,50	80,79	(1)
TTMT	3	81,46	14,27	95,33	9,61	(1)
TTBE	4	(1)	0,00	(1)	0,00	(1)
TCBL	4	84,07	36,02	113,25	33,12	(1)
TCMN	4	92,44	48,18	38,19	27,54	(1)
TCV	4	203,10	89,71	105,47	23,89	(1)
E	4	143,75	41,46	690,50	352,02	(1)
ETS	2	234,16	66,24	869,47	347,23	(1)
ETMT	4	20,00	11,22	431,79	200,56	(1)
ETBE	4	194,50	116,83	750,00	391,38	(1)
ECBL	4	254,23	18,55	1801,82	346,25	(1)
ECMN	4	181,62	71,82	1341,55	479,29	(1)
ECV	4	321,08	182,81	2051,13	1492,89	(1)
X	Promedio de anión expresado en mg/L					
SD	Desviación estándar poblacional					
N	Nº de muestras					
(1)	Concentración inferior a 5					

Tabla 22: Concentración media de aniones en el lixiviado 2 (24/05/2005).

CONCENTRACIÓN MEDIA DE ANIONES								
Tratamiento	N	X Cl <sup>-</sup>	SD Cl <sup>-</sup>	X SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	SD SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	X NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	X NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SD NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>
T	4	42,25	43,61	82,75	77,10	(1)	94,75	96,71
TTS	4	53,31	33,75	207,16	93,54	(1)	599,23	400,77
TTMT	3	56,18	12,29	82,13	12,74	(1)	13,30	4,79
TTBE	4	89,43	89,11	186,15	135,79	(1)	445,12	621,58
TCBL	4	91,50	48,73	450,50	159,37	(1)	1933,50	700,61
TCMN	4	85,32	61,69	202,53	81,72	(1)	1130,12	747,68
TCV	4	95,18	110,94	173,25	203,91	(1)	952,66	1104,32
E	4	72,25	62,76	181,50	297,42	(1)	145,00	252,15
ETS	3	40,21	31,50	100,78	90,41	(1)	410,40	400,77
ETMT	4	47,27	46,03	147,71	145,91	(1)	25,25	27,84
ETBE	4	151,00	34,82	503,75	110,96	(1)	219,75	143,91
ECBL	3	81,02	67,06	379,76	316,48	(1)	1288,73	1073,63
ECMN	4	97,76	65,79	435,60	371,32	(1)	1275,94	1185,94
ECV	4	365,64	114,75	681,91	339,86	(1)	2646,79	715,02
X	Promedio de anión expresado en mg/L							
SD	Desviación estándar poblacional							
N	Nº de muestras							
(1)	Concentración inferior a 5							



Tabla 23: Concentración media de aniones en el lixiviado 3 (15/09/2005).

CONCENTRACIÓN MEDIA DE ANIONES								
Tratamiento	N	X Cl <sup>-</sup>	SD Cl <sup>-</sup>	X SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	SD SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	X NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	X NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SD NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>
T	4	164,13	39,04	132,35	16,93	(1)	13,40	3,75
TTS	4	283,04	74,28	293,45	69,06	(1)	128,25	143,67
TTMT	4	282,71	120,65	140,78	52,80	(1)	622,33	413,36
TTBE	4	176,89	112,08	119,31	73,21	(1)	85,53	43,41
TCBL	4	155,27	109,70	157,49	114,36	(1)	72,21	56,66
TCMN	4	192,98	33,69	120,32	17,40	(1)	44,10	13,69
TCV	4	176,70	41,62	133,15	28,43	(1)	129,59	49,29
E	4	73,31	35,66	82,17	7,68	(1)	(1)	0,00
ETS	3	145,85	50,87	219,76	69,35	(1)	184,63	152,84
ETMT	4	162,69	50,56	122,45	41,70	(1)	275,82	125,88
ETBE	4	216,24	77,17	262,36	129,53	(1)	258,30	146,49
ECBL	4	122,16	58,05	210,19	52,29	(1)	90,60	27,16
ECMN	4	120,11	41,86	149,58	43,55	(1)	141,51	65,35
ECV	4	187,25	115,71	206,00	114,71	(1)	302,75	364,33
X	Promedio de anión expresado en mg/L							
SD	Desviación estándar poblacional							
N	Nº de muestras							
(1)	Concentración inferior a 5							

Tabla 24: Concentración media de aniones en el lixiviado 4 (02/11/2005).

CONCENTRACIÓN MEDIA DE ANIONES								
Tratamiento	N	X Cl <sup>-</sup>	SD Cl <sup>-</sup>	X SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	SD SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	X NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	X NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SD NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>
T	4	17,83	2,09	153,04	29,12	(1)	14,39	0,00
TTS	4	43,47	16,18	264,42	108,89	(1)	8,67	3,06
TTMT	4	113,95	54,53	195,51	70,59	(1)	430,88	286,78
TTBE	3	79,74	44,48	229,59	82,20	(1)	33,45	26,24
TCBL	4	76,76	11,91	290,44	107,36	(1)	46,96	62,40
TCMN	4	160,19	55,49	275,49	88,98	(1)	35,96	31,77
TCV	4	177,01	18,76	323,10	36,79	(1)	184,50	95,80
E	4	66,45	47,59	135,70	84,08	(1)	12,59	5,04
ETS	4	182,83	108,61	515,85	324,93	(1)	475,57	324,91
ETMT	4	197,11	66,24	357,25	138,59	(1)	864,00	468,64
ETBE	4	305,90	132,80	700,66	296,59	(1)	557,86	239,26
ECBL	4	88,66	67,59	303,01	194,47	(1)	124,95	143,68
ECMN	4	221,08	165,97	466,69	286,32	(1)	425,13	250,77
ECV	4	171,19	73,00	394,39	111,56	(1)	470,78	218,31
X	Promedio de anión expresado en mg/L							
SD	Desviación estándar poblacional							
N	Nº de muestras							
(1)	Concentración inferior a 5							



Tabla 25: Concentración media de aniones en el lixiviado 5 (15/12/2005).

CONCENTRACIÓN MEDIA DE ANIONES								
Tratamiento	N	X Cl <sup>-</sup>	SD Cl <sup>-</sup>	X SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	SD SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	X NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	X NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SD NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>
T	4	8,07	2,61	69,40	21,90	(1)	(1)	0,00
TTS	4	12,56	6,20	105,43	44,84	(1)	(1)	0,00
TTMT	3	22,84	6,30	95,04	18,40	(1)	35,40	17,04
TTBE	4	26,53	7,82	126,51	36,34	(1)	6,33	2,67
TCBL	4	20,50	5,80	157,75	68,81	(1)	5,50	1,00
TCMN	4	39,47	10,06	125,44	37,04	(1)	(1)	0,00
TCV	4	49,42	17,89	177,02	43,46	(1)	12,06	11,61
E	4	130,88	88,78	161,38	70,76	(1)	9,00	4,62
ETS	4	207,83	20,77	525,73	56,60	(1)	753,07	215,43
ETMT	4	168,91	61,57	305,35	111,27	(1)	1060,29	561,29
ETBE	4	186,91	57,02	400,43	44,77	(1)	221,30	188,67
ECBL	4	155,11	23,04	453,34	34,28	(1)	604,71	368,52
ECMN	4	158,05	40,40	377,91	55,11	(1)	188,11	138,39
ECV	4	201,01	68,18	397,53	156,51	(1)	772,13	337,70
X	Promedio de anión expresado en mg/L							
SD	Desviación estándar poblacional							
N	Nº de muestras							
(1)	Concentración inferior a 5							

El anión NO<sub>2</sub><sup>-</sup> no ha sido detectado para ninguno de los cinco lixiviados. Los aniones restantes Cl<sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> y NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, han sido detectados de forma irregular en todos los lixiviados.

De manera general se observa una mayor concentración media en NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, seguido por SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> y Cl<sup>-</sup>, siendo estos dos últimos los de menor concentración. En el lixiviado 1 la concentración de NO<sub>3</sub><sup>-</sup> no ha podido ser analizada.

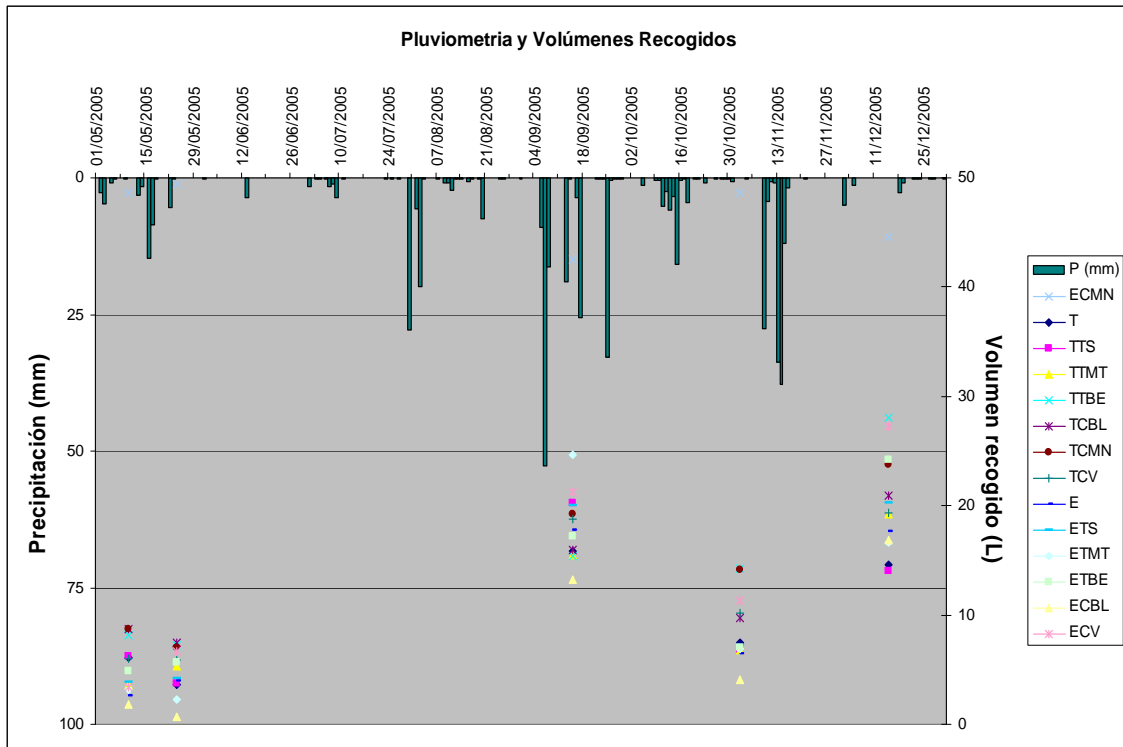
## **5.- DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS**





## 5.1.- Pluviometria y recogida de volúmenes lixiviados.

Gráfico 5: Pluviometria y Volúmenes recogidos



Como se puede observar en el gráfico 5, las fechas de recogida de volúmenes lixiviados, se ajustaban a los periodos de máxima precipitación. Las fechas exactas de dichas recogidas son:

- 1º Lixiviado: 10 de Mayo del 2005.
- 2º Lixiviado: 24 de Mayo del 2005.
- 3º Lixiviado: 15 de Septiembre del 2005.
- 4º Lixiviado: 2 de Noviembre del 2005.
- 5º Lixiviado: 15 de Diciembre del 2005.

Para un mismo muestreo, las diferencias de volumen son imputables a diversas causas: tipo de sustrato, nivelación de los contenedores y pérdidas en el proceso de lixiviado.

## 5.2.- METALES PESADOS

### 5.2.1.- Estudio individual de los diferentes lixiviados

Tan solo se han realizado gráficos para los metales detectados. Aún así, existen tratamientos que poseen concentraciones inferiores a la concentración característica, que se han representado en color negro. La variabilidad observada para cada tratamiento, queda reflejada en forma de líneas verticales, mediante de  $\pm Sd$  (Desviación estándar).



Las líneas de color fucsia y granate, muestran las cantidades de metal aportadas por tratamiento respecto el control. A partir de estos valores se ha calculado el promedio de incrementos, según la fórmula siguiente:

$$\text{Promedio de incrementos de lixiviados de los metales} = \frac{\sum (C_i - C_c)}{n}$$

$C_i$  = Concentración media de los tratamientos.

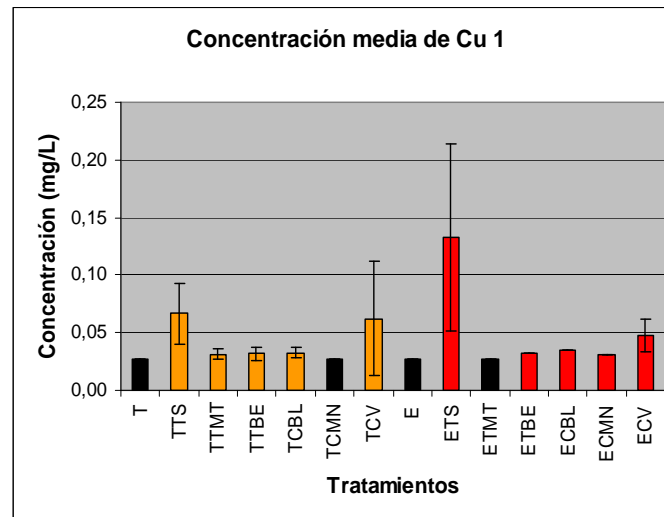
$C_c$  = Concentración media del control.

$n$  = N° de muestras.

En primer lugar se obtienen los **incrementos (Ci-Cc)** como diferencia entre los tratamientos con lodo y el control correspondiente a cada sustrato y se calcula su promedio; finalmente se calcula el **promedio de incrementos**.

### ▪ Lixiviado 1

**Gráfico 6: Concentración media de Cu en el lixiviado 1**



**Nota:** Barras negras indican, concentración inferior a la concentración característica.

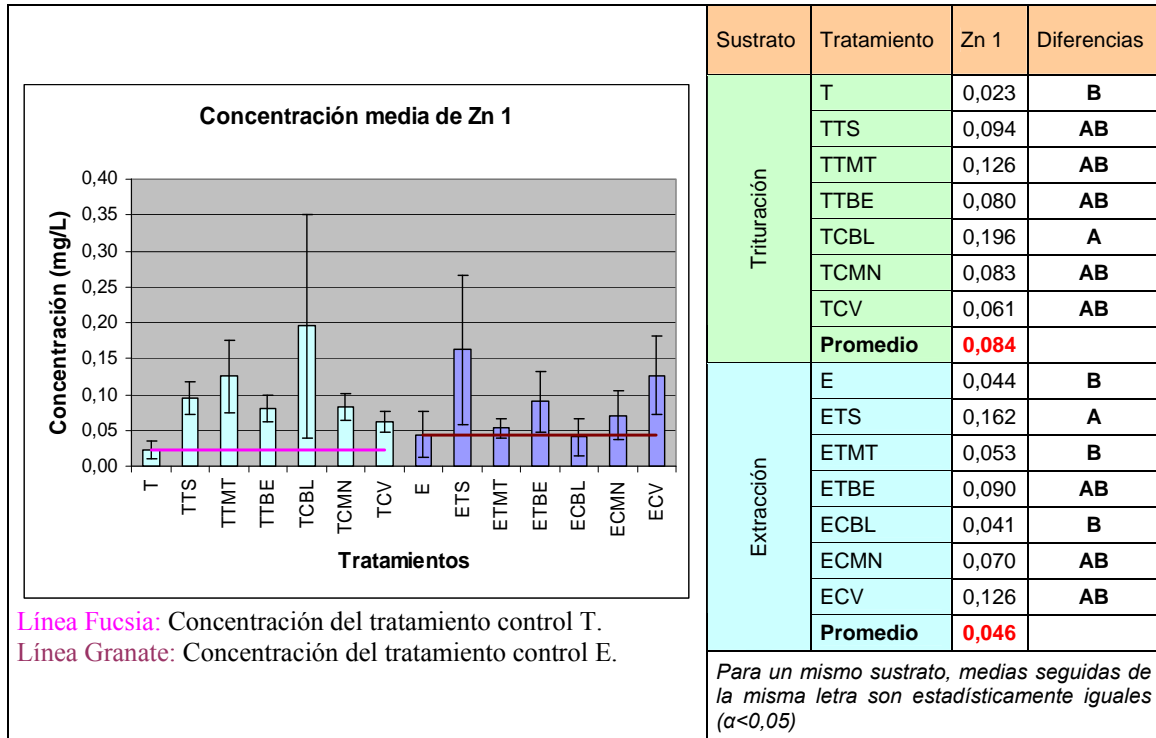
Existen cuatro tratamientos con contenidos de Cu no detectables: T, TCMN, E, ETMT.

Se observa que la mayoría de los tratamientos con lodos aumentan la concentración de Cu, para ambos sustratos. Destacamos con aumentos importantes, los tratamientos térmicos de Sabadell y en menor importancia, los compostados de Vilaseca en ambos sustratos. Dichos tratamientos muestran una alta desviación estándar (Tabla 11 y Gráfico 5), es decir, una importante variabilidad. Característica que se acentúa en el caso particular del tratamiento ETS, pero en parte atribuible a que, de forma excepcional, la media se ha obtenido de solo dos réplicas.

Debido a que los tratamientos control presentan contenidos de Cu inferiores a la concentración característica, no se ha podido realizar el tratamiento estadístico de estos resultados.



**Gráfico 7 y Tabla 26: Concentración media y tratamiento estadístico del Zn en el lixiviado 1**



Se observa un aumento variable de la concentración de Zn respecto de los tratamientos control T y E. Pero sin un patrón de comportamiento claro ni entre sustratos ni entre lodos. Casos a destacar: TCBL y ETS, con concentración media y desviación estándar altas. El lodo EBCL muestra una concentración ligeramente inferior al tratamiento control E.

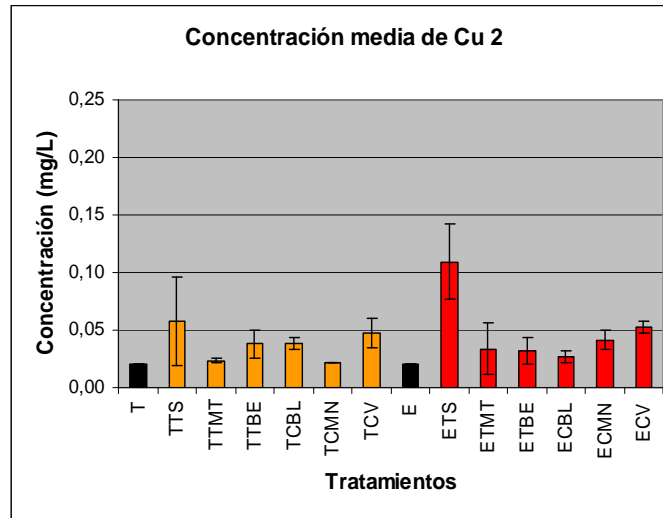
En la tabla 26, se observa para el sustrato trituración, que los tratamientos T y TCBL (tratamiento compostado Blanes) son significativamente diferentes. Para el sustrato extracción, se aprecia que el tratamiento ETS (tratamiento térmico Sabadell) es significativamente diferente de E, ETMT y ECBL. Los tratamientos restantes comparten semejanzas con los tratamientos anteriormente mencionados, estos son, ETBE, ECMN y ECV.

Según lo obtenido en el promedio de incrementos de la tabla 26 y el gráfico 7, el sustrato que mayor cantidad de Zn presenta en el Lixiviado 1, es el de trituración.



▪ **Lixiviado 2**

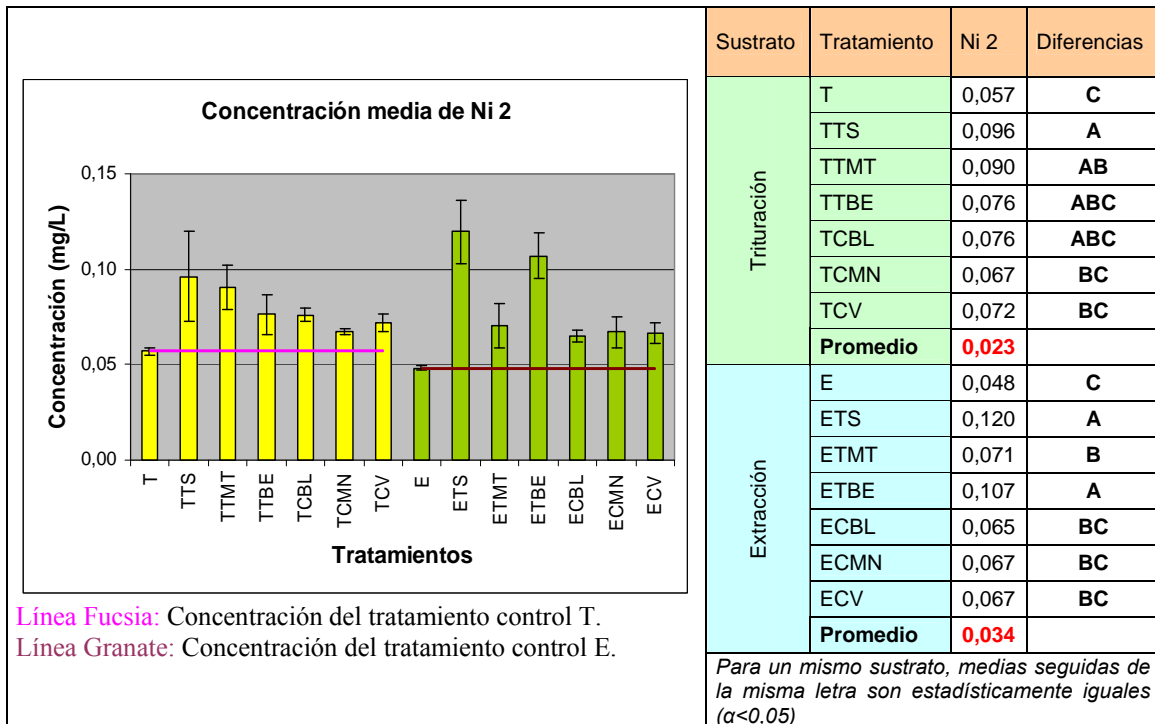
**Gráfico 8: Concentración media de Cu en el lixiviado 2**



**Nota:** Barras negras indican, concentración inferior a la concentración característica.

Los tratamientos no detectables son: T y E, lo que dificulta la comparación con el resto de tratamientos. Se observa un aumento sistemático en el metal Cu, respecto los tratamientos control T y E. Como se sucede para la mayoría de los lixiviados para el Cu, los casos más relevantes debido a las altas concentraciones y Sd, son los tratamientos con el lodo TS y en menor medida CV, para ambos sustratos.

**Gráfico 9 y Tabla 27: Concentración media y tratamiento estadístico de Ni en el lixiviado 2**



Sustrato	Tratamiento	Ni 2	Diferencias
Trituración	T	0,057	C
	TTS	0,096	A
	TTMT	0,090	AB
	TTBE	0,076	ABC
	TCBL	0,076	ABC
	TCMN	0,067	BC
	TCV	0,072	BC
	<b>Promedio</b>	<b>0,023</b>	
Extracción	E	0,048	C
	ETS	0,120	A
	ETMT	0,071	B
	ETBE	0,107	A
	ECBL	0,065	BC
	ECMN	0,067	BC
	ECV	0,067	BC
<b>Promedio</b>	<b>0,034</b>		

Para un mismo sustrato, medias seguidas de la misma letra son estadísticamente iguales ( $\alpha < 0,05$ )

Línea Fucsia: Concentración del tratamiento control T.  
Línea Granate: Concentración del tratamiento control E.



