

# La disminución del contenido metálico en el proceso de compostaje de residuos sólidos urbanos es factible

I PREMIO AL MEJOR TRABAJO CIENTÍFICO SOBRE TRATAMIENTO DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS  
UNIA - RESUR 2009

M<sup>a</sup> del Carmen Gutiérrez Martín

Ana Belén Corredera Espejo



# La disminución del contenido metálico en el proceso de compostaje de residuos sólidos urbanos es factible

I PREMIO AL MEJOR TRABAJO CIENTÍFICO SOBRE TRATAMIENTO DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS  
UNIA - RESUR 2009

M<sup>a</sup> del Carmen Gutiérrez Martín    Ana Belén Corredera Espejo

## La disminución del contenido metálico en el proceso de compostaje de residuos sólidos urbanos es factible

---

### EDITA

Universidad Internacional de Andalucía.

### AUTORAS

M<sup>a</sup> del Carmen Gutiérrez Martín y Ana Belén Corredera Espejo.

### COAUTORES

Arturo Fco. Chica Pérez  
Antonio Rosal Raya  
M<sup>a</sup> Ángeles Martín Santos  
Manuel Dios Pérez  
M<sup>a</sup> Ángeles Arcos Mora  
José Ángel Siles López  
Antonio Martín Martín

### MAQUETACIÓN Y DISEÑO:

Ricardo Barquín Molero | [cosmonauta.org](http://cosmonauta.org)

### FECHA

Mayo de 2010.

ISBN 978-84-7993-098-5 Versión papel

### COPYRIGHT DE LA PRESENTE EDICIÓN

Universidad Internacional de Andalucía.

### COPYRIGHT

Los autores.

Edición de 500 ejemplares.

### UNIVERSIDAD INTERNACIONAL DE ANDALUCÍA

Monasterio de la Cartuja. Calle Américo Vespucio, 2.  
Isla de la Cartuja. 41092 Sevilla  
[www.unia.es](http://www.unia.es)

# Índice

---

## 0. RESUMEN .15

---

## 1. CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN .19

---

## 2. CAPÍTULO II: OBJETIVOS .27

---

## 3. CAPÍTULO III: MATERIALES Y MÉTODOS .31

### 3.1 PLANTAS DE COMPOSTAJE .32

- 3.1.1 Planta de recuperación y compostaje A .32
- 3.1.2 Planta de recuperación y compostaje B .37
- 3.1.3 Planta de recuperación y compostaje C .45
- 3.1.4 Planta de recuperación y compostaje D .53
- 3.1.5 Descripción de la planta piloto diseñada .55

### 3.2 METODOLOGÍA Y PLAN DE TRABAJO .57

- 3.2.1 Metodología experimental para el estudio del proceso llevado a cabo en cada planta industrial .57
  - 3.2.1.1 Planta de recuperación y compostaje A .57
  - 3.2.1.2 Planta de recuperación y compostaje B .59
  - 3.2.1.3 Planta de recuperación y compostaje C .59
  - 3.2.1.4 Planta de recuperación y compostaje D .61
  - 3.2.1.5 Toma, tratamiento y análisis de muestras .63
- 3.2.2 Metodología experimental a escala piloto .64
  - 3.2.2.1 Diseño de experimentos. Estudio de extracción y especiación de metales .64
  - 3.2.2.2 Toma, tratamiento y análisis de muestras .67
- 3.2.3 Ensayos experimentales en parcelas de cultivo .67
- 3.2.4 Ensayos experimentales de fertilización en semilleros .68
- 3.2.5 Métodos analíticos. Puesta a punto de distintas técnicas .68

## 4. CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIÓN .81

### 4.1 CARACTERIZACIÓN DE LA FRACCIÓN DE LOS RSU QUE SE DESTINAN A COMPOSTAJE EN LAS DIVERSAS PLANTAS .82

### 4.2 RENDIMIENTOS MÁXIMOS EN EL COMPOSTAJE .83

- 4.2.1 Planta de recuperación y compostaje A .83
- 4.2.2 Planta de recuperación y compostaje B .85
- 4.2.3 Planta de recuperación y compostaje C .87
- 4.2.4 Planta de recuperación y compostaje D .89
- 4.2.5 Conclusiones parciales del balance másico .92

### 4.3 ESTUDIO DEL ORIGEN, COMPORTAMIENTO Y CICLO DE VIDA DE LOS METALES

### EN LAS PILAS ESTUDIADAS .93

- 4.3.1 Caracterización metálica en origen .93
- 4.3.2 Evolución de los metales durante el compostaje .96
- 4.3.3 Ciclo vital y destino final de los metales pesados .98
- 4.3.4 Estudio de calidad del compost final, respecto al contenido en metales, producido en cada planta .101

### 4.4 ESTUDIO DE EXTRACCIÓN DE METALES EN PILAS DE FORSU (ESCALA PILOTO) .106

- 4.4.1 Balance de materia seca durante el compostaje .108
- 4.4.2 Análisis del contenido metálico. Eficacia de la lixiviación química .109
- 4.4.3 Ciclo vital de los metales en los experimentos piloto .118
- 4.4.4 Caracterización metálica en los lixiviados generados durante el compostaje de las pilas estudiadas a escala piloto .121
- 4.4.5 Estudio de especiación metálica en las pilas compostadas a escala piloto. Movilidad y biodisponibilidad de los metales pesados .123

### 4.5 ESTUDIO DE EXTRACCIÓN DE METALES EN PILAS DE LODOS (ESCALA PILOTO) .127

- 4.5.1 Balance de materia seca .128
- 4.5.2 Análisis del contenido metálico. Eficacia de la lixiviación química .128

### 4.6 ESTUDIO DE LA ACUMULACIÓN Y ASIMILACIÓN DE METALES PESADOS EN CULTIVOS DE CAMPO EXPERIMENTALES Y EN SEMILLEROS, FERTILIZADOS TOTAL O PARCIALMENTE CON COMPOST .131

- 4.6.1 Caracterización del compost empleado en los ensayos agronómicos experimentales .131
- 4.6.2 Análisis del contenido de metales en suelos de cultivo y plantas .132
- 4.6.3 Análisis del rendimiento productivo obtenido a través de los cultivos que han recibido distintos tratamientos de fertilización .135
- 4.6.4 Ensayos experimentales en semilleros con compost aplicado .136

## 5. CAPÍTULO V: CONCLUSIONES .141

---

## 6. BIBLIOGRAFÍA .149

---

## 7. ABREVIATURAS Y NOMENCLATURA .155

### 7.1 ABREVIATURAS .156

### 7.2 NOMENCLATURA .158

- 7.2.1 Unidades de medida .158
  - 7.2.2 Compuestos .159
-

# Índice de tablas

## CAPÍTULO I

Tabla 1.1: Límite de concentración de metales pesados de los productos fertilizantes .22

## CAPÍTULO III

Tabla 3.1: Características generales de la gestión de la planta .37

Tabla 3.2: Características generales de la gestión en la PRC-B .37

Tabla 3.3: Características generales de la gestión de residuos por la PRC-C .45

Tabla 3.4: Fases programadas en el SCADA de cada túnel .48

Tabla 3.5: Respuesta del autómatas a los cambios físico-químicos .50

Tabla 3.6: Tipo de bioaerosoles generados en función del tipo de residuo orgánico tratado (adaptado de Millner et al., 1994). (+) presencia; (-) ausencia .51

Tabla 3.7: Programa de funcionamiento de los túneles en la PRC-D .55

Tabla 3.8: Programa de funcionamiento de los túneles de compostaje en la PRC-C .60

Tabla 3.9: Fuerza ácida de cada uno de los extractantes utilizados .65

Tabla 3.10: Grado de innovación en el estudio de la lixiviación química de metales a escala piloto .66

Tabla 3.11: Sustrato utilizado en semilleros para distintas siembras de tomate y melón .68

Tabla 3.12: Métodos de digestión para la extracción de metales .70

Tabla 3.13: Resultados en el análisis de metales de tres muestras de FORSU con distinta digestión .70

Tabla 3.14: Resultados en el análisis de metales de tres muestras procedentes de una mezcla de lodos y poda y que han tenido distinta digestión .71

Tabla 3.15: Condiciones de trabajo en el espectrofotómetro de llama .75

Tabla 3.16: Condiciones de trabajo para el cálculo del LD .75

Tabla 3.17: Métodos de extracción de las distintas fracciones metálicas .77

## CAPÍTULO IV

Tabla 4.1: Balance másico y porcentaje de humedad en el procesado de la APF y la APL .84

Tabla 4.2: Balance másico y porcentaje de humedad en el material de la pila BPF .86

Tabla 4.3: Balance másico y porcentaje de humedad en el procesado de CPF y CTF 71 .88

Tabla 4.4: Balance másico y porcentaje de humedad en el material de las pilas DPF, DTF1, DTF2 y DTF3 .90

Tabla 4.5: Contenido metálico (ppm) de distintas fracciones del residuo .94

Tabla 4.6: Valores medios de concentración (ppm) de distintas fracciones del residuo .94

Tabla 4.7: Masa de metal (mg) que aporta cada fracción de residuo por kilo de material de la pila a compostar .95

Tabla 4.8: Resultados experimentales del análisis de pH, %M.O. y metales. s.m.s. (sobre materia seca). A.R.= antes de refino .97

Tabla 4.9: Cantidades calculadas de cada metal, en diversos momentos del proceso. Pila APF .99

Tabla 4.10: Cantidades calculadas de cada metal, en diversos momentos del proceso. Pila APL .99

Tabla 4.11: Cantidades calculadas de cada metal, en diversos momentos del proceso. Pila CPF .100

Tabla 4.12: Cantidades calculadas de cada metal, en diversos momentos del proceso. Pila CTF .100

Tabla 4.13: Concentración de metales (ppm) en el compost producido .101

Tabla 4.14: Límites de concentración metálica según la legislación actual .102

Tabla 4.15: Evolución de la masa (kg de materia seca) de las pilas experimentales durante el proceso y volumen total de lixiviado recogido en los 55 días .108

Tabla 4.16: Determinación del contenido metálico durante el compostaje de la pila testigo. Los resultados, están expresados en ppm (mg metal/kg materia seca) .109

Tabla 4.17: Determinación del contenido metálico durante el compostaje de la pila del experimento 1. Los resultados, están expresados en ppm (mg metal/kg materia seca) .110

Tabla 4.18: Determinación del contenido metálico durante el compostaje de la pila del experimento 2. Los resultados, están expresados en ppm (mg metal/kg materia seca) .110

Tabla 4.19: Determinación del contenido metálico durante el compostaje de la pila del experimento 3. Los resultados, están expresados en ppm (mg metal/kg materia seca) .110

Tabla 4.20: Determinación del contenido metálico durante el compostaje de la pila del experimento 4. Los resultados, están expresados en ppm (mg metal/kg materia seca) .111

Tabla 4.21: Porcentaje de reducción obtenido en cada experimento .118

Tabla 4.22: Cantidades calculadas de cada metal, en diversos momentos del proceso. Testigo .119

Tabla 4.23: Cantidades calculadas de cada metal, en diversos momentos del proceso. Experimento 1 .119

Tabla 4.24: Cantidades calculadas de cada metal, en diversos momentos del proceso. Experimento 2 .120

Tabla 4.25: Cantidades calculadas de cada metal, en diversos momentos del proceso. Experimento 3 .120

Tabla 4.26: Cantidades calculadas de cada metal, en diversos momentos del proceso. Experimento 4 .120

Tabla 4.27: Contenido de metal (mg) analizado en el lixiviado recogido .122

Tabla 4.28: Planificación de la experimentación con pilas de LODOS + PODA .127

Tabla 4.29: Evolución de la masa de las pilas experimentales durante el proceso y volumen total de lixiviado recogido en los 55 días .128

Tabla 4.30: Determinación del contenido metálico durante el compostaje de la pila testigo .129

Tabla 4.31: Determinación del contenido metálico durante el compostaje de la pila del experimento 1 .129

Tabla 4.32: Determinación del contenido metálico durante el compostaje de la pila del experimento 2 .129

Tabla 4.33: Porcentaje de reducción obtenido al comparar concentraciones de metal en el compost procedente de pilas 1:1 con los valores de analizados en el compost procedente de la pila proporción 4:1 .130

Tabla 4.34: Caracterización físico-química de los compost empleados en ensayos agronómicos. Todos los análisis realizados sobre muestra seca. nd= no determinado .132

Tabla 4.35: Valores medios del contenido (ppm) de cada metal en el grano de trigo determinado en los cuatro años de cosechas .133

Tabla 4.36: Valores medios del contenido (ppm) de cada metal en el suelo donde se ha cultivado trigo, determinados estos en los cuatro años de cosechas .133

Tabla 4.37: Valores medios del contenido (ppm) de cada metal en el bulbo de ajo, determinados estos en los cuatro años de cosechas .133

Tabla 4.38: Valores medios del contenido (ppm) de cada metal en el suelo donde se ha cultivado el ajo, determinados estos en los cuatro años de cosechas .134

Tabla 4.39: Media del contenido en metales pesados en grano de trigo durante los 4 años .134

Tabla 4.40: Media del contenido en metales pesados en el suelo plantado con trigo, durante los 4 años de tratamientos de fertilización. \*Letras diferentes indican diferencia significativa al 95% .134

Tabla 4.41: Media del contenido en metales pesados en bulbos de ajo durante los 4 años de tratamientos de fertilización. \*Letras diferentes indican diferencia significativa al 95% .135

Tabla 4.42: Media del contenido en metales pesados en el suelo plantado con ajo, durante los 4 años de tratamientos de fertilización. \*Letras diferentes indican diferencia significativa al 95% .135

Tabla 4.43: Rendimiento en la producción de trigo (kg/ha) por año de cosecha .135

Tabla 4.44: Rendimiento en la producción de bulbos de ajo (Kg/ha) por año de cosecha .136

Tabla 4.45: Concentración de metal en cada uno de los sustratos empleados. Los resultados están expresados en mg metal/kg muestra seca. \*Compost 1 .137

Tabla 4.46: Concentración de metal (mg/kg) en tomate sembrado en semillero con varias mezclas de sustratos. \*Compost 1 .137

Tabla 4.47: Concentración de metal en melón sembrado en semillero con varias mezclas de sustratos.\*Compost 1 .137

Tabla 4.48: Concentración de metal en tomate sembrado en semillero con varias mezclas de sustratos. \*\*Compost 2 .138

Tabla 4.49: Concentración de metal en melón sembrado en semillero con varias mezclas de sustratos. \*\*Compost 2.138

## Índice de figuras

### CAPÍTULO III

Figura 3.1: Esquema de la planta de recuperación y compostaje A .35

Figura 3.2: Zona de descarga. Se observan las dos cintas; línea de inertes y línea de orgánica .36

Figura 3.3: Detalle de tromel de separación .36

Figura 3.4: Balsas de lixiviados .36

Figura 3.5: Aspecto de los conductos de aspiración que garantizan la calidad del aire dentro de la planta de compostaje .39

Figura 3.6: Las latas separadas mediante corrientes de Foucault y posteriormente prensadas .40

Figura 3.7: Aspecto que tiene la cinta formadora de pilas o montones de compost .42

Figura 3.8: Zona de refinado en una planta .43

Figura 3.9: Diagrama de proceso para las dos líneas de tratamiento en la planta de Montalbán. Fuente: EPREMASA .44

Figura 3.10: Túnel de compostaje .47

Figura 3.11: Zona de volteos mecánicos de las pilas .47

Figura 3.12: A la izquierda, suministro de aire en el suelo de un túnel en construcción (sin cubrir) y a la derecha, detalle de suelo perforado del túnel (ya cubierto) .49

Figura 3.13: Pantalla general de control del proceso en un túnel .52

Figura 3.14: Sistema de carga de túnel de compostaje con cinta transportadora .54

Figura 3.15: Sistema de depuración de lixiviados .54

Figura 3.16: Planta piloto cargada con residuo fresco. En la parte superior izquierda y derecha se observan las sondas de temperatura .56

Figura 3.17: Volumen de residuo a los 34 días de compostaje .56

Figura 3.18: Esquema de la determinación de la temperatura en el interior de la pila .58

Figura 3.19: Data Logger para registro de la temperatura interior de las pilas de compostaje .58

Figura 3.20: Volteo mecánico de una pila .60

Figura 3.21: A la derecha de la imagen, se observa cómo mediante pala mecánica se transporta el residuo al interior de un túnel. A la izquierda, un túnel abierto después de finalizar el programa de funcionamiento .61

Figura 3.22: Programa de control de la pila DTF1 de 14 días de compostaje en túnel .62

Figura 3.23: Programa de control de la pila DTF2 de 16 días de compostaje en túnel .62

Figura 3.24: Programa de control de la pila DTF3 de 19 días de compostaje en túnel .63

Figura 3.25: Estructura molecular del ácido cítrico .65

Figura 3.26: Estructura molecular del ácido oxálico .65

Figura 3.27: Aplicación del stadvisor a 3 medidas del Cu .72

Figura 3.28: Aplicación del stadvisor a 3 medidas del Cd .72

Figura 3.29: Aplicación del stadvisor a 3 medidas del Cr .72

Figura 3.30: Aplicación del stadvisor a 3 medidas del Ni .72

Figura 3.31: Aplicación del stadvisor a 3 medidas del Pb .72

Figura 3.32: Aplicación del stadvisor a 3 medidas del Zn .72

Figura 3.33: Aplicación del stadvisor a 3 medidas del Cu .73

Figura 3.34: Aplicación del stadvisor a 3 medidas del Cd .73

Figura 3.35: Aplicación del stadvisor a 3 medidas del Cr .73

- Figura 3.36: Aplicación del stadvisor a 3 medidas del Ni .73  
 Figura 3.37: Aplicación del stadvisor a 3 medidas del Pb .73  
 Figura 3.38: Aplicación del stadvisor a 3 medidas del Zn .73  
 Figura 3.39: Espectrofotómetro de llama AAnalyst 300 .76

## CAPÍTULO IV

- Figura 4.1: Gráficos de cuñas porcentuales (% en peso) correspondientes a la caracterización del residuo de partida a compostar en cada planta .82  
 Figura 4.2: Diagrama de flujo másico del material en la pila APF .84  
 Figura 4.3: Diagrama de flujo másico del material en la pila APL .85  
 Figura 4.4: Diagrama de flujo másico del material en la pila BPF .87  
 Figura 4.5: Diagrama de flujo másico del material en la pila CPF .88  
 Figura 4.6: Diagrama de flujo másico del material en la pila CTF .89  
 Figura 4.7: Diagrama de flujo másico del material en la pila DPF .90  
 Figura 4.8: Diagrama de flujo másico del material en la pila DTF1 .91  
 Figura 4.9: Diagrama de flujo másico del material en la pila DTF2 .91  
 Figura 4.10: Diagrama de flujo másico del material en la pila DTF3 .92  
 Figura 4.11: Nivel de concentración de Cu en el producto obtenido de cada pila estudiada .103  
 Figura 4.12: Nivel de concentración de Cd en el producto obtenido de cada pila estudiada .103  
 Figura 4.13: Nivel de concentración de Cr en el producto obtenido de cada pila estudiada .104  
 Figura 4.14: Nivel de concentración de Ni en el producto de cada pila estudiada .104  
 Figura 4.15: Nivel de concentración de Pb en el producto de cada pila estudiada .105  
 Figura 4.16: Nivel de concentración de Zn en el producto de cada pila estudiada .105  
 Figura 4.17: Evolución de la temperatura a lo largo del compostaje en uno de los experimentos a escala piloto. Las barras verticales indican las adiciones de ácido .107  
 Figura 4.18: Evolución del porcentaje de pérdidas en materia seca de cada una de las pilas compostadas a escala piloto .109  
 Figura 4.19: Evolución de los metales en la pila testigo .111  
 Figura 4.20: Evolución de los metales en la pila del experimento 1 .112  
 Figura 4.21: Evolución de los metales en la pila del experimento 2 .112  
 Figura 4.22: Evolución de los metales en la pila del experimento 3 .113  
 Figura 4.23: Evolución de los metales en la pila del experimento 4 .113  
 Figura 4.24: Concentración de Cu en cada pila piloto .114  
 Figura 4.25: Concentración de Cd en cada pila piloto .115  
 Figura 4.26: Concentración de Cr en cada pila piloto .115  
 Figura 4.27: Concentración de Ni en cada pila piloto .116  
 Figura 4.28: Concentración de Pb en cada pila piloto .116  
 Figura 4.29: Concentración de Zn en cada pila piloto .117  
 Figura 4.30: Especiación BCR al inicio .123  
 Figura 4.31: Especiación BCR en compost testigo .124  
 Figura 4.32: Especiación BCR en compost del experimento 1 .124  
 Figura 4.33: Especiación BCR en compost del experimento 2 .125  
 Figura 4.34: Especiación BCR en compost del experimento 3 .125  
 Figura 4.35: Especiación BCR en compost del experimento 4 .126



## Resumen

El aumento de población en núcleos urbanos, el creciente nivel de vida y los cambios en hábitos de consumo, han producido un notable incremento de residuos sólidos urbanos y de lodos procedentes de Estaciones Depuradoras de Aguas Residuales (EDARs). La necesidad de aprovechar la materia orgánica en ellos contenida con objeto de contribuir a paliar el déficit de ésta en los suelos mediterráneos, aliviar el problema de su depósito en vertederos, y fijar en el terreno una parte del carbono evitando su migración a la atmósfera (que se ha confirmado con el RD de vertederos de 2001, y los Planes de Residuos Nacionales y Autonómicos aprobados en los últimos años), motivó al Grupo de Investigación de Ingeniería Química de la Universidad de Córdoba a iniciar en 1998, el estudio del compostaje de residuos orgánicos.

Este trabajo se encuadra en el desarrollo de ese estudio. En él se reúne el resultado de varios años de trabajo a escala industrial principalmente, con los inconvenientes que ello comporta, pero con el interés de colaborar directamente con la sociedad real a la que van dirigidas las conclusiones del mismo.

En la introducción y objetivos se sitúa el problema en que nos hemos centrado en este trabajo: el problema que supone la acumulación de metales en el compost y sus posibles soluciones.

En materiales y métodos se describen los modos de operar en la Plantas de Recuperación y Compostaje (PRC) que se han estudiado. A continuación, se describe una planta piloto expresamente diseñada para este trabajo, en la que se ha estudiado, fundamentalmente, el efecto de la adición de ácidos orgánicos al material en compostaje sobre el contenido de metales en el compost. Se detallan así mismo, las condiciones de experimentación, para comprobar el efecto (especialmente desde el punto de vista del contenido metálico) de la sustitución de abono mineral y turba por compost, en campo y semilleros, respectivamente.

Finalmente, la experimentación se ha enfocado a los tres aspectos centrales del trabajo, encontrándose los siguientes resultados:

#### ***Caracterización, análisis y evolución del contenido metálico en el proceso de compostaje, realizado en cuatro plantas de reciclado y compostaje de residuos municipales de Andalucía.***

Se ha encontrado que, los metales ya están presentes en los materiales de partida, y no sólo en los inorgánicos, sino también en los típicamente catalogables como materia orgánica. Su concentración en el compost, por pérdida de materia volatilizable, es la esperable en todos los casos, salvo para el Cu y Zn, metales que han demostrado afinidad por la materia orgánica, a la que se unen fácilmente, probablemente en forma de complejos húmicos, y transfiriéndose a lo largo del proceso desde la fracción inorgánica del material a la fracción orgánica (fenómeno nunca antes cuantificado en bibliografía a nivel industrial).

El estudio de una pila de lodos de EDARS (LD) mezclados con material de poda en proporción 5:1, ha demostrado que, con frecuentes volteos se puede compostar en un periodo aproximado de 6 meses, aún sin alcanzar condiciones termófilas. En este caso, la cantidad total de metales medida al inicio y al final del proceso ha sido la misma, produciéndose el lógico aumento de la concentración de éstos al disminuir la masa total de la pila.

#### ***Estudio de la lixiviación química a escala piloto, en el compostaje de material constituido únicamente con FORSU, como método de eliminación de metales en el compost.***

Se ha diseñado y construido una planta piloto, con capacidad para algo más de 100 kg de FORSU, en la que se ha simulado eficazmente el sistema de compostaje en pilas volteadas y regadas. Con ella se ha verificado que añadir ácido cítrico o ácido oxálico en una proporción por debajo de 40 ml de ácido 0,25 Molar por cada kg de residuo seco, no afecta al desarrollo del proceso de compostaje más que en el nivel de pH alcanzado (un punto más bajo) y en una notable reducción en el contenido final de Cu, Zn y también Pb con respecto a lo que sucede cuando no se añade ácido. Esta reducción no se produce por extracción de los metales y paso al lixiviado, sino por impedimento de la transferencia de éstos a la fracción orgánica.

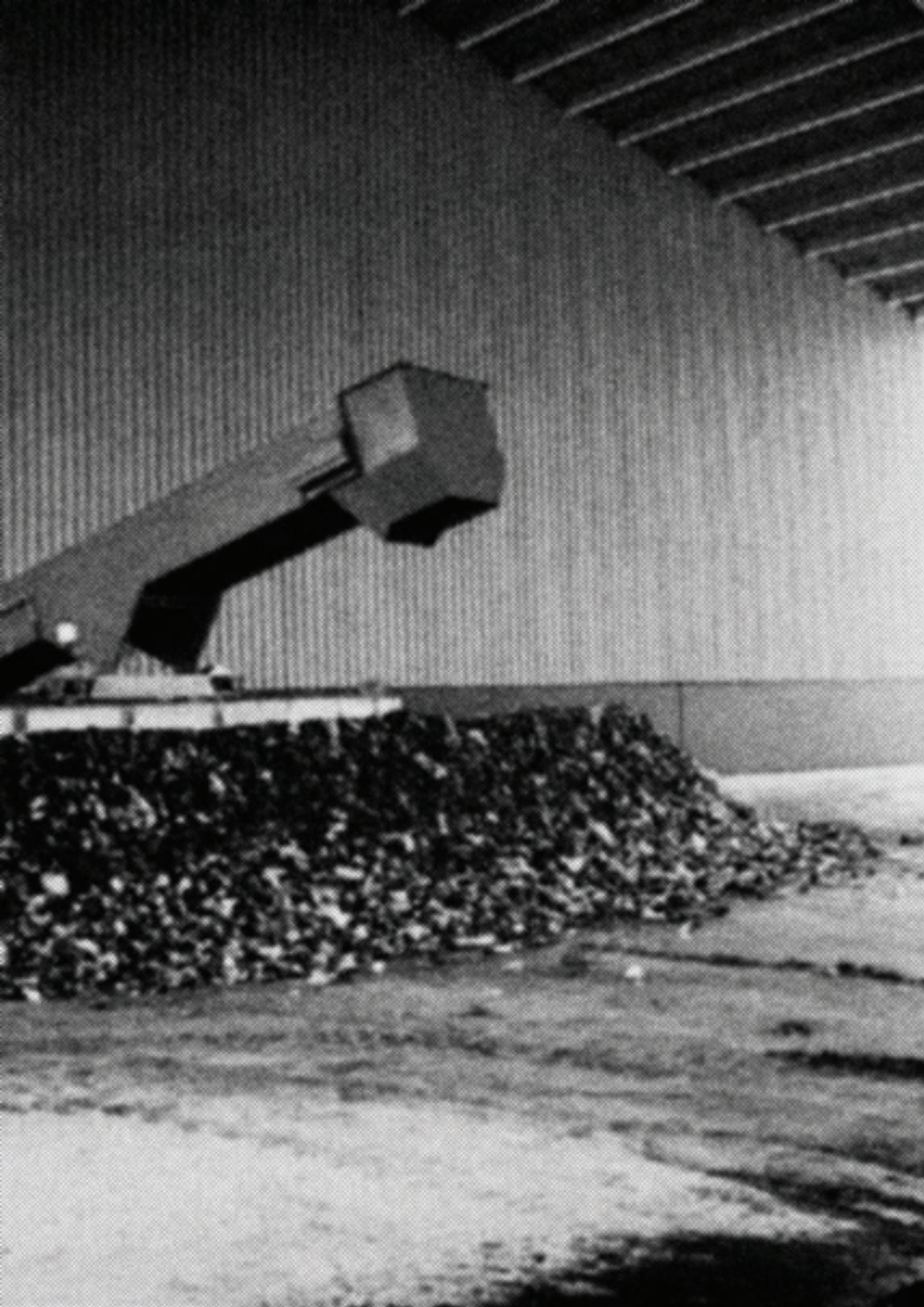
Estos resultados son originales de nuestro grupo y no se han publicado aún en ninguna revista especializada.

Un análisis de especiación, BCR, ha confirmado lo dicho en el párrafo anterior. Además indica que en el compost, la fracción más móvil de los metales representa menos del 25% del total de metal detectado, y la fracción fija ha sido del 35%.

#### ***Análisis de la bioacumulación de metales pesados en suelos y de la bioasimilación en vegetales a partir de ensayos experimentales de cultivos y siembra de semilleros a los que se les ha aplicado compost.***

El tratamiento aplicado (con y sin compost) en las distintas zonas de campo no ha supuesto una variación significativa en la concentración de metales acumulados, ni en los suelos, ni en los correspondientes productos obtenidos. El rendimiento productivo obtenido abonando con N mineral y abonando con una mezcla al 50% de compost y N mineral ha sido similar en 4 años de estudio.

Sin embargo, en el estudio en semilleros se ha encontrado que la bioasimilación de metales en la planta de tomate y en la de melón ha sido mayor cuando la mezcla de sustratos ha contenido compost. A mayor porcentaje de éste en la mezcla, mayor concentración de metal se ha determinado en la cosecha. Una vez más, el Zn, seguido del Cu, y muy alejado el Pb, son los tres metales que en mayor proporción se han encontrado en la planta; precisamente son los tres que más se concentran en el compost y además los que tienen mayor porcentaje de metal en forma de fracción móvil y fracción unida a la materia orgánica.



## 1. Introducción

La conservación del medio ambiente constituye en la actualidad uno de los grandes retos de la humanidad, cuyo futuro depende en gran medida del adecuado enfoque y tratamiento que se dé al mismo. Esto abarca diversos y múltiples aspectos, entre los que, la pérdida de materia orgánica en el suelo, y la gestión de los residuos municipales aparecen como algunos de los más importantes.

La utilización cada vez más intensiva del suelo, así como el empleo de prácticas inadecuadas de cultivo y de maquinaria pesada, ha dado lugar a una disminución del contenido de materia orgánica del mismo, alterando el equilibrio químico y biológico de sus diferentes horizontes, lo cual ha ido acompañado de una degradación de su estructura y una pérdida o disminución de su fertilidad física, química y biológica. La degradación de un suelo supone ante todo una disminución de su capacidad productiva, debido a ciertos cambios sufridos en sus propiedades físicas, químico-físicas, químicas, bioquímicas o biológicas que conducen a la pérdida o disminución de su fertilidad.

Por otro lado, las fuentes tradicionales de materia orgánica para los suelos, tales como estiércoles y turbas, son cada vez más escasas y, no siempre, son las apropiadas para estos fines. Se ha hecho así necesaria la búsqueda de otros materiales orgánicos, de bajo costo, y que a ser posible se produzcan de modo sostenible. En este sentido, el reciclado de los residuos orgánicos municipales tales como lodos de aguas residuales urbanas y la Fracción Orgánica de los Residuos Sólidos Urbanos (F.O.R.S.U.) puede resultar una alternativa interesante.

La aglomeración de la población en núcleos urbanos y el aumento del nivel de vida han provocado un incremento progresivo de la generación de estos residuos, cuya acumulación puede constituir un foco de contaminación de consecuencias imprevisibles.

Su utilización con fines agrícolas y de regeneración de suelos permite paliar la escasez de materia orgánica antes señalada y sirve para dar salida a los mismos, evitando los problemas ambientales que su acumulación provoca.

Sin embargo, la utilización directa de estos residuos no siempre está exenta de riesgos, ya que además de poder generar problemas derivados de la presencia de metales pesados, contaminantes orgánicos y microorganismos patógenos, al utilizar una materia orgánica poco estabilizada (como es el caso de los residuos urbanos “frescos”) se puede dar lugar a situaciones incompatibles con el desarrollo normal de los cultivos. Por todo esto es aconsejable someter los residuos a un adecuado proceso de estabilización y compostaje que permita obtener un producto final, “compost”, que pueda ser utilizado en agricultura sin provocar efectos negativos en el suelo o en las plantas.

Quizás el factor limitante a tener más en cuenta en el uso del compost en agricultura (sobre todo en agricultura ecológica), es su contenido en metales pesados. Algunos metales, a partir de una determinada concentración, pueden resultar tóxicos para

las plantas. El nivel de peligrosidad de estos metales va ligado a su toxicidad y persistencia, sin olvidar la capacidad que posee la planta para absorber parcialmente a estos elementos. Por ello es fundamental, a la hora de evaluar el grado de peligrosidad de estos metales en el compost, tener en cuenta la movilidad y forma química del metal, así como el pH o el contenido en arcillas.

El problema de los metales pesados en el suelo es uno de los que más preocupa a los investigadores, debido fundamentalmente a:

La existencia de cultivos que acumulan metales (tomate, lechuga, maíz, champiñón, etc.).

Efecto a largo plazo sobre la cadena alimentaria.

Fuerte impacto ambiental en general.

Dificultades que presenta la remediación de la contaminación que provocan.

La aparición de normativas, cada vez más restrictivas, que reducen el mercado y la salida comercial del compost.

El origen de algunos metales en los RSU (como Cd, Ni, y Cr) podría estar en las pilas usadas, pudiendo proceder de recipientes metálicos, pinturas, tintes, marcaje de cartones, o aditivos de polimerización usados en los plásticos. En general podríamos decir que la mayoría de estos metales proceden de la actividad industrial ya sea directa, o indirectamente. Por ello los contenidos en metales pesados tanto en RSU como en los lodos de depuradora varían dependiendo de la región de procedencia de dichos residuos.

Conocer las cantidades totales de metales pesados es una información necesaria para valorar los riesgos de acumulación y sus peligros potenciales, pero el verdadero problema estriba en la posibilidad de migración que tengan dichos metales en el suelo, así como su disponibilidad para las plantas.

Aunque la concentración de metales en forma hidrosoluble suele ser baja, existe otra fracción, en principio no soluble, que se puede poner a disposición de la planta.

El pH del compost, normalmente situado entre 7 y 8, hace que la movilidad de los metales sea baja (Juste y Pommel., 1977).

El proceso de compostaje al que se someten los residuos hace aumentar la concentración de metales pesados totales, debido a la pérdida de peso que sufre la mezcla como consecuencia de la mineralización de la materia orgánica (en muchos casos, en ocho semanas se pierde el 50% del peso inicial), pero si estudiamos la fracción extraíble con agentes quelantes (DTPA, EDTA, etc.) o con agua, se aprecia en muchos metales una cierta insolubilización durante el proceso de compostaje (F. Costa, 1995).

Por eso se hace necesario profundizar en el conocimiento del proceso de compostaje de la fracción orgánica de los residuos municipales así como de los lodos de depuradora municipales, poniendo especial énfasis en el contenido metálico de los mismos.

Según el Real Decreto 824/2005, un residuo orgánico que ha sufrido un proceso de fermentación se considerará biorresiduo o compost en función de la concentración en metales pesados que éste posea, así como la calidad de los compost estará determinada por el mismo parámetro; de lo que se deriva que la aplicación agronómica de un residuo orgánico, tras un proceso de compostaje, depende en gran medida de su concentración en metales pesados.

Así, los valores límites de metales pesados aplicables a los productos fertilizantes elaborados con residuos y otros componentes orgánicos según el anexo V del R.D. 824/2005, son los siguientes:

METAL PESADO	Límite de concentración mg/kg de materia seca		
	Clase A	Clase B	Clase C
Cadmio	0,7	2	3
Cromo (total)	70	250	300
Cromo (VI)	0	0	0
Cobre	70	300	400
Mercurio	0,4	1,5	2,5
Níquel	25	90	100
Plomo	45	150	200
Zinc	200	500	1.000

Tabla 1.1. Límite de concentración de metales pesados de los productos fertilizantes

Según estos límites los productos fertilizantes son clasificados según su calidad medioambiental en:

**Clase A:** productos fertilizantes cuyo contenido en metales pesados no superan ninguno de los valores de la columna A. Producto de alto nivel de calidad, que no presenta restricciones de uso excepto los límites establecidos para agricultura.

**Clase B:** productos fertilizantes cuyo contenido en metales pesados no superan ninguno de los valores de la columna B.

**Clase C:** productos fertilizantes cuyo contenido en metales pesados no superan ninguno de los valores de la columna C

Los productos de la clase C no podrán aplicarse sobre suelos agrícolas en dosis superiores a cinco toneladas de materia seca por ha y año.

### Metodologías de eliminación de metales

Por todo lo expuesto anteriormente, en los últimos años se han ido desarrollando distintas metodologías para evitar la acumulación de metales pesados o para la reducción de los mismos, bien en el material de partida del proceso de compostaje o bien en el producto final. Estas tecnologías se pueden clasificar en dos tipos:

#### a) Lixiviación química

La lixiviación química consiste en separar los constituyentes solubles de un sólido inerte con un solvente. El proceso completo de extracción suele comprender la recuperación por separado del solvente y el soluto.

Este proyecto se interesa por los metales pesados como constituyentes de interés de los residuos, que deberían solubilizarse, para ser eliminados junto al solvente. De esta manera, la materia orgánica que constituye el residuo quedaría con concentraciones de metales aptas para poder obtener tras el compostaje un producto de buena calidad.

Se debe tener en cuenta que la solubilización de metales mejora con la acidez y a medida que se aumenta la temperatura de reacción, y disminuye con el contenido de materia orgánica. Sin embargo se debe llegar a un compromiso entre unos buenos resultados, el bajo coste y unas condiciones que no alteren la calidad del material a compostar. La velocidad y duración del tratamiento está dirigida por las características del contaminante, su reactividad con los agentes químicos utilizados y las características del residuo.

El proceso consiste en poner en contacto mediante volteos del residuo sólido con el agente extractante, preferiblemente un ácido orgánico o inorgánico débil. El ácido nítrico, clorhídrico y sulfúrico, así como agentes quelantes como NTA y EDTA no son aplicables a gran escala por el alto coste de los procesos, por su influencia negativa en la calidad final del producto y por el impacto medioambiental negativo que suponen las corrientes de residuos sólidos y líquidos generados.

#### b) Biolixiviación

La biolixiviación o *bioleaching* es un proceso de lixiviación microbiana, consiste en la producción por medio de microorganismos de ácido sulfúrico y la posterior solubilización de metales pesados mediante la oxidación de sulfuros metálicos insolubles a sulfatos solubles y ácido sulfúrico. Este proceso está mediado por unas específicas bacterias acidófilas capaces de producir ácido, las más estudiadas son

del género *Thiobacillus*. Estos microorganismos son capaces de oxidar compuestos de azufre reducidos o  $\text{Fe}^{2+}$ , usados como sustrato.

Existen numerosas referencias bibliográficas sobre biolixiviación pero ninguna de ellas referidas a un lodo digerido anaeróbicamente procedente de residuos urbanos, sino aplicada a aguas residuales. En este sector demuestran la viabilidad desde el punto de vista técnico de la lixiviación metálica las especies *T.ferrooxidans* y *T.thiooxidans*. Ambos bacilos, **Gram** -, quimioautotróficos, oxidan iones ferroso y azufre (ferrooxidans) o sólo azufre (thiooxidans) para obtener energía, fijan dióxido de carbono para obtener carbono; son aerobios y acidófilos.

El efecto de ciertos factores ambientales sobre el desarrollo y crecimiento de estas bacterias juega un rol importante dentro del proceso de lixiviación bacteriana, es por ello de mucha importancia el control de factores, como el pH, la presencia de oxígeno, la temperatura, la influencia de la luz, los requerimientos nutricionales, tamaño de partícula, y el efecto de inhibidores, entre otros. Se pueden destacar:

**pH:** Se desarrollan bien en medios ácidos, siendo los *T.ferrooxidans* incapaces de desarrollarse a un pH mayor de 3.0. Normalmente los valores sobre los que los tiobacilos se desarrollan se ubican dentro del rango de 1.5 a 2.5, siendo posible el desarrollo de los *T.thiooxidans* de 0.6 a 6.

**Oxígeno y Dióxido de Carbono:** La disponibilidad de oxígeno es un factor que controla la extracción de metales por bacterias, ya que los microorganismos son aerobios. No se conoce otro oxidante que pueda ser utilizado por los microorganismos en ambientes de lixiviación.

El dióxido de carbono o carbonatos son utilizados como fuente de carbono, se utiliza la inyección de aire para proveer de  $\text{CO}_2$  y  $\text{O}_2$ . Se puede controlar la concentración de  $\text{CO}_2$  y  $\text{O}_2$  consumido durante los experimentos de biolixiviación mediante equipos especializados. El consumo de estos gases está directamente relacionado con la actividad microbiana.

**Nutrientes:** Como todos los seres vivos, requieren de fuentes nutricionales para su óptimo desarrollo, entre las que tenemos fuente de fósforo, de S, iones metálicos (como  $\text{Mg}^{+}$ ), etc. Los medios de cultivo empleados presentan estos requerimientos, siendo los más importantes el 9K y el TK. La demanda de nitrógeno se satisface con N o con formas reducidas de N como amonio y/o nitratos.

**Fuente de Energía:** Los *T.ferrooxidans* utilizan como fuente primaria de energía los iones ferroso y azufre inorgánico y los *T.thiooxidans* utilizan solamente el azufre. El hierro ferroso debe ser suplementado al medio cuando se trata de medios sintéticos.

**Luz:** La luz visible y la no filtrada tienen un efecto inhibitorio sobre algunas especies de *Thiobacillus*, pero el hierro férrico ofrece alguna protección a los rayos visibles.

**Temperatura:** El rango sobre el cual se desarrollan se encuentra entre 25°C y 35°C. En cuanto al efecto de la temperatura usando bacterias originarias del lodo oxidantes de S (*Thiobacillus spp.*), cuanto menor sea ésta da lugar a una acumulación más lenta del ácido y por lo tanto una reducción del pH también más lenta. A pH constante, la solubilización de metal es independiente de la temperatura.

**Presencia de Inhibidores:** Los iones en ciertas concentraciones resultan tóxicas para las bacterias ferrooxidantes afectando el desarrollo bacteriano. La literatura señala que los niveles de tolerancia de las bacterias para ciertos metales es  $\text{Zn}^{+2} = 15 - 72 \text{ g/l}$ ;  $\text{Ni}^{+2} = 12 - 50 \text{ g/l}$ ;  $\text{Cu}^{+2} = 15 \text{ g/l}$ ;  $\text{Ag}^{+} = 1 \text{ ppb}$ ;  $\text{O}_2^{+2} = 200 - 500 \text{ mg/l}$ , entre otros. Existen otras sustancias inhibitorias que pueden afectar a la lixiviación de metales pesados de lodos de agua residual digerido anaeróbicamente como son los ácidos orgánicos, estando aún sin conocer el efecto en lodos procedentes de plantas de tratamiento de RSUs. Dentro de los ácidos orgánicos, especialmente el acético en una concentración de 10.8mM y los ácidos propiónicos con 9.88mM. Hay que tener en cuenta que la digestión anaerobia se inhibe con unos niveles de 13 mM de acético y 18,2 mM de propiónico, por lo que los niveles de inhibición de la biolixiviación se alcanzarán en escasas ocasiones.