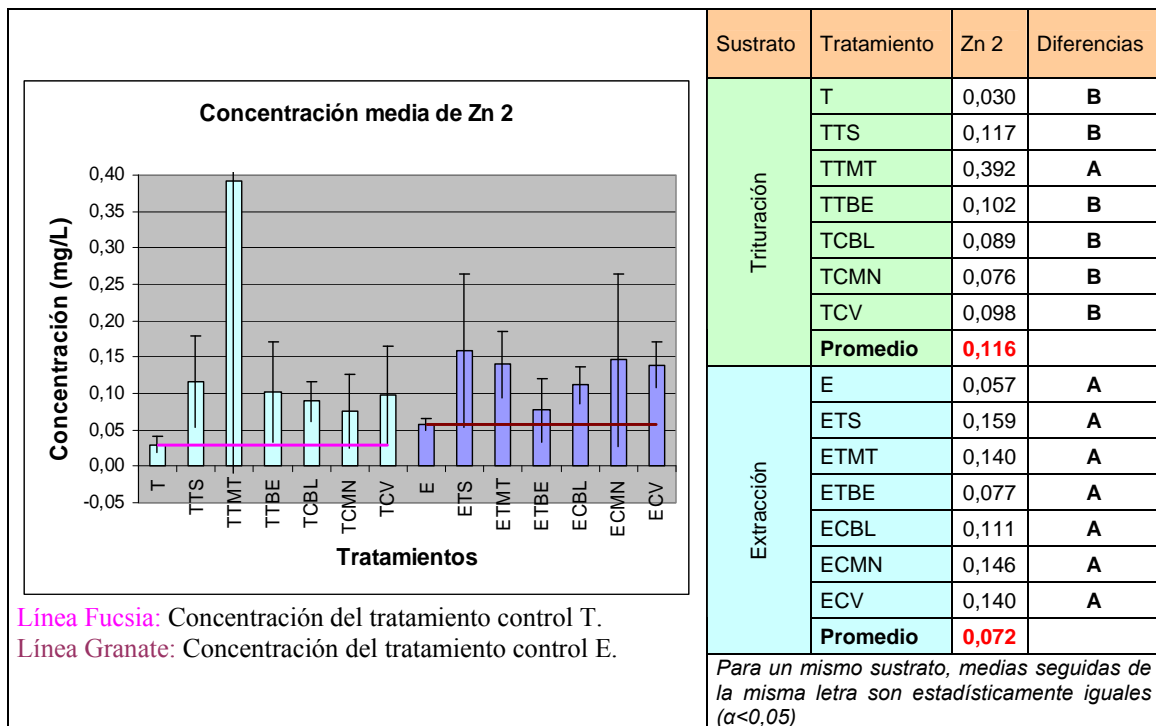
En este lixiviado ya aparece el Ni como metal detectable. Se produce un aumento sistemático de Ni respecto los tratamientos control, T y E. Los tratamientos con mayor contenido en metal Ni, son el térmico Sabadell para ambos sustratos, y el térmico Besós en el sustrato de extracción.

En la tabla 27 se ve, como para el sustrato trituración los tratamientos significativamente diferentes respecto al control son los tratamientos con fango térmico de Sabadell y Mataró. Los tratamientos restantes presentan contenidos similares entre si y estadísticamente no presentan diferencias significativas entre ellos ni respecto al control.

En el sustrato extracción, todos los tratamientos con fango térmico son estadísticamente diferentes respecto del control. Los tratamientos restantes presentan contenidos similares entre si, y no se diferencian del tratamiento control.

Según los resultados obtenidos en el promedio de incrementos de la tabla 27 y el gráfico 9, los dos sustratos tienen concentraciones de Ni similares.

**Gráfico 10 y Tabla 28: Concentración media y tratamiento estadístico de Zn en el lixiviado 2**



Como en el primer lixiviado, el Zn en el lixiviado 2 aumenta para todos los tratamientos con lodos, respecto al control. Aquí claramente el caso más remarcable es el TTMT cuyo contenido medio y Sd son mucho más altos que el resto de los tratamientos indicándonos su alta variabilidad, en este caso acusado en mayor medida, por el menor número de réplicas.

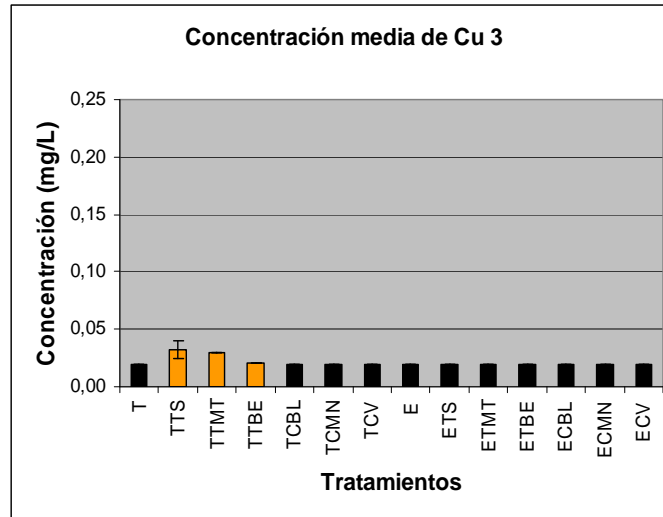
En la Tabla 28 se aprecia que para el sustrato T el único tratamiento que presenta diferencias significativas respecto al resto de tratamientos es el TMT. Para el sustrato E no existen diferencias significativas entre ninguno de los tratamientos.



Según lo obtenido en el promedio de incrementos de la tabla 28 y el gráfico 10, el sustrato que mayor concentración de Zn presenta en el lixiviado 2, es el de trituration.

▪ **Lixiviado 3**

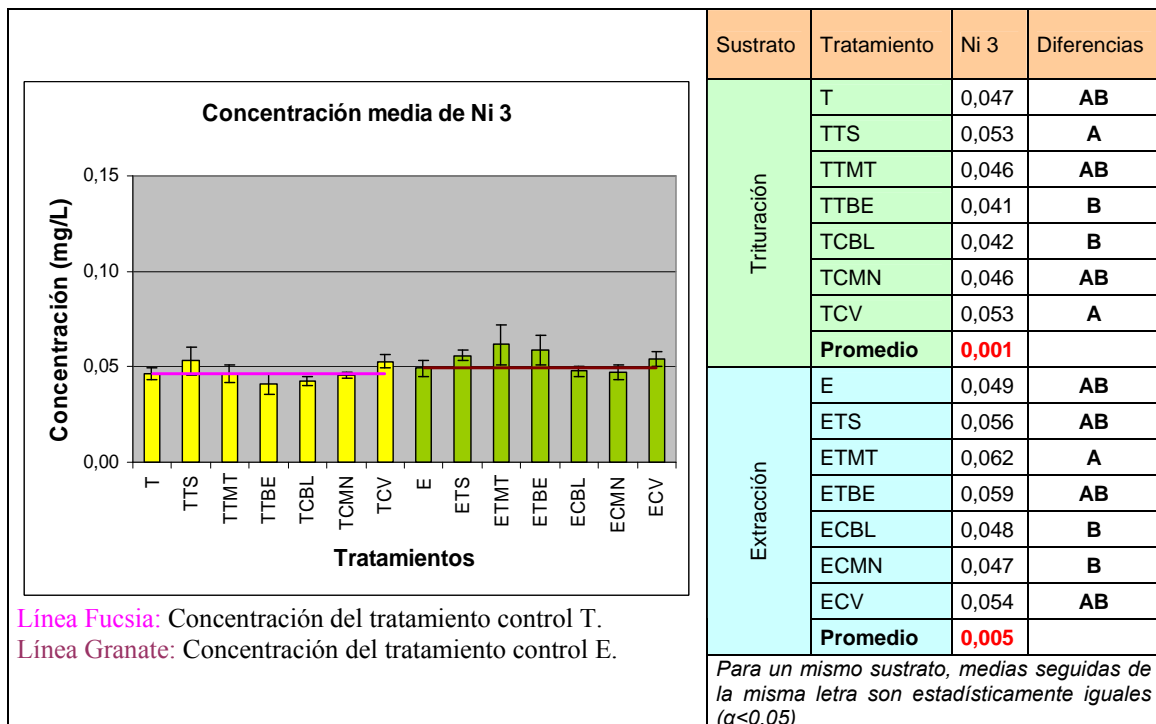
**Gráfico 11: Concentración media de Cu en el lixiviado 3**



**Nota:** Barras negras indican, concentración inferior a la concentración característica.

Tal y como se refleja en el gráfico, la mayoría de los tratamientos no son detectables. Los únicos tratamientos detectables son todos los térmicos aplicados al sustrato T, aunque con contenidos no muy alejados de la concentración característica.

**Gráfico 12 y Tabla 29: Concentración media y tratamiento estadístico de Ni en el lixiviado 3**



Línea Fucsia: Concentración del tratamiento control T.  
Línea Granate: Concentración del tratamiento control E.

Sustrato	Tratamiento	Ni 3	Diferencias
Trituración	T	0,047	AB
	TTS	0,053	A
	TTMT	0,046	AB
	TTBE	0,041	B
	TCBL	0,042	B
	TCMN	0,046	AB
	TCV	0,053	A
	<b>Promedio</b>	<b>0,001</b>	
Extracción	E	0,049	AB
	ETS	0,056	AB
	ETMT	0,062	A
	ETBE	0,059	AB
	ECBL	0,048	B
	ECMN	0,047	B
	ECV	0,054	AB
	<b>Promedio</b>	<b>0,005</b>	

Para un mismo sustrato, medias seguidas de la misma letra son estadísticamente iguales ( $\alpha < 0,05$ )

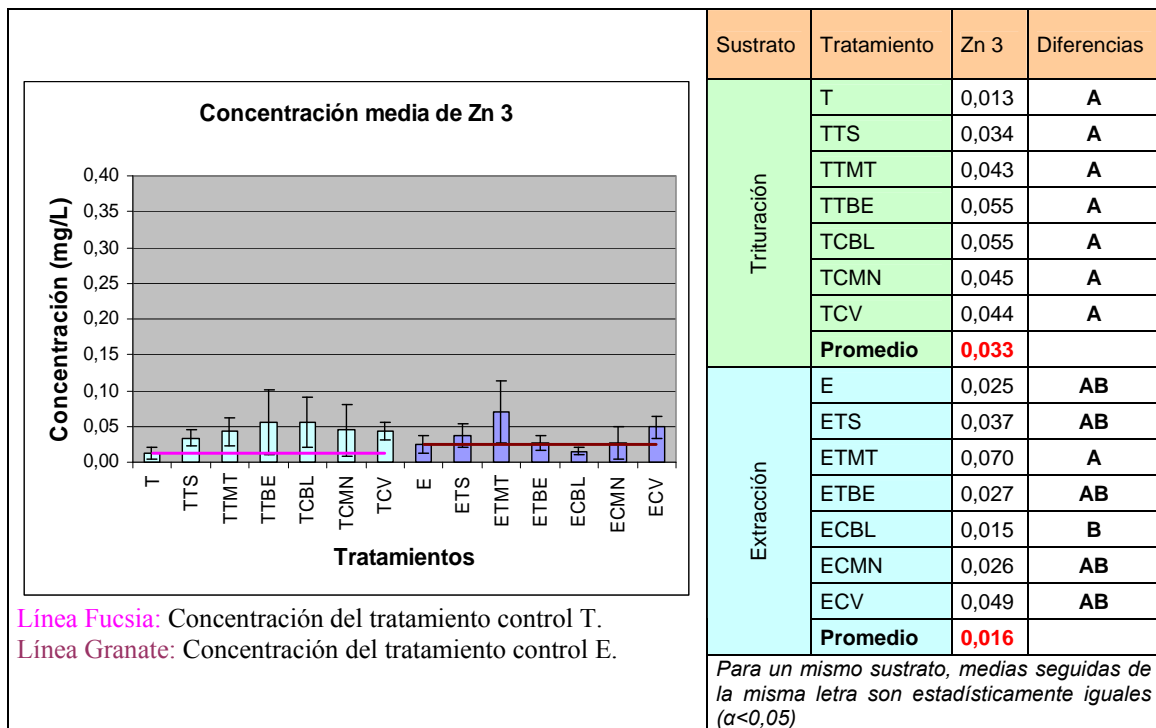


En el lixiviado 3 se observan concentraciones similares de Ni entre tratamientos, incluso hay seis tratamientos con concentraciones medias ligeramente inferiores a las de los tratamientos control. Estos tratamientos son: térmicos Mataró y Besós para el sustrato trituración, compostados Blanes y Manresa para ambos sustratos.

En la tabla 29 se aprecia que para el sustrato trituración, los tratamientos con diferencias significativas son, térmicos Sabadell y compostado Vilaseca, respecto térmico Besós y compostado Blanes. Hay que destacar que ningún tratamiento es diferente respecto al control.

En el caso del sustrato extracción, se observa que los tratamientos significativamente diferentes son, térmico Mataró, respecto los compostados Blanes y Manresa, pero igual que en el sustrato anterior, ningún tratamiento es diferente respecto al control.

**Gráfico 13 y Tabla 30: Concentración media y tratamiento estadístico de Zn en el lixiviado 3**



En el sustrato T la adición de lodos implica aumentos de Zn en el lixiviado 3, pero en menor medida que en los muestreos anteriores. En el sustrato E, solo se observan aumentos en tres tratamientos, térmicos Sabadell y Besós, y compostado Manresa. Para el tratamiento ECBL vemos que su contenido medio en Zn, es inferior al tratamiento control E. La mayoría de los tratamientos presentan una variabilidad bastante elevada, reflejada por las altas Sd.

Para el sustrato trituración no hay diferencias significativas entre los tratamientos.

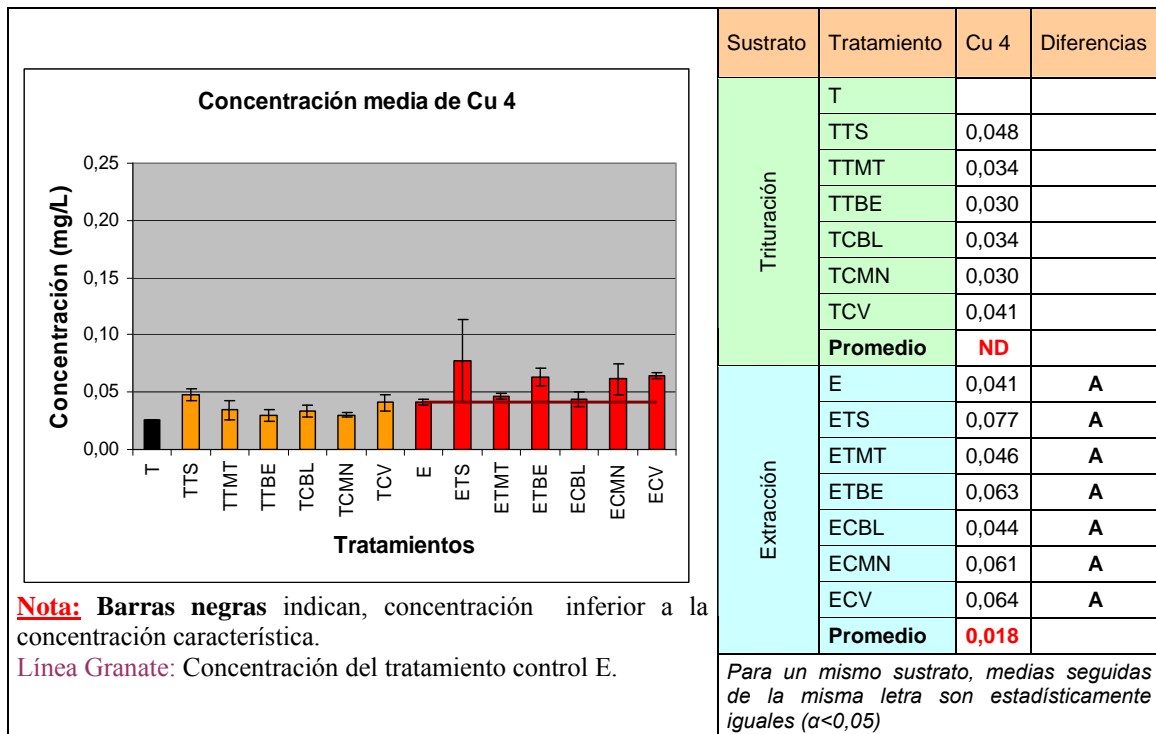
Para el sustrato extracción se aprecia que los tratamientos con diferencias significativas son, ETMT y ECBL. Ningún tratamiento es diferente respecto al control.



Según los resultados obtenidos en el promedio de incrementos de la tabla 30 y el gráfico 13, el sustrato de trituración tiene una concentración de Zn ligeramente mayor a la del extracción.

▪ **Lixiviado 4**

**Gráfico 14 y Tabla 31: Concentración media y tratamiento estadístico de Cu en el lixiviado 4**



El tratamiento control T, posee una concentración media inferior de Cu a la concentración característica, con lo que dificulta la comparación con el resto de tratamientos.

Se puede apreciar claramente que en el sustrato de extracción, es donde se encuentran los contenidos superiores de Cu.

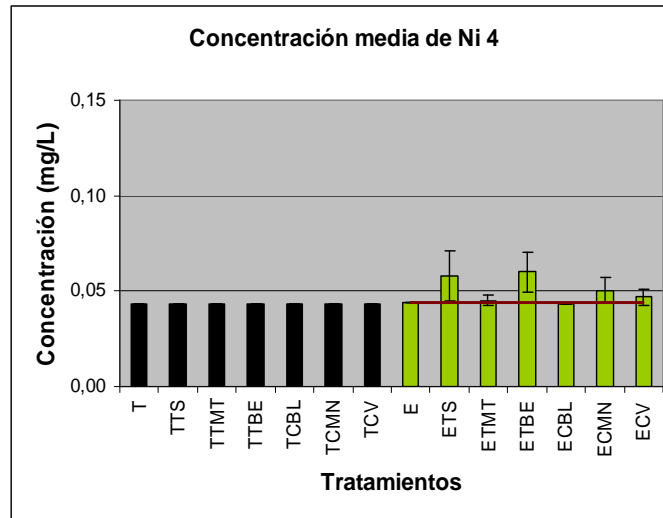
Se observan aumentos en ambos sustratos, respecto los tratamientos control, siendo los más acusados: ETS, ECV, ETBE y ECMN.

No hay diferencias entre ningún tratamiento en el sustrato de extracción.





**Gráfico 15: Concentración media de Ni en el lixiviado 4**

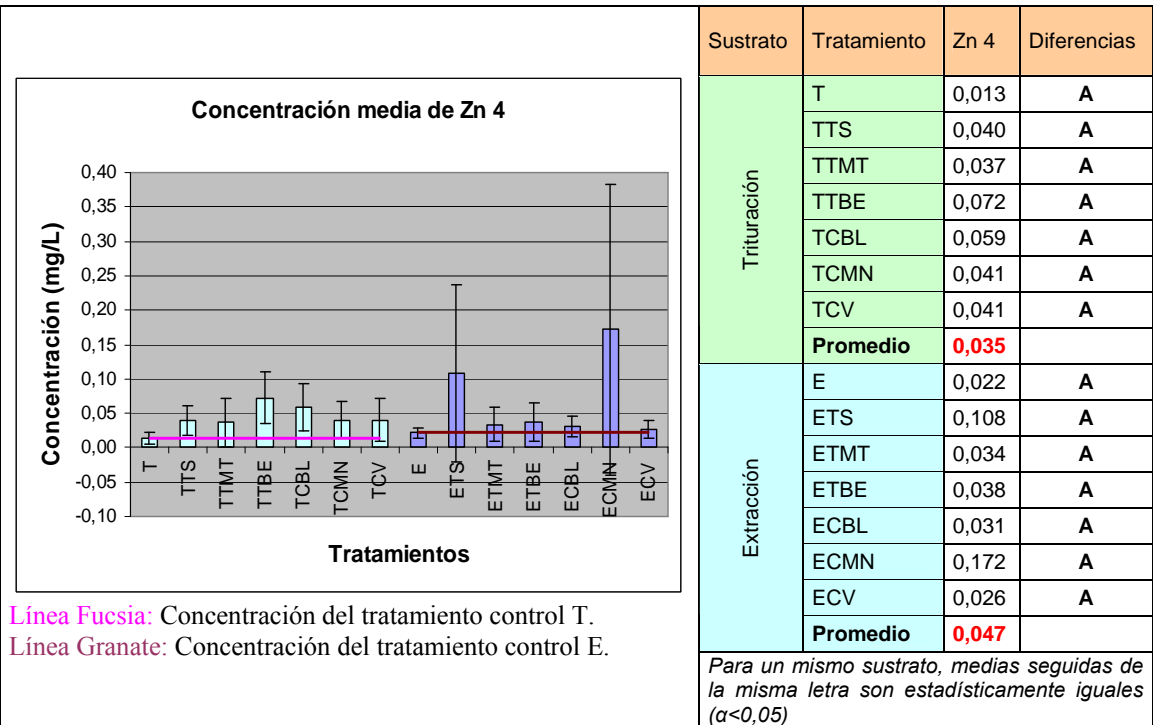


**Nota:** Barras negras indican, concentración inferior a la concentración característica.  
 Línea Granate: Concentración del tratamiento control E.

Todos los tratamientos con lodos en el sustrato de trituración poseen una concentración de Ni inferior a la concentración característica.

En el sustrato extracción se puede constatar una tendencia a la homogeneización, ya que dos tratamientos presentan contenidos similares respecto al control, y el resto únicamente ligeros aumentos.

**Gráfico 16 y Tabla 32: Concentración media y tratamiento estadístico de Zn en el lixiviado 4**



Línea Fucsia: Concentración del tratamiento control T.  
 Línea Granate: Concentración del tratamiento control E.

Sustrato	Tratamiento	Zn 4	Diferencias
Trituración	T	0,013	A
	TTS	0,040	A
	TTMT	0,037	A
	TTBE	0,072	A
	TCBL	0,059	A
	TCMN	0,041	A
	TCV	0,041	A
	<b>Promedio</b>	<b>0,035</b>	
Extracción	E	0,022	A
	ETS	0,108	A
	ETMT	0,034	A
	ETBE	0,038	A
	ECBL	0,031	A
	ECMN	0,172	A
	ECV	0,026	A
	<b>Promedio</b>	<b>0,047</b>	

Para un mismo sustrato, medias seguidas de la misma letra son estadísticamente iguales ( $\alpha < 0,05$ )

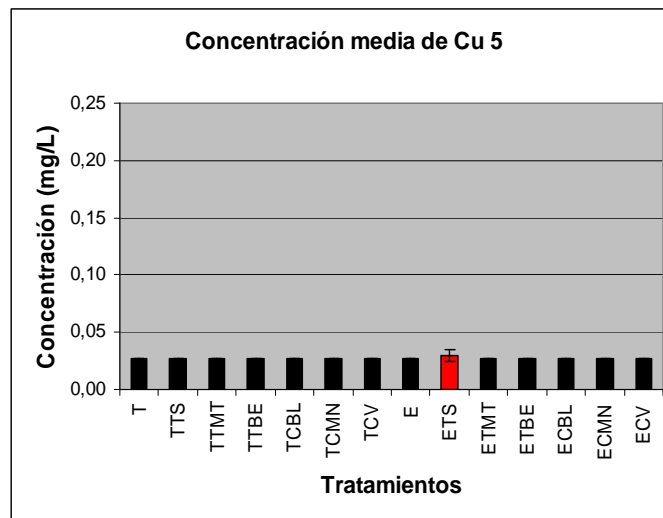


Como en los anteriores lixiviados, se observa un aumento sistemático del contenido de Zn en los tratamientos con fangos respecto al control. Los casos claramente destacables son el compostado Manresa y el térmico Sabadell para el sustrato extracción. Sendos casos muestran altas desviaciones estándar, situación que nos indica que existe una alta variabilidad entre las muestras de cada uno de los tratamientos.