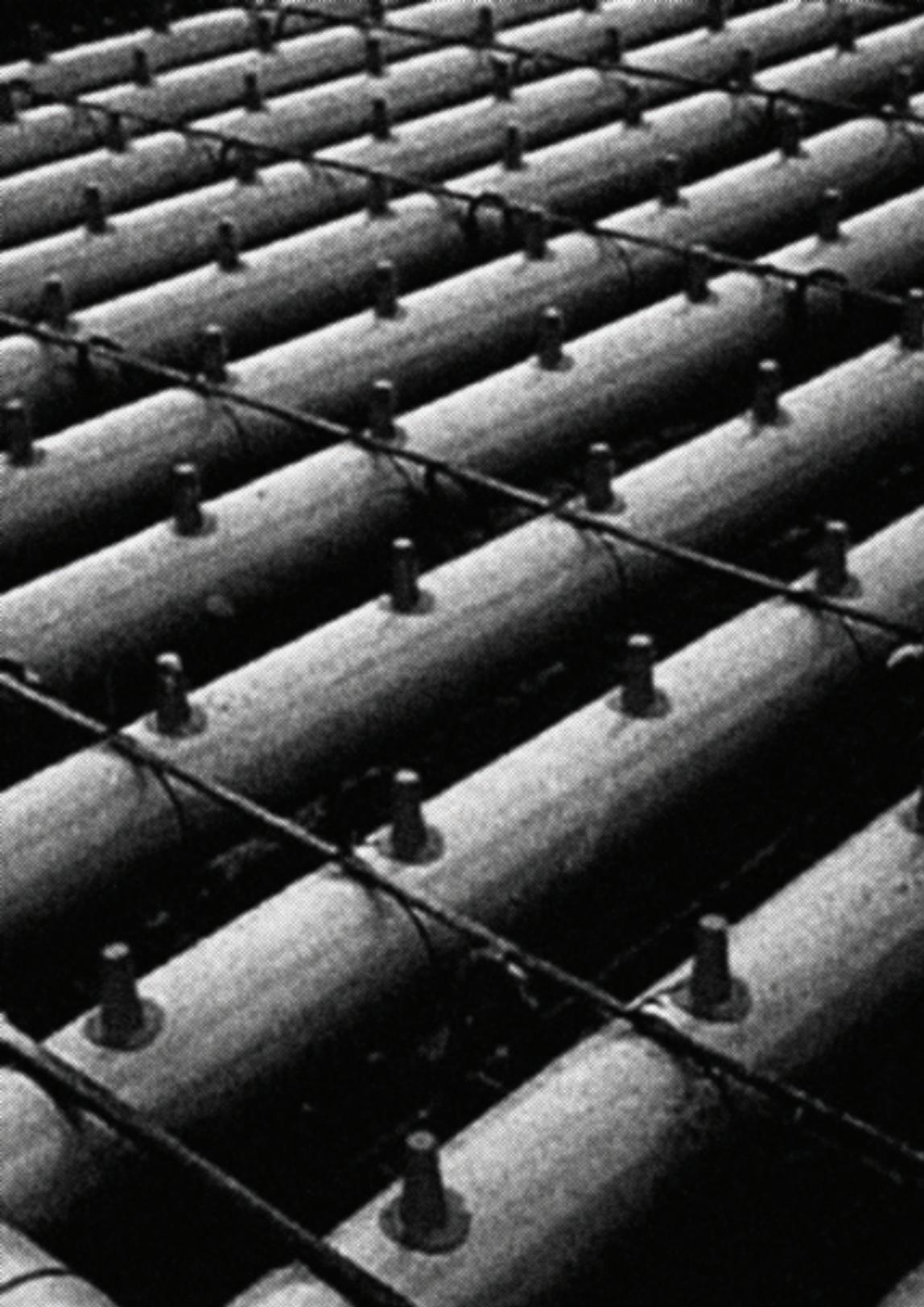
## 2. Objetivos

El principal objetivo de este estudio es la determinación de una metodología efectiva para la eliminación de metales pesados mediante la adición de ácidos orgánicos durante el proceso de compostaje de RSU con la finalidad de cumplir con las normativas cada vez más exigentes en los niveles de este parámetro y por tanto en la mejora de la calidad del producto final.

Caracterización, en base al contenido en metales, del compost producido en diversas plantas de compostaje próximas del entorno social, teniendo en cuenta la legislación española, además de analizar el proceso de compostaje usado en cada una de las plantas estudiadas y correlacionarlo con el contenido en metales del compost producido en ellas.

Dado que el contenido en metales aparece como uno de los factores más limitantes para la aplicación agrícola del compost, se propone la lixiviación química, mediante la adición de ácidos en el proceso de compostaje, como tratamiento alternativo para conseguir minimizar el contenido metálico final en el compost y valorar adecuadamente su impacto en la calidad del mismo. A la vez, se trata de extraer conclusiones acerca del comportamiento de los metales durante el compostaje a través de los resultados obtenidos del método de especiación, BCR, utilizado para el análisis de muestras al inicio del proceso de compostaje y en el compost final obtenido.

Finalmente, se trata de completar estos estudios con ensayos agronómicos del compost producido; analizando las consecuencias de su aplicación sobre cosechas y suelos.



### 3. Materiales y métodos

Para la descripción de los materiales y métodos empleados en este trabajo se describen, en primer lugar, las Plantas de Recuperación y Compostaje (PRC) en las que se ha trabajado a escala industrial y la planta con la que se ha experimentado a escala piloto. Por otro lado, se detallan los ensayos experimentales llevados a cabo y los métodos de análisis utilizados.

En siguientes apartados se detallan cada uno de los experimentos instalados en dichas plantas para el estudio del contenido en metales del compost durante el proceso de obtención del mismo y en el compost final. También se describen los ensayos de lixiviación química a escala piloto que se han realizado para analizar la eficacia de dos ácidos orgánicos: ácido cítrico y ácido oxálico, en la extracción de metales de la pila, durante su compostaje.

Por último se describen los ensayos experimentales realizados en parcelas de cultivo y en semilleros para estudiar cómo afecta la fertilización con compost en el rendimiento de las cosechas y en el contenido metálico final de la planta y del suelo en el que se aplica.

### 3.1 Plantas de compostaje

El seguimiento y control del compostaje de pilas experimentales se ha desarrollado en cuatro plantas de Andalucía.

Dos de las plantas elegidas para el desarrollo del trabajo utilizan un sistema de compostaje basado exclusivamente en volteos mecánicos de pilas y las otras dos utilizan un sistema de túneles de aireación continuados con un sistema eras de volteo. Ambos modos de compostar son los más extendidos en la Comunidad Andaluza.

#### 3.1.1 Planta de recuperación y compostaje A

La planta está configurada como centro de compostaje y reciclaje (con dos líneas de selección, claramente diferenciadas, la línea orgánica para el tratamiento del compostaje y la línea de envases e inertes destinada al reciclaje), aunque también dispone de un horno de incineración y, actualmente, de una plataforma de gestión de residuos de construcción y demolición.

A esta planta se destinan en la actualidad los residuos domiciliarios producidos por una población aproximada de 390.000 habitantes que generan un cantidad total de 254.000 toneladas de residuos (tabla 3.1).

A planta se transportan, separadamente, los residuos que en origen su único destino es el reciclaje o el vertedero (material de ecoparques, vidrio, papel-cartón, envases y otros inertes), de los residuos destinados a la producción de compost; entre ellos, la Fracción Orgánica de Residuos Sólidos Urbanos (FORSU), lodos procedentes de estaciones depuradora de aguas residuales y residuos orgánicos industriales

asimilables.

La recogida de RSU se lleva a cabo de manera selectiva aunque con un matiz importante y diferenciador frente a la que desarrollan en el resto de plantas de Andalucía: la separación en origen de la materia orgánica (FORSU). Dicha materia orgánica no se mezcla con otros residuos (envases e inertes, papel-cartón, vidrio) los cuales son recogidos en distintos contenedores. Este modo de operar lleva implantado desde 1993 y con él se pretende conseguir básicamente dos cosas:

Unos residuos orgánicos limpios que puedan ser transformados mediante un correcto proceso de compostaje en un compost de excelente calidad que sea aceptado por los agricultores y demás consumidores potenciales de este producto.

Unos residuos inertes, libres de elementos orgánicos, que puedan ser recuperados y puestos en el mercado del reciclaje sin que exista rechazo de los mismos.

El modo de funcionar en planta es el siguiente (figura 3.1):

Una vez los residuos han sido recogidos y posteriormente transportados a la planta, son dirigidos hacia la zona de descarga en la que, de manera independiente, se encuentran las dos cintas encargadas de conducir el material hacia las líneas de tratamiento que posee el complejo:

Orgánica (basura procedente del contenedor exclusivo para materia orgánica).

Inerte.

En el principio de cada línea, existe una zona de triaje manual donde se retiran los voluminosos. Pasada esta zona, el material que transporta cada cinta sigue en planta una gestión totalmente distinta.

Pasado el triaje manual de voluminosos, la línea de inertes tiene su continuación en un trómel de 80 mm (ver figura 3.2 y 3.3) en cuyo interior hay ubicados conos metálicos que rompen la mayoría de las bolsas de basura. El hundido de dicho trómel se transporta a vertedero. El resto de residuos, mediante un sistema de clasificación, totalmente automatizado y basado en fotocélulas, se consigue la separación de envases (PET, PEAD, PEBD,...) para su posterior reciclaje. A continuación, se dirige hacia un electroimán y un separador de Foucault, con los que se retira el material férrico y el aluminio (latas y bricks). Por último, el material se transporta mediante cinta a un separador plano-rodado que con movimiento vibratorio consigue separar residuos de distinto volumen (plásticos, cartón y otros envases no separados anteriormente).

La **línea de “orgánica”** empieza también con otra criba rotatoria de 80 mm (figura 3.2 y 3.3) en cuyo interior se dispone el sistema de conos metálicos, ya comentado.

El hundido de criba se dirige mediante cinta hacia un electroimán que elimina en gran parte el contenido férrico y posteriormente mediante corrientes de Foucault se elimina el aluminio. Con una cinta tripper (cinta transportadora con cabecera móvil) se forman, en la era de volteo, las pilas de FORSU de aproximadamente 20 m de longitud, 2 m de ancho y 2 m de altura.

Estas pilas se voltean y riegan mecánicamente de forma periódica, para conseguir las condiciones favorables que permitan una mejor degradación de la materia orgánica. Finalizado el proceso de volteos, el material se transporta a la zona de refino, en la que mediante una criba rotatoria de 15 mm de luz y una mesa densimétrica, se consigue un producto de fina granulometría en el que se ha eliminado la mayor parte del material inerte con un tamaño de partícula elevado.

Por último, el afino de compost se lleva a una zona de maduración donde continúan los procesos de transformación de la materia orgánica pero de forma más ralentizada. Los lixiviados generados en planta se acumulan en balsas, (figura 3.4) pero no son utilizados para fin alguno, simplemente son conducidos a través de tuberías hacia unos evaporadores forzados. Los residuos secos generados en éstos son llevados a vertedero.

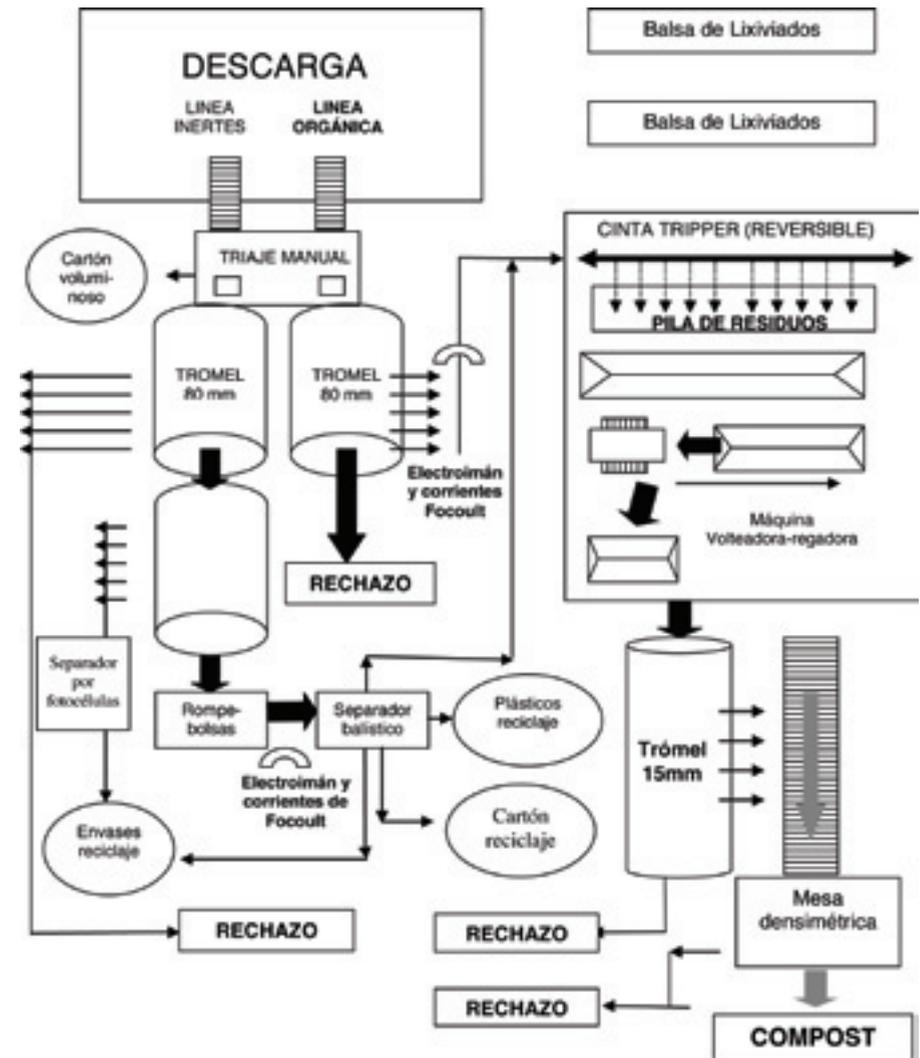


Figura 3.1. Esquema de la Planta de Recuperación y Compostaje-A



Figura 3.2. Zona de descarga. Se observan las dos cintas; línea de inertes y línea de orgánica.



Figura 3.3. Detalle de Tromel de separación.



Figura 3.4. Balsas de lixiviados.

Número de localidades gestionadas	8	Volumen de envases e inertes reciclados	21.705 toneladas
Número de habitantes	390.000	Volumen de residuos destinados a Compost	30.975 toneladas
Gestión de recogida	Selectiva en origen de la materia orgánica	Producción de Compost	5.000 toneladas
Volumen total de Residuos	254.380 toneladas	Volumen de residuos destinados a vertederos	227.675 toneladas

Tabla 3.1. Características generales de la gestión de la Planta. (Fuente: Memoria 2005 de la PRC-A)

### 3.1.2 Planta de recuperación y compostaje B

En la planta, que se inauguró en Abril de 2001, se gestionan los R.S.U. producidos en los 46 municipios que integran la zona sur de la provincia (144000 t/año de residuos brutos y 1470 tm de envases). La propiedad de la misma es de la Diputación de Córdoba, aunque la construcción y equipamiento de la planta fue financiada en un 85% por los Fondos de Cohesión Europeos y por la Diputación de Córdoba en un 15%. La explotación se realiza por parte de la empresa EPREMASA.

Número de localidades gestionadas	46	Volumen de envases e inertes reciclados	16.419 Toneladas
Número de habitantes	365.000	Volumen de residuos orgánicos destinados a Compost	50.572 Toneladas
Gestión de recogida	Hay municipios donde la recogida es selectiva y otros donde no.	Producción de Compost	2.796 Toneladas
Volumen total de Residuos a tratar	158.548 Toneladas	Volumen de residuos destinados a vertederos	139.333

Tabla 3.2. Características generales de la gestión en la PRC-B. (Fuente: Memoria 2005)

Se ubica junto al antiguo vertedero que se terminó clausurando aunque se han abierto nuevos vasos de vertido. Se encuentra en una zona deprimida, con lo que la visibilidad es muy reducida y el impacto paisajístico bajo.

Los RSU sean brutos o procedentes de la recogida diferenciada llegan a este centro por varias vías:

- a. Directamente en los vehículos de recogida de la fracción orgánica (es el caso de los municipios Aguilar de la Frontera, La Carlota, La Victoria, Santaella, S.S. de los Ballesteros, Montilla, Montalbán, Encinas Reales, Palenciana, Benamejía, Fernán Nuñez, La Rambla, Montemayor, Puente Genil, Monturque y Moriles), y en los vehículos de recogida de envases ligeros (Montalbán, Montilla, Aguilar, Santaella, La Victoria, San Sebastián de los Ballesteros, Moriles y Monturque).
- b. Procedentes de las diferentes instalaciones de transferencia de la zona sur.
- c. Una tercera vía de recepción es el vertido de residuos urbanos y “asimilables a urbanos” procedentes de industriales y particulares, además de las cubas que son retiradas en los puntos limpios de los municipios del sur de la provincia de Córdoba.

### **Tratamiento en la Planta**

Esta planta tiene la versatilidad de tratar los RSU recogidos de forma selectiva y mezclados.

El primer paso consiste en su pesado para el control y registro de las entradas de residuos. Posteriormente se llevan a la “playa de descarga”, donde se acumulan temporalmente los residuos. En la “playa de descarga” mediante una inspección ocular por parte del operario, una pala mecánica saca del proceso los elementos voluminosos que podrían interferir en el proceso o causar averías mecánicas, es decir, los electrodomésticos, ruedas, etc. Estos residuos voluminosos se tratan al margen junto con los voluminosos extraídos en el triaje primario. En toda la planta existe, para la extracción de los gases contaminantes, sistemas de aspiración que garantizan este cometido y previenen la contaminación en los lugares de trabajo y por tanto la salud laboral de los trabajadores.



Figura 3.5. Aspecto de los conductos de aspiración que garantizan la calidad del aire dentro de la planta de Compostaje.

Para los residuos envases, contenidos en el contenedor amarillo, los materiales entran directamente en la nave de separación donde a través de un triaje manual se seleccionan y clasifican los materiales inorgánicos según el material de que estén fabricados:

- Papel-cartón.
- Polietileno de baja densidad.
- Polietileno de alta densidad.
- PET.
- PVC y todo-uno resto de plásticos.
- Cartón de bebidas (brik).
- Vidrio.

Los residuos no seleccionados, siguen la línea que los conduce hasta el separador electromagnético que separa los metales férricos del flujo de los residuos. El resto de los residuos que circulan sobre la cinta son descargados sobre el separador de metales no férricos por corrientes inductivas de Foucault, esto es, se produce la separación del aluminio, latón, cobre, etc.



Figura 3.6. Las latas separadas mediante corrientes de Foucault y posteriormente prensadas.

Todos estos subproductos reciclables son depositados sobre los silos de almacenamiento provistos de transportadores de fondo móvil reversible. Posteriormente son prensados y enviados a las diferentes fábricas de reciclaje. Los residuos no seleccionados en la cinta de triaje son recogidos por una cinta que los transporta hasta la línea de rechazos de RSU y destinados a vertedero.

En el caso de la fracción orgánica o contenedor de RSU mezclado, desde la pala de la “playa de descarga” se alimenta una tolva, tras ella, los residuos (RSU y envases) pasan a una cinta transportadora de donde manualmente (traje primario) se retiran los materiales gruesos y los plásticos de gran volumen tales como neumáticos, materiales metálicos voluminosos, grandes plásticos, cartonajes, etc.

A continuación los residuos entran en un tromel giratorio que posee en su parte inicial palas para romper las bolsas de basura. El tromel cuenta con una luz de malla de 90 milímetros de diámetro. Aquí, el proceso se divide en dos:

#### **Materiales mayores de 90 mm:**

No pasan los agujeros del tromel. Salen por una cinta transportadora y a diferencia de otras plantas de compostaje no se produce una separación manual de plásticos y envases dado que EPREMASA presta el servicio de recogida selectiva de envases considerándose que la recuperación de los envases debe venir de la separación previa procedente de los contenedores amarillos. Por esta razón y porque los envases de la basura bruta al venir muy “sucios” suelen ser rechazados por los recicladores, en la planta de valorización de Montalbán no se utiliza la línea de triaje incorporada a la línea de residuos orgánicos. Estos envases que acompañan a la orgánica van a vertedero previa compactación y, según datos, se componen en un 47 % de plástico. Es el rechazo grueso.

#### **Materiales menores de 90 mm:**

Se supone que el material orgánico tiene unas dimensiones menores por lo que constituye la fracción hundida del tromel junto con otros residuos.

Aquí se produce una separación en tres partes:

En primer lugar, un separador electromagnético que separa los metales férricos del flujo de los residuos.

En segundo lugar, el resto de los residuos que circulan sobre la cinta son descargados sobre el separador de metales no férricos por corrientes inductivas de Foucault, esto es, se produce la separación del aluminio, latón, cobre, etc. Tanto la fracción magnética y metales no férricos se prensa y deja el producto en pequeñas balas prensadas y en disposición de ser almacenadas y posteriormente transportadas hasta el destino de reutilización.

Finalmente, lo que queda es, en su mayoría, materia orgánica que se tratará en la elaboración de compost.

#### **Proceso de elaboración de compost**

Para la elaboración de compost se sigue un proceso de tratamiento fermentativo aerobio destinado a incrementar la temperatura del cúmulo de basura. Se trata en definitiva de un proceso termófilo que alcanza por sí mismo temperaturas de hasta 65°C que son de interés, por provocar la higienización de la mezcla de residuos.