El estudio estadístico no muestra diferencias significativas para ningún tratamiento en ambos sustratos.

▪ **Lixiviado 5**

**Gráfico 17: Concentración media de Cu en el lixiviado 5**

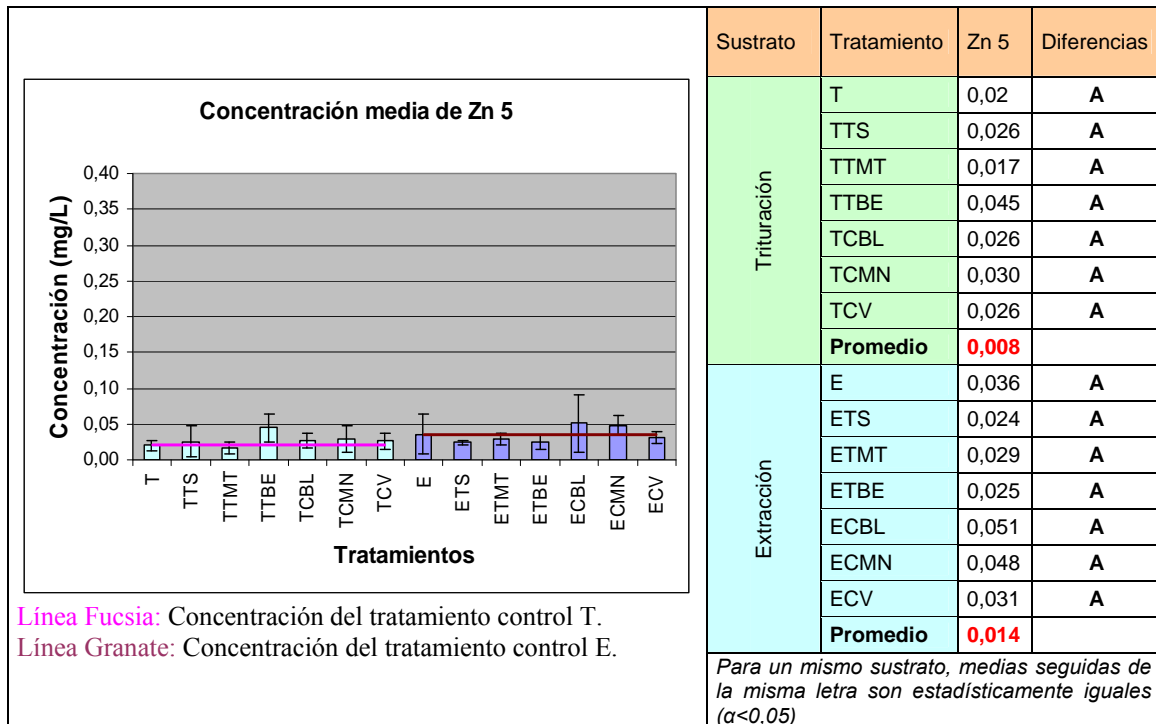


**Nota:** Barras negras indican, concentración inferior a la concentración característica.

Aquí solo se observa un único caso detectable, el térmico Sabadell, aunque el valor resultante está muy próximo a la concentración característica. Este tratamiento para la mayoría de lixiviados es el que presenta mayor contenido medio. Así pues transcurridos 6 meses desde el inicio de la experiencia, se observa una clara tendencia a la homogeneización y disminución del contenido de este metal en los lixiviados.



**Gráfico 18 y Tabla 33: Concentración media y tratamiento estadístico de Zn en el lixiviado 5**



En este lixiviado se observan contenidos de Zn similares entre si. Algunos casos presentan concentraciones inferiores a la de los tratamientos control, estos son: térmico Mataró para ambos sustratos, térmicos Sabadell y Besós, y compostado Vilaseca para el sustrato de Extracción.

El estudio estadístico no muestra diferencias significativas para ningún tratamiento en ambos sustratos.

**5.2.2.- Comparación entre el tratamiento térmico y el compostado.****TABLA 34: Comparación entre el tratamiento de fangos dentro del mismo sustrato.**

Sustrato	Trat	Zn 1	Dif	Cu 2	Dif	Ni 2	Dif	Zn 2	Dif	Ni 3	Dif	Zn 3	Dif	Cu 4	Dif	Zn 4	Dif	Zn 5	Dif
Trituración	T	0,100	A	0,038	A	0,088	A	0,204	A	0,047	A	0,044	A	0,037	A	0,050	A	0,029	A
	C	0,113	A	0,043	A	0,072	A	0,088	A	0,047	A	0,048	A	0,035	A	0,047	A	0,027	A
Extracción	T	0,101	A	0,058	A	0,099	A	0,125	A	0,059	A	0,044	A	0,062	A	0,060	A	0,026	A
	C	0,079	A	0,040	A	0,066	A	0,132	A	0,050	B	0,030	A	0,056	A	0,076	A	0,043	A
T	Tratamiento Térmico																		
C	Tratamiento Compostado																		
Trat	Tratamiento																		
Dif	Diferencias																		
Letras Diferentes	Existen diferencias significativas entre tratamientos dentro del mismo sustrato																		
Unidades	Concentración de metal expresada en mg/L																		

El único caso, en el que se encuentran diferencias significativas entre los procesos de tratamiento de los lodos dentro del mismo sustrato, es para el metal Ni en el lixiviado 3. No obstante se considera que dichas diferencias de forma práctica no son importantes, ya que las medias son muy próximas. Sorprende la falta de diferencias entre según que medias, explicable en general por la alta variabilidad registrada.



### 5.2.3.- Evolución del contenido de metales en los lixiviados a lo largo del tiempo.

#### ▪ Evolución del Cu

Gráfico 19: Evolución del Cu en el sustrato trituración

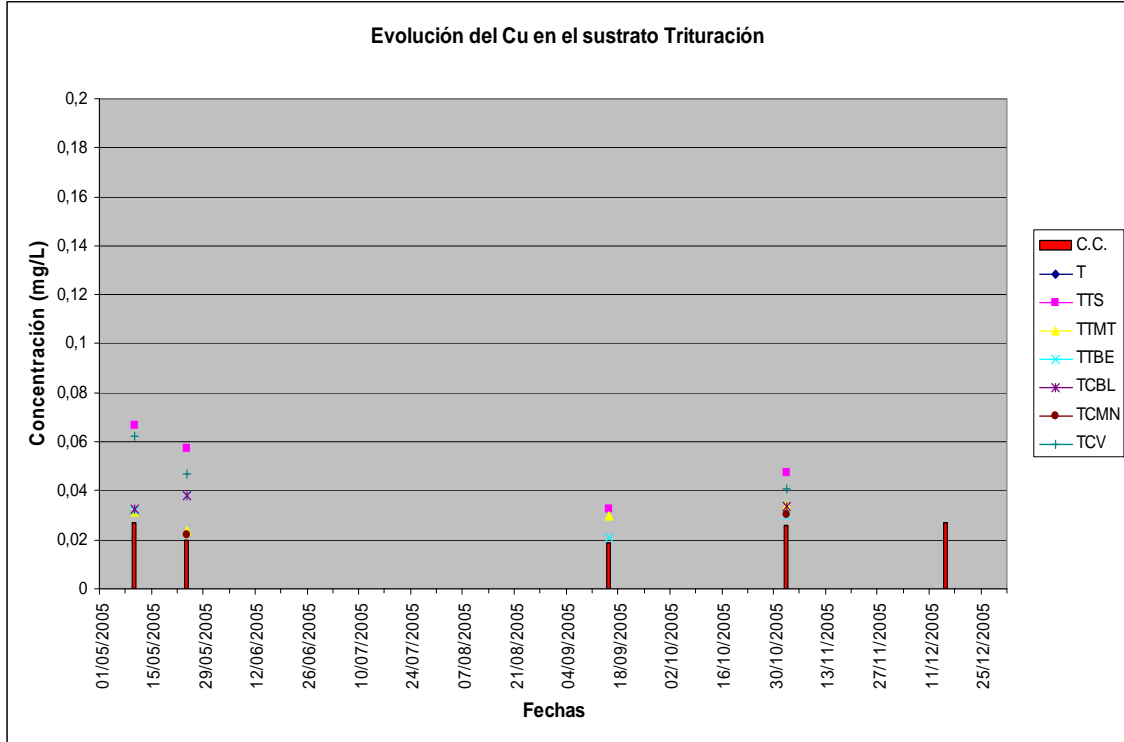
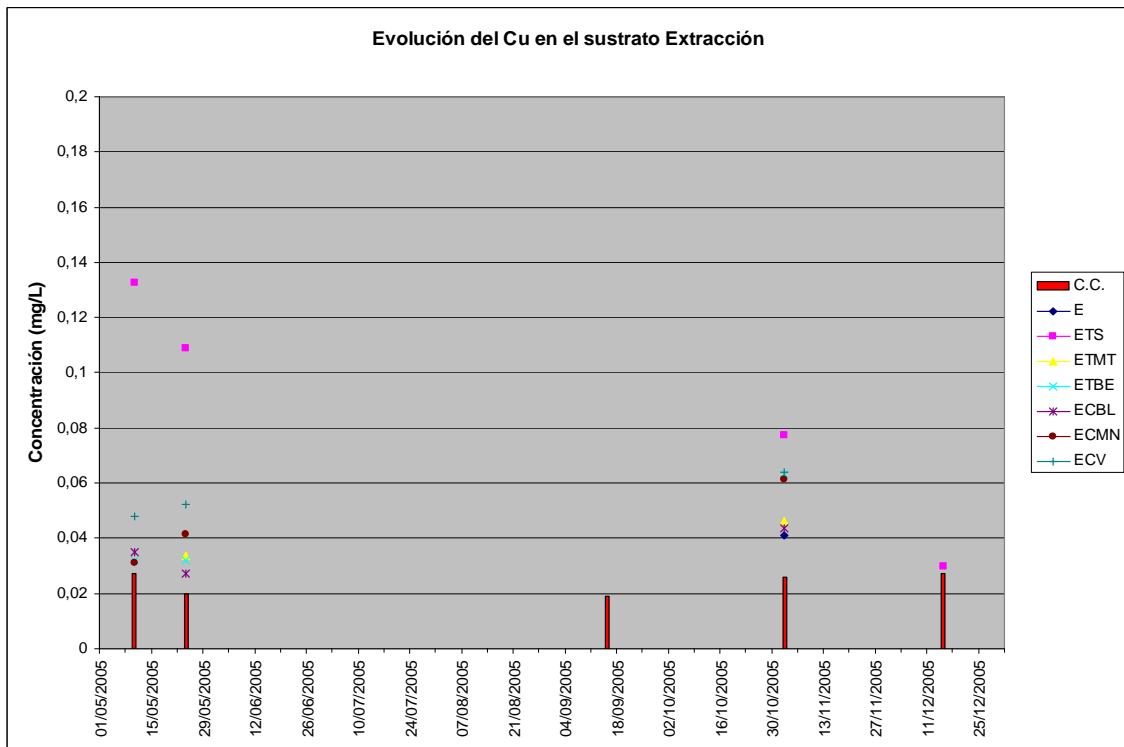


Gráfico 20: Evolución del Cu en el sustrato extracción



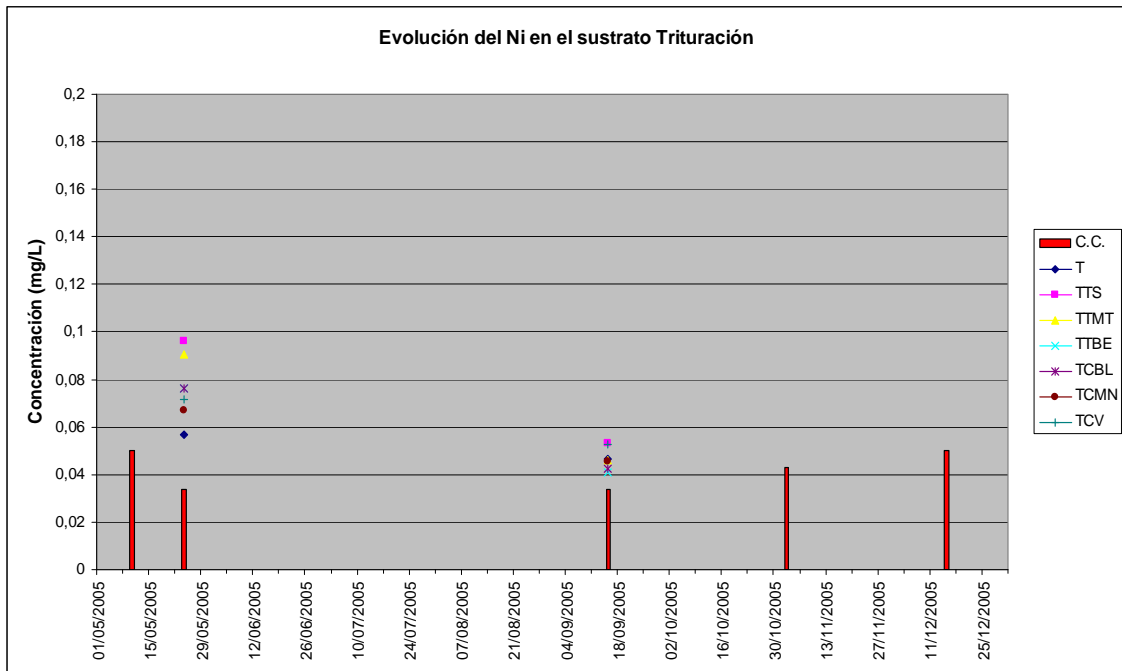


Los sustratos con lodos térmicos de Sabadell, presentan claramente mayor concentración de Cu para todos los lixiviados; seguidos ambos por los tratamientos compostados de Vilaseca (Gráficos 19 y 20).

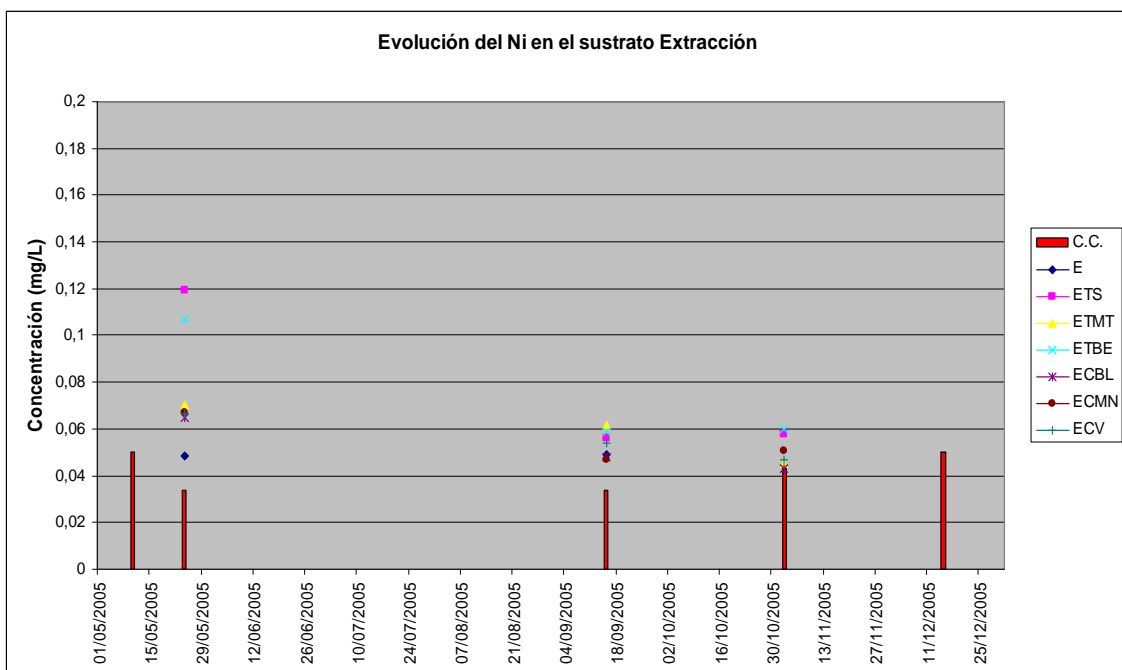
En general se observa una tendencia a la disminución a lo largo del tiempo de la concentración de Cu.

▪ **Evolución del Ni**

**Gráfico 21: Evolución del Ni en el sustrato trituración**



**Gráfico 22: Evolución del Ni en el sustrato extracción**





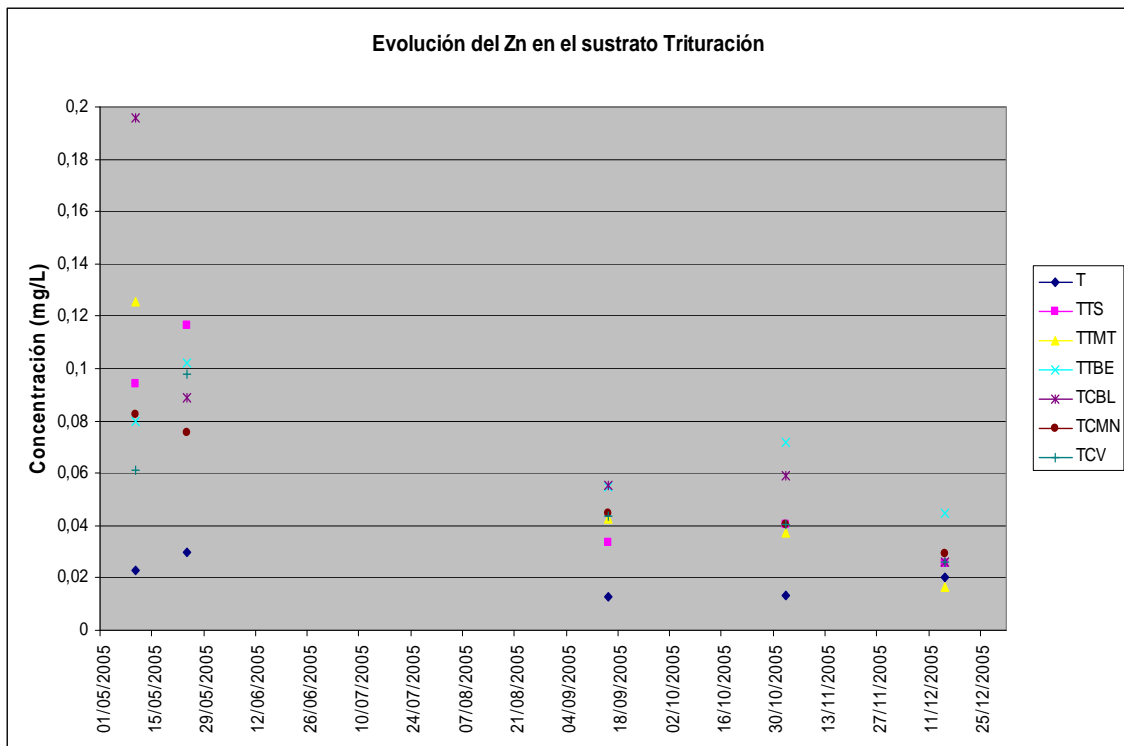
Al inicio de la experiencia los tratamientos térmicos de Sabadell, tanto para el sustrato trituración como para el de extracción, presentan claramente mayor concentración de Ni para todos los lixiviados. En este caso también se observa que el tratamiento térmico de Besós para sustrato extracción, posee valores altos de concentración de Ni.

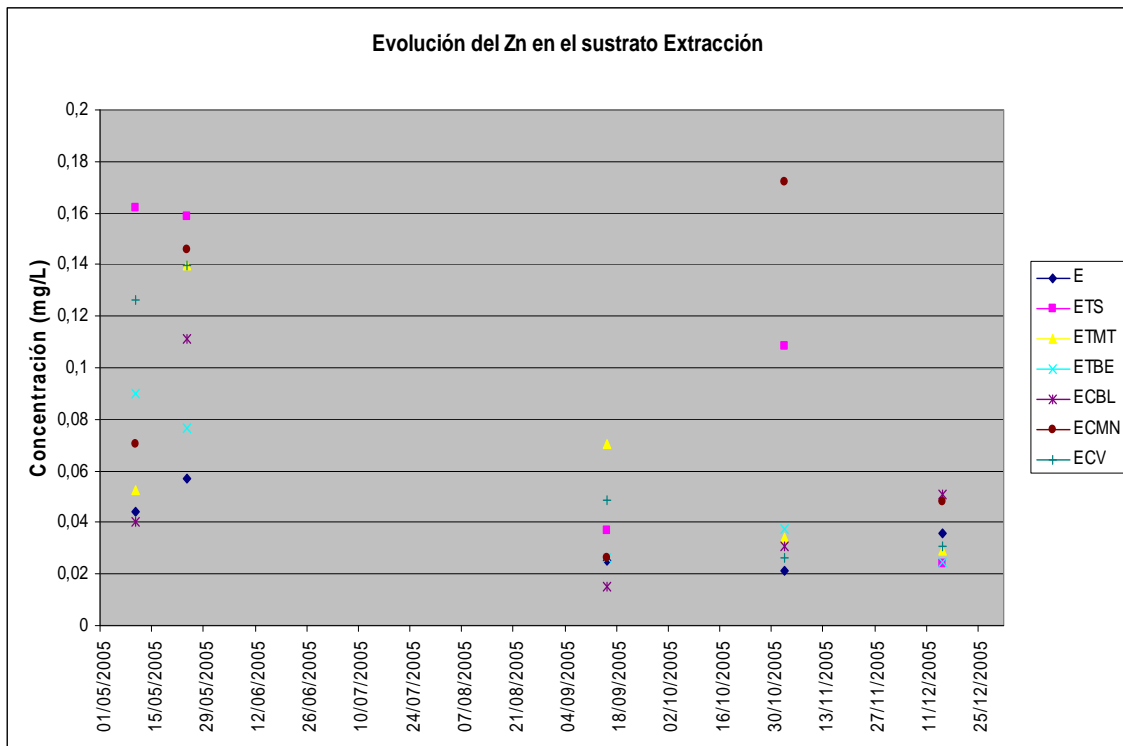
En general se observa una tendencia clara a la disminución de la concentración de Ni a lo largo del tiempo para todos los tratamientos.

Cabe destacar que para el caso del Ni, las concentraciones obtenidas para el lixiviado 1 y 5 fueron inferiores a su concentración característica (Gráficos 21 y 22).

▪ **Evolución del Zn**

**Gráfico 23: Evolución del Zn en el sustrato trituración**



**Gráfico 24: Evolución del Zn en el sustrato extracción**

En este caso es obvio que existe una variabilidad general entre los cinco lixiviados. No obstante se observa una tendencia general a la disminución de la concentración de Zn de todos los tratamientos a lo largo del tiempo, semejante a los casos anteriores (Gráficos 23 y 24). Se exceptúan en el sustrato de extracción con lodos de Manresa y Sabadell.

#### 5.2.4.- Estimación de pérdidas de metales por lixiviación.

Debido al tipo de terreno, al comportamiento hidrológico variable y a la irregularidad de los volúmenes de recogida de lixiviados; se ha considerado realizar esta estimación para reflejar el escenario más desfavorable por pérdidas por lixiviación.