En este tratamiento los materiales se acumulan en pilas de fermentación. Estas pilas están ubicadas en una zona cuyo suelo está eficazmente aislado por una losa de cemento con recogida de lixiviados y todas las eras de compostaje están cubiertas. Las pilas se voltean periódicamente para controlar la aireación y el contenido en agua. Durante el proceso de fermentación pierden sobre un 30% de peso por la respiración ( $\text{CO}_2$  y  $\text{H}_2\text{O}$ ). Las pilas que han reducido su tamaño se unen para resultar otras pilas mayores.



Figura 3.7. Aspecto que tiene la cinta formadora de pilas o montones de compost.

La duración de esta fermentación es de 10-12 semanas aproximadamente. El resultado del proceso es un compost inmaduro con pequeños restos de plástico y vidrio. Este compost inicial se introduce en un tromel con agujeros de 25 mm de diámetro. El hundido de tromel constituye el producto bruto “compost” que habrá que refinar en una mesa densimétrica, el resto supone rechazo. Entre el tromel de 25 mm y la mesa densimétrica se intercala un proceso de cribado que rechaza la fracción superior a 15 mm, el resto se dirige a la mesa densimétrica. Las dos fracciones denominadas rechazo acaban en el vertedero.

Las mesas de separación densimétrica tienen incorporado un cajón vibrante y un fondo de repartición de aire. La mecánica de vibración proporciona un movimiento vibratorio al cajón por medio de dos bielas excéntricas. La canaleta de carga permite ajustar la alimentación y altura con puertas de salida de material. La corriente de aire debe asegurar la puesta en suspensión de los elementos ligeros para su desplazamiento, dejando depositados los elementos pesados para que sean transportados. Para una distribución correcta del aire, el mínimo de velocidad de la corriente de aire corresponde a una depuración correcta de los elementos pesados que salen por la compuerta superior. Esta velocidad será suficiente para fluidificar y conducir los elementos ligeros hacia la compuerta inferior. El exceso de velocidad de aire tiene como consecuencia el levantamiento de materiales pesados deslizándolos hacia la compuerta inferior de ligeros. Por otro lado, una falta de aire deposita sobre el fondo material ligero que sale por la compuerta superior de pesados. Por tanto, un reglaje del flujo de aire y su correcta distribución es fundamental en la obtención de un compost de calidad. La mesa densimétrica genera tres fracciones:

**Residuos de mayor densidad:** son pequeños trozos de vidrio y van a vertedero. Es rechazo fino.

**Residuos de menor densidad:** son pequeños trozos de plástico y va a vertedero. Es rechazo fino.

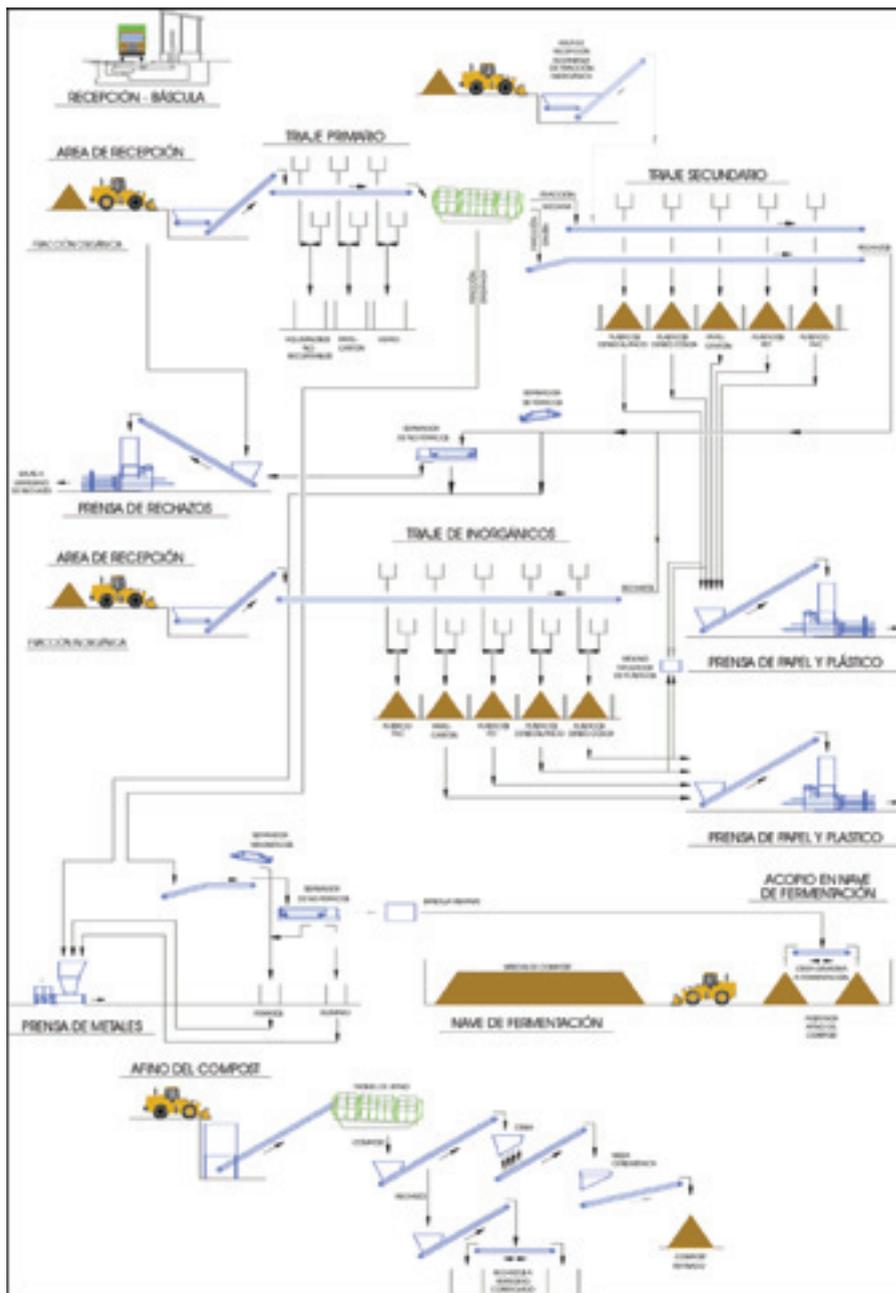
**Residuos de densidad intermedia:** es el compost inmaduro con un alto grado de pureza. Este se trata madurándolo.



Figura 3.8. Zona de refinado en una Planta.

La maduración del compost refinado se lleva a cabo en pilas durante 4 ó 5 semanas, aunque normalmente se ve alargado este periodo por problemas en su comercialización. El compost se somete a análisis analíticos periódicos de forma trimestral, aunque la salida comercial es compleja si no se realiza un envasado del producto. En la siguiente figura (figura 3.9) se puede ver de forma esquemática el proceso de la planta.

A continuación se muestra el destino que tiene cada una de las fracciones que llega a la planta hasta su segregación total o valorización como compost así como los tratamientos que se suceden en la planta de compostaje para las dos líneas de tratamiento (envases y resto). Incluye también la línea de afinado del compost por la cual y después de tres procesos (tromel de 25 mm., criba de 15 mm. y mesa densimétrica) se obtiene un compost de aceptables características.



### 3.1.3 Planta de recuperación y compostaje C

Esta planta gestiona los residuos urbanos generados por una población aproximada de 60.000 habitantes (tabla 3.3) y se encuentra diseñada para permitir:

El tratamiento de residuos domiciliarios procedentes tanto de recogida selectiva como no selectiva.

El tratamiento de lodos procedentes de las E.D.A.R.s.

El acondicionamiento de las fracciones recuperadas para su óptimo almacenamiento y transporte.

La eliminación controlada del menor porcentaje posible de residuos.

Número de localidades gestionadas	16	Volumen de envases e inertes reciclados	1,4 Tm
Número de habitantes	60.000	Volumen de residuos destinados a Compost	22.897 Tm
Gestión de recogida	Actualmente la recogida No es selectiva	Producción de Compost	92 Tm
Volumen total de Residuos a tratar	42.489 Tm	Volumen de residuos destinados a vertederos	35.524 Tm

Tabla 3.3. Características generales de la gestión de Residuos por la PRC-C. (Fuente: Memoria del 2004).

La gestión del residuo en planta depende de la procedencia (R.S.U. o lodos de EDARs) y de la recogida (selectiva o no selectiva). La planta dispone de dos líneas completamente diferenciadas, la línea de residuos brutos (recogida no selectiva) y la línea de recogida selectiva (solamente para envases, cartón, papel, vidrio e inertes). Hay que tener en cuenta que, la recogida selectiva no se lleva a cabo como en la PRC-A, sino que lo único separado en origen son los envases, y en algunos barrios hay también contenedores de cartón-papel y vidrio. No se separa en origen la materia orgánica sino que siempre llega al complejo procedente de contenedores de recogida "en bruto", lo que empeora la calidad del compost que se produce.

Figura 3.9. Diagrama de proceso para las dos líneas de tratamiento en la planta de Montalbán. (Fuente: EPREMASA).

Si se trata de R.S.U. recogido de manera selectiva, las bolsas de basura son depositadas, con pala mecánica, en una tolva de recepción donde por impacto terminan rompiéndose. El material, mediante cinta transportadora, se conduce a la **Zona II** de triaje donde se realiza la separación manual de aluminio, papel, plásticos, envases de PET y bricks; el resto de residuo que no es separado, es conducido hacia vertedero.

Si se trata de R.S.U. recogido de manera no selectiva, las bolsas de basura son conducidas hacia la **Zona I** de triaje (situada independientemente de la anterior) en la que se lleva a cabo la separación manual del material voluminoso (traje primario). El resto se conduce hacia un trómel, de 80 mm de luz, con conos metálicos en su interior que terminan de abrir aquellas bolsas que no se rompieran anteriormente. El hundido de trómel es transportado mediante cinta a la nave de almacenamiento, no sin antes haber separado el contenido férrico con un electroimán. El resto de material se conduce hacia la zona de triaje II (comentada anteriormente) donde se lleva a cabo la separación manual de material a reciclar.

Si se produce la entrada de lodos de depuradora en planta, éstos permanecen un tiempo prudencial en era de secado. Posteriormente cuando el contenido en humedad ha disminuido considerablemente (para evitar problemas durante el tratamiento), una pala mecánica se encarga de transportarlos a una tolva de recepción, donde una cinta transportadora conduce el residuo semisólido hasta una mezcladora, a la que al mismo tiempo se le está haciendo llegar residuo procedente del triaje secundario. Después de haberse producido una buena mezcla, otra cinta transportadora conduce el residuo a la nave de almacenamiento.

El aprovechamiento de la materia orgánica contenida en los residuos procedentes de la recogida no selectiva, se realiza a través del compostaje en túnel de aireación forzada (figura 3.10) y posteriormente en era de volteo (figura 3.11). Concretamente la planta dispone de cuatro túneles y una nave techada para realizar los volteos. Los cuatro túneles de la planta, de flujo discontinuo (WTT, Waste Treatment Technology, Holanda), son recintos de hormigón armado, de dimensiones considerables (4x4x22 m<sup>3</sup>) y con un sistema de control de las variables que intervienen en el proceso de compostaje. Estas variables se encuentran interrelacionadas y sus valores afectan tanto a la economía (mayor o menor consumo de energía) como a la calidad del producto final (estabilidad e higienización). He aquí donde reside el interés del diseño de un buen proceso de control.



Figura 3.10. Túnel de compostaje.



Figura 3.11. Zona de volteos mecánicos de las pilas.

Incrementar la eficiencia del compostaje conlleva maximizar la velocidad de descomposición, objetivo final de estos sistemas de aireación forzada. Sin embargo, para alcanzar dicho objetivo, existe el inconveniente de encontrarnos múltiples factores que influyen en el proceso (pH y temperatura del medio, concentración de oxígeno, humedad, etc.), interrelacionados a su vez entre sí, y que, en cierto modo, no todos son controlables. Si se estuviera ante un reactor piloto, existen normalmente múltiples opciones de controlar el sistema, pero en el compostaje a escala industrial las opciones son menores, y si además se trata de sistemas de aireación activa, prácticamente, la principal variable a controlar se resume en una, la velocidad de aireación (Sundberg C. 2005).

Básicamente se puede decir que el funcionamiento del túnel de compostaje se fundamenta en la combinación de dos procesos:

Control del proceso de aire.

Control del proceso de agua.

Esto se lleva a cabo por un autómata programable o PLC (Controlador Lógico Programable, SIEMENS S7-400) que controla a tiempo real procesos secuenciales (temporizaciones, regulaciones, cálculos...) y un PC de supervisión, en el que se encuentra configurado un sistema SCADA que sirve de interfaz entre el operador y el autómata.

El programa diseñado para el control del proceso de compostaje en los túneles se divide en diez fases (tabla 5), cada una con un tiempo de duración y un rango de temperatura programados de tal manera que un óptimo funcionamiento del sistema suponga en el material a compostar, la evolución de las distintas poblaciones microbianas encargadas de degradar el material orgánico y una higienización del sustrato al final del proceso.

FASES	OBJETIVOS
Ventilación inicial	Ventilar el túnel con aire fresco durante el proceso de llenado.
Nivelación	A veces, después del llenado pueden producirse grandes diferencias de temperatura en el material residual. Para tener un punto de partida que sea lo más homogéneo posible se bombea aire a través del material a compostar. El tiempo de nivelación depende de la temperatura media de Compostaje y la actividad en el residuo. <b>La temperatura media medida en varios puntos de la pila, menos 5°C es la temperatura a la que hay que nivelar.</b>
Calentar	Aumentar la temperatura 1°C/hora hasta el valor de temperatura de consigna. Esto se puede lograr restringiendo parcialmente la cantidad de aire fresco, vigilando que el nivel de oxígeno no descienda hasta valores que puedan producir zonas de anaerobiosis en la masa. Durante esta fase, la propia actividad del Compost es tan alta que el material a compostar puede ser calentado sin ayuda.
Precompostaje	Mantener la temperatura de consigna. Durante esta fase se degradan compuestos de fácil descomposición y además se produce una gran evaporación de agua y reducción del volumen de la masa.
Calentar-Higienizar	Aumentar la temperatura de la masa hasta el valor de consigna programado, a través de incrementos de 1,5°C/hora
Higienizar	Mantener la temperatura de higienización durante el tiempo programado. Durante esta fase mueren todos los patógenos y las semillas de malas hierbas.
Enfriar-Higienizar	Disminución de la temperatura a razón de 1,5°C/hora. El enfriamiento se realiza aumentando la proporción de aire fresco en la mezcla de aire de entrada que se inyecta a través del material residual.
Compostar	Mantener la temperatura de consigna durante el tiempo programado. Durante esta fase se produce nuevamente una reducción de volumen.
Enfriar	Conseguir llevar el material hasta la temperatura de 25°C. El punto de partida es un descenso de la temperatura de la fase de compostaje con un gradiente de 1,5°C/hora, lo cual se realiza de la misma forma que la fase enfriar-higienizar.
Ventilar	Inyectar aire fresco durante un tiempo programado.

Tabla 3.4. Fases programadas en el SCADA de cada túnel.

## Control del proceso de aireación

La entrada de aire al túnel se ubica en la parte inferior del suelo a través de unos tubos de PVC taladrados con pequeños orificios a los que se les colocan embocaduras conoidales sobresalientes (spigots) por donde circula el aire hacia el exterior. Sobre este sistema de tuberías se construye el suelo de hormigón con canales paralelos de 1 cm de profundidad coincidentes con los tubos y perforados en aquellos puntos en los que haya ubicado un spigot (figura 3.12).



Figura 3.12. A la izquierda, suministro de aire en el suelo de un túnel en construcción (sin cubrir) y a la derecha, detalle de suelo perforado del túnel (ya cubierto).

El aire es bombeado desde la nave de carga hacia el interior del túnel a un caudal regulado por el autómata en función de la relación entre la temperatura de la pila que se composte y la temperatura de consigna (figura 3.13). Esta temperatura de consigna, particular para cada fase, es la que se fija como valor en el programa de control que se diseñe. La señal de entrada para el controlador (PID) es la diferencia entre esta temperatura de consigna y la temperatura media del material que se composte. El controlador actúa sobre el ventilador en función de esta diferencia; de modo que, si la masa de aire debe enfriarse, el caudal de aire que entra debe ser mayor y, por tanto, la velocidad de aireación debe aumentar, y viceversa.

Por otra parte, el sistema de control también actúa sobre el sistema de electroválvulas. De manera que, si la temperatura de la masa es mayor que la temperatura de consigna (etapa de enfriamiento), el aire que se inyecta debe ser más frío, por lo que la válvula de aire fresco debe abrirse más, mientras que la de aire recirculado (más caliente) se cierra. En el caso de que la temperatura de la masa sea menor que la temperatura de consigna (etapa de calentamiento), la válvula de aire recirculado debe abrirse más, mientras que la de aire fresco se cierra en la misma proporción. Sin embargo, se debe tener en cuenta que el nivel de oxígeno en el aire recirculado es menor respecto del aire que entra al túnel ya que disminuye por la propia actividad aerobia de los microorganismos. Por este motivo, se necesita un segundo control cuya señal de entrada sea la concentración de oxígeno, medida con un oxímetro ubicado en el conducto de entrada de aire al túnel.

Durante todo el compostaje se establece un 20.5% (v/v) como valor de consigna para la concentración de oxígeno en el aire de entrada al túnel. Cuando el aire que entra está a una concentración menor, se abre más la válvula de aire fresco mientras que se cierra la de aire recirculado.

A modo de resumen, se esquematiza en la siguiente tabla, el control del proceso de aireación.

Condiciones fisico-químicas	Reacción del sistema
Temperatura de consigna en la masa	Regulación del Ventilador del túnel.
Existe el nivel mínimo de oxígeno	Mantiene la regulación dada a la válvula de aire fresco.
Temperatura alta en la masa	Se abre la válvula de aire fresco, alimentando al túnel con una gran caudal.
Nivel bajo de oxígeno	Se aumenta el porcentaje de aire fresco inyectado al material dentro del túnel.
La válvula de recirculación de aire está mecánicamente conectada a la válvula de alimentación de aire fresco y funciona por tanto de manera contraria a la válvula de alimentación. De ahí, que si hay menor entrada de aire recirculado, automáticamente más aire fresco está siendo inyectado.	

Tabla 3.5. Respuesta del autómata a los cambios físico-químicos.

En el extremo opuesto a la puerta de los túneles existe un sistema de extracción de gases. Estos gases de salida están compuestos principalmente por el aire que ha atravesado la masa que se composte y los productos de las reacciones que tienen lugar en la degradación biológica de los residuos, fundamentalmente CO<sub>2</sub> y vapor de agua; aunque también, si la aireación no está siendo eficaz y óptima en toda la pila, pueden surgir zonas de anaerobiosis donde se producen compuestos de azufre y metano.

Parte del aire que se extrae de los túneles se transporta a un conducto central de salida y otra parte es utilizada para recirculación. El conducto central transporta el aire extraído de los 4 túneles a un conducto de mezcla ubicado en la parte posterior de los mismos y allí se diluye con aire que se extrae de la nave de carga. Esta mezcla no solo contiene aire y compuestos de los mencionados anteriormente, sino que también transporta bioaerosoles y partículas que no deben ser emitidas al exterior con objeto de evitar malos olores y problemas en la salud, tanto de los trabajadores de la planta como de residentes de zonas colindantes (tabla 3.6). Un riesgo biológico, que ha despertado el interés de varios países europeos en los cuales se han establecido normativas y recomendaciones específicas para evitar la formación y dispersión de los bioaerosoles tanto para plantas en funcionamiento como de nueva construcción (Sánchez- Monedero M.A. et al., 2006).

En la planta en cuestión, este gas con partículas en suspensión es tratado antes de ser expulsado al exterior. Para ello, en primer lugar, el gas se conduce hacia un humidificador (scrubber), que dispone de cabezas de aspersión que lo humedecen frecuentemente, minimizando de este modo su contaminación. Posteriormente, antes

de que salga al exterior, el gas se bombea por tuberías cuya boca de salida está situada en la parte inferior de un biofiltro, cuya microbiota se encarga de convertir los contaminantes orgánicos volátiles en dióxido de carbono, agua y biomasa. La eficacia de este tipo de biofiltros está demostrada pues algunos autores confirman la eliminación de prácticamente el 90% de contaminantes como el *Aspergillus fumigatus* y una reducción entre el 40 y el 90% de las bacterias mesófilas (Sánchez- Monedero M.A. et al., 2003).

Tipo de residuo	Bioaerosoles más representativos					
	Hongos	Bacterias	Bacterias/ virus entérico	Actinomicetos	Endotoxinas	Ácaros
Restos vegetales	+	+	-	+	+	+
Residuos sólidos urbanos	+	+	+	-	+	+
Residuos agroindustriales	+	+	+	+	+	+
Lodos de depuradora	+	+	+	-	+	+
Estiércoles	+	+	+	-	+	+

Tabla 3.6. Tipo de bioaerosoles generados en función del tipo de residuo orgánico tratado (adaptado de Millner et al., 1994). (+) presencia; (-) ausencia.

En esta planta, el relleno del biofiltro está constituido por una capa inferior de grava que favorece la difusión del aire contaminado. Sobre esta grava, se deposita una capa de compost maduro que presenta, frente a otros rellenos orgánicos, una doble ventaja:

Contiene de manera natural los microorganismos y nutrientes indispensables para mantener una elevada actividad microbiológica.

Aumenta la permeabilidad del conjunto del biofiltro.

Como inconveniente, puede citarse la esperanza de vida del relleno que oscila entre 6 meses y 2 años, en función de los gases a tratar, frente a otros rellenos como las virutas de madera que solamente necesitan ser renovadas cada 7 años aproximadamente.

### Control del proceso de riego

Todos los lixiviados de la planta de compostaje son recogidos en un tanque de decantación subterráneo, situado debajo de los túneles. Desde aquí, estos lixiviados se bombean, junto con otras aguas residuales de la planta, hasta una criba de arco que retira parte de los sólidos que contiene.

Esta agua clarificada pasa a un segundo tanque de decantación subterráneo, donde sedimentan los sólidos que no se han separado en el cribado. Mediante rebose, el

lixiviado más clarificado pasa a otro tanque continuo desde el cual, parte del lixiviado se bombea hasta el humidificador de gases de salida del túnel y otra parte se bombea para ser utilizado por el sistema de irrigación dentro de los túneles. Estos tanques de decantación deberán ser limpiados cada cierto tiempo para retirar los sólidos depositados en el fondo. Cuando hay exceso de lixiviado en estos tanques, se bombea parte del mismo a una balsa de evaporación exterior. Sin embargo, cuando el proceso necesita más agua de la existente en los tanques, se añade agua limpia procedente de un pozo.

La ventaja de este sistema, prácticamente cerrado, es que los lixiviados son tratados y reutilizados, por lo que no suponen la generación de un residuo de proceso. No obstante, existe el inconveniente de que la recirculación puede dar lugar, con el tiempo, a problemas de salinidad que afecten también a la masa regada.

El material a compostar dentro del túnel, es regado con el agua clarificada. Para ello, hay instalados pulverizadores en el techo, cuyas tuberías se alimentan de una central. La cantidad de agua que se añade al material en el interior del túnel depende del valor que se haya fijado en el programa de control. Debido a que sólo existe un medidor de caudal en la tubería central, los túneles no pueden ser regados simultáneamente y por tanto, desde el sistema de control se programa una secuencia temporal de riegos a un caudal determinado establecido previamente.

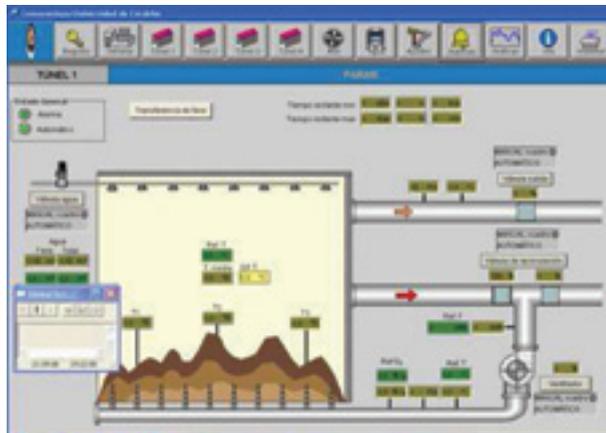


Figura 3.13. Pantalla general de control del proceso en un túnel.

Todas las variables medibles (temperatura de la pila, porcentaje de oxígeno, caudal de agua) y regulables (apertura de válvula de recirculación y velocidad del ventilador) se registran en una gráfica, de manera que se puede observar su evolución a lo largo del tiempo. Además, también se registran en un fichero de históricos para su posterior análisis.

El compostaje se completa a la salida del túnel mediante volteos mecánicos en un cordón de 3 metros de alto y otros 3 metros de ancho que se dispone, bajo techo, a continuación del último material sacado de túnel.

Finalizado el periodo de volteos, el material se transporta a la zona de afino donde se elimina la mayor parte del inerte que posee con la finalidad de conseguir la granulometría adecuada para el comercio del producto. El afino se lleva a cabo haciendo pasar el material por una criba rotatoria de 15 mm de luz y posteriormente por una mesa densimétrica. Tanto de la criba rotatoria como de la mesa densimétrica, se obtiene un rechazo que termina en vertedero.

### 3.1.4 Planta de recuperación y compostaje D

La capacidad de tratamiento de residuos es de 140.000 toneladas/año, para lo cual la planta dispone de dos líneas completas, cada una de ellas capaz de tratar 25 toneladas de residuos/ hora.

La gestión de los residuos comienza en la zona de descarga, constituida por dos fosos rectangulares de hormigón armado y con una capacidad capaz de albergar un volumen en residuos de 3300 m<sup>3</sup>. Las dos líneas son alimentadas con pulpos grúa que, además, manejan los residuos que se depositan.

Se trata de una planta que gestiona residuos procedentes de recogida no selectiva. Estos residuos pasan por una zona de triaje primario donde manualmente se retiran los impropios de elevado tamaño. Posteriormente, una cinta transportadora lleva los residuos de menor tamaño a un trómel dotado de dos cribas rotatorias en cuyo interior existen unas cuchillas encargadas de romper las bolsas de basura.

Los residuos de tamaño inferior a 110 mm son recogidos por la parte inferior y conducidos por otra cinta a la **zona de fermentación** (es la línea de “orgánica”), habiendo pasado previamente por un separador magnético que retira el material férreo.

Los residuos de mayor tamaño, continúan por las cintas (línea de “inorgánica”) hasta las cabinas de selección (traje secundario) en las que manualmente los elementos reciclables son retirados (vidrio, papel, cartón, plásticos, etc.).

La zona de fermentación, anteriormente mencionada, está formada por 14 túneles de aireación forzada con un volumen de 30 x 5 x 5 m<sup>3</sup> y por una nave de maduración que se encuentra techada.

Los **túneles de fermentación** son alimentados de forma automática a través de una cinta transportadora telescópica (figura 3.14), procedente de la nave de clasificación (donde se encuentra el triaje primario y secundario), que deposita la “materia orgánica” en el fondo del túnel. En su interior, la masa orgánica es ventilada gracias a la inyección de aire a través de una losa perforada que ocupa prácticamente la

totalidad del suelo del túnel. Además, se dispone en el interior del túnel de un sistema de riego por aspersión con agua y/o lixiviados procedentes del propio proceso, tratados previamente. Por la parte superior de éstos, se realiza la extracción de gases del interior y se conducen hacia un colector general. De ahí, los gases se transportan a través de tuberías hacia lavaderos y finalizan su recorrido en unos biofiltros construidos en el extremo de la serie de túneles, evitando así la emisión de olores desagradables.

La planta dispone de un sistema de depuración de lixiviados que trata aquellos que se generan durante todas las fases del proceso y los procedentes de la balsa de acumulación del vertedero. El proceso consiste en un sistema combinado de evaporación y condensación (figura 3.15).



Figura 3.14. Sistema de carga de túnel de compostaje con cinta transportadora.



Figura 3.15. Sistema de depuración de lixiviados.

El control del proceso en el túnel se realiza mediante sondas de medición de oxígeno y temperatura, cuyas señales son transmitidas a un autómata programable, que a su vez envía la información a un ordenador provisto de un programa específico de control que actúa sobre la ventilación forzada y sobre el riego de la masa. El fundamento del funcionamiento de estos túneles es el mismo que el de los túneles de la planta de recuperación y compostaje C.

El SCADA de funcionamiento de los túneles posee siete fases diseñadas que pretenden conseguir unos objetivos específicos. Dichos objetivos se detallan en la siguiente tabla:

FASES	OBJETIVOS
<b>Carga</b>	Ventilar el túnel con aire fresco durante el proceso de llenado.
<b>Subida de temperatura</b>	Aumentar la temperatura hasta valores programados y propios de una higienización del material. Para ello el sistema de control, establece la orden de aumentar dicha temperatura en razón de 1°C/hora.
<b>Higienización</b>	Mantener la temperatura de higienización el tiempo programado para la destrucción de patógenos y semillas de malas hierbas.
<b>Bajada de temperatura</b>	Enfriar la masa gradualmente partiendo de un descenso de la temperatura de 1,5°C/hora.
<b>Descomposición</b>	Mantener el material a temperaturas propias de la fase termófila.
<b>Bajada de temperatura</b>	Enfriar la masa a razón de 1,5°C/hora
<b>Acondicionamiento</b>	Mantener a la temperatura de consigna hasta abrir el túnel.

Tabla 3.7. Programa de funcionamiento de los túneles en la PRC-D.

Una vez se ha terminado el proceso en túnel, el material se descarga con pala y se acopia en una nave de maduración techada donde mecánicamente una volteadora realiza su labor periódicamente.

El compost, ya maduro, se transporta con pala mecánica a la zona de refinado que se compone de un alimentador-dosificador, una cinta transportadora y una criba rotatoria donde son separados los elementos más gruesos. La parte del compost que atraviesa la luz de malla de 15 mm es transportado por una cinta hasta el equipo de separación densimétrica.

Todos los rechazos generados en el proceso son evacuados a vertedero.

### 3.1.5 Descripción de la planta piloto diseñada

La supervisión e investigación de la disponibilidad/solubilidad/movilización de los metales dentro de ensayos piloto con residuos, es una importante herramienta para ampliar la evaluación de impactos potenciales, debido a la existencia de los mismos (Sánchez- Monedero M.A. et al., 2003).

Para el estudio de la lixiviación química y la especiación metálica, se han diseñado dos plantas piloto con las que se ha podido llevar a cabo la experimentación semi-industrial del compostaje y además, al mismo tiempo, poder recoger los lixiviados generados durante el proceso para poder también caracterizarlos y extraer conclusiones del análisis de los resultados.

Cada planta piloto consiste básicamente en una plancha de acero inoxidable sobre la que se coloca el material a compostar, levantada a una altura del suelo para poder ser transportada y pesada, y con una ligera pendiente que facilita la recogida del lixiviado en una canaleta, también de acero inoxidable, y dotada de una llave manual que permite tomar la muestra y medir el volumen de lixiviado generado (figuras 3.16 y 3.17).

Además del estudio sobre la eficacia de extracción de metales, estas plantas piloto han permitido que se pueda realizar un balance de materia del proceso más preciso y completo; además del análisis físico-químico del lixiviado generado.



Figura 3.16. Planta piloto cargada con residuo fresco. En la parte superior izquierda y derecha se observan las sondas de temperatura.



Figura 3.17. Volumen de residuo a los 34 días de compostaje.

## 3.2 Metodología y plan de trabajo

Para este apartado utilizaremos la siguiente nomenclatura:

### Planta de Recuperación y Compostaje-A: PRC-A

Pila de FORSU compostada en la Planta A: APF

Pila-mezcla de lodos y poda compostada en la Planta A: APL

### Planta de Recuperación y Compostaje-B: PRC-B

Pila de FORSU compostada en la Planta B: BPF

### Planta de Recuperación y Compostaje-C: PRC-C

Pila de FORSU compostada en la Planta C: CPF

Pila de FORSU compostada en túnel en la Planta C: CTF

### Planta de Recuperación y Compostaje-D: PRC-D

Pila de FORSU compostada en la Planta D: DPF

1ª Pila de FORSU compostada en túnel en la Planta C: DTF1

2ª Pila de FORSU compostada en túnel en la Planta C: DTF2

3ª Pila de FORSU compostada en túnel en la Planta C: DTF3

### 3.2.1 Metodología experimental para el estudio del proceso llevado a cabo en cada planta industrial

#### 3.2.1.1 Planta de Recuperación y Compostaje-A

En esta planta se ha trabajado con una pila de composición 100% FORSU (APF) y montada de forma trapezoidal (2 m de alto y ancho y 20 m de longitud). Su compostaje se ha llevado a cabo durante 190 días en los que, cada 7 días y durante el primer mes, una volteadora mecánica (SANDBERGER UNI 4000) ha aireado el material. Tras este tiempo se ha disminuido la frecuencia de volteo. El riego se ha hecho coincidir con los volteos programados.

Durante 185 días, también se ha compostado, en esta misma planta, una pila constituida por una mezcla de lodos de depuradora y poda (APL) en una razón en peso de 5:1. Este material se volteó tres veces durante el primer mes de compostaje

y cada 15 días en el segundo y tercer mes. En el resto del periodo de compostaje solamente se volteó dos veces más. En ningún momento se regó la mezcla ya que la humedad media presente durante el compostaje fue superior al 50%.

El balance de materia se ha llevado a cabo en ambas pilas de compostaje. Para ello, se ha pesado inicialmente el residuo a compostar; y una vez finalizado el tratamiento, se pesa el compost producido y los rechazos obtenidos.

El seguimiento de la evolución térmica interior de la pila volteada durante el compostaje se ha llevado a cabo mediante sonda de temperatura (PT-100) conectada a un dispositivo de almacenamiento de datos (data logger Testo 175-T2) previamente programado para tomar un dato de temperatura cada hora (figuras 3.18 y 3.19). Una vez finalizado el proceso de toma de datos de temperatura, se retiran los data loggers y se conectan al PC con el software adecuado y se obtiene la evolución de los datos temperatura alcanzada en el centro térmico de la pila durante el proceso de compostaje.

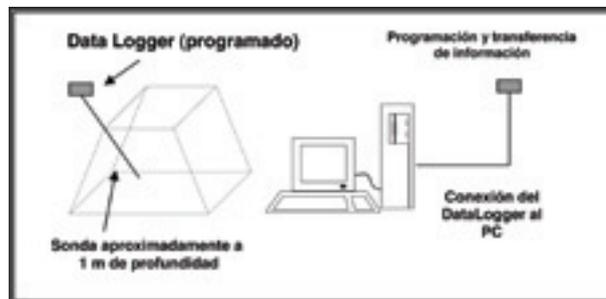


Figura 3.18. Esquema de la determinación de la temperatura en el interior de la pila.



Figura 3.19. Data Logger para registro de la temperatura interior de las pilas de compostaje.

### 3.2.1.2 Planta de Recuperación y Compostaje-B

En esta planta se ha compostado durante 75 días una pila de composición 100% FORSU (BPF) montada de forma troncopiramidal (aproximadamente 3,5 m de alto, 3 m de ancho y 15 m de longitud) y que ha sido volteada tres veces durante el primer mes de compostaje, y tan sólo dos veces en el periodo restante. Dicho volteo se ha llevado a cabo con una pala mecánica. La pila ha sido regada con la misma secuencia de volteo.

La temperatura interior de la pila en cada momento del compostaje ha sido medida con una sonda de temperatura (PT-100) conectada a un dispositivo de almacenamiento de datos (data logger Testo 175-T2).

### 3.2.1.3 Planta de Recuperación y Compostaje-C

En esta planta se ha compostado, durante 119 días y mediante volteos mecánicos, una pila de FORSU que no ha sido previamente introducida en ningún túnel de aireación forzada (CPF). Esta pila ha tenido unas dimensiones aproximadas de 10 m de longitud, 2,5 m de ancho y 1,5 m de alto. Los volteos del material se han llevado a cabo cada 15 días durante los dos primeros meses del compostaje. En el resto del periodo, la pila solamente se volteó tres veces (figura 3.20). El número de riegos durante todo el proceso ha sido de un total de dos.

Al mismo tiempo que se ha realizado el compostaje exterior de la pila CPF, se ha puesto en marcha el compostaje en túnel de una pila (CTF) durante 14 días. El proceso de compostaje en el túnel (figura 3.21) siguió un programa de control diseñado previamente (tabla 3.8). A la salida, el proceso se completó mediante volteos mecánicos, con la misma frecuencia que los realizados a la pila CPF.

El rendimiento másico de los dos procesos se ha evaluado a través de un balance de masa realizado a partir de pesadas de material al inicio del compostaje, antes del refinado, al compost y al rechazo obtenido.

Fases del Proceso	Temperatura de consigna (°C)	Duración (horas)	[O <sub>2</sub> ] mínima
Ventilación inicial	25	0.83	21
Nivelación	20	11	21
Calentar	48	12	21
Precompostaje	48	84	21
Calentar-Higienizar	62	12	21
Higienizar	62	48	21
Enfriar-Higienizar	48	20	21
Compostar	48	132	21
Enfriar	25	48	21
Ventilar	25	0.67	21

Tabla 3.8. Programa de funcionamiento de los túneles de compostaje en la PRC-C.

Tres sondas, tipo PT-100, colocadas consecutivamente en la dirección longitudinal del túnel, miden la temperatura en tres puntos distintos del interior de la pila. El programa calcula la media aritmética de las tres medidas, y en función de la diferencia entre esta media y la temperatura de consigna programada en la fase, el sistema actúa regulando la velocidad del ventilador y la válvula de recirculación del aire, para así intentar conseguir ajustar la temperatura real medida en la pila con la de consigna programada.



Figura 3.20. Volteo mecánico de una pila.



Figura 3.21. A la derecha de la imagen, se observa cómo mediante pala mecánica se transporta el residuo al interior de un túnel. A la izquierda, un túnel abierto después de finalizar el programa de funcionamiento.

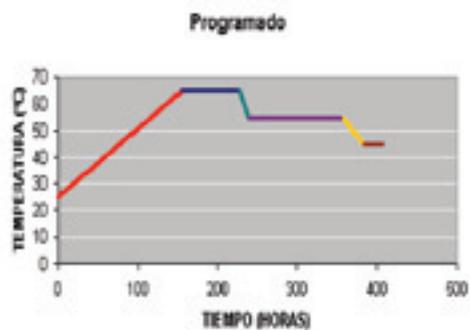
### 3.2.1.4 Planta de Recuperación y Compostaje-D

En esta planta se ha estudiado el compostaje de tres pilas 100% FORSU (DTF1, DTF2 y DTF3) que previamente han permanecido en túneles de aireación forzada con distintos programas de funcionamiento (ver figuras 3.22, 3.23 y 3.24). El tiempo de compostaje en el interior del túnel ha sido de 14 (DTF1), 16 (DTF2) y 19 días (DTF3).

A la salida del túnel, las pilas DTF1, DTF2 y DTF3 se han compostado en eras de volteo hasta completar un periodo total de 85, 73 y 116 días respectivamente mediante volteos mecánicos realizados una vez cada 15 días durante los dos primeros meses de compostaje. En el resto del periodo se han diferenciado en el número de volteos y en la frecuencia. Los riegos han sido distintos para cada pila destacando la DTF3 como la que mayor número de riegos ha recibido.

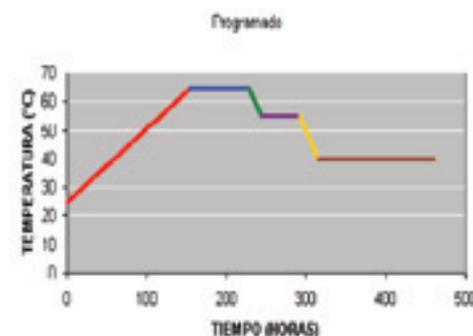
También se ha llevado a cabo durante 90 días, el compostaje mediante volteos de otra pila (DPF) que no ha sido introducida en túnel previamente. Esta pila se ha volteado cada 15 días aproximadamente y se ha regado dos veces en el primer mes de compostaje y otras dos veces en el resto del periodo.

El análisis de todos los procesos ha ayudado a establecer conclusiones acerca de la manera de optimizar el funcionamiento de los túneles y mejorar su rendimiento y eficacia, sin minimizar la calidad del producto.



PROGRAMA (DTF1)		
ETAPA	T (°C)	Tiempo (h)
Inicio	25	0
Carga	65	156
Subida de temperatura	65	156
Higienización	65	228
Bajada de temperatura	55	239
Descomposición	55	359
Bajada de temperatura	45	383
Acondicionamiento	45	407

Figura 3.22. Programa de control de la pila DTF1 de 14 días de compostaje en túnel.



PROGRAMA (DTF3)		
ETAPA	T (°C)	Tiempo (h)
Inicio	25	0
Carga	65	156
Subida de temperatura	65	156
Higienización	65	228
Bajada de temperatura	55	244
Descomposición	55	292
Bajada de temperatura	40	316
Acondicionamiento	40	460

Figura 3.24. Programa de control de la pila DTF3 de 19 días de compostaje en túnel.

### 3.2.1.5 Toma, tratamiento y análisis de muestras

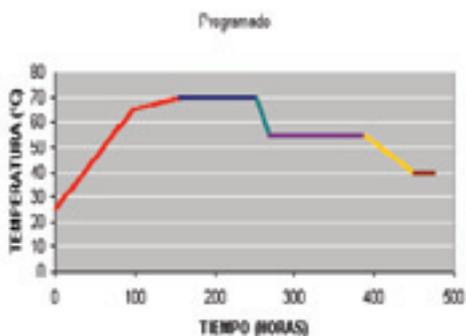
El muestreo se realiza en distintos puntos de la pila y en momentos puntuales a lo largo del proceso de compostaje. Especialmente, cuando se trata de pilas compostadas en túneles de aireación siempre se ha procurado tomar muestra a la entrada y salida del túnel para poder luego evaluar, entre otros parámetros, la evolución de la degradación de la materia orgánica cuando la pila se encontraba en el interior.

Para tomar las muestras se ha procedido de la siguiente manera:

Se han tomado 6 muestras de aproximadamente 500 g cada una, a distintas profundidades y se han mezclado para obtener un total de 3 kg. Toda la mezcla se ha pesado y posteriormente llevado a estufa a 50°C durante 72 horas. Pasado este tiempo, se ha pesado nuevamente y se ha vuelto a introducir en estufa. Así, repetidas veces hasta peso constante.

De la mezcla ya seca, se toman aproximadamente 500 g con los que obtener los extractos acuosos necesarios para las determinaciones de pH, conductividad y carbono orgánico total.

Con el resto de muestra seca, simulando lo que sería el tratamiento de refinado que todo compost recibe antes de salir al mercado, se retira manualmente la fracción inerte de gran tamaño, que se clasifica y pesa, para así caracterizar el residuo. Posteriormente, una vez limpio de fracciones inertes, se tritura en un molino de cuchillas (ORTO-ALRESA) y se homogeniza la muestra, a la que se le va a determinar el contenido en materia orgánica, nitrógeno total, fósforo soluble, **metales pesados** y ácidos húmicos.