##### ▪ Bases para el cálculo

Para el cálculo de estas pérdidas, se ha definido la peor de las situaciones posibles, dicha situación es aquella que supondría la máxima pérdida por lixiviación. Por ello hemos escogido entre los cuatro volúmenes y concentraciones de las cuatro réplicas por tratamiento, aquel volumen y concentración, cuyo valor sea máximo.

La pérdida máxima de metal (mg/contenedor), se ha calculado multiplicando la concentración máxima por el volumen máximo.

**Pérdida máxima por lixiviación (mg metal/contenedor)= *concentración máxima x volumen máximo***

Para aquellos metales cuya concentración era inferior a la concentración característica de trabajo, se ha escogido esta como concentración máxima.





El porcentaje de pérdidas totales respecto la aportación, se ha obtenido mediante la ecuación siguiente:

**Pérdidas máximas netas por lixiviación:**

$$\frac{\Sigma (\text{pérdidas } L_i \text{ Trat}_i - \text{pérdidas } L_i \text{ blanco})}{\text{metales aport trat}} \times 100$$

*Pérdidas  $L_i$   $\text{Trat}_i$ :* Pérdidas máximas por lixiviado.

*Pérdidas  $L_i$  blanco:* Pérdidas de los tratamientos control.

*Metales aport trat:* Metales aportados por tratamiento al inicio de la experiencia.

En las tablas 35 a 39 se muestran los resultados obtenidos, y en la tabla 40 se presentan las aportaciones de metal realizadas con la aplicación de lodos.

Al final se obtiene la tabla 41, donde la pérdida total por lixiviación ha sido calculada para cada sustrato y para cada tratamiento, expresada en porcentaje (%).

▪ **Estimación de pérdidas máximas por lixiviado**

**TABLA 35: Estimación máxima de pérdidas en el lixiviado 1 (10/05/2005).**

Tratamiento	Volumen (L)	Concentración máxima (mg/L)		Pérdida máxima por contenedor (mg)	
		Cu	Zn	Cu	Zn
T	9,80	0,027	0,037	0,265	0,363
TTS	9,80	0,094	0,124	0,921	1,215
TTMT	6,40	0,035	0,166	0,224	1,062
TTBE	9,75	0,036	0,098	0,351	0,956
TCBL	12,10	0,036	0,419	0,436	5,070
TCMN	10,40	0,027	0,111	0,281	1,154
TCV	8,65	0,120	0,082	1,038	0,709
E	4,40	0,027	0,089	0,119	0,392
ETS	6,45	0,190	0,235	1,226	1,516
ETMT	3,50	0,027	0,066	0,095	0,231
ETBE	6,10	0,032	0,133	0,195	0,811
ECBL	3,40	0,035	0,079	0,119	0,269
ECMN	3,40	0,031	0,115	0,105	0,391
ECV	5,70	0,061	0,202	0,348	1,151
		<b>C.C. Cu</b>	<b>0,027</b>		
		<b>C.C. Zn</b>	<b>0,009</b>		



TABLA 36: Estimación máxima de pérdidas en el lixiviado 2 (24/05/2005).

Tratamiento	Volumen (L)	Concentración máxima (mg/L)			Pérdida máxima por contenedor (mg)		
	máximo	Cu	Ni	Zn	Cu	Ni	Zn
T	8,05	0,020	0,059	0,047	0,161	0,475	0,378
TTS	10,40	0,112	0,129	0,203	1,165	1,342	2,111
TTMT	10,00	0,025	0,103	0,845	0,250	1,030	8,450
TTBE	10,40	0,052	0,091	0,197	0,541	0,946	2,049
TCBL	10,95	0,045	0,079	0,109	0,493	0,865	1,194
TCMN	10,75	0,022	0,069	0,150	0,237	0,742	1,613
TCV	8,95	0,066	0,076	0,191	0,591	0,680	1,709
E	7,10	0,020	0,049	0,064	0,142	0,348	0,454
ETS	7,75	0,149	0,141	0,303	1,155	1,093	2,348
ETMT	4,20	0,067	0,082	0,209	0,281	0,344	0,878
ETBE	6,80	0,049	0,123	0,136	0,333	0,836	0,925
ECBL	0,95	0,032	0,068	0,140	0,030	0,065	0,133
ECMN	2,05	0,048	0,079	0,316	0,098	0,162	0,648
ECV	8,20	0,056	0,074	0,185	0,459	0,607	1,517
			<b>C.C. Cu</b>	<b>0,020</b>			
			<b>C.C. Ni</b>	<b>0,034</b>			
			<b>C.C. Zn</b>	<b>0,007</b>			

TABLA 37: Estimación máxima de pérdidas en el lixiviado 3 (15/09/2005).

Tratamiento	Volumen (L)	Concentración máxima (mg/L)			Pérdida máxima por contenedor (mg)		
	máximo	Cu	Ni	Zn	Cu	Ni	Zn
T	20,50	0,019	0,051	0,024	0,390	1,046	0,492
TTS	23,00	0,039	0,059	0,049	0,897	1,357	1,127
TTMT	27,00	0,030	0,051	0,065	0,810	1,377	1,755
TTBE	20,00	0,021	0,048	0,117	0,420	0,960	2,340
TCBL	18,00	0,019	0,045	0,095	0,342	0,810	1,710
TCMN	27,00	0,019	0,048	0,097	0,513	1,296	2,619
TCV	27,50	0,019	0,057	0,056	0,523	1,568	1,540
E	22,00	0,019	0,054	0,038	0,418	1,188	0,836
ETS	24,50	0,019	0,059	0,050	0,466	1,446	1,225
ETMT	27,50	0,019	0,073	0,102	0,523	2,008	2,805
ETBE	21,50	0,019	0,066	0,037	0,409	1,419	0,796
ECBL	21,00	0,019	0,050	0,020	0,399	1,050	0,420
ECMN	19,50	0,019	0,053	0,058	0,371	1,034	1,131
ECV	27,50	0,019	0,059	0,070	0,523	1,623	1,925
			<b>C.C. Cu</b>	<b>0,019</b>			
			<b>C.C. Ni</b>	<b>0,034</b>			
			<b>C.C. Zn</b>	<b>0,005</b>			



TABLA 38: Estimación máxima de pérdidas en el lixiviado 4 (02/11/2005).

Tratamiento	Volumen (L)	Concentración máxima (mg/L)			Pérdida máxima por contenedor (mg)		
	máximo	Cu	Ni	Zn	Cu	Ni	Zn
T	17,50	0,026	0,043	0,023	0,455	0,753	0,403
TTS	18,50	0,051	0,043	0,062	0,944	0,796	1,147
TTMT	14,00	0,043	0,043	0,090	0,602	0,602	1,260
TTBE	20,00	0,033	0,043	0,104	0,660	0,860	2,080
TCBL	14,50	0,040	0,043	0,107	0,580	0,624	1,552
TCMN	18,25	0,032	0,043	0,074	0,584	0,785	1,351
TCV	16,50	0,051	0,043	0,075	0,842	0,710	1,238
E	13,50	0,044	0,044	0,028	0,594	0,594	0,378
ETS	10,50	0,127	0,072	0,296	1,334	0,756	3,108
ETMT	9,25	0,050	0,047	0,059	0,463	0,435	0,546
ETBE	8,50	0,074	0,067	0,069	0,629	0,570	0,587
ECBL	7,75	0,048	0,043	0,045	0,372	0,333	0,349
ECMN	4,50	0,081	0,055	0,484	0,365	0,248	2,178
ECV	13,50	0,067	0,050	0,036	0,905	0,675	0,486
			<b>C.C. Cu</b>	<b>0,026</b>			
			<b>C.C. Ni</b>	<b>0,043</b>			
			<b>C.C. Zn</b>	<b>0,008</b>			

TABLA 39: Estimación máxima de pérdidas en el lixiviado 5 (15/12/2005).

Tratamiento	Volumen (L)	Concentración máxima (mg/L)		Pérdida máxima por contenedor (mg)		
	máximo	Cu	Zn	Cu	Zn	
T	28,00	0,027	0,030	0,756	0,840	
TTS	28,00	0,027	0,057	0,756	1,596	
TTMT	24,00	0,027	0,022	0,648	0,528	
TTBE	28,00	0,027	0,061	0,756	1,708	
TCBL	28,00	0,027	0,038	0,756	1,064	
TCMN	28,00	0,027	0,057	0,756	1,596	
TCV	28,00	0,027	0,040	0,756	1,120	
E	28,00	0,027	0,076	0,756	2,128	
ETS	28,00	0,036	0,029	1,008	0,812	
ETMT	22,75	0,027	0,041	0,614	0,933	
ETBE	28,00	0,027	0,036	0,756	1,008	
ECBL	22,75	0,027	0,105	0,614	2,389	
ECMN	17,85	0,027	0,067	0,482	1,196	
ECV	28,00	0,027	0,042	0,756	1,176	
			<b>C.C. Cu</b>	<b>0,027</b>		
			<b>C.C. Zn</b>	<b>0,008</b>		



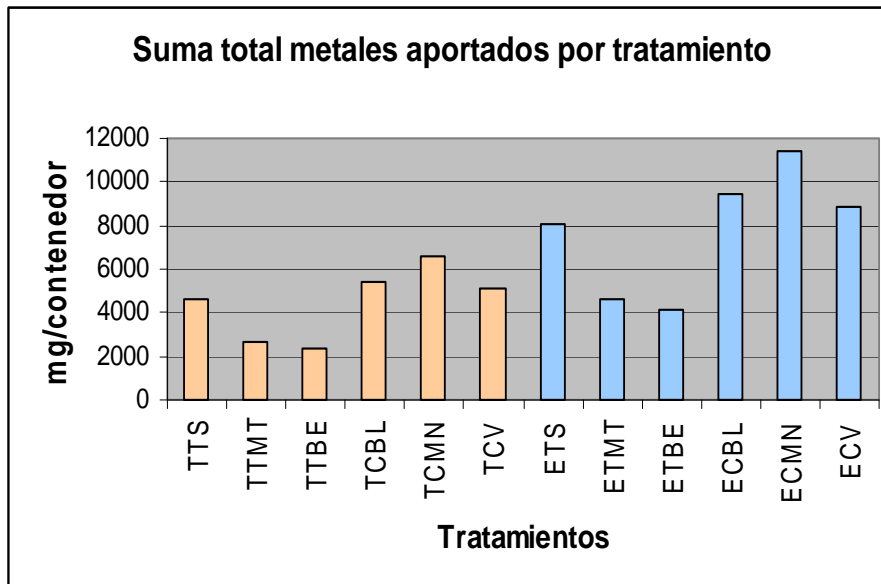
▪ **Aportaciones iniciales de metales por tratamiento**

**TABLA 40: Metales aportados al inicio de la experiencia.**

Tratamiento	mg Cu/cont	mg Cd/cont	mg Cr/cont	mg Ni/cont	mg Pb/cont	mg Zn/cont	Suma total tratamiento
TTS	1303,61	0,99	363,70	188,09	126,03	2660,85	4643,28
TTMT	606,58	0,88	215,01	72,83	70,49	1685,70	2651,49
TTBE	466,98	0,95	412,82	94,68	154,00	1262,67	2392,11
TCBL	1904,95	1,61	333,22	145,50	246,45	2825,52	5457,25
TCMN	820,40	1,57	1075,78	126,43	276,47	4338,34	6638,99
TCV	1516,90	1,50	217,85	114,39	120,79	3143,21	5114,63
<b>Promedio</b>							<b>4482,96</b>
ETS	2252,65	1,71	628,48	325,03	217,78	4597,99	8023,65
ETMT	1048,13	1,51	371,52	125,85	121,80	2912,80	4581,62
ETBE	806,91	1,64	713,34	163,61	266,10	2181,82	4133,42
ECBL	3281,40	2,77	574,00	250,63	424,53	4867,14	9400,45
ECMN	1413,19	2,70	1853,11	217,79	476,23	7473,06	11436,07
ECV	2612,95	2,59	375,25	197,04	208,06	5414,37	8810,27
<b>Promedio</b>							<b>7730,91</b>

En la tabla 40 y en el promedio se puede observar claramente, que el mayor peso de “metal total aportado” se produce en el residuo de extracción, debido lógicamente a que hemos añadido una dosis de lodo más alta que en el residuo de trituración.

**Gráfico 25: Total de metales aportados por tratamiento**



Los aportes de metales de los tratamientos de lodo con sustrato extracción, son casi el doble de los de trituración, exactamente 1,7 veces.

Como se observa en el histograma los tratamientos de lodo con sustrato extracción con procedencia Manresa, Blanes, Vilaseca y Sabadell, son los que han recibido una mayor cantidad de metales en mg por contenedor.



▪ **Estimación total de pérdidas por lixiviación**

**TABLA 41: % Pérdidas de metal por lixiviación durante el periodo de 6 meses.**

% PÉRDIDA METAL POR LIXIVIACIÓN=				$\frac{\Sigma (\text{pérdidas } L_i \text{ Trat}_i - \text{pérdidas } L_i \text{ blanco})}{\text{metales aport trat}} \times 100$		
Tratamiento	% Pérdida Cu	% Pérdida Ni	% Pérdida Zn	% Pérdida Cu	% Pérdida Ni	% Pérdida Zn
TTS	0,204	0,649	0,177	0,104	0,539	0,313
TTMT	0,084	1,011	0,628			
TTBE	0,150	0,521	0,527			
TCBL	0,030	0,018	0,287			
TCMN	0,042	0,435	0,135			
TCV	0,114	0,598	0,122			
ETS	0,140	0,358	0,105	0,071	0,424	0,051
ETMT	-0,005	0,522	0,041			
ETBE	0,036	0,425	-0,003			
ECBL	-0,015	-0,272	-0,013			
ECMN	-0,043	-0,315	0,018			
ECV	0,037	0,393	0,038			

Si observamos la tabla de manera horizontal, los tipos de lodo que lixivian en mayor o menor cantidad, según tratamiento y sustrato son:

Sustratos	Lodos térmicos		Lodos compostados	
	Trituración	Extracción	Trituración	Extracción
<b>Mayor Lixiviación</b>	TTMT (Mataró)	ETS (Sabadell)	TCV (Vilaseca)	ECV (Vilaseca)
<b>Menor Lixiviación</b>	TTS (Sabadell)	ETBE (Besós)	TCBL (Blanes)	ECBL (Blanes)

Cabe destacar que los tipos de lodos compostados Vilaseca y Blanes, lixivian de igual manera para ambos sustratos.

A nivel de sustratos, el que mayor lixiviana es el de trituración, siendo la cantidad lixiviada casi el doble que la lixiviada por el sustrato de extracción.

Las pérdidas estimadas de metal por sustrato no llegarían a un 0,55%. Este porcentaje corresponde al metal Ni, que es el metal con mayor porcentaje lixiviado.

Los porcentajes comentados anteriormente son pequeños, por lo tanto se puede decir que las pérdidas por lixiviación son mínimas y no suponen un riesgo de contaminación.

**5.2.5.- Evaluación del posible impacto ambiental de los lixiviados**

Para poder evaluar si la pérdida por lixiviación de metales pesados puede causar algún impacto ambiental, se han escogido los límites de concentración de los metales pesados Cd, Cr, Cu, Ni, Pb y Zn de dos reales decretos diferentes (**RD 995/2000** y el **RD 140/2003**).



La elección de sendos decretos se ha establecido por su ámbito de aplicación u objetivos, siendo éstos:

- El **RD 995/2000** marca los objetivos de calidad para determinadas sustancias contaminantes en las aguas superficiales continentales.
- El **RD 140/2003** establece los criterios sanitarios de la calidad del agua de consumo humano.

**TABLA 42: Límites de concentración (mg/L) de los metales pesados según normativa**

Metales	RD 995/2000 Objetivos de calidad de las aguas superficiales		RD 140/2003 Calidad del agua de consumo humano	
	Muestras que superan los límites	mg/L	Muestras que superan los límites	mg/L
Cd	--	--	CC (0,009)	0,005
Cr	0	0,05	0	0,05
Cu	ETS1 (L1) ETS1 (L2)	0,12 (dureza>100)	0	2
Ni	0	0,2 (dureza>200)	<b>Todos superan la CC(0,04)</b>	0,02
Pb	CC (0,087)	0,05	CC(0,087)	0,025
Zn	0	0,5 (dureza>100)	--	--

CC Concentración característica  
ETS1 Muestra nº1 del sustrato extracción de origen Sabadell  
0 Muestras que no superan los límites de concentración en los RD  
-- No existen límites de concentración en los RD

Hasta ahora, para la mayoría de las tablas, se ha utilizado para comparar las concentraciones medias de cada cuatro réplicas por lodo, en cambio en la tabla 42 se han comparado cada una de las réplicas, con los parámetros de calidad para metales pesados de cada uno de los Reales Decretos.

Aún sin ser detectados (concentración muestra < CC), se ha considerado incluir todos los metales, ya que para algunos casos las concentraciones características superan los límites de los Reales Decretos.

Para el metal Pb, se observa que la concentración característica de las muestras de lodo, superan los límites de concentración en ambos Reales Decretos. A diferencia de éste, las muestras de lodo para el Cd, solo superan los límites del **RD 140/2003**.

La muestra de lodo ETS1, supera los límites de concentración de Cu del **RD 995/2000** para los lixiviados 1 y 2.

El único caso considerado a evaluar es para el metal Ni. Todas las muestras de lodo (detectadas y no detectadas) para dicho metal, superan los límites de concentración del **RD 140/2003**. Existen muestras ETS1 (Muestra nº1 del sustrato extracción de origen



Sabadell) y TTS4 (Muestra nº4 del sustrato trituración de origen Sabadell) para el lixiviado 2, que incluso superan hasta siete veces la concentración límite del **RD 140/2003**. Con ello finalmente se estima que el líquido lixiviado por estas muestras, no cumple los criterios sanitarios de la calidad del agua de consumo humano (**RD 140/2003**).

### 5.3.- CATIONES Y ANIONES

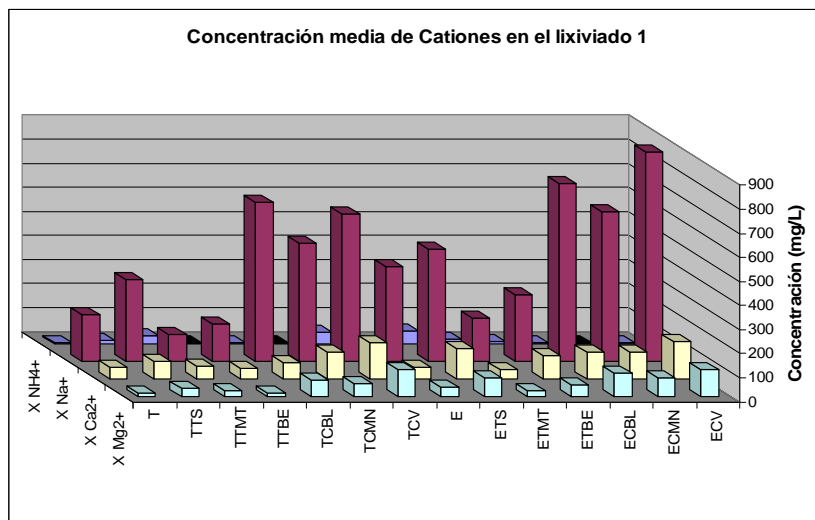
#### 5.3.1.- Estudio individual de Cationes y Aniones en los diferentes lixiviados

Se han realizado los gráficos de los cationes y aniones que han sido detectados. No obstante, existen tratamientos que poseen concentraciones inferiores al límite de detección, que se han representado en color negro.

Para cationes y aniones, se ha optado por realizar los gráficos en 3D, para poder tener una mayor visualización de las concentraciones de cada uno de los iones por tratamiento.

#### ▪ Cationes

#### Grafico 26: Concentración media de cationes en el lixiviado 1.



**Nota:** Barras negras indican, concentración inferior a la concentración característica.

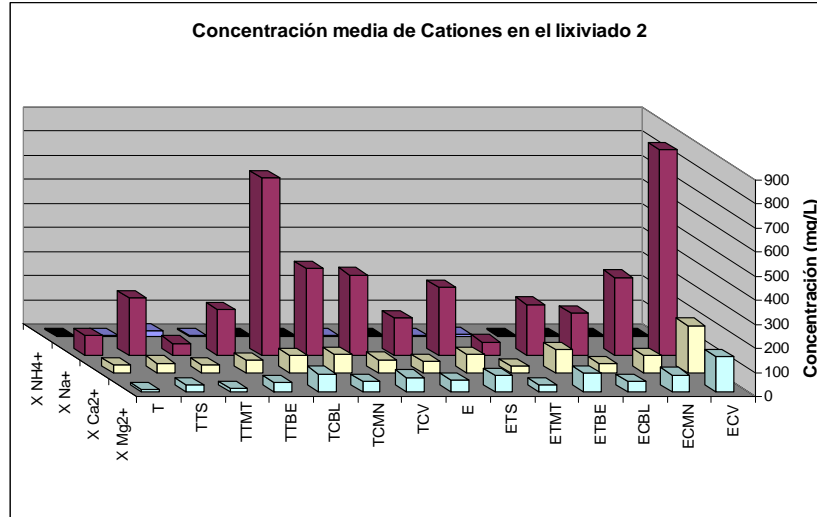
Existen cuatro tratamientos con contenidos de  $\text{NH}_4^+$  no detectables: TTBE, TCMN, E, ECMN. Cabe destacar que para este catión, los mayores contenidos se encuentran para el sustrato trituración, el compostado Vilaseca, y para el sustrato extracción, el térmico Sabadell. Acentuándose en el caso particular del tratamiento ETS, en parte atribuible de forma excepcional, a la media obtenida de solo dos réplicas.

Se observa que la mayoría de los tratamientos con lodos aumentan la concentración de los cationes  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$ , para ambos sustratos. Destacamos con aumentos importantes, los tratamientos compostados de Vilaseca para  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$  (en ambos sustratos), y el de Blanes para el  $\text{Na}^+$  (para el sustrato trituración). Los lodos térmicos de Mataró y Besós, poseen el menor contenido medio en  $\text{Na}^+$  para ambos sustratos, siendo



su concentración media inferior a la de los tratamientos control. Para  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$ , los menores contenidos medios se encuentran para los lodos TTBE y ETMT, cuyas concentraciones medias son inferiores a la de los tratamientos control.

**Grafico 27: Concentración media de cationes en el lixiviado 2.**



**Nota:** Barras negras indican, concentración inferior a la concentración característica.

Los lodos que no han sido detectados en contenidos de  $\text{NH}_4^+$  son: T, TCBL, TCMN, E, ETBE, ECBL, ECMN y ECV. En ambos sustratos el mayor contenido medio en  $\text{NH}_4^+$  es para el tratamiento térmico Mataró.