PROGRAMA (DTF2)		
ETAPA	T (°C)	Tiempo (h)
Inicio	25	0
Carga	65	96
Subida de temperatura	70	156
Higienización	70	252
Bajada de temperatura	55	268
Descomposición	55	388
Bajada de temperatura	40	450
Acondicionamiento	40	474

Figura 3.23. Programa de control de la pila DTF2 de 16 días de compostaje en túnel.

### 3.2.2 Metodología experimental a escala piloto

Básicamente, la sistemática de trabajo llevada a cabo en los experimentos diseñados a escala piloto ha sido diseñada para:

Simular un proceso de compostaje a escala semi-industrial.

Estudiar la lixiviación química de metales en pilas de composición 100% FORSU a partir de la adición de ácidos orgánicos. Las conclusiones del estudio sobre lixiviación química suponen una base más para proponer otras mejoras en los procesos de compostaje y relacionarlas con la calidad del producto final.

Examinar la influencia de la adición ácida sobre el proceso de compostaje.

Analizar la evolución de las distintas especies metálicas presentes en el residuo. El estudio de especiación metálica al residuo se hace indispensable para evaluar el potencial contaminante. **No sólo es interesante saber qué concentración de metales tiene el compost final sino también la disponibilidad real de cada metal para acumularse en el suelo, contaminar el subsuelo, o bien ser absorbido por la planta.**

#### 3.2.2.1 Diseño de experimentos. Estudio de extracción y especiación de metales

La extracción del metal depende de:

Contenido inicial en el residuo.

pH y potencial rédox del medio.

Tiempo de extracción.

Grado de degradación de la materia.

Tipo de metal (Veeken A. 1998), (García-Mina J.M. 2006).

De manera general en bibliografía, numerosos autores concluyen que en la mayoría de los casos, la extracción es alta a pH bajos. Sin embargo, a dichas condiciones, para algunos metales, como el Cu, se retrasa el tiempo de extracción necesario para obtener una buena eficacia. Por tanto, hay que tener también en cuenta que, condiciones de pH extremas inhibirían la actividad degradativa de la microbiota. Todo esto, se ha tenido en consideración a la hora de plantear el método experimental a seguir.

Diversos estudios señalan que, ni ácidos inorgánicos, ni agentes quelatantes (tipo NTA y EDTA) son buenos extractantes, y sin embargo sí ofrecen bastantes ventajas la utilización de ácidos orgánicos. Es por ello que para el estudio a escala piloto se han elegido dos ácidos, cítrico y oxálico (figura 3.25 y 3.26). Ambos son orgánicos pero tienen distinta fuerza ácida (tabla 3.9).

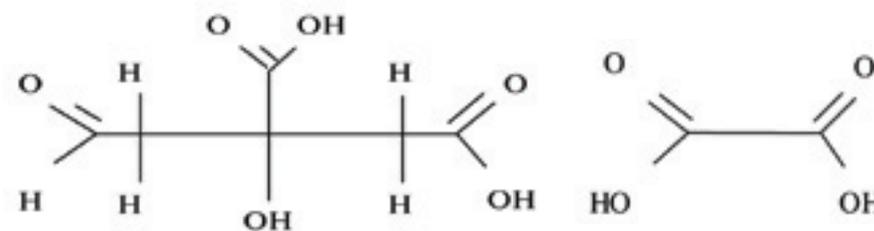


Figura 3.25. Estructura molecular del ácido cítrico.

Figura 3.26. Estructura molecular del ácido oxálico.

	pK <sub>a</sub> / 1 <sup>er</sup> protón	Concentración a preparar	Relación
Ácido cítrico	3,00	0,25 M	1:15, 1:20, 1:40
Ácido oxálico	1,25	0,25 M	1:40

Tabla 3.9. Fuerza ácida de cada uno de los extractantes utilizados.

Cinco experimentos fueron desarrollados a escala piloto, todos ellos con pilas 100% FORSU.

En todos los experimentos se ha pesado; primero, el material de la pila al inicio, a los 10, 20, 35, 45 y 55 días del compostaje; después tras un proceso de cribado, se ha pesado el compost y el material de rechazo. Con los resultados se ha realizado el balance de masa. Con la misma frecuencia anterior, se han tomado las muestras, se ha volteado el material y se ha regado hasta un porcentaje de humedad del 40%. Para ello se ha necesitado de la ayuda de un medidor portátil de humedad MB 45 de la casa comercial DHAUS.

La determinación de la temperatura interna de la pila en cada momento del compostaje se ha realizado con una sonda de temperatura PT-100 conectada a un data logger (Testo 175-T2) que registraba los datos.

Un primer experimento se ha utilizado como ensayo testigo en el que no se ha realizado la adición de extractante. En tres de los cinco experimentos, se ha adicionado ácido cítrico como extractante, en las proporciones [kg residuo seco: mL extractante] 1:15, 1:20 y 1:40 respectivamente. En el último experimento se ha comparado la capacidad de extracción del ácido cítrico con la del ácido oxálico, añadido éste en relación 1:40.

Para evitar que los ensayos con extractante estén sometidos a las inclemencias del tiempo, las pilas han estado bajo techo en todo momento.

En los cuatro experimentos con extractante, la adición siempre se ha producido en tres momentos puntuales del proceso, a los 10, 20 y 35 días de compostaje. El ácido empleado siempre se ha utilizado en una concentración, 0,25 M y siempre se ha añadido después de humedecer la pila hasta el 40%.

El diseño experimental con el se ha trabajado permite poder comparar entre ensayos la eficacia del extractante, condicionada ésta solamente a 4 factores:

1. Relación Residuo / Extractante.
2. pH del medio.
3. Metal en cuestión y especiación.
4. Degradación de la materia orgánica presente.

En este estudio, se considerará que las posibles variaciones del potencial debidas a una mayor concentración de oxígeno en el medio son las mismas en todos los ensayos, ya que la frecuencia de muestreo y volteo es la misma en los cinco experimentos. Por las mismas razones, se va a suponer que el tiempo de contacto entre extractante y residuo, también es el mismo.

El estudio a escala piloto se completa con un análisis de la evolución de las distintas fracciones metálicas durante el compostaje. Para ello, se ha utilizado el método de determinación BCR. Este método de especiación se ha realizado con muestras tomadas en dos momentos puntuales, al inicio y a los 55 días de compostaje.

En la siguiente tabla se exponen, en tres puntos simplificados, las diferencias de este trabajo con las líneas de investigación que sobre el mismo tema se encuentran en bibliografía (Veeken A. 1998), (García-Mina J.M. 2006), (Iwegbue C. et al., 2007), y que justifican su grado innovador.

GRADO DE INNOVACIÓN	
PLANTA PILOTO	OTROS AUTORES
Se ha diseñado un Proceso de extracción a <b>escala Piloto</b> que permite tratar grandes cantidades de cualquier tipo de residuo sólido o semisólido con agente extractante, simulando un proceso industrial de lixiviación química en eras de volteo.	La extracción metálica con adición de agente extractante, hasta ahora, prácticamente sólo se ha realizado a <b>escala laboratorio</b> .
Se añade extractante en tres momentos puntuales del Proceso y se analiza el grado en el que se afecta la evolución del Compostaje.	La mayoría de la bibliografía detalla solamente experimentos en los que la adición de extractante <b>NUNCA se realiza a lo largo del Proceso de Compostaje</b> sino simplemente al Compost final.
El diseño de una Planta piloto permite el estudio de la lixiviación química a escala semi-industrial en pilas de composición 100% FORSU y el análisis de los lixiviados que se generan durante el Proceso.	Hasta ahora la especiación metálica y los experimentos de lixiviación química prácticamente habían tenido una extensa aplicación a todos y sedimentos, pero había sido nula la investigación a escala piloto en pilas de FORSU.

Tabla 3.10. Grado de innovación en el estudio de la lixiviación química de metales a escala piloto.

### 3.2.2.2 Toma, tratamiento y análisis de muestras

En todos los experimentos se ha realizado la misma frecuencia de muestreo al residuo y al lixiviado (inicio y a los 10, 20, 35, 45 y 55 días de compostaje). Finalizado el proceso de compostaje, el material se ha cribado por malla de 1 cm de luz, y se ha tomado muestra tanto del compost como del rechazo obtenido. La toma de muestra ha sido siempre antes de la adición del extractante. A todas las muestras sólidas se les han realizado las determinaciones de pH, humedad, conductividad eléctrica, contenido en materia orgánica (salvo en el material de rechazo), contenido en metales, temperatura máxima de autocalentamiento y VECO. Como complemento para el estudio, al compost final de cada pila, también se le ha realizado un análisis de nitrógeno total, fósforo soluble y contenido húmico total.

La posibilidad que ofrece la planta piloto de recoger el lixiviado que se genera, permite incluir en el plan de trabajo, un control del volumen generado del mismo en cada momento del compostaje y toma de muestra del mismo, a la que se le determina, pH y concentración metálica.

En los cinco experimentos se ha estudiado la evolución química de las distintas especies metálicas presentes mediante una extracción secuencial de metales aplicando el método BCR (European Commission's Bureau Communautaire). Un método que armoniza anteriores procesos de extracción de especies metálicas.

### 3.2.3 Ensayos experimentales en parcelas de cultivo

En colaboración con el Departamento de Ciencias y Recursos Agrícolas y Forestales de la E.T.S.I.A.M. en Córdoba, se han realizado una serie de experimentos de fertilización de cultivos con compost procedente de la PRC-A y al que previamente se le han analizado los distintos parámetros físico-químicos que caracterizan su calidad. El objetivo ha sido el de evaluar, a lo largo de cuatro años, el potencial contaminante del producto fertilizante sobre las cosechas y el suelo de labor.

Los experimentos se han realizado en una parcela dividida en 8 zonas; cuatro de ellas dedicadas al cultivo de trigo y las cuatro restantes al de ajo. Cada zona del cultivo de trigo se ha sometido a un tratamiento distinto; una ha sido abonada con nitrógeno mineral (N-Mineral) a dosis óptimas teóricas (180 kg de nitrógeno/ ha), otra con una mezcla al 50% de compost y 50% de N-Mineral (50C-50NM), la tercera con 100% compost y una última que se ha utilizado como testigo y que no ha sido abonada (Control). Las zonas con cultivo de ajo han recibido un tratamiento similar.

En las distintas zonas, se tomaron muestras de suelo (entre 1-15 cm de profundidad) y del producto cultivado, a las que se les hicieron un análisis por triplicado del contenido metálico presente.

Para terminar de evaluar la incidencia del compost sobre las cosechas, se ha realizado un estudio de la producción obtenida en cada parcela de campo.

### 3.2.4 Ensayos experimentales de fertilización en semilleros

Estos ensayos se han realizado, durante dos años, en los invernaderos del Campus de Rabanales (Universidad de Córdoba). Para ello, se ha dispuesto de un semillero, con 150 alvéolos de 57 cm<sup>3</sup> cada uno.

Las siembras que se han llevado a cabo son de cultivos populares, concretamente, semillas de tomate (*Lycopersicon esculentum*) y melón (*Cucumis melo*) fertilizados con compost procedente de pilas de composición 100% FORSU mezclado en distintas proporciones con sustratos de turba rubia (Tr) y turba negra (Tn) (tabla 3.11).

Primer año	Segundo año
Tr (65%)+Tn(35%)+perlita(5%)	Tr (65%)+Tn(35%)+perlita (5%)
Tn (65%)+Compost 1 (35%)+perlita (5%)	Tn (65%)+Compost 2 (35%)+perlita (5%)
Tn (65%)+Tr (35%)+perlita (5%)	Tn (65%)+Tr (35%)+perlita (5%)
Tr (65%)+Compost 1 (35%)+perlita (5%)	Tr (65%)+Compost 2 (35%)+perlita (5%)
Compost 1 (65%)+Tn (35%)+perlita (5%)	Compost 2 (65%)+Tn (35%)+perlita (5%)

Tabla 3.11. Sustrato utilizado en semilleros para distintas siembras de tomate y melón.

Los experimentos de siembra han tenido un objetivo común, analizar y comparar la asimilación metálica por parte de la planta después de haberseutilizado distintos sustratos de base para el crecimiento.

### 3.2.5 Métodos analíticos. Puesta a punto de distintas técnicas

El RD 824/2005 detalla los métodos de análisis oficiales a emplear para la determinación de la mayoría de los parámetros que caracterizan la calidad de un producto como el compost. Este RD, prácticamente de reciente aprobación, establece para una gran cantidad de parámetros, sus métodos de determinación; sin embargo, en algunos casos (por ejemplo en el análisis de metales) simplemente se limita a recomendar distintos métodos o técnicas de análisis, oficialmente reconocidos en otros países.

Antes de este RD, los métodos de análisis utilizados para la evaluación del compost eran los establecidos por el RD del 12 de Julio de 1991, en el que se aprobaban los métodos oficiales de análisis de productos orgánicos fertilizantes y afines. Este anterior RD ha sido reemplazado con la entrada en vigor del RD 824/2005, mucho más completo que el anterior.

Como es obvio pensar, la llegada “tardía” del RD ha supuesto, en algunos casos, divergencia entre el método de análisis utilizado en nuestra investigación y el método oficial. Sin embargo, es importante aclarar que, en todos los casos, los métodos analíticos empleados en el trabajo han sido, o bien métodos oficiales aprobados

por el anterior RD o por el actual, o bien son métodos de análisis recomendados por organismos de reconocido prestigio, como la Association of Official Analytical Chemists.

Los métodos y técnicas analíticas aplicadas se describen a continuación:

#### Metales Pesados

El RD 824/2005 no se pronuncia sobre los métodos oficiales de análisis de metales que se deben emplear; simplemente recomienda algunos recogidos en Normas UNE-EN (13650, 13806) y en algún que otro Decreto Internacional, como el aprobado en Italia, el 8 de Mayo de 2003, para la determinación del cromo hexavalente.

Exceptuando las técnicas de medida directa en muestras sólidas, como fluorescencia de Rayos X o la Activación neutrónica (Ekinci K. et al., 2002), poco utilizadas en el campo de la investigación de metales en productos orgánicos fertilizantes, el análisis de metales suele realizarse mediante una digestión ácida.

En la revisión bibliográfica realizada, se observa de manera clara que básicamente son tres las diferencias entre los distintos métodos utilizados para determinar metales en productos orgánicos: el modo de digestión, el ácido empleado y la técnica de determinación.

Mientras algunos autores se inclinan por digestiones a temperaturas bajas, otros se inclinan por temperaturas medias, e incluso, los hay que optan por calcinar a elevadas temperaturas y después realizar una digestión a moderada temperatura (Elwell D.L. et al., 2004), (Epstein E.E. 1993), (Epstein K. 1997). También se ha encontrado diferencia en la manera de llevar a cabo la digestión. En este sentido, se ha observado que las opciones más frecuentes son placa calefactora y microondas; aunque también existen autores que se inclinan por la digestión en mufla, o la ultrasonificación combinada con placa, que ha resultado efectiva para la extracción metálica (Escalante N. 2005). Actualmente, es corriente el uso de la digestión en Microondas, puesto que este sistema cumple con los objetivos de seguridad, repetibilidad y minimización de pérdidas de elementos volátiles (Das K.C. et al., 2002a), (Das K.C. et al., 2002b), (De Bertoldi M. et al., 1983).

Pero sin lugar a dudas, la efectividad de la digestión radica de manera importante en el tipo de ácido empleado. En este sentido, cabe destacar que en líneas generales el nítrico es uno de los más utilizados para digerir carbonatos, el fluorhídrico para silicatos y el perclórico cuando existe materia orgánica; y que, también, el uso de distintas mezclas entre los tres tipos de ácidos parece ser interesante (De Bertoldi M. et al., 2005), (Díaz M.J. et al., 2002).

El utilizar un tipo concreto de digestión, depende de la composición de la muestra, lo que hace muy difícil a priori predecir cuál será el método más apropiado, ya que deberán ensayarse distintas posibilidades a fin de establecer un método que sea lo más rápido y simple posible, y que introduzca una menor contaminación.

Antes de empezar a trabajar con un método de digestión en concreto, se ha decidido realizar, por triplicado, el análisis de metales pesados (Cu, Cd, Cr, Ni, Pb, Zn) a dos muestras de distinta composición, una 100% FORSU y otra, procedente de una pila de mezcla de lodos y poda en la proporción 5:1, en las que los analitos se han extraído mediante tres métodos de digestión distintos (tabla 3.12). Los resultados se han estudiado estadísticamente con el test de diferencia significativa (LSD).

	DIGESTIÓN 1 (D1)	DIGESTIÓN 2 (D2)	DIGESTIÓN 3 (D3)
<b>Aparatos e Instrumentación</b>	Mufa/ placa	Microondas	Microondas
<b>Peso de muestra</b>	1 g	0.5 g	0.5 g
<b>Reactivos</b>	HCl (37%) HCl 2N	HNO <sub>3</sub> HCl (37%)	HNO <sub>3</sub> / HCl (37%)/ HF/ H <sub>2</sub> BO <sub>3</sub>
<b>Temperatura/ tiempo</b>	550°C/ 1 hora 120°C/ 30 minutos	30 minutos de rampa de temperatura hasta 230°C/ esta T se mantiene durante 35 minutos y se finaliza con 25 minutos de venteo	25 minutos de rampa de temperatura hasta 210°C y luego un venteo de 90 minutos
<b>Limitaciones</b>	ninguna	Volumen de disolución de muestra en el vaso de teflón/ problemas con el desprendimiento de gases	Volumen de disolución de muestra en el vaso de teflón/ problemas con el desprendimiento de gases
<b>Número máximo de muestras</b>	18	6	6

Tabla 3.12. Métodos de digestión para la extracción de metales.

Los resultados obtenidos se detallan en las tablas que a continuación se exponen:

	FORSU					
	Cu	Cd	Cr	Ni	Pb	Zn
<b>Digestión (D1)</b>	258a*	0.5a	63a	79a	133a	390a
<b>Digestión (D2)</b>	311a	0.6a	85a	103a	211a	426a
<b>Digestión (D3)</b>	266a	0.5a	87a	97a	175a	399a

Tabla 3.13. Resultados en el análisis de metales de tres muestras de FORSU con distinta digestión. (\* Letras iguales indican que no existe diferencia significativa entre determinaciones. Los resultados están expresados en ppm de metal sobre muestra seca).

	Mezcla de lodos y poda (5:1)					
	Cu	Cd	Cr	Ni	Pb	Zn
<b>Digestión (D1)</b>	305a*	2.0a	46a	56b	119a	400a
<b>Digestión (D2)</b>	330a	0.0b	63a	99a	149a	413a
<b>Digestión (D3)</b>	326a	2.0a	70a	75a	159a	454a

Tabla 3.14. Resultados en el análisis de metales de tres muestras procedentes de una mezcla de lodos y poda y que han tenido distinta digestión. (\* Letras iguales indican que no existe diferencia significativa entre determinaciones. Los resultados están expresados en ppm de metal sobre muestra seca).

El análisis estadístico, con el programa informático Statadvisor, indicó (figuras 3.27-3.38) que en las muestras de FORSU no hubo diferencias significativas entre los resultados obtenidos para cada metal extraído con distinto método de digestión. Similares resultados se obtuvieron en las muestras de lodos y poda, salvo para el Ni y el Cd. En el caso del primero, el resultado obtenido con la muestra sometida a la D1 es diferente significativamente a los obtenidos con las muestras sometidas a digestión utilizando los métodos D2 y D3. Para el caso del Cd, el resultado diferente es el obtenido con la muestra sometida a la digestión del método D2.

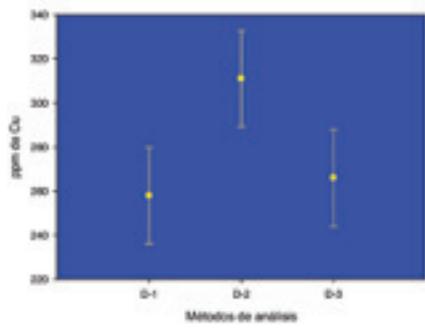


Figura 3.27. Aplicación del stadvisor a 3 medidas del Cu.

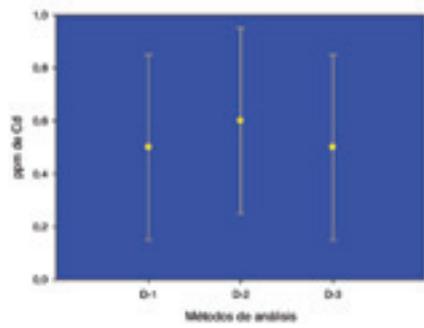


Figura 3.28. Aplicación del stadvisor a 3 medidas del Cd.

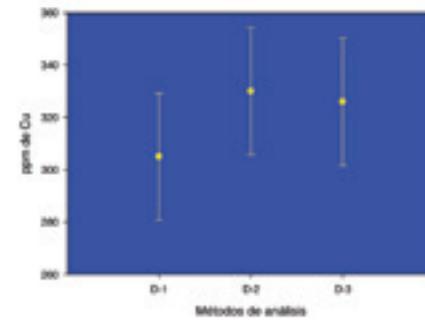


Figura 3.33. Aplicación del stadvisor a 3 medidas del Cu.

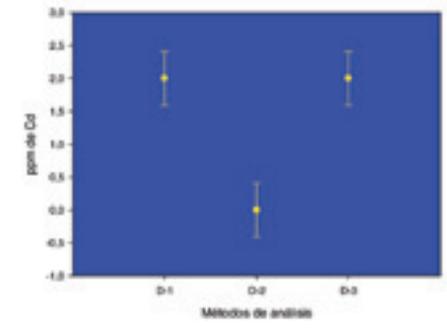


Figura 3.34. Aplicación del stadvisor a 3 medidas del Cd.