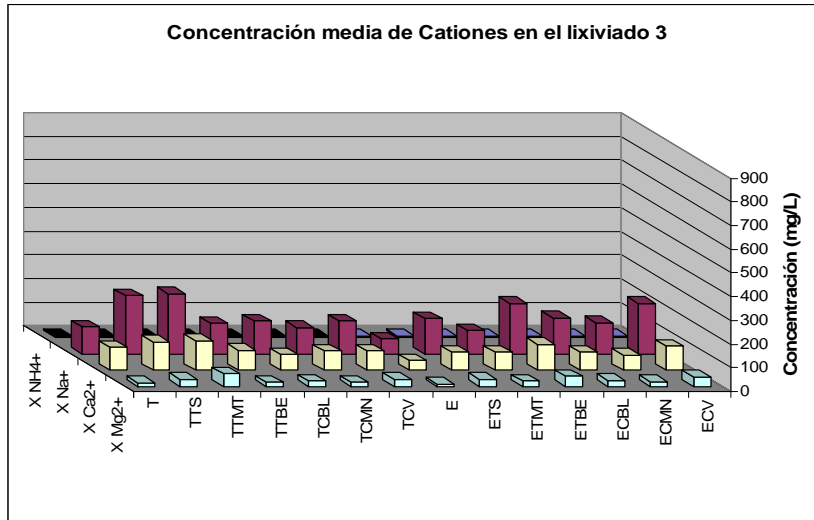
En el sustrato trituración, los tratamientos con mayor concentración media en cationes son, el compostado Blanes para  $\text{Na}^+$  y  $\text{Mg}^{2+}$  y el compostado Manresa, para el  $\text{Ca}^{2+}$ . El tratamiento con menor contenido en  $\text{Na}^+$  y  $\text{Ca}^{2+}$ , es el térmico Mataró, cuya concentración media es inferior a la del tratamiento control T.

En el sustrato extracción el lodo con mayor contenido medio de cationes en  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$ , es el compostado Vilaseca. Para estos tres cationes, el tratamiento con menor concentración media es el térmico Mataró. Este a su vez, tiene una concentración inferior a la del tratamiento control E. Además del térmico Mataró, el tratamiento compostado Blanes, también posee una concentración media inferior a la del tratamiento control E, para los cationes  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$ .





**Grafico 28: Concentración media de cationes en el lixiviado 3.**

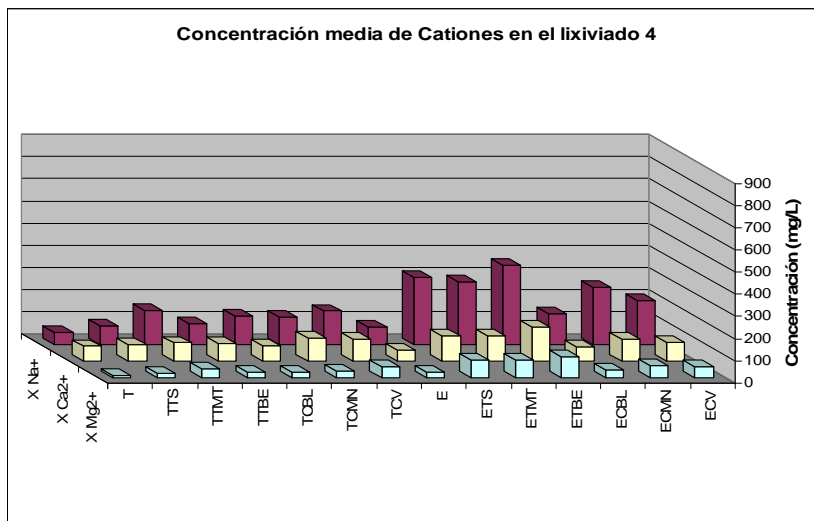


**Nota:** Barras negras indican, concentración inferior a la concentración característica.

Todos los lodos del sustrato de trituración poseen una concentración de  $\text{NH}_4^+$ , inferior a la del límite de detección. El tratamiento con mayor cantidad de cationes  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$  es el térmico Mataró. Los lodos compostados Blanes, Manresa, Vilaseca y el térmico Besós, poseen una concentración media de  $\text{Ca}^{2+}$ , inferior a la del tratamiento control T. Ocurre lo mismo para el  $\text{Na}^+$ , el tratamiento CMN posee un contenido medio inferior al del tratamiento control.

En el sustrato extracción, se producen aumentos variables en la concentración de los cationes, a partir de la concentración del tratamiento control E, excepto el tratamiento TS, que tiene una concentración media de  $\text{NH}_4^+$  inferior a la del tratamiento control. Los lodos compostados con mayor concentración media en  $\text{NH}_4^+$  y  $\text{Na}^+$  son, Blanes y Vilaseca. Sin embargo, el lodo con mayor contenido en cationes  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$  es el térmico Besós.

**Grafico 29: Concentración media de cationes en el lixiviado 4.**



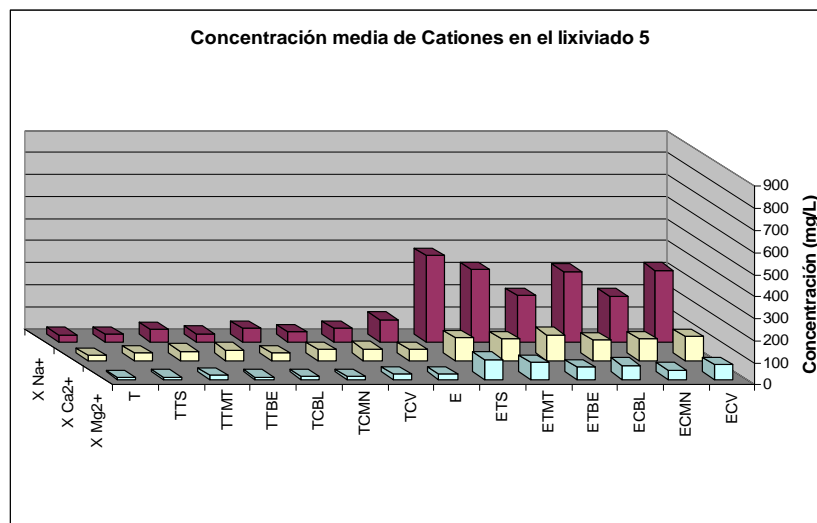


A partir del lixiviado 4, el catión  $\text{NH}_4^+$  ya no se detecta para ninguno de los lodos.

Se producen aumentos de la concentración media de cationes para todos los lodos, a partir de la concentración del tratamiento control, para ambos sustratos. En el sustrato trituración la adición de lodos implica aumentos de cationes en los lixiviados, pero en menor medida que en los muestreos anteriores. Siendo el sustrato con mayor contenido medio en cationes el de extracción

El tratamiento con mayor contenido medio en los cationes  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$  es el TBE para el sustrato E. En el sustrato T, los lodos TMT, CMN y CV son los que tienen mayor concentración media para los cationes  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$ , ordenados respectivamente por orden decreciente de concentración.

**Grafico 30: Concentración media de cationes en el lixiviado 5.**



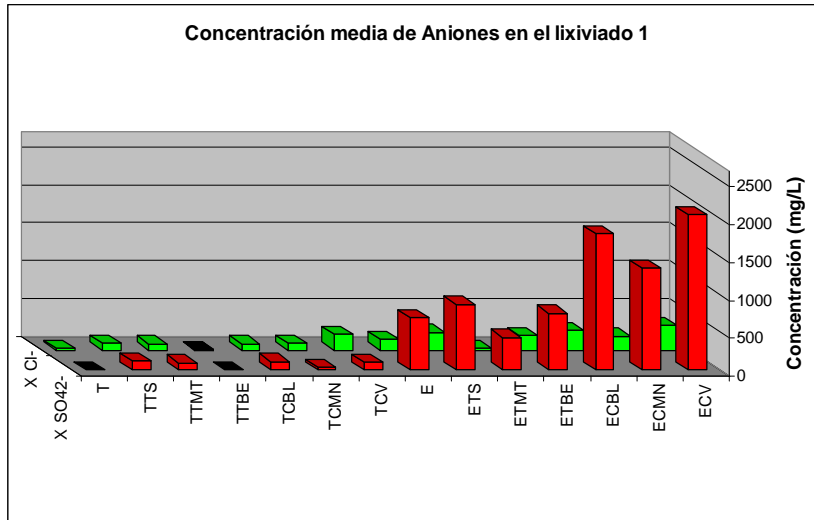
A partir de los tratamientos control de ambos sustratos, se producen aumentos variables en la concentración de cationes.

Se observa que el sustrato con mayor concentración media en cationes, es el de extracción. Siendo los casos más destacados los lodos térmicos, Sabadell para el  $\text{Na}^+$  y  $\text{Mg}^{2+}$ , y Besós para el  $\text{Ca}^{2+}$ . En el sustrato trituración, el lodo con mayor concentración media en cationes es el compostado Vilaseca.



▪ **Aniones**

**Grafico 31: Concentración media de aniones en el lixiviado 1.**



**Nota:** Barras negras indican, concentración inferior a la concentración característica.

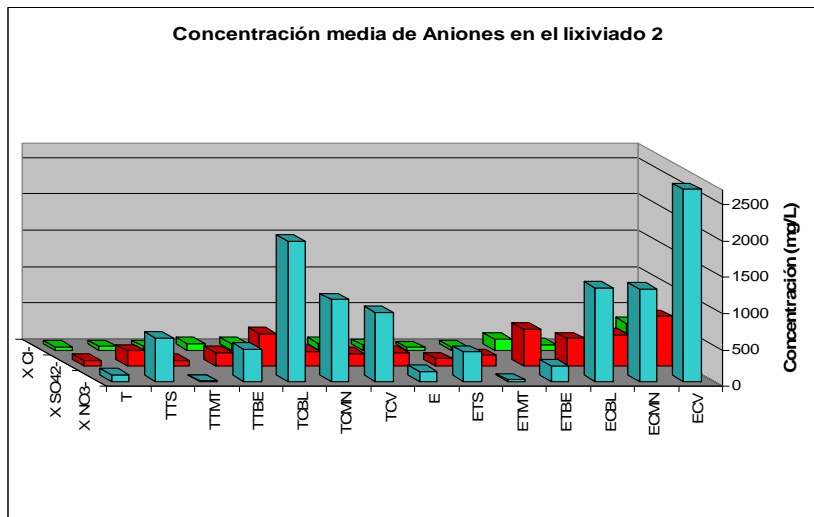
Tal y como se ha comentado anteriormente, debido a problemas técnicos, no se ha incluido en este gráfico las concentraciones medias del  $\text{NO}_3^-$ .

Los lodos que no han sido detectados son, el tratamiento T para el  $\text{SO}_4^{2-}$ , y el TTBE para ambos aniones ( $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Cl}^-$ ).

El sustrato con mayor concentración media en aniones es el de extracción. Para ambos sustratos, el tratamiento compostado de Vilaseca es el que contiene mayor cantidad media de aniones  $\text{SO}_4^{2-}$  y  $\text{Cl}^-$ . Además de este tratamiento, en el sustrato trituración se encuentra el lodo térmico Sabadell con mayor concentración media en  $\text{SO}_4^{2-}$ .

En el sustrato extracción el lodo con menor cantidad media en aniones, es el térmico Mataró, cuya concentración media es inferior a la del tratamiento control E.

**Grafico 32: Concentración media de aniones en el lixiviado 2.**



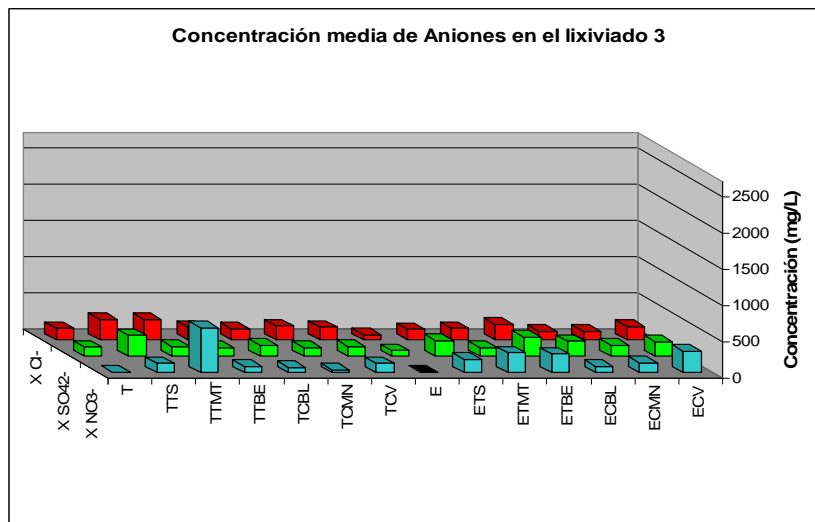


A nivel general se observan aumentos variables de la concentración media en aniones en ambos sustratos.

En el sustrato trituración, los lodos compostados, Blanes para  $\text{SO}_4^{2-}$  y  $\text{NO}_3^-$ , y Vilaseca para  $\text{Cl}^-$ , son los que tienen mayor concentración media. Para los aniones  $\text{SO}_4^{2-}$  y  $\text{Cl}^-$ , se producen aumentos de la concentración media en todos los lodos, a partir de la concentración del tratamiento control T. El tratamiento térmico de Mataró tiene una concentración media en  $\text{SO}_4^{2-}$  y  $\text{NO}_3^-$ , inferior a la del tratamiento control T.

Para el sustrato extracción, el lodo con mayor contenido medio en aniones es el compostado Vilaseca. Los tratamientos térmicos de Sabadell y Mataró, son lo que tienen menor concentración en  $\text{Cl}^-$  y  $\text{SO}_4^{2-}$ , siendo está inferior a la del tratamiento control E. El tratamiento térmico de Mataró, también es el de menor contenido medio en  $\text{NO}_3^-$ , con concentración media inferior a la del tratamiento control E.

**Grafico 33: Concentración media de aniones en el lixiviado 3.**



**Nota:** Barras negras indican, concentración inferior a la concentración característica.

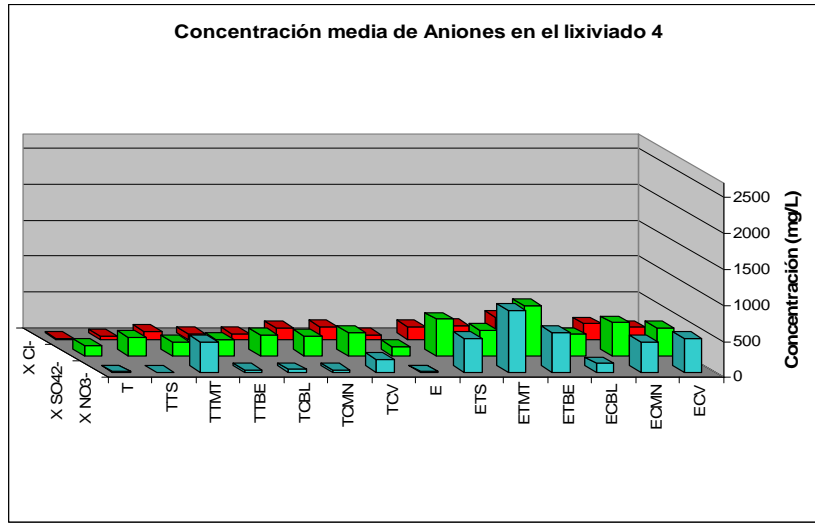
Para ambos sustratos se observan concentraciones medias similares. En el sustrato extracción hay un tratamiento no detectable, el tratamiento control E.

En el sustrato trituración el tratamiento térmico Sabadell es el que tiene mayor concentración media en aniones  $\text{Cl}^-$  y  $\text{SO}_4^{2-}$ , y el tratamiento térmico Mataró en  $\text{NO}_3^-$ . Los lodos con menor concentración media son, el compostado Blanes para  $\text{Cl}^-$  y el térmico Besós para  $\text{SO}_4^{2-}$ . Para el anión  $\text{SO}_4^{2-}$ , hay tres tratamientos que tienen una concentración media inferior a la del tratamiento control, éstos son TBE, CMN y CV.

En el sustrato extracción se producen aumentos en la concentración media de los tres aniones, a partir de la concentración del tratamiento control E. Los tratamientos con mayor concentración media en aniones son, TBE para  $\text{Cl}^-$  y  $\text{SO}_4^{2-}$ , y CV para  $\text{NO}_3^-$ .



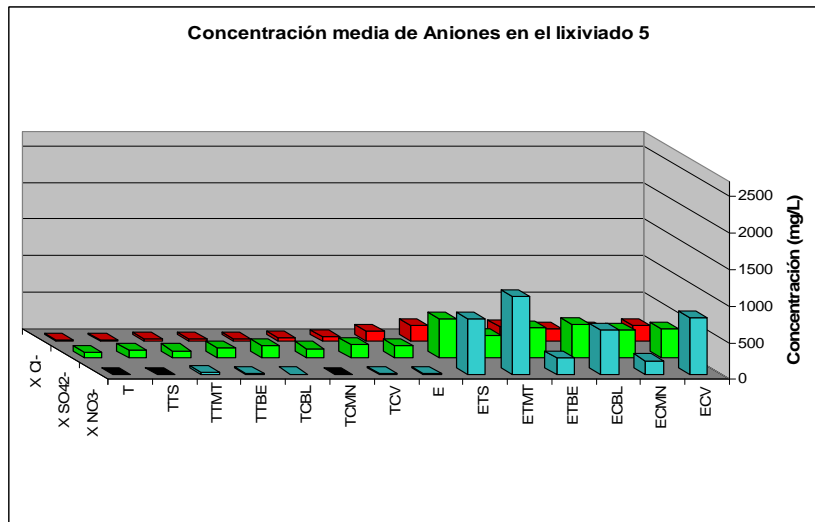
**Grafico 34: Concentración media de aniones en el lixiviado 4.**



Se producen aumentos de la concentración media de aniones para todos los lodos, a partir de la concentración del tratamiento control, para ambos sustratos. En el sustrato extracción la adición de lodos implica aumentos de aniones en los lixiviados, siendo su concentración media mayor que la del lixiviado 3.

Los aumentos importantes de la concentración media de  $\text{NO}_3^-$ , se observan para el tratamiento térmico Mataró, en ambos sustratos. Para los aniones  $\text{Cl}^-$  y  $\text{SO}_4^{2-}$ , los tratamientos con mayor contenido medio son, TCV y ETBE.

**Grafico 35: Concentración media de aniones en el lixiviado 5.**



**Nota:** Barras negras indican, concentración inferior a la concentración característica.

En los lodos T, TTS y TCMN del sustrato trituración, no se ha podido detectar la concentración media de  $\text{NO}_3^-$ .

A partir de la concentración media del tratamiento control, se observan aumentos del contenido medio en aniones para ambos sustratos. Los aumentos importantes de la



concentración media de  $\text{Cl}^-$  y  $\text{NO}_3^-$ , se observan respectivamente, para el tratamiento compostado Vilaseca y para el tratamiento térmico Mataró.

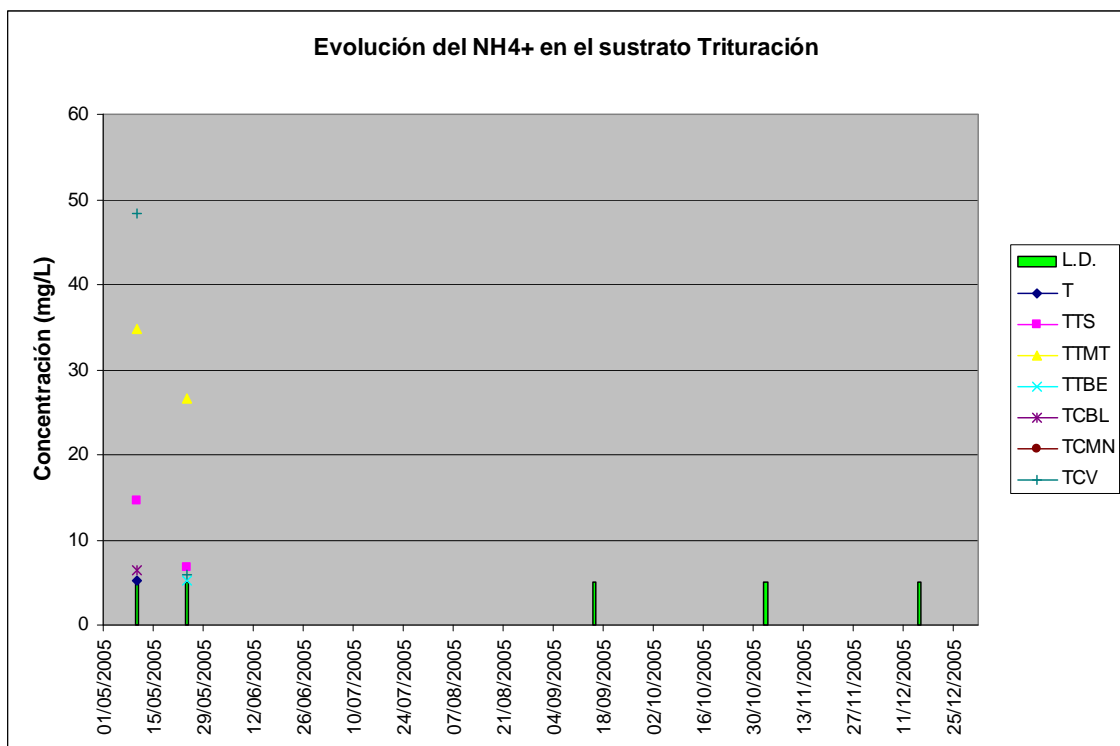
Los tratamientos con mayor contenido medio en  $\text{SO}_4^{2-}$  son TCV y ETS.

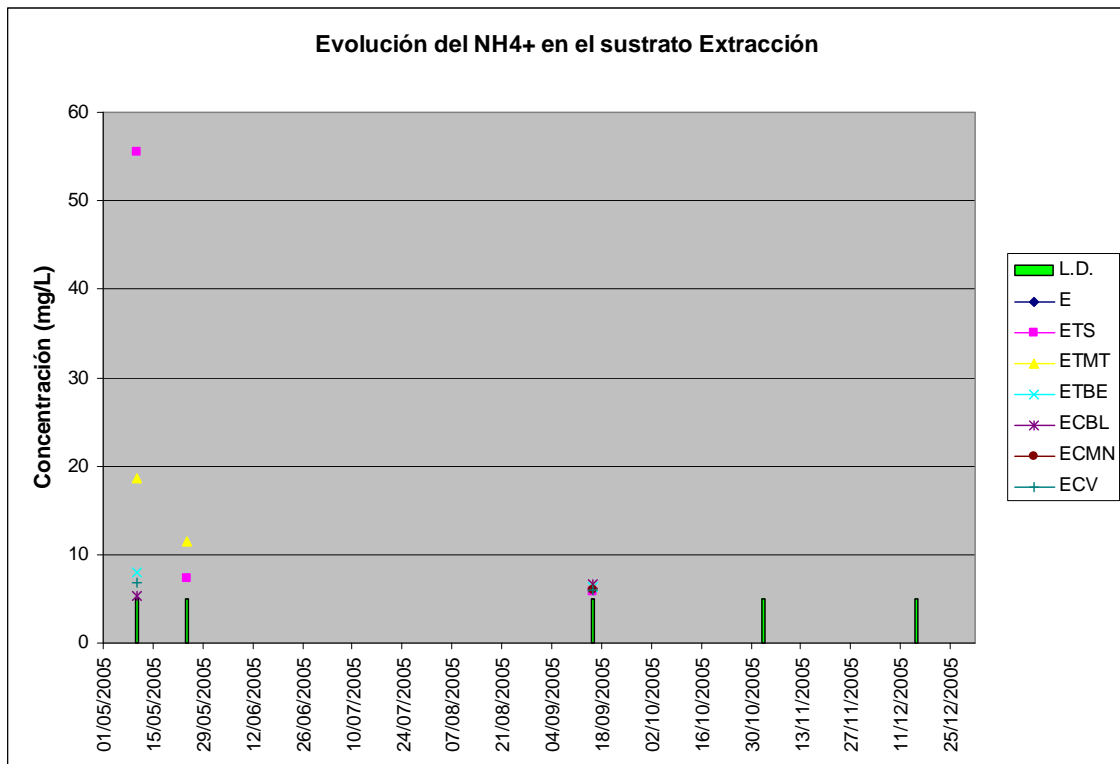
### 5.3.2.- Evolución del contenido de Cationes y Aniones en los lixiviados a lo largo del tiempo

#### ▪ Evolución de Cationes

- Evolución de  $\text{NH}_4^+$ .

Gráfico 36: Evolución del  $\text{NH}_4^+$  en el sustrato trituración.



**Gráfico 37: Evolución del  $\text{NH}_4^+$  en el sustrato extracción.**

Se observa una clara tendencia a la disminución en  $\text{NH}_4^+$  a lo largo del tiempo, con mayor concentración media en los tratamientos térmicos Sabadell y Mataró, para ambos sustratos; y de forma puntual el tratamiento compostado Vilaseca, para el sustrato trituración (gráficos 36 y 37).

Cabe destacar que las concentraciones de  $\text{NH}_4^+$  obtenidas para los lixiviados 4 y 5, y para el lixiviado 3 en el sustrato trituración, fueron inferiores al límite de detección.



- Evolución de Na<sup>+</sup>.

Gráfico 38: Evolución del Na<sup>+</sup> en el sustrato trituración.

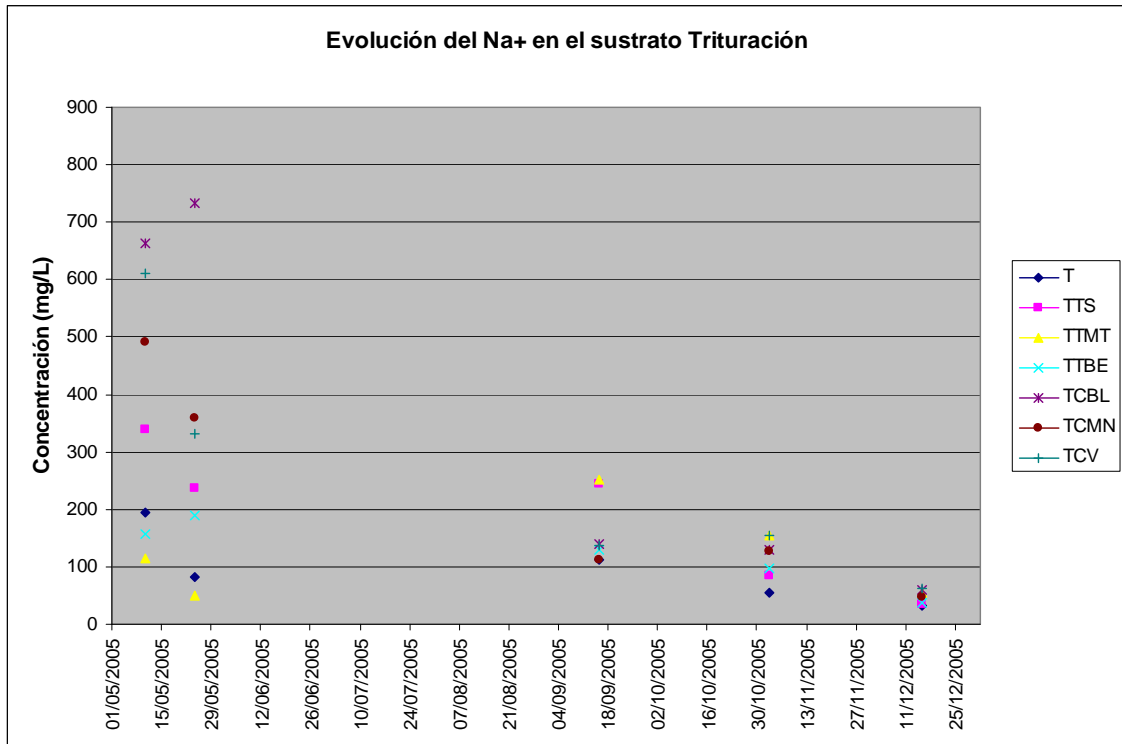
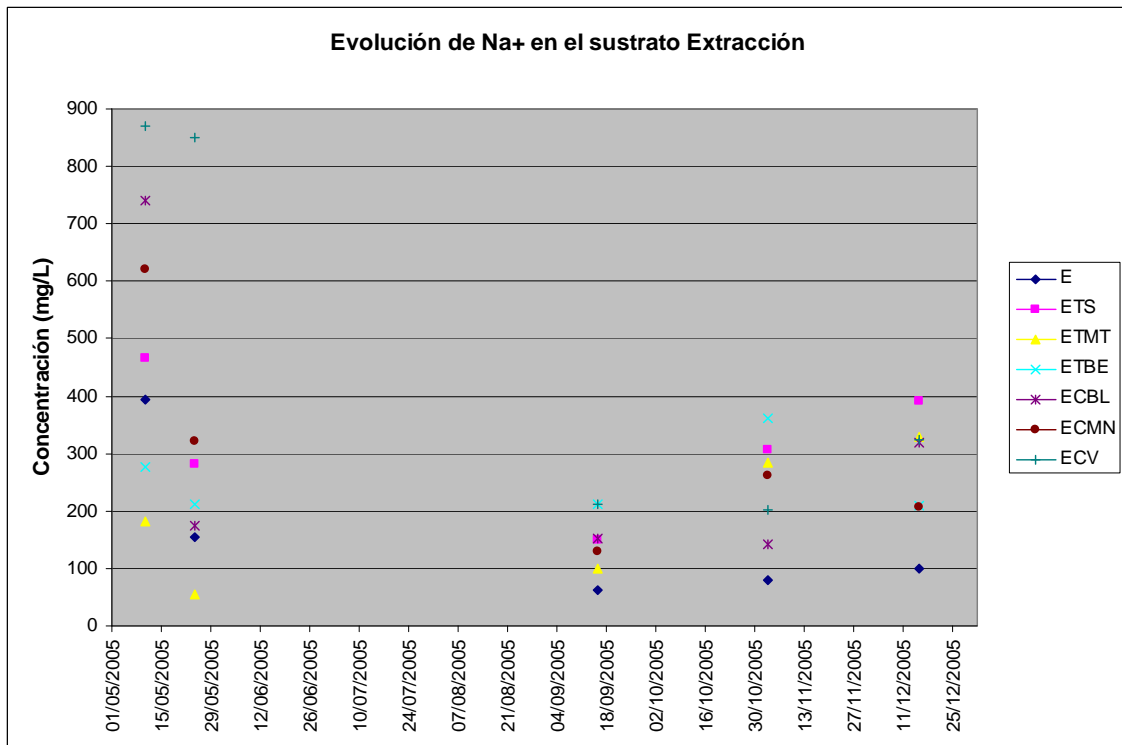


Gráfico 39: Evolución del Na<sup>+</sup> en el sustrato extracción.







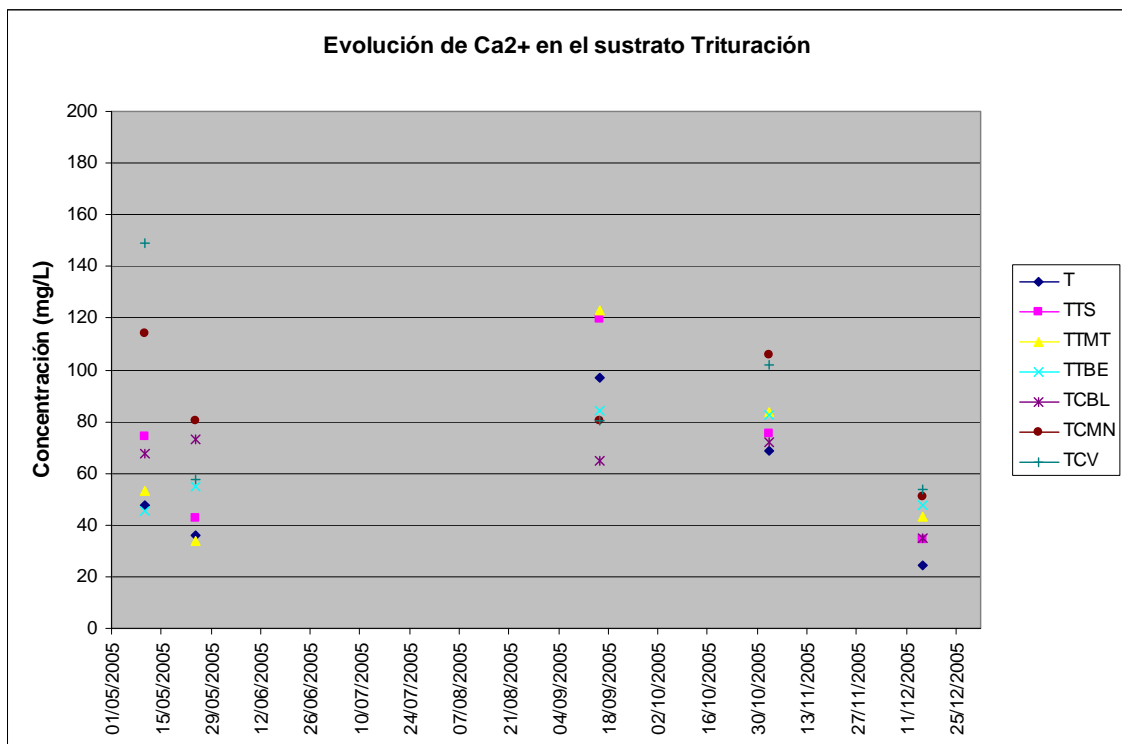
En general se observa una tendencia a la disminución de la concentración de Na<sup>+</sup> a lo largo del tiempo para todos los tratamientos (Gráficos 38 y 39).

Al inicio de la experiencia los tres tratamientos compostados (Blanes, Manresa y Vilaseca), tanto para el sustrato trituración como para el de extracción, presentan claramente mayor concentración de Na<sup>+</sup> para los lixiviados 1 y 2.

A partir del tercer lixiviado, aumenta ligeramente la concentración media de los tratamientos térmicos (Besós, Sabadell y Mataró), en el sustrato extracción.

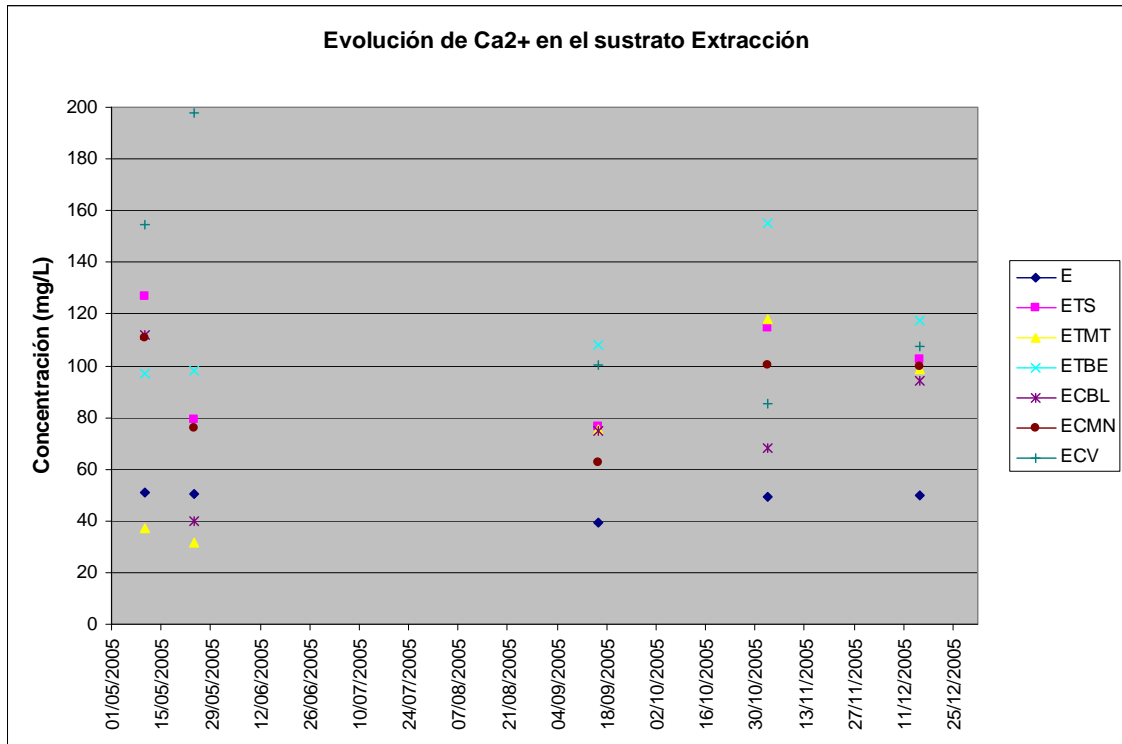
- **Evolución de Ca<sup>2+</sup>.**

**Gráfico 40: Evolución del Ca<sup>2+</sup> en el sustrato trituración.**





**Gráfico 41: Evolución del Ca<sup>2+</sup> en el sustrato extracción.**



En este caso se observa que existe una variabilidad general entre los cinco lixiviados. No obstante se observa una tendencia general a la disminución de la concentración de Ca<sup>2+</sup> de todos los tratamientos a lo largo del tiempo (Gráficos 40 y 41). Se exceptúan en el sustrato de extracción, los lodos térmicos (Sabadell, Mataró y Besós) que aumentan ligeramente su concentración media en Ca<sup>2+</sup>, a partir del tercer lixiviado.



- Evolución de Mg<sup>2+</sup>.

Gráfico 42: Evolución del Mg<sup>2+</sup> en el sustrato trituración.

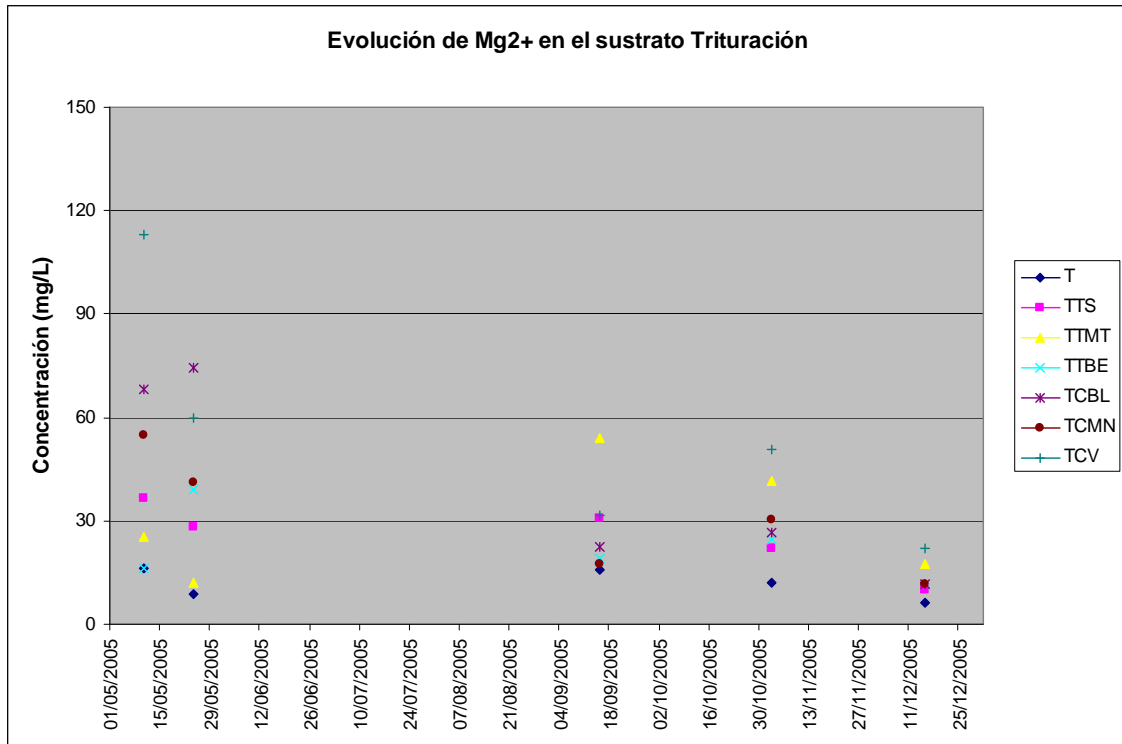
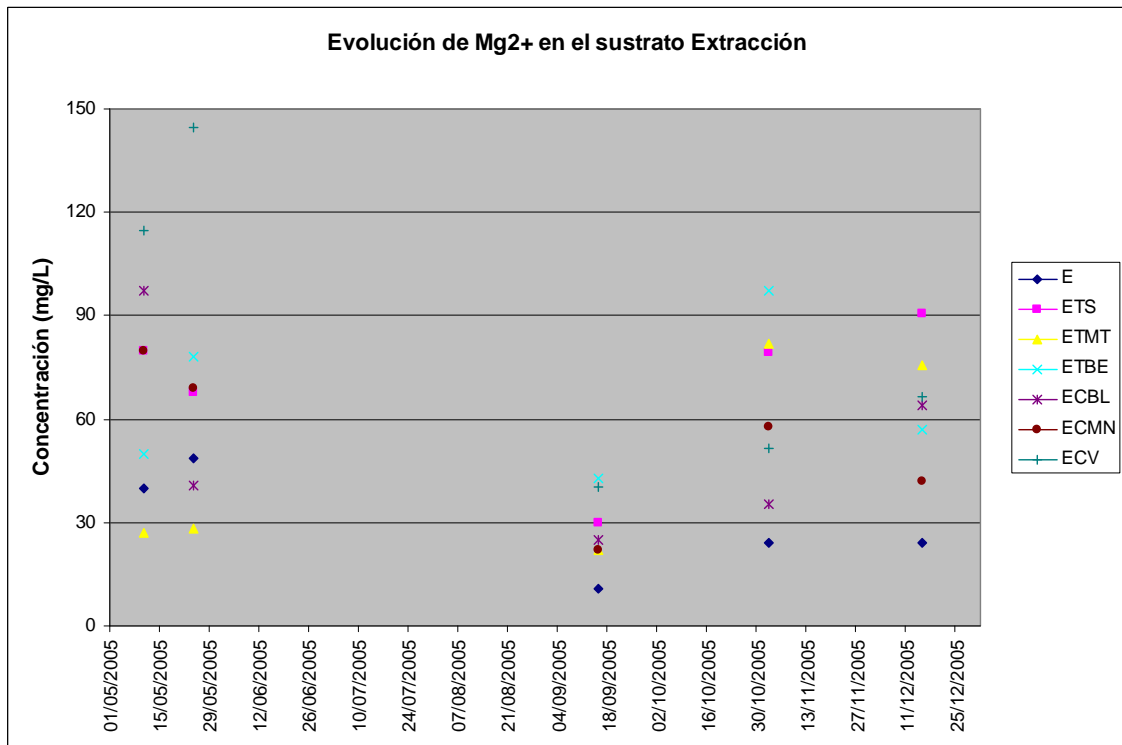


Gráfico 43: Evolución del Mg<sup>2+</sup> en el sustrato extracción.





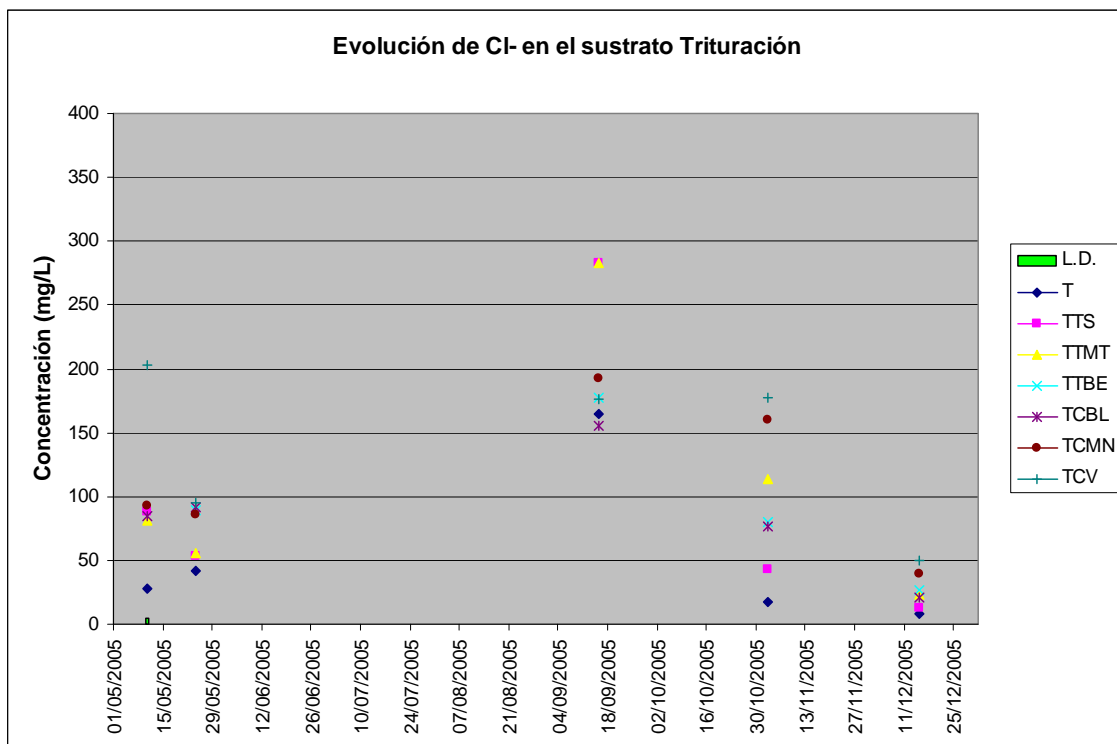
De forma general se observa una tendencia a la disminución en  $Mg^{2+}$  a lo largo del tiempo, con evidencia clara para el sustrato trituración (Gráficos 42 y 43).

En ambos sustratos, los tratamientos con mayor concentración media en  $Mg^{2+}$  son los compostados (Blanes, Manresa y Vilaseca). Como en casos anteriores, se exceptúan en el sustrato de extracción los tratamientos térmicos que aumentan ligeramente su concentración media en  $Mg^{2+}$ , a partir del tercer lixiviado.