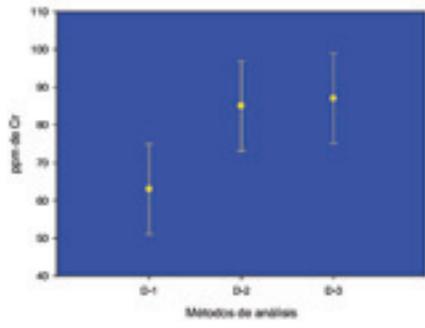


Figura 3.29. Aplicación del stadvisor a 3 medidas del Cr.

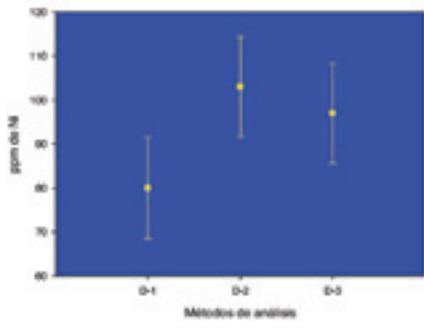


Figura 3.30. Aplicación del stadvisor a 3 medidas del Ni.

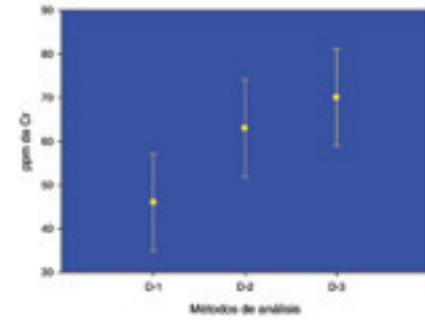


Figura 3.35. Aplicación del stadvisor a 3 medidas del Cr.

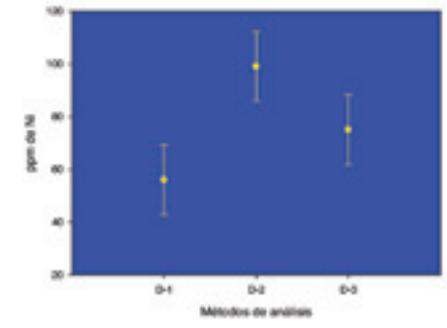


Figura 3.36. Aplicación del stadvisor a 3 medidas del Ni.

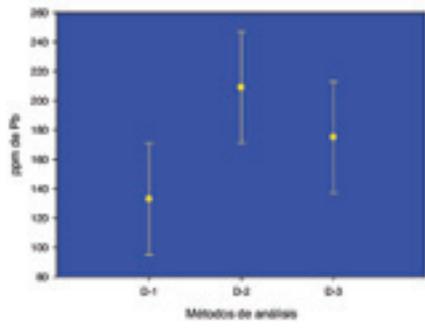


Figura 3.31. Aplicación del stadvisor a 3 medidas del Pb.

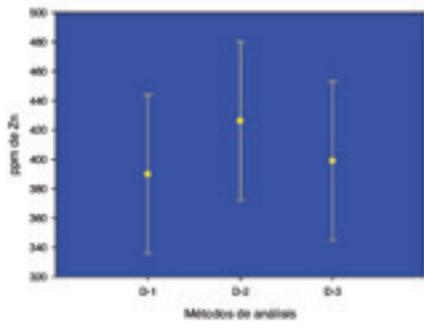


Figura 3.32. Aplicación del stadvisor a 3 medidas del Zn.

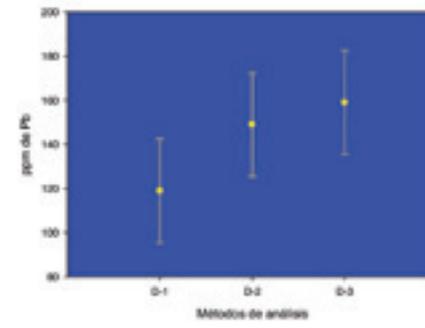


Figura 3.37. Aplicación del stadvisor a 3 medidas del Pb.

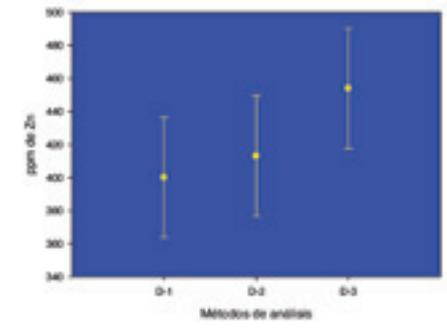


Figura 3.38. Aplicación del stadvisor a 3 medidas del Zn.

El método de extracción de metales, con la D1 resulta menos costoso, minimiza el número de interferencias por utilizar menor número de reactivos, es más rápido y además no presenta las limitaciones que sí tienen el resto de métodos de digestión (tabla 3.12).

Concretamente, el método elegido para los análisis ha consistido en: calcinación en mufla a 550 °C de 1 gramo aproximado de muestra durante una hora, para posteriormente llevar a cabo la digestión del residuo en placa calefactora a 120°C con 10 mL de HCL (37%) hasta sequedad total y por último se disuelve el resto sólido con 20 mL de HCl 2N. La disolución se ha microfiltrado (0,45 µm) y el volumen recogido se ha diluido con agua ultrapura hasta 100 mL.

Respecto a la elección de la técnica de determinación, decir que, entre otras cosas, depende del tipo de muestra, de su tratamiento y del grado de precisión, selectividad y sensibilidad que se quiera obtener en los resultados. Se ha encontrado en bibliografía determinaciones de metales a través de numerosas técnicas; aunque destacan, el ICP y la Absorción Atómica, entre las más utilizadas.

En nuestro caso, la Absorción Atómica (AA) ha sido la técnica que se ha utilizado para la determinación de la concentración metálica en las muestras. Para ello se ha dispuesto de un espectrofotómetro de llama de la casa comercial Perkin Elmer (modelo AAnalyst 300) (figura 3.39). La espectrofotometría de absorción atómica es una técnica analítica cuantitativa para determinar la concentración de elementos en una muestra. Se basa en la absorción de luz por los átomos del elemento. En concreto, el espectrofotómetro usado vaporiza la muestra en una llama producida a partir de la mezcla de aire y acetileno. Esto, deja a la mayoría de los átomos del elemento en su estado fundamental. Dicha muestra es atravesada por luz visible o ultravioleta, con lo que se excita a los átomos que están en estado fundamental hacia estados de energía más alta. La absorción de la luz incidente (a longitudes de onda específicas) es determinada y, aplicando la ley de Beer se establece una relación entre la absorbancia y la concentración del elemento. Los átomos no absorben luz de forma arbitraria, sólo absorben luz de ciertas longitudes de onda y estas longitudes de onda particulares corresponden a diferencias de energía entre el estado fundamental y varios estados excitados del átomo.

El espectrofotómetro posee una lámpara de cátodo hueco (HLC) que emite luz de la energía de resonancia del elemento que se quiera determinar (es decir, a una longitud de onda determinada). La luz pasa a través de la llama en la que los átomos de la muestra absorben a sus energías de resonancia. La luz no absorbida pasa después a través de un monocromador mediante el que la longitud de onda de resonancia primaria es aislada de otras radiaciones. El haz incide después en un tubo fotomultiplicador en el que se mide su intensidad. La señal se amplía electrónicamente y se lee mediante un dispositivo digital.

El espectrofotómetro posee también una lámpara de deuterio que corrige el ruido de fondo causado por partículas o formas moleculares no disociadas de la matriz. Para

el calibrado del instrumento (tabla 3.15) se han preparado patrones que cubren el rango de concentración deseada.

Metal	Técnica	LLama	λ	Rango lineal	Sensibilidad	Concentración de patrones
Cu	Absorción	Aire acetileno	324,8 nm	5 ppm	0,077 ppm	1 ppm 4 ppm
Cd	Absorción	Aire Acetileno	228,8 nm	2 ppm	0,028 ppm	1 ppm 2 ppm
Cr	Absorción	Aire Acetileno	357,9 nm	5 ppm	0,078 ppm	1 ppm 4 ppm
Ni	Absorción	Aire Acetileno	232,0 nm	2 ppm	0,14 ppm	1 ppm 2 ppm
Pb	Absorción	Aire Acetileno	217,0 nm	20 ppm	0,19 ppm	1 ppm 6 ppm
Zn	Absorción	Aire acetileno	213,9 nm	1 ppm	0,018 ppm	2 ppm 6 ppm 12 ppm

Tabla 3.15. Condiciones de trabajo en el espectrofotómetro de llama.

También se ha calculado el límite de detección (LD) del instrumento a las condiciones de trabajo.

	Condiciones de análisis en el Espectrofotómetro de llama para calcular el LD								
	Presión de gases (bar)		Caudal de gases (L/ min.)		Lámpara		Concentración de patrones preparados		LD* (ppm)
	Aire	Acetileno	Aire	Acetileno	λ	slit	mayor	menor	
Cu	4,0	0,9	10,0	3,0	324,8	0,7	5,0	2,5	0,10
Cd	4,0	0,9	9,7	4,2	228,8	0,7	2,0	1,0	0,02
Cr	4,0	0,9	9,7	4,3	357,9	0,7	5,0	2,5	0,01
Ni	4,0	0,9	10,5	3,1	232,0	0,2	2,0	1,0	0,01
Pb	4,0	0,9	10,0	3,0	217,0	0,7	18,0	3,0	0,20
Zn	4,0	0,9	10,0	3,0	213,9	0,7	1,0	0,5	0,01

Tabla 3.16. Condiciones de trabajo para el cálculo del LD.

\* Para el cálculo del límite de detección (LD) se ha realizado el test de medias. Optimizando el instrumento a las condiciones de trabajo más favorables, se ha analizado la secuencia de medida, blanco-patrón de menor concentración-blanco-patrón de mayor concentración, por duplicado.

### Cálculos:

El espectrofotómetro de llama expresa los resultados en mg/L (ppm). Para referirlos a mg de metal / kg de muestra seca se realizan los cálculos siguientes:

$$\frac{\text{mg metal}}{\text{kg de muestra seca}} = \frac{A \times 0.1L}{B} \times 1000$$

donde:

A = cantidad de metal determinado por el espectrofotómetro, en ppm.

B = peso de muestra seca, en g.



Figura 3.39. Espectrofotómetro de llama AAnalyst 300.

### Especiación química de metales. Método BCR

Como ya se ha dicho, la especiación química es la técnica por la que se extraen secuencialmente las distintas especies químicas de cada metal. Empieza a desarrollarse en el análisis de sedimentos, y actualmente es una técnica muy utilizada en muestras de lodos de aguas residuales, de suelos y de compost. Esta técnica se aplica extensamente en estudios medioambientales y es útil para entender el comportamiento químico y biodisponibilidad de metales.

En los últimos años se han desarrollado un gran número de metodologías de extracción química secuencial, todas prácticamente con el mismo procedimiento (Tessier A. et al., 1979), (Wong J.W. C. et al., 2005), (Zennaro M. et al., 2005). La utilización de diversos extractantes y su forma de aplicación, hizo que la Community Bureau of Reference (BCR) de la Comisión de la Comunidad Europea en 1992 realizara un estudio para la armonización de las diferentes técnicas empleadas bajo

el nombre “Especiación de metales pesados en suelos y sedimentos” (Esakku S. et al., 2005), (Alvarenga P. et al., 2007). Este método comprende cuatro fracciones de extracción:

Metal en forma de iones intercambiables y carbonatos (IC).

Metal asociado a los óxidos de hierro y manganeso (O).

Metal ligado a la materia orgánica (MO).

Fase residual o litogénica (Rs).

Para la realización del análisis, se ha pesado aproximadamente un gramo de muestra en un bote de centrifuga. A partir de aquí, y para extraer las distintas fracciones, se ha añadido un volumen de extractante. La disolución se ha mantenido en agitación durante un tiempo determinado y posteriormente se ha centrifugado a 3000 rpm durante 40 minutos. Del extracto líquido se determina el contenido metálico (Cu, Cd, Cr, Ni, Pb, Zn), habiendo previamente microfiltrado la disolución y enrasado a un volumen de 100 mL con agua ultrapura. El residuo sólido obtenido después de centrifugación, se lava con agua ultrapura y se procede a la extracción de la siguiente fracción. Este procedimiento se repite hasta haber extraído el resto de fracciones.

Detalladamente en la siguiente tabla, se expone el procedimiento llevado a cabo para la extracción de cada una de las fracciones metálicas.

	IC	O	MO	Rs
Extractantes	40 mL de ácido acético 0,11 M	40 mL de clorhidrato de hidroxilamina 1 M	10 mL de peróxido de hidrógeno 8,8 M	5 mL de HCl (37%) y 15 mL de HNO <sub>3</sub> (35%)
Tiempo de agitación	16 horas	16 horas	1 hora	-
Centrifugación 3000 rpm	40 minutos	40 minutos	-	-
Calentar	-	-	1 hora a 85°C	3 horas a 150°C
Reactivo	-	-	50 mL de acetato de amonio 1 M	-
Tiempo de agitación	-	-	16 horas	-
Centrifugación 3000 rpm	-	-	40 minutos	40 minutos

Tabla 3.17. Métodos de extracción de las distintas fracciones metálicas.

### Lixiviados

#### Contenido en metales pesados

Para el análisis se ha tomado un volumen de muestra de 100 mL en un crisol de porcelana, se ha secado a 105°C en estufa y después se ha llevado a mufla a 550°C

durante 1 hora. A continuación, se ha procedido como lo indicado en el análisis de metales en muestras sólidas.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos en la realización de los experimentos planteados para lograr los objetivos propuestos. Para ello, esta parte de la memoria se divide en tres grandes bloques:

Caracterización del material que se destina a compostaje en cada una de las plantas de reciclado y compostaje de residuos municipales, objeto de estudio.

Caracterización de la evolución del contenido en metales del material contenido en las pilas de cada una de las plantas mencionadas.

Estudio de la lixiviación química a escala piloto, en el compostaje de material constituido únicamente con FORSU, como método de eliminación de metales en el compost.

Análisis de la bioacumulación de metales pesados en suelos y de la bioasimilación en vegetales a partir de ensayos experimentales de cultivos y siembra de semilleros a los que se les ha aplicado compost.

Las pilas de material a compostar, con las que se ha trabajado experimentalmente, han sido montadas en cuatro plantas de recuperación y compostaje encargadas de gestionar los residuos urbanos de ámbitos de población muy diferentes. Este hecho, que influye de manera decisiva en la composición del material de partida, constituye, junto al diferente modo de operar en cada planta, las bases para explicar muchos de los resultados obtenidos.



## 4. Resultados y discusión

## 4.1 Caracterización de la fracción de los RSU que se destinan a compostaje en las diversas plantas

En los gráficos de la figura 4.1 se expone la composición media del material que se destina a compostaje. Los resultados que se muestran presentan una ligera variación a lo largo del año.

La diferencia más significativa se ha detectado en la planta PRC-A, cuyos residuos contienen un porcentaje en peso de materia orgánica superior al 50%, conseguido gracias a una gestión de recogida selectiva para dicha fracción. Respecto a los porcentajes en vidrio y papel de dichos residuos, éstos han resultado ser inferiores a los determinados en el material a compostar estudiado en las otras tres plantas. El resto de la composición ha sido similar en todas las plantas. Destacar que, aunque la planta PRC-A gestiona los residuos de una ciudad, frente al resto que gestionan términos municipales rurales (y por tanto gestiona un mayor volumen de residuos (ver apartado 3.1.1) y una mayor diversidad en los mismos) el contenido orgánico ha sido mayor y el porcentaje del resto de fracciones ha resultado, en uno casos análogo, y en otros incluso inferior al determinado en el material del resto de plantas.

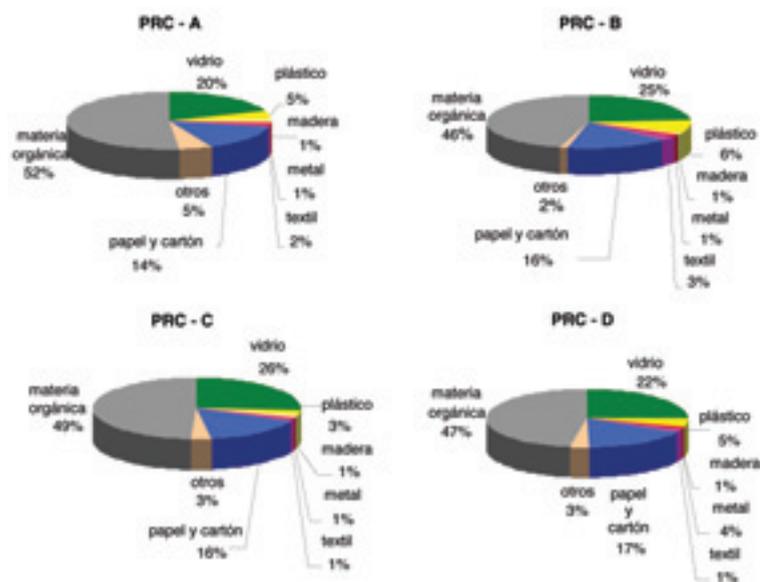


Figura 4.1. Gráficos de cuñas porcentuales (% en peso) correspondientes a la caracterización del residuo de partida a compostar en cada planta.

Como se muestra en las gráficas, en todas las plantas, el material de partida para compostaje presenta aún, un alto porcentaje en peso de las fracciones de vidrio y papel. Ambos casos muestran una media por encima del 20% y 15%, respectivamente; lo que implica que aún debe mejorarse la recogida selectiva de dichas fracciones en origen.

## 4.2 Rendimientos máxicos en el compostaje

A continuación, se presentan los balances máxicos de cada pila en estudio.

Se ha querido distinguir, por un lado, lo que es el **rendimiento industrial, RI**, del proceso, y por otro, lo que se ha considerado como **rendimiento seco, RS**. El primero es relevante a la hora de evaluar el proceso en términos económicos y comerciales, pero resulta incompleto para poder calificar con él la gestión que de los residuos a compostar, se realiza en la planta. El segundo, conjuntamente con el cálculo de la pérdida de materia seca antes de refino, permite evaluar mejor la evolución máxica de la materia orgánica durante el proceso de compostaje.

El rendimiento industrial se puede definir como la relación de compost producido respecto a la cantidad de materia húmeda inicial, expresado en tanto por ciento; el rendimiento seco como el porcentaje obtenido al considerar la cantidad de compost seco frente a la de materia inicial seca.

La discrepancia entre la masa evaluada antes de refino (AR) y la obtenida tras dicha operación (Compost + Rechazo) no ha sido superior en ninguno de los casos estudiados al 5%. Esta diferencia es debida al propio proceso de refino y al modo de contabilizar en planta la cantidad de materia. Esto último se ha llevado a cabo con palas mecánicas que han cargado el material y lo han llevado a báscula industrial. La media aritmética obtenida del valor de tres pesadas, multiplicado por el número de paladas que se realizaron refleja la masa obtenida de cada una de las fracciones.

### 4.2.1 Planta de recuperación y compostaje A

A continuación se exponen los datos obtenidos de las dos pilas estudiadas en la planta de recuperación y compostaje identificada con la letra A. Como ya se ha indicado, estas pilas se designan como **APF** (correspondiente a una pila típica de las que se procesan en la planta **A**, mediante el sistema de pilas volteadas y regadas, con aireación natural, y constituida únicamente con material procedente de separar la fracción orgánica de RSU, FORSU) y como **APL** (correspondiente a una pila típica de las que se procesan en la planta **A**, mediante el sistema de pilas volteadas y regadas, con aireación natural, y constituida con lodos de una estación depuradora de aguas residuales municipales, LD, a los que se añade poda triturada, como material estructurante, en una relación volumétrica 5:1).

Tanto la pila APF como la APL, han tenido prolongados periodos de compostaje, 190 y 185 días respectivamente.

PLANTA DE RECUPERACIÓN Y COMPOSTAJE - A			
		APF	APL
Días de compostaje		190	185
Masa inicial (kg)	M.I.	28.500	70.500
Humedad inicial (%)		33,0	82,5
Masa antes de Refino (kg)	A.R.	17.500	10.600
Humedad antes de Refino (%)		35,1	18,7
Masa de Rechazo (kg)	Rechazo	10.870	2250
Humedad del Rechazo (%)		28,5	18,5
Masa de Compost (kg)	Compost	5.850	8.250
Humedad del Compost (%)		39,5	17,5
Rendimiento industrial (%)	$R.I. = 100 \cdot \text{Compost} / M.I.$	20,5	11,7
Masa inicial seca (kg)	M.I.S.	19.095	12.337
Masa seca antes de Refino (kg)	A.R.S.	11.357	8.618
Compost seco (kg)	Compost-S	3.539	6.781
Rechazo seco (kg)	Rechazo-S	7.772	1.834
Pérdida de materia seca (kg)	$M.I.S. - A.R.S.$	7.738	3.719
Rendimiento seco (%)	$RS = 100 \cdot \text{Compost-S} / M.I.S.$	18,5	55,0

Tabla 4.1. Balance másico y porcentaje de humedad en el procesado de la APF y la APL.