▪ **Evolución de Aniones**

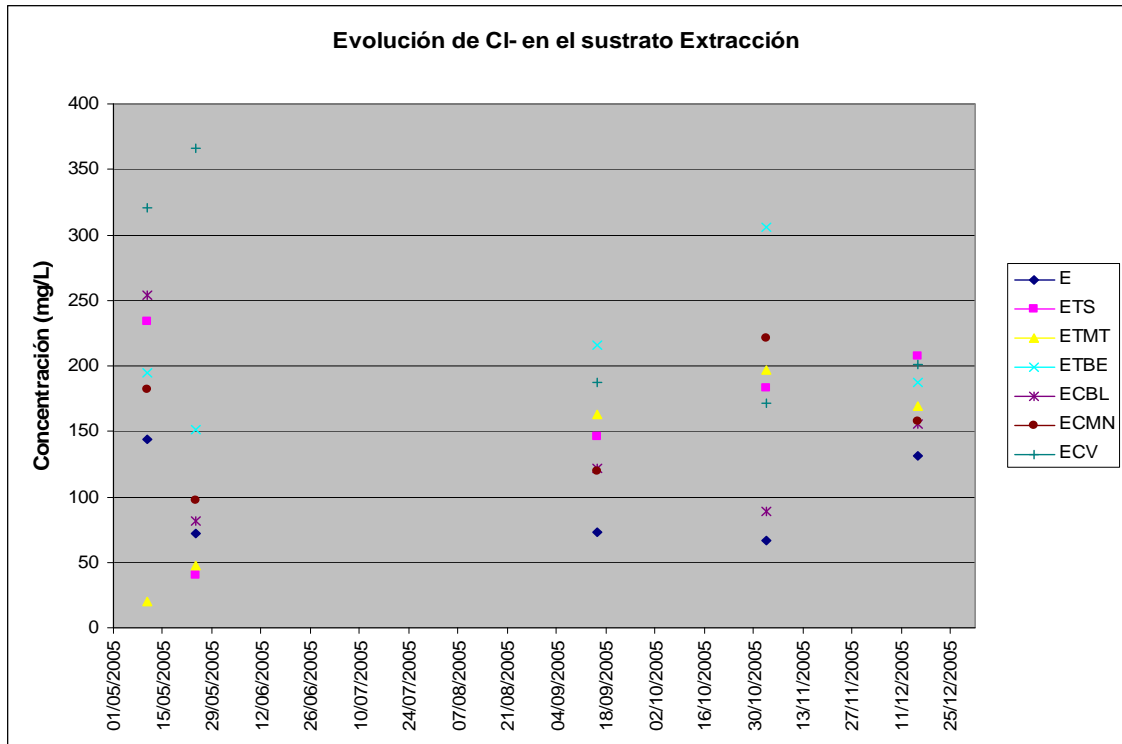
- **Evolución de  $Cl^-$ .**

**Gráfico 44: Evolución del  $Cl^-$  en el sustrato trituración.**





**Gráfico 45: Evolución del Cl<sup>-</sup> en el sustrato extracción.**



Existe una variabilidad en la concentración de Cl<sup>-</sup> para todos los lixiviados, en ambos sustratos. No obstante, se observa una tendencia a la disminución de la concentración media de Cl<sup>-</sup> al largo del tiempo (Gráficos 44 y 45).

A partir del tercer lixiviado, como en el caso de los cationes, se observa que en el sustrato extracción, los tratamientos térmicos Sabadell y Mataró aumentan su concentración media de Cl<sup>-</sup>, respecto los dos primeros lixiviados



- Evolución de  $\text{SO}_4^{2-}$

Gráfico 46: Evolución del  $\text{SO}_4^{2-}$  en el sustrato trituración.

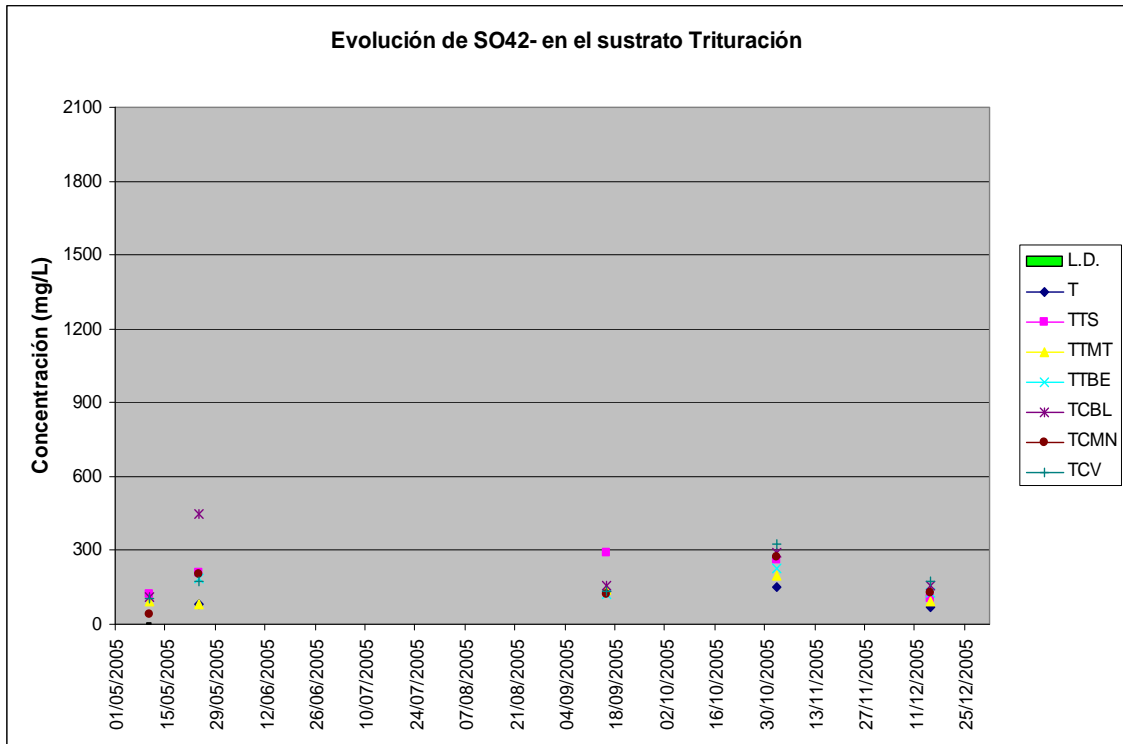
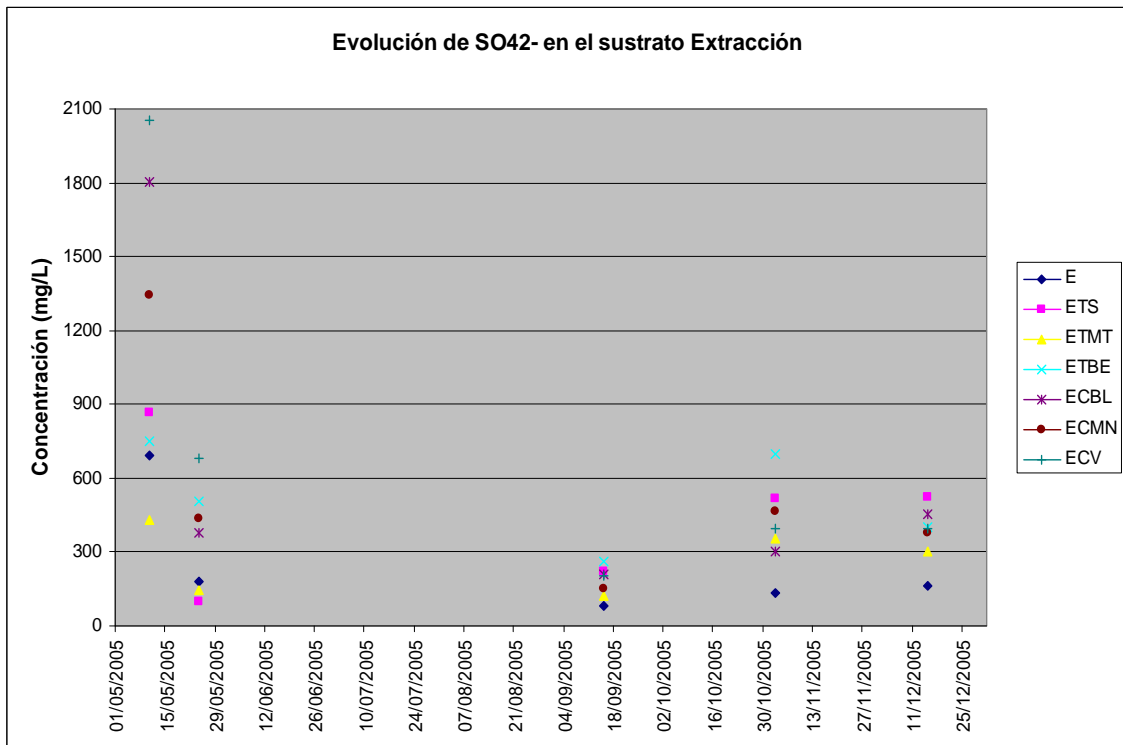


Gráfico 47: Evolución del  $\text{SO}_4^{2-}$  en el sustrato extracción.



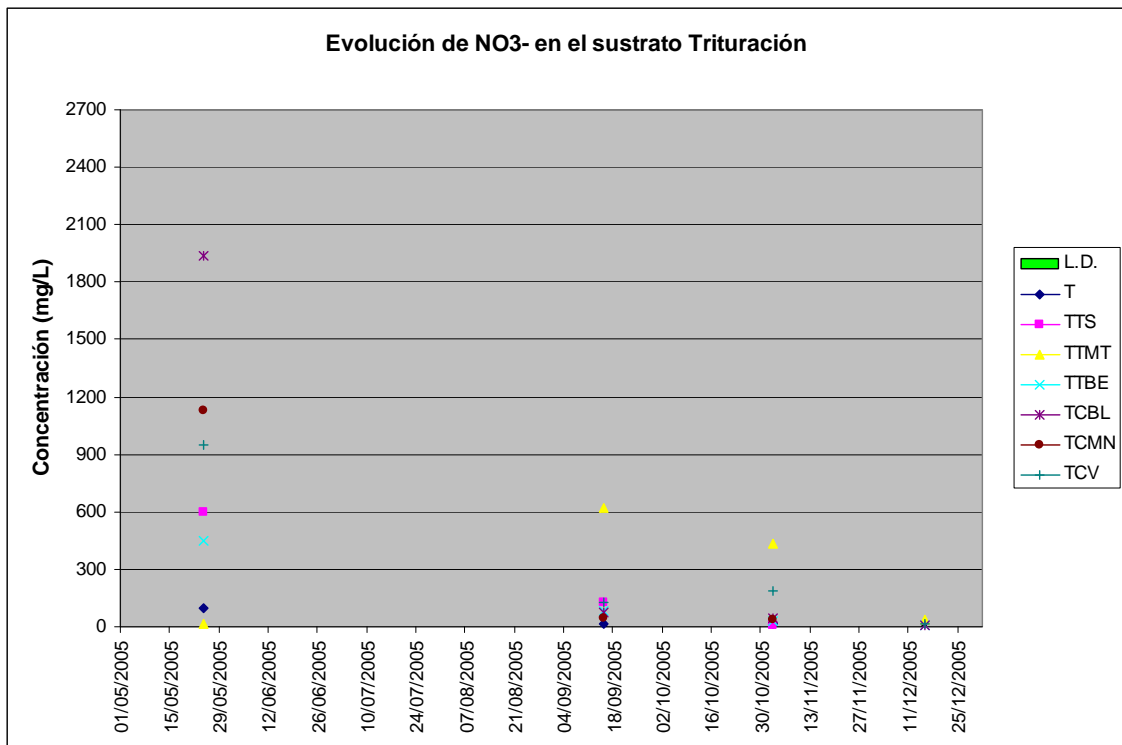


Independientemente de la variabilidad obtenida, se observa una tendencia a la disminución de  $\text{SO}_4^{2-}$  a lo largo del tiempo, siendo los tratamientos más destacados los compostados Blanes y Vilaseca, en ambos sustratos (Gráficos 46 y 47).

Tal y como sucede en casos anteriores, en el sustrato extracción se producen aumentos en la concentración de  $\text{SO}_4^{2-}$  de los tratamientos térmicos Sabadell y Mataró, a partir del lixiviado 3.

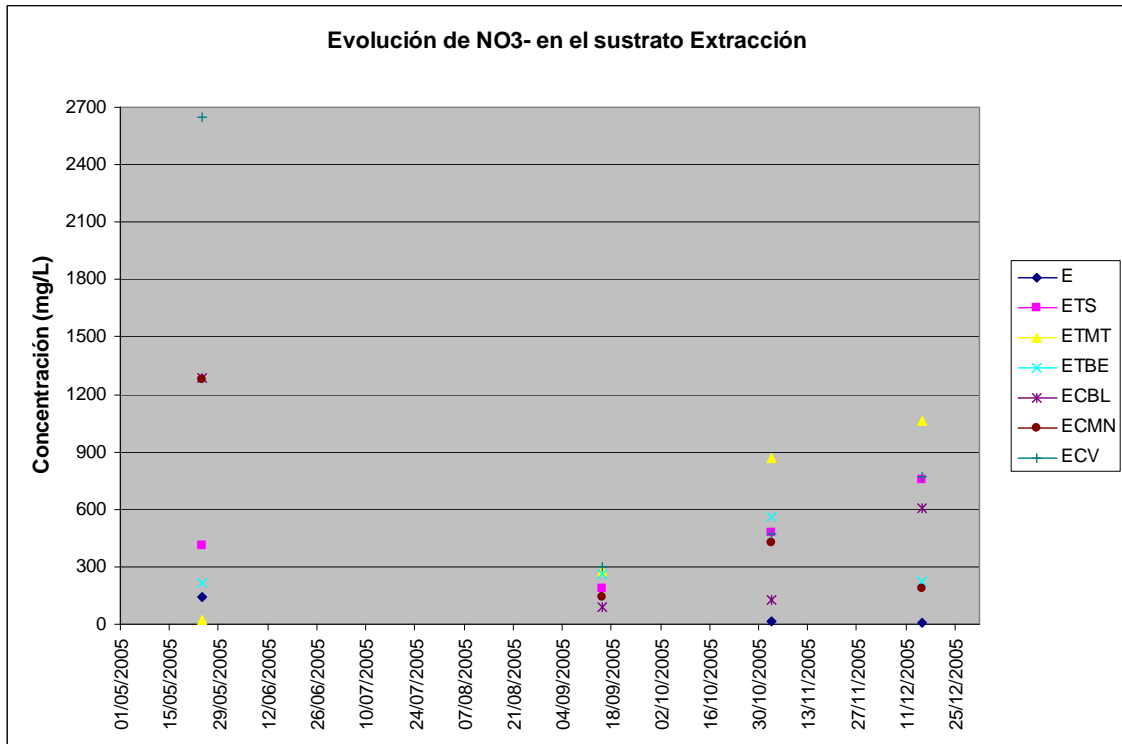
- Evolución de  $\text{NO}_3^-$ .

**Gráfico 48: Evolución del  $\text{NO}_3^-$  en el sustrato trituración.**





**Gráfico 49: Evolución del NO<sub>3</sub><sup>-</sup> en el sustrato extracción.**



Tal y como se ha comentado en otros apartados, no se han considerado las concentraciones medias en NO<sub>3</sub><sup>-</sup> para el lixiviado 1, debido a problemas técnicos en el laboratorio.

A nivel general se observa una tendencia a la disminución de la concentración de NO<sub>3</sub><sup>-</sup> a lo largo del tiempo, siendo más evidente en el sustrato de trituración (Gráficos 48 y 49).

Igual que para los anteriores iones a partir del tercer lixiviado, se producen aumentos progresivos de la concentración media de NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, de los tratamientos térmicos Sabadell y Mataró, para el sustrato extracción.

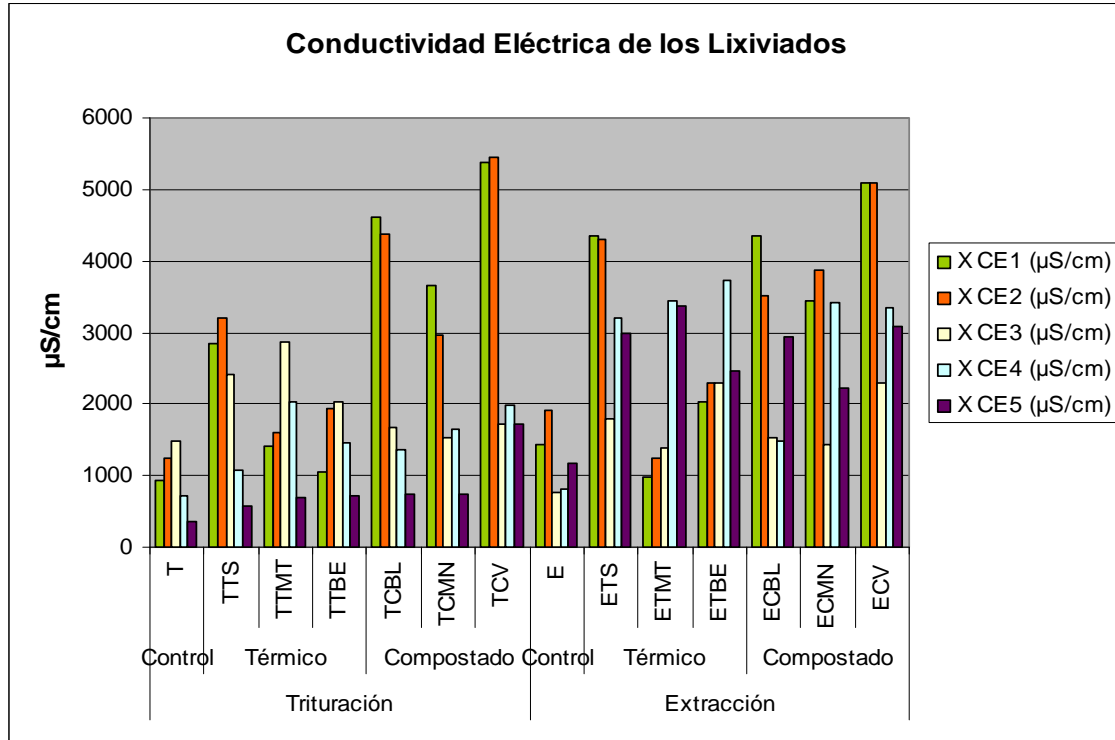




### 5.3.3.- Evolución del SAR (Relación de adsorción de Sodio)

#### ▪ Conductividad eléctrica de los lixiviados

Gráfico 50: Conductividad eléctrica de los lixiviados



**Fuente:** Los datos de la conductividad eléctrica de los lixiviados han sido suministrados por el personal del proyecto.

Al comienzo de la experiencia, se observa una mayor conductividad media para los dos primeros lixiviados. A nivel general se produce una disminución en la conductividad a lo largo del tiempo, siendo más evidente para el sustrato trituración. A partir del tercer lixiviado, en el sustrato extracción, se produce un ligero aumento de la conductividad eléctrica.

#### ▪ Evolución del SAR en los lixiviados

Para poder hacer una estimación sobre la calidad de los lixiviados recogidos, se ha optado por utilizar dos clasificaciones, ambas sobre la clasificación de aguas de riego. Cabe destacar que las clasificaciones elegidas son más restrictivas, ya que las concentraciones de las soluciones del suelo son algo más altas que las concentraciones de las aguas para riego.

Las clasificaciones utilizadas son, **U.S.L.S** (Fig. 11) y la **F.A.O** (Fig. 12). Estas clasificaciones se basan en la medida de la conductividad eléctrica del agua para determinar el riesgo de salinización del suelo y en el cálculo de la **Relación de Adsorción de Sodio (SAR o RAS)**, para determinar el riesgo de sodificación o alcalinización.

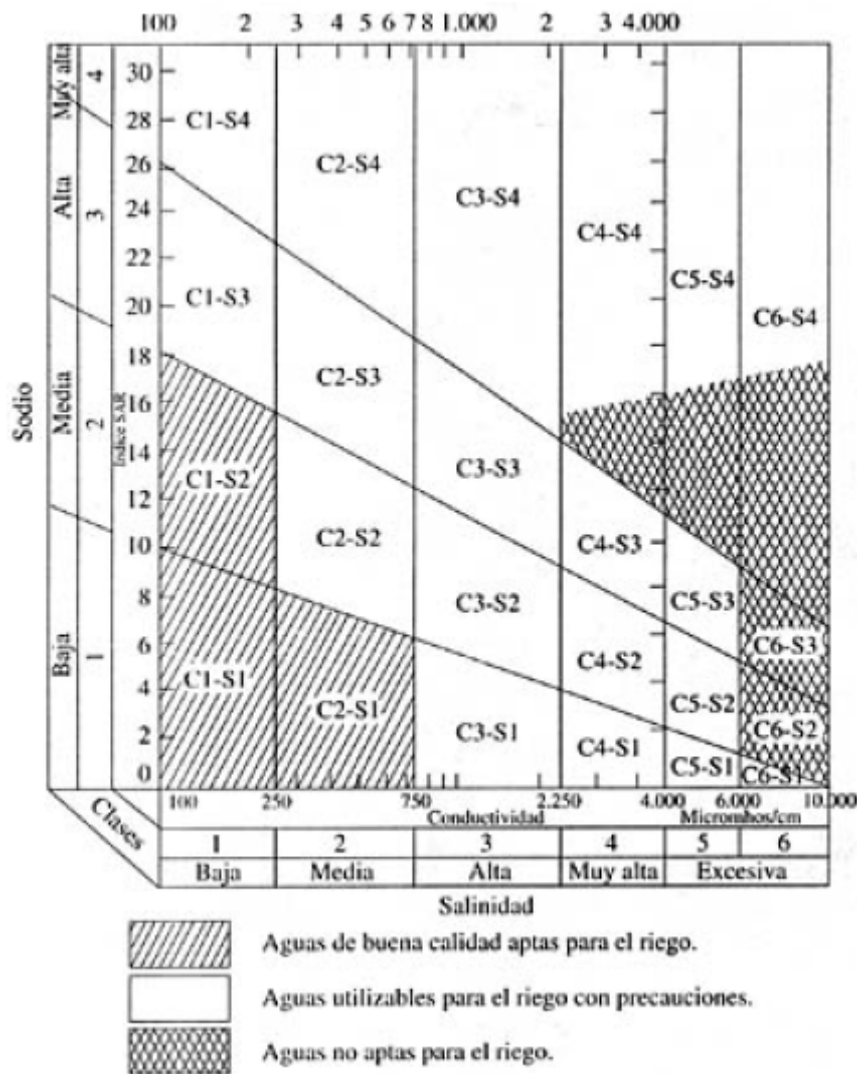


Para calcular el SAR (Relación de Adsorción de Sodio) se ha utilizado la ecuación siguiente:

$$SAR = \frac{Na^+}{\sqrt{\frac{Ca^{2+} + Mg^{2+}}{2}}}$$

[Cación]: Expresada en meq/L.

Figura 11: Clasificación del U.S.L.S para las aguas según la salinidad (CE) y la Relación de adsorción de Sodio (SAR) del agua de riego. Normas Riverside (Richards, 1954).





<b>Tipos</b>	<b>Calidad y normas de uso</b>
<b>C<sub>1</sub></b>	Agua de baja salinidad, apta para el riego en todos los casos. Pueden existir problemas sólo en suelos de muy baja permeabilidad.
<b>C<sub>2</sub></b>	Agua de salinidad media, apta para el riego. En ciertos casos puede ser necesario emplear volúmenes de agua en exceso y utilizar cultivos tolerantes a la salinidad.
<b>C<sub>3</sub></b>	Agua de salinidad alta que puede utilizarse para el riego de suelos con buen drenaje, empleando volúmenes de agua en exceso para lavar el suelo y utilizando cultivos muy tolerantes a la salinidad.
<b>C<sub>4</sub></b>	Agua de salinidad muy alta que en muchos casos no es apta para el riego. Sólo debe usarse en suelos muy permeables y con buen drenaje, empleando volúmenes en exceso para lavar las sales del suelo y utilizando cultivos muy tolerantes a la salinidad.
<b>C<sub>5</sub></b>	Agua de salinidad excesiva, que sólo debe emplearse en casos muy contados, extremando todas las precauciones apuntadas anteriormente.
<b>C<sub>6</sub></b>	Agua de salinidad excesiva, no aconsejable para riego.

<b>S<sub>1</sub></b>	Agua con bajo contenido en sodio, apta para el riego en la mayoría de los casos. Sin embargo, pueden presentarse problemas con cultivos muy sensibles al sodio.
<b>S<sub>2</sub></b>	Agua con contenido medio en sodio, y por lo tanto, con cierto peligro de acumulación de sodio en el suelo, especialmente en suelos de textura fina (arcillosos y franco-arcillosos) y de baja permeabilidad. Deben vigilarse las condiciones físicas del suelo y especialmente el nivel de sodio cambiante del suelo, corrigiendo en caso necesario
<b>S<sub>3</sub></b>	Agua con alto contenido en sodio y gran peligro de acumulación de sodio en el suelo. Son aconsejables aportaciones de materia orgánica y empleo de yeso para corregir el posible exceso de sodio en el suelo. También se requiere un buen drenaje y el empleo de volúmenes copiosos de riego.
<b>S<sub>4</sub></b>	Agua con contenido muy alto de sodio. No es aconsejable para el riego en general, excepto en caso de baja salinidad y tomando todas las precauciones apuntadas.

**Figura 12: Clasificación de la FAO para aguas según la salinidad (CE) y Relación de Adsorción de Sodio (SAR) del agua de riego (Ayers y Westcot, 1985).**

Problema potencial	Grado de restricción de uso		
	Nulo	Ligero - Moderado	Elevado
	CE (µS/cm)		
<b>Salinidad</b> (afecta a la productividad de los cultivos)	<700	700 – 3.000	>3.000
	CE (µS/cm)		
<b>Sodicidad</b> (afecta a la estabilidad estructural del suelo)	CE (µS/cm)		
SAR = 0 – 3	>700	700 - 200	<200
SAR = 3 – 6	>1.200	1.200 - 300	<300
SAR = 6 – 12	>1.900	1.900 - 500	<500
SAR = 12 – 20	>2.900	2.900 – 1.300	<1.300
SAR = 20 - 40	>5.000	5.000 – 2.900	<2.900



Gráfico 51: Evolución del SAR en el lixiviado 1

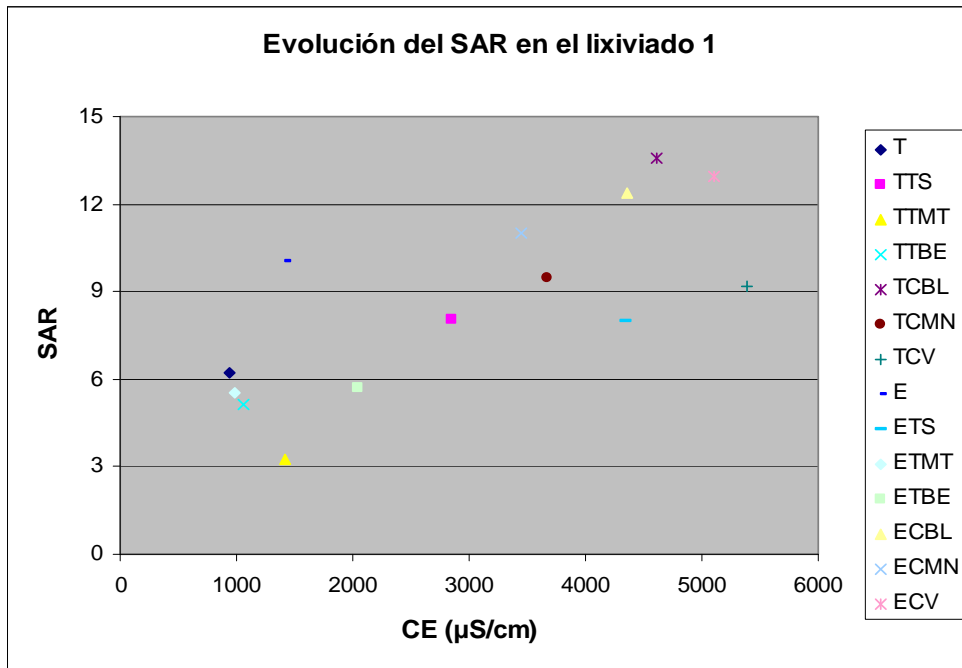
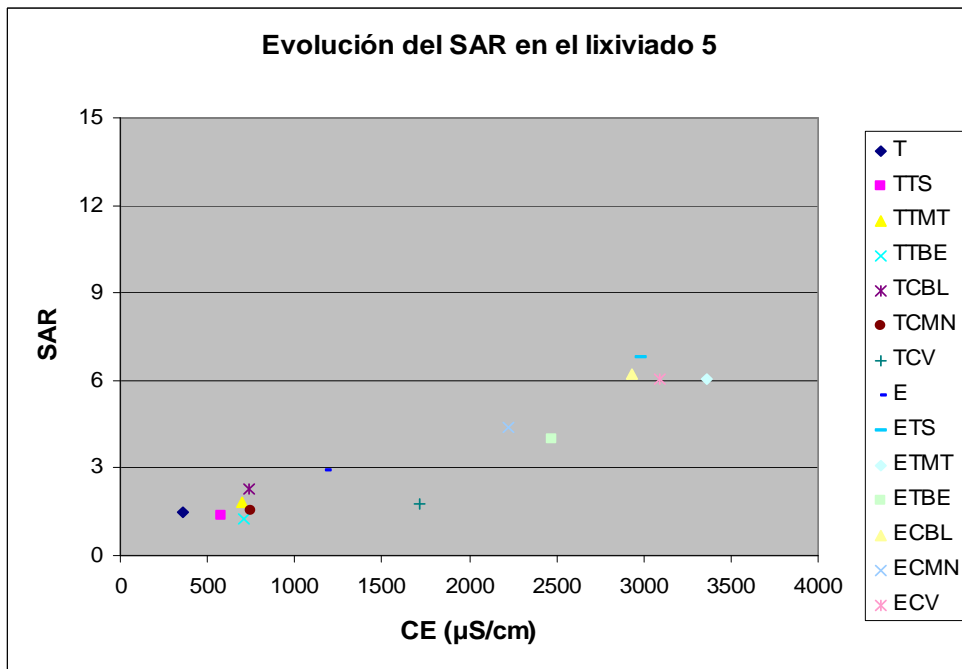


Gráfico 52: Evolución del SAR en el lixiviado 5



En general se observa una tendencia a la disminución de la conductividad y el SAR a lo largo del tiempo, por ello se ha considerado solo comentar los lixiviados 1 y 5.

Al principio de la experiencia, en el lixiviado 1 (Gráfico 51), se obtiene variabilidad de conductividades y SAR. Los tratamientos con mayor SAR y conductividad son los compostados Blanes, Manresa y Vilaseca, para ambos sustratos.



Al final de la experiencia, en el lixiviado 5 (Gráfico 52), se observa una clara disminución del SAR y la conductividad para todos los tratamientos. No obstante cabe destacar que todos los tratamientos del sustrato extracción, salvo el tratamiento control E, son los que tienen mayor conductividad y SAR.

Se han realizado dos tablas para facilitar la comprensión de las clasificaciones elegidas. Solamente se muestran en estas tablas los tratamientos que han sido anteriormente comentados y remarcados para los lixiviados 1 y 5.

<b>Lixiviado 1</b>	Clasificación <b>FAO</b>	Clasificación <b>USLS</b>
Tratamientos		
TCBL	Restricción elevada por Salinidad. Ningún problema de Sodicidad.	C5-S4: Salinidad excesiva. Muy alto contenido en Sodio.
TCMN	Restricción elevada por Salinidad. Ningún problema de Sodicidad.	C4-S3: Salinidad muy alta. Alto contenido en Sodio
TCV	Restricción elevada por Salinidad. Ningún problema de Sodicidad.	C5-S3: Salinidad excesiva. Alto contenido en Sodio
ECBL	Restricción elevada por Salinidad. Ningún problema de Sodicidad.	C5-S4: Salinidad excesiva. Muy alto contenido en Sodio.
ECMN	Restricción elevada por Salinidad. Ningún problema de Sodicidad.	C4-S3: Salinidad muy alta. Alto contenido en Sodio
ECV	Restricción elevada por Salinidad. Ningún problema de Sodicidad.	C5-S4: Salinidad excesiva. Muy alto contenido en Sodio.

<b>Lixiviado 5</b>	Clasificación <b>FAO</b>	Clasificación <b>USLS</b>
Tratamientos		
ETS	Restricción ligera-moderada por Salinidad. Ningún problema de Sodicidad.	C4-S2: Salinidad muy alta. Contenido medio en Sodio.
ETMT	Restricción elevada por Salinidad. Ningún problema de Sodicidad.	C4-S2: Salinidad muy alta. Contenido medio en Sodio.
ETBE	Restricción ligera-moderada por Salinidad. Ningún problema de Sodicidad.	C4-S1: Salinidad muy alta. Bajo contenido en Sodio.
ECBL	Restricción ligera-moderada por Salinidad. Ningún problema de Sodicidad.	C4-S2: Salinidad muy alta. Contenido medio en Sodio.
ECMN	Restricción ligera-moderada por Salinidad. Ningún problema de Sodicidad.	C3-S1: Salinidad alta. Bajo contenido en Sodio.
ECV	Restricción elevada por Salinidad. Ningún problema de Sodicidad.	C4-S2: Salinidad muy alta. Contenido medio en Sodio.

## **6.- CONCLUSIONES**



#### ▪ METALES PESADOS

La utilización de lodos en la preparación de sustratos a partir de residuos mineros calcáreos, aumentó en algunos casos la concentración de Cu, Ni y Zn, durante el primer mes de experiencia. En los siguientes lixiviados se observó una tendencia clara a la disminución.

El rango de concentraciones obtenido para los metales pesados Cu, Ni y Zn ha sido: (0,019-0,133) mg/L, (0,041-0,120) mg/L y (0,013-0,392) mg/L, respectivamente.

El Zn es el metal que se aporta en mayor cantidad a través de los lodos y que presenta también mayor concentración en los lixiviados. La alta variabilidad de los resultados reflejada no permite aclarar cual es el tratamiento con lodo que presenta la mayor concentración.

El Cd, Cr y Pb se mantuvieron durante todos los lixiviados a concentraciones muy bajas, inferiores a los límites de detección.

No se observaron diferencias relevantes entre los post-tratamientos de lodos y entre los sustratos minerales sobre la lixiviación de metales.

Durante los primeros 6 meses de experiencia, la estimación del porcentaje de Cu, Ni y Zn lixiviados respecto a los aportes de estos metales atribuibles a los lodos, en el caso más desfavorable, fue muy baja (<0,6%).

En la mayoría de los casos no se superaron los límites indicados en el RD 995/2000 por lo que se puede afirmar que las concentraciones de metal de los lixiviados analizados no suponen un riesgo de contaminación en aguas superficiales continentales.

#### ▪ CATIONES-ANIONES

A nivel general destaca el Na<sup>+</sup> como el catión detectado en mayor concentración en los lixiviados recogidos durante el primer semestre de los tratamientos con lodos de depuradora. Siendo despreciables las pérdidas de los otros cationes.

Para los aniones se ha obtenido la mayor concentración en NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, seguido por SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> y Cl.

En los lixiviados de los momentos 4 y 5 se producen ligeros aumentos de la concentración de iones de los tratamientos térmicos (Besós, Sabadell y Mataró) para el sustrato extracción.

Se observa una tendencia a la disminución de la Conductividad eléctrica y del SAR a lo largo de la experiencia. Al principio de la experiencia, en el lixiviado 1, es donde se han obtenido los valores más altos de conductividades y SAR. Los tratamientos con mayor SAR y CE son los tratamientos con lodos compostados (Blanes, Manresa, Vilaseca) para ambos sustratos. En caso de aplicar los lixiviados de estos tratamientos, a riego (o actividades similares) hay riesgo de provocar salinización en los suelos donde se aplique, de acuerdo con la clasificación FAO (1985) y USLS (1954). Además de



problemas por salinidad, según la clasificación USLS también existen problemas de sodicidad para estos tratamientos compostados para ambos sustratos.

▪ CONCLUSIÓN FINAL

En resumen, de los resultados de la experiencia realizada, se desprende que no hay riesgo apreciable de que se produzca contaminación por metales pesados (Cu, Cd, Cr, Ni, Pb, Zn) de los acuíferos por lixiviación a partir de sustratos preparados con lodos compostados o secados térmicamente.

Así pues, en base a los resultados obtenidos en este estudio, la utilización de lodos de depuradora compostados o secados térmicamente a dosis elevadas en la preparación de sustratos adecuados para la restauración en el marco de la minería de piedra calcárea, presentó un riesgo muy bajo de contaminación por metales pesados de las aguas subterráneas.

En las condiciones experimentales se demuestra que hay riesgo muy moderado de salinización de las aguas freáticas, puesto que la salinidad de los lixiviados se reduce muy rápidamente después de las primeras lluvias.



## **7.- BIBLIOGRAFÍA**



Acebillo, J. A. y Folch, R. *Atlas ambiental del área de Barcelona. Balance de recursos y problemas*. Estudio Ramón Folch. Gestión y Comunicación Ambiental S.L., 1996. [http://www.mcrit.com/ATLESAB/ATLES\\_CD/Diagnosi/Diag\\_esp.DOC](http://www.mcrit.com/ATLESAB/ATLES_CD/Diagnosi/Diag_esp.DOC) [13/05/08]

Agencia Catalana del Agua. *L'Agència i els Programes de Sanejament d'Aigües Residuals Urbanes i Industrials*. [http://mediambient.gencat.net/aca/documents/ca/publicacions/memoria\\_2005\\_part\\_2\\_2.pdf](http://mediambient.gencat.net/aca/documents/ca/publicacions/memoria_2005_part_2_2.pdf) [29/04/08]

Agencia Catalana del Agua. *La gestió de fangs de depuració d'aigües residuals municipals a Catalunya. Evolució històrica i estratègia de futur (nou Programa de fangs)*. III Jornades Tècniques de Gestió de Sistemes de Sanejament d'Aigües Residuals, 2007. [http://mediambient.gencat.net/aca/documents/ca/jornadatecnica003/02\\_moliner.pdf](http://mediambient.gencat.net/aca/documents/ca/jornadatecnica003/02_moliner.pdf) [30/04/08]

Agencia Catalana del Agua. *Instalaciones de postratamiento de lodos*. [http://mediambient.gencat.net/aca/es//actuacions/depuradores/postractament\\_fangs.jsp](http://mediambient.gencat.net/aca/es//actuacions/depuradores/postractament_fangs.jsp) [08/05/08]

Aguilar, M. R. *Sistemas Poliméricos hidrofílicos con grupos ionizables y su aplicación como biomateriales*. Tesis doctoral. Departamento de Química Orgánica. Universidad Complutense de Madrid, 2002. <http://www.ucm.es/BUCM/tesis/qui/ucm-t26387.pdf> [10/04/2007]

Alcañiz, J.M., Comellas, L., Pujolà, M. *Manual de restauració d'activitats extractives amb fangs de depuradora: recuperació de terrenys marginals*. Ed: Junta de Sanejament, Generalitat de Catalunya. Barcelona, 1996.

Alcañiz, J.M. y Ortiz, O. *Avaluació de treballs de rehabilitació de sòl en àrees afectades per activitats extractives a Catalunya: criteris de qualitat de la restauració*. CREAM-Unitad de Ecologia. Universidad Autónoma de Barcelona. Bellaterra, 2003. Orsis 18: 63-75. <http://ddd.uab.es/pub/orsis/02134039n18p63.pdf> [21/02/08]

Buján, J. y Gonzalez, M.A. *Aplicación de diferentes dosis de fango a suelos calcáreos estudio de lisímetros evolución de las diferentes formas nitrogenadas y estudio de la contaminación de lixiviados*. Trabajo Final de Carrera. ESAB-UPC, 1996.

Carrera, S. y Quevedo, G. *Efecte de l'aplicació de diferents dosis de fang en sòls calcaris degradats: Proves lisimètriques, evolució dels diferents tractaments i lixivats durant el segon any d'experiència*. Trabajo Final de Carrera. ESAB-UPC, 1997.

Chicón, L. *Especiación de metales pesados en lodos de aguas residuales de origen urbano y aplicación de lodos digeridos como mejoradores de suelos*. Trabajo de investigación del Programa de Doctorado en Ingeniería Ambiental. Universidad de Málaga, 2000. <http://usuarios.lycos.es/ambiental/lodos.html> [27/02/08]

Departament de Medi Ambient i del Habitatge de la Generalitat de Catalunya. *Datos del medio ambiente en Catalunya*. Barcelona, 2007.



[http://mediambient.gencat.net/cat/el\\_departament/actuacions\\_i\\_serveis/publicacions/dades\\_2007\\_esp.pdf](http://mediambient.gencat.net/cat/el_departament/actuacions_i_serveis/publicacions/dades_2007_esp.pdf) [30/04/08]

Departament de Medi Ambient i del Habitatge de la Generalitat de Catalunya. *Restauració d'espais afectats per activitats extractives.*

[http://mediambient.gencat.net/cat/el\\_medi/natura/extractives/inici.jsp?ComponentID=63729&SourcePageID=59491](http://mediambient.gencat.net/cat/el_medi/natura/extractives/inici.jsp?ComponentID=63729&SourcePageID=59491) [16/04/08]

Departamento de Química Física y Analítica de la Universidad de Oviedo. *Determinación de plomo en la atmósfera por Espectrofotometría de Absorción Atómica.* Practicas de Análisis Instrumental (Ingeniería Química Curso 2002-2003). <http://web.uniovi.es/QFAnalitica/trans/AnalisisInstrum/Pr%E1ctica%203.doc> [17/01/2007]

Diputació de Barcelona (Àrea de Medio Ambiente). *La gestió de fangs de les estacions depuradores d'aigües residuals.* 1ª ed. Col·lecció "Documents de Treball" Serie Medio Ambiente, 1. Barcelona, 2008.

<http://www.diba.es/pdfs/05622.pdf> [20/02/2008]

Echarri, L. *Ciencias de la tierra y del medio ambiente* [libro electrónico utilizado como complemento del libro de texto: "Ciencias de la Tierra y del Medio Ambiente". Teide, 1998]. Tecnum: Campus Tecnológico de la Universidad de Navarra. Escuela Superior de Ingenieros. Universidad

<http://www.esi.unav.es/asignaturas/ecologia/hipertexto/00General/IndiceGral.html> [23/06/08]

EU 2000. *Working Document on Sludge.* 3<sup>RD</sup> Draft. ENV.E.3/LM. Brussels, 2000. [http://ec.europa.eu/environment/waste/sludge/pdf/sludge\\_en.pdf](http://ec.europa.eu/environment/waste/sludge/pdf/sludge_en.pdf) [18/04/08]

FEGA. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Visor SIGPAC. *Situación geográfica de la cantera de Begues.* <http://sigpac.mapa.es/feqa/visor/> [17/06/08]

García-Gil, J.C. *Efectos residuales y acumulativos producidos por la aplicación de compost de residuos urbanos y lodos de depuradora sobre agro sistemas Mediterráneos degradados.* Tesis doctoral. CSIC-Centro de Ciencias Medioambientales. Madrid, 2001. <http://www.quimicosmadrid.org/doc/lododepu.pdf> [25/02/08]

Google Maps España. *Situación geográfica de la cantera de Begues.* <http://maps.google.es/> [17/06/08]

Hernández, E. *Módulo de Sensibilización Ambiental.* Departamento de Economía Aplicada. Universidad Autónoma de Madrid, 2007.

<http://www.uam.es/departamentos/economicas/econapli/fse03/Senamb07.doc> [20/02/08]

Hernández, J. *Nuevas metodologías de análisis de pesticidas por electroforesis capilar.* Tesis doctoral, Universidad de la Laguna (Tenerife), 2005.

<http://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=994> [18/10/07]

Mata, J. Jornadas Universidad de Barcelona, 2007.

<http://www.inasmet.es/Modulos/DocumentosVisor.aspx?Fid=447> [4/06/08]



Milan, D. *Estudi de la contaminació dels llixiviats a l'aplicar dosis altes de fangs de depuració urbana a terrenys calcaris: Estudi in Vitro / Proba de camp*. Trabajo Final de Carrera. ESAB-UPC, 1994.

Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. *Protección del Medio Ambiente y en particular de los suelos en la utilización de los lodos de depuradora en agricultura*. <http://www.mapa.es/app/Condiciona/Documentos/lodos.pdf> [03/06/08]

Ministerio de Medio Ambiente, Medio Rural y Marino. *Perfil ambiental de España 2006*. [http://www.mma.es/portal/secciones/calidad\\_contaminacion/indicadores\\_ambientales/perfil\\_ambiental\\_2006/pdf/perfilamb2006\\_residuos.pdf](http://www.mma.es/portal/secciones/calidad_contaminacion/indicadores_ambientales/perfil_ambiental_2006/pdf/perfilamb2006_residuos.pdf) [15/05/08]

Ministerio de Medio Ambiente, Medio Rural y Marino. *Plan Nacional Integrado de Residuos (PNIR) 2007-2015. II Plan Nacional de Lodos de Depuradoras de aguas residuales-EDAR II PNLD (2007-2015)*. Anexo 5. Madrid, 2006. [http://www.mma.es/secciones/calidad\\_contaminacion/residuos/planificacion\\_residuos/pdf/borradorpnir\\_anexo5.pdf](http://www.mma.es/secciones/calidad_contaminacion/residuos/planificacion_residuos/pdf/borradorpnir_anexo5.pdf) [13/05/2008]

Ojeda, F. G. *Aplicaciones en superficie de lodos de depuradora y sus repercusiones sobre la erosión y las propiedades físicas del suelo*. Tesis doctoral. CREAM-Unidad de Ecología. Universidad Autónoma de Barcelona. Bellaterra, 2005. [http://www.tesisenxarxa.net/TESIS\\_UAB/AVAILABLE/TDX-0502106-234711//fgoc1de1.pdf](http://www.tesisenxarxa.net/TESIS_UAB/AVAILABLE/TDX-0502106-234711//fgoc1de1.pdf) [20/02/08]

Pérez, P. *Sistemas Poliméricos inteligentes con entrecruzamiento biodegradable*. Tesis doctoral. CSIC-Instituto de Ciencia y Tecnología de Polímeros. Universidad Complutense de Madrid, 2007. <http://www.ictp.csic.es/bm/tesispdf/tesis%20paloma.pdf> [10/04/2007]

Richards, L.A. (ed.). *Diagnóstico y rehabilitación de suelos salinos y sódicos*. Ed: Limusa. Mexico, 1982.

Tarrasón, D. *Alternatives de fertilització per a la rehabilitació de sòls degradats: aplicació de fang fresc, compostat i d'assecatge tèrmic*. Tesis doctoral. CREAM-Unidad de Ecología. Universidad Autónoma de Barcelona. Bellaterra, 2004. [http://www.tesisenxarxa.net/TESIS\\_UAB/AVAILABLE/TDX-1124104-172332//dte1de2.pdf](http://www.tesisenxarxa.net/TESIS_UAB/AVAILABLE/TDX-1124104-172332//dte1de2.pdf) y [http://www.tesisenxarxa.net/TESIS\\_UAB/AVAILABLE/TDX-1124104-172332//dte2de2.pdf](http://www.tesisenxarxa.net/TESIS_UAB/AVAILABLE/TDX-1124104-172332//dte2de2.pdf) [21/02/08]

Uceda, M. *Anàlisi qualitatiu dels fangs generats a les depuradores d'aigües residuals urbanes de Catalunya*. Agència Catalana del Agua. III Jornades Tècniques de Gestió de Sistemes de Sanejament d'Aigües Residuals. Barcelona, 2007. [http://mediambient.gencat.net/aca/documentos/ca/jornadatecnica003/34\\_udeca.pdf](http://mediambient.gencat.net/aca/documentos/ca/jornadatecnica003/34_udeca.pdf) [17/04/08]

## **8.- ANEJO**