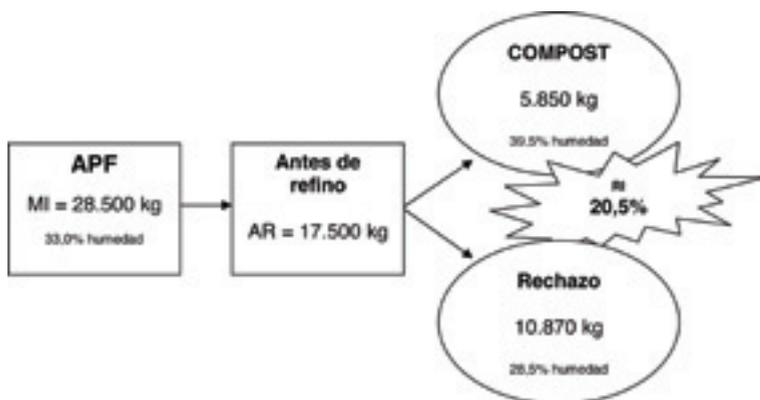


Figura 4.2. Diagrama de flujo másico del material en la pila APF.

El **rendimiento industrial (R.I)** del proceso de Compostaje de la pila APF (20,5%) y la pérdida de materia seca (41%) han sido, porcentualmente, los más elevados de todos los casos estudiados.

El Rechazo Seco de la pila APF ha sido de un 41% sobre la Materia Inicial Seca, porcentaje que se aproxima al promedio determinado para el conjunto total de fracciones de los impropios (no orgánicos) en la caracterización del material de partida destinado a Compostaje. Este hecho verifica la eficacia de la separación de fracciones en el proceso de refino.

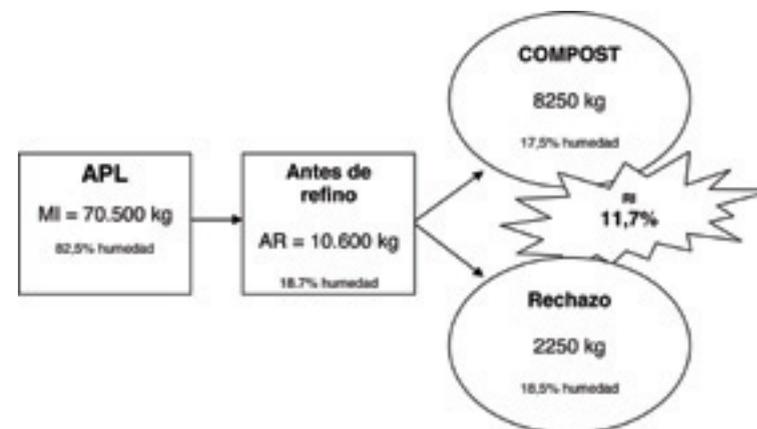


Figura 4.3. Diagrama de flujo másico del material en la pila APL.

El **rendimiento industrial (R.I)** en la pila APL ha sido del 11,7%. Sin embargo, el rendimiento seco es muy ilustrativo en este tipo de pilas, pues permite apreciar que el 55% de la materia seca que se ha procesado ha acabado en forma de compost, mientras que en la de FORSU dicho porcentaje ha sido sólo del 18,5%

Esta diferencia es lógica, y se debe a que los lodos procedentes de la estación depuradora de aguas residuales (EDAR) están constituidos en su mayor parte de materia orgánica. La cantidad de material seco de rechazo, 1834 kg, obtenido en el proceso de refino de la pila APL, corresponde en su mayor parte a la poda que inicialmente se mezcló con el lodo (aproximadamente unos 2056 kg secos de material estructurante).

#### 4.2.2 Planta de recuperación y compostaje B

En este apartado, se presenta el estudio de una pila típica de las que se procesan en la planta B, mediante el sistema de pilas volteadas y regadas, con aireación natural, y constituida únicamente con material procedente de separar la fracción orgánica de RSU, BPF, con un periodo de compostaje de 75 días.

El rendimiento industrial (R.I) del proceso ha sido del 10,4% y la pérdida de materia seca del 15,8% (tabla 4.2 y figura 4.4). Ambos valores inferiores a los determinados en la pila APF, aunque también hay que tener en cuenta que el tiempo de compostaje en esta planta ha sido inferior.

El porcentaje de rechazo, en base seca, ha sido del 70%, un valor porcentual muy elevado explicable por el alto contenido en impropios del material de partida y, posiblemente, por una ineficaz separación entre éstos y determinados fragmentos de materia orgánica, generalmente de tamaño de partícula elevado, que terminan formando parte del rechazo.

PLANTA DE RECUPERACIÓN Y COMPOSTAJE - B		
		<b>BPF</b>
Días de compostaje		75
Masa inicial (kg),	M.I.	30.650
Humedad inicial (%)		50,8
Masa antes de Refino (kg),	A.R.	18.700
Humedad antes de Refino (%)		32,1
Masa de Rechazo (kg),	Rechazo	14.800
Humedad del Rechazo (%)		29,0
Masa de Compost (kg)	Compost	3.200
Humedad del Compost (%)		32,8
Rendimiento industrial (%)	$R.I. = 100 \cdot \text{Compost} / M.I.$	10,4
Masa inicial seca (kg)	M.I.S.	15.080
Masa seca antes de Refino (kg)	A.R.S.	12.697
Compost seco (kg)	Compost-S	2.150
Rechazo seco (kg)	Rechazo-S	10.508
Pérdida de materia seca (kg)	$M.I.S. - A.R.S.$	2.383
Rendimiento seco (%)	$RS = 100 \cdot \text{Compost-S} / M.I.S.$	14,3

Tabla 4.2. Balance másico y porcentaje de humedad en el material de la pila BPF.

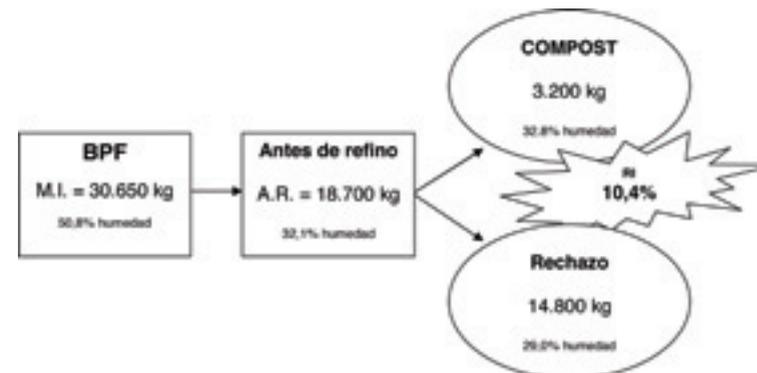


Figura 4.4. Diagrama de flujo másico del material en la pila BPF.

### 4.2.3 Planta de recuperación y compostaje C

En esta planta, se ha estudiado el compostaje de dos pilas constituidas, únicamente, con material procedente de separar la fracción orgánica de RSU. En ambas pilas, el periodo de compostaje se ha iniciado al mismo tiempo y ha tenido una duración de 119 días. Para la caracterización inicial se ha realizado una sola toma de muestra, considerándose que al comienzo del compostaje las pilas parten con las mismas características físico-químicas que se determinan en esa muestra inicial común.

Una de las pilas ha sido compostada solamente mediante el sistema de pilas volteadas y regadas, CPF; y la otra, CTF, ha tenido un compostaje previo de 14 días en túnel, donde se favorecen las condiciones de humedad, aireación y temperatura en las fases iniciales del proceso de compostaje y donde las transformaciones son más elevadas. Tras el paso por el túnel, se mantiene un sistema tradicional de pilas volteadas y regadas, sin aireación forzada.

PLANTA DE RECUPERACIÓN Y COMPOSTAJE - C			
		CPF	CTF
Días de compostaje		119	119
Masa inicial (kg)	M.I.	21.440	130.704
Humedad inicial (%)		39,8	39,8
Masa antes de Refino (kg)	A.R.	11.960	77.220
Humedad antes de Refino (%)		4,5	9,4
Masa de Rechazo (kg)	Rechazo	9.840	62.870
Humedad del Rechazo (%)		4,0	7,9
Masa de Compost (kg)	Compost	2.120	14.350
Humedad del Compost (%)		6,8	13,9
Rendimiento industrial (%)	$R.I. = 100 * Compost / M.I.$	9,9	11,0
Masa inicial seca (kg)	M.I.S.	12.907	78.684
Masa seca antes de Refino (kg)	A.R.S.	11.422	69.961
Compost seco (kg)	Compost-S	1.976	12.355
Rechazo seco (kg)	Rechazo-S	9.446	57.903
Pérdida de materia seca (kg)	$M.I.S. - A.R.S.$	1.485	8.723
Rendimiento seco (%)	$R.S. = 100 * Compost-S / M.I.S.$	15,3	15,7

Tabla 4.3. Balance másico y porcentaje de humedad en el procesado de CPF y CTF.

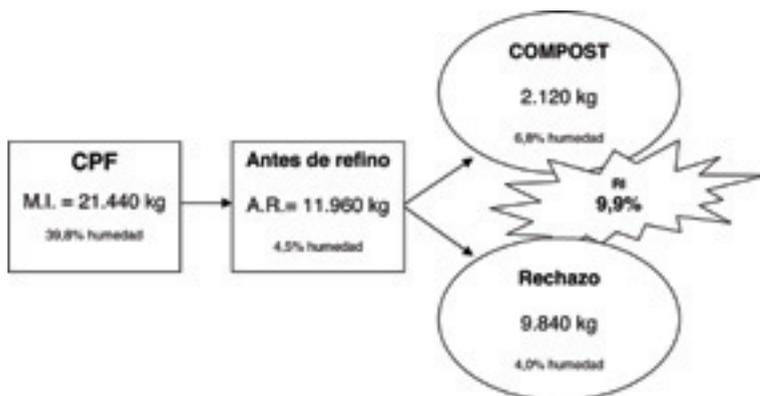


Figura 4.5. Diagrama de flujo másico del material en la pila CPF.

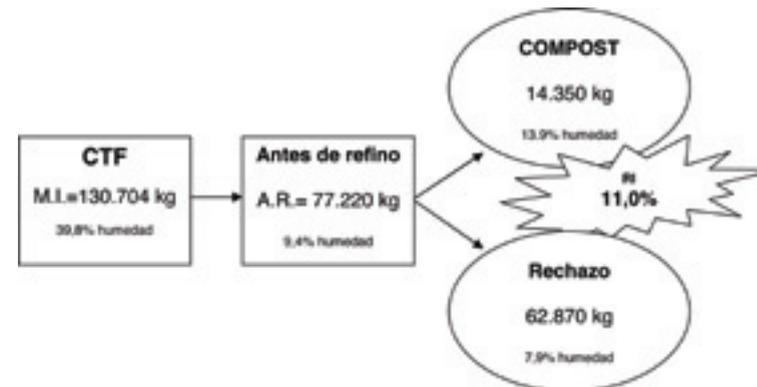


Figura 4.6. Diagrama de flujo másico del material en la pila CTF.

A pesar del amplio periodo de compostaje, las cifras significativas del proceso indican que éste no se ha realizado adecuadamente, debido a que:

Las pérdidas de materia seca han sido muy bajas en ambos casos, del orden del 11%.

Los rendimientos industriales del proceso también han sido bajos, 10 y 11%.

El porcentaje de rechazo que se ha obtenido es elevado, un 73% en ambos casos.

Estas cifras coincidentes e incluso algo peores que las de la planta B indican un déficit de funcionamiento, que probablemente tenga su explicación, entre otras causas, en los bajos valores de humedad mantenidos (tabla 4.3 y figuras 4.5 y 4.6).

#### 4.2.4 Planta de recuperación y compostaje D

De las cuatro pilas de esta planta, todas ellas constituidas por FORSU, tres están identificadas con la letra T, ya que han tenido una primera fase de compostaje intensivo en túnel, con diferentes programas de funcionamiento (DTF1, DTF2, y DTF3). La otra, DPF, es una pila que se ha procesado únicamente mediante el sistema de pilas volteadas y regadas, con aireación natural, sin pasar por la primera fase de compostaje en túnel.

Atendiendo a los datos que se muestran en la tabla 4.4, se pueden distinguir dos comportamientos diferentes en cuanto al porcentaje de pérdida de masa: las pilas DPF y DTF3 han tenido una pérdida de masa, en base seca, del 18% aproximadamente, mientras que, las dos intermedias, DTF1 y DTF2, apenas pasan del 10%; esta dualidad se repite respecto al tiempo de compostaje, menor para estas dos últimas (85 y 73 días, frente a 90 y 116), y en cuanto al nivel de humedad mantenido durante el compostaje, que también ha sido menor.

PLANTA DE RECUPERACIÓN Y COMPOSTAJE - D				
	DPF	DTF1	DTF2	DTF3
Días de compostaje	90	85	73	116
Masa inicial (kg), M.I.	120.500	175.000	180.000	175.000
Humedad inicial (%)	42,0	43,6	42,5	40,5
Masa antes de Refino (kg), A.R.	65.500	93.950	97.500	90.600
Humedad antes de Refino (%)	12,7	6,0	4,5	5,9
Masa de Rechazo (kg), Rechazo	48.450	69.600	77.000	60.660
Humedad del Rechazo (%)	10,8	4,5	4,4	3,7
Masa de Compost (kg), Compost	16.900	22.680	21.000	28.350
Humedad del Compost (%)	13,0	6,2	4,7	6,0
Rendimiento industrial (%) R.I. = 100 * Compost / M.I.	14,0	13,0	11,7	16,2
Masa inicial seca (kg), M.I.S.	69.890	96.700	103.500	104.125
Masa seca antes de Refino (kg), A.R.S.	57.181	88.313	93.112	85.255
Compost seco (kg), Compost-S	14.703	21.274	20.013	26.649
Rechazo seco (kg), Rechazo-S	43.217	66.466	73.612	58.608
Pérdida de materia seca (kg), M.I.S. - A.R.S.	12.709	10.387	10.388	18.870
Rendimiento seco (%) RS = 100 * Compost-S / M.I.S.	21,0	21,5	19,3	25,6

Tabla 4.4. Balance másico y porcentaje de humedad en el material de las pilas DPF, DTF1, DTF2 y DTF3.

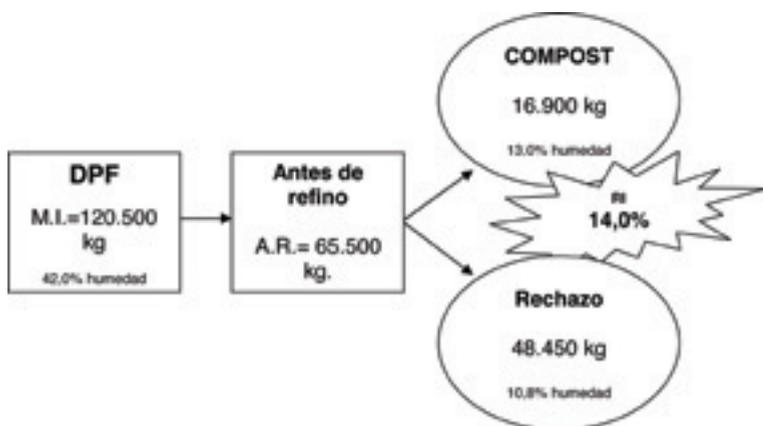


Figura 4.7. Diagrama de flujo másico del material en la pila DPF.

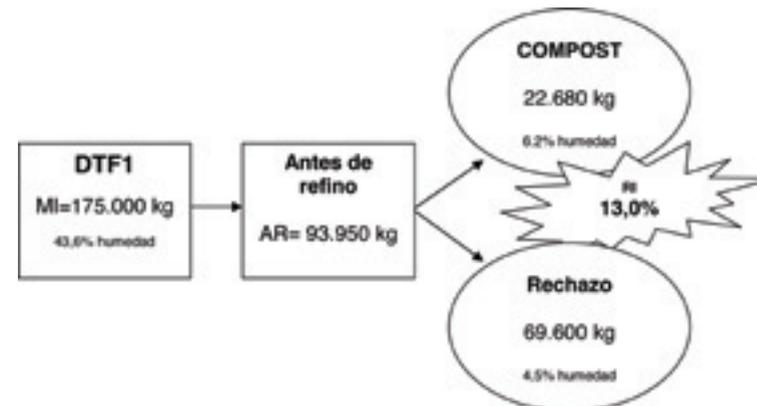


Figura 4.8. Diagrama de flujo másico del material en la pila DTF1.

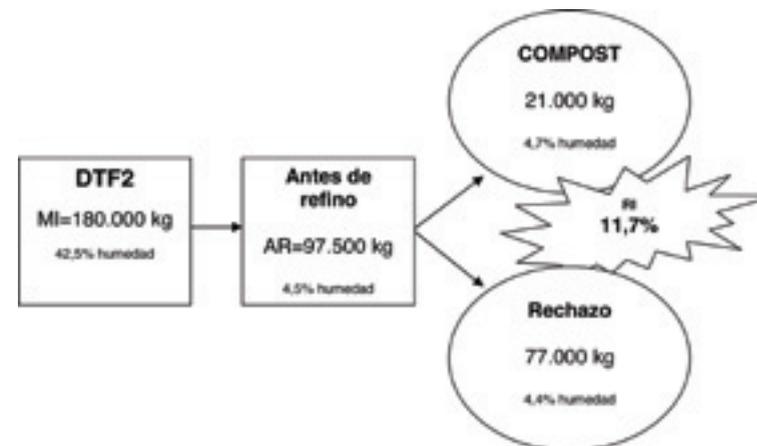


Figura 4.9. Diagrama de flujo másico del material en la pila DTF2.

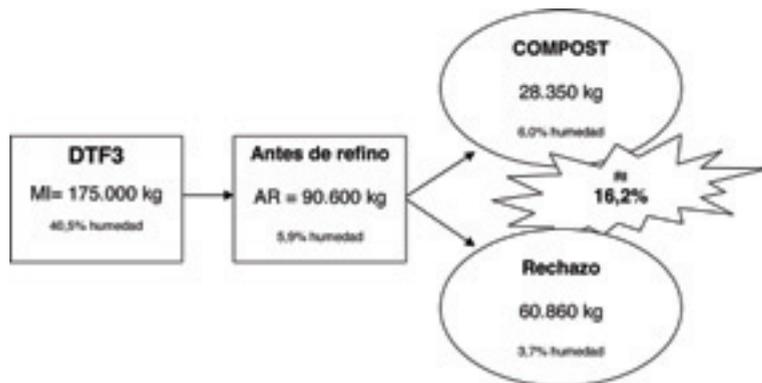


Figura 4.10. Diagrama de flujo másico del material en la pila DTF3.

El porcentaje de rechazo seco ha tenido un comportamiento análogo, sus valores han sido del 62%, 67%, 71% y 56% para la DPF, DTF1, DTF2 y DTF3, respectivamente. Valores altos, aunque no tanto como los encontrados en las plantas B y C.

#### 4.2.5 Conclusiones parciales del balance másico

Los cálculos realizados sobre la cantidad de materia procesada y su evolución en el proceso de compostaje, han permitido ver que hay que distinguir claramente entre los dos tipos de pilas (las de FORSU de la de LD). En cuanto a las primeras, en general se logran rendimientos industriales bajos (entre el 10% y el 20% como valores extremos). Sin embargo, esto no es debido a que la mayor parte de la materia orgánica se haya transformado y emitido en forma de CO<sub>2</sub> y agua, ya que el balance de materia seca nos ha proporcionado unos datos de pérdidas de materia antes de refinado muy bajos en tres de las cuatro plantas (entre un 10 y un 18%). En cambio, los rechazos secos arrojan en estas tres plantas un valor medio del 67%, lo que supone que una parte significativa de la materia orgánica está presente aún en esta partida.

Frente a estos resultados, están los de la planta A, en la que se mantiene un tiempo de compostaje mayor que en las otras, con volteos y riegos más frecuentes, y partiendo de una materia prima de mayor calidad para el compostaje (más proporción de materia orgánica y procedente de una recogida selectiva en origen algo más eficaz); en este caso se pierde, por transformación, un 40% de la materia seca y se rechaza solamente otro 40%, proporcionando así el rendimiento industrial más elevado de todos.

En resumen, parece clara la existencia de una correlación directa entre tiempo de compostaje y grado de humedad por un lado y eficacia másica del proceso por otro.

En cuanto a la pila constituida con lodos y poda, ya se ha comentado su particular rendimiento másico y su problemática, por exceso de humedad, que en este caso no

ha sido impedimento para que las pérdidas de materia seca antes de refinado hayan alcanzado un 30%.

### 4.3 Estudio del origen, comportamiento y ciclo de vida de los metales en las pilas estudiadas

En este apartado se ha estudiado, por un lado, el origen de los metales presentes en el compost, a través de la determinación de su concentración en distintas fracciones constituyentes de la pila. Por otro lado, a partir de la medida de la concentración metálica, se ha analizado su evolución a lo largo del compostaje, y el destino final, de cada metal en el proceso.

Un análisis detallado de los resultados obtenidos ha permitido: un mejor conocimiento de la casuística de los metales pesados en el proceso de compostaje; la predicción del modo de atenuar o eliminar la contaminación en el compost final; y la evaluación de la dificultad existente para la obtención de un compost de calidad, con los límites establecidos actualmente.

#### 4.3.1 Caracterización metálica en origen

Se ha planteado en capítulos anteriores que una separación en origen más rigurosa sería una de las claves para mejorar la calidad del compost final. Sin embargo, cabe preguntarse, qué tipo de residuos deberían recogerse separados de aquellos otros cuyo destino será el compostaje. Para tratar de responder a esta pregunta se ha analizado el contenido en metales de los materiales de partida.

Por otra parte, conociendo el contenido inicial de metal en el residuo, el porcentaje de materia orgánica inicial (s.m.s.) y el porcentaje de materia orgánica al final (s.m.s.) del proceso de compostaje, se puede estimar la concentración final de cada metal a partir de la ecuación de Veeken (Veeken A. 1998) con la que se determina el llamado, factor de concentración (FC). La multiplicación de éste por el contenido inicial da como resultado el contenido final de metal previsible en el compost.

$$FC = \frac{100}{100 - MO_{in} \frac{MO_{deg}}{100}}$$

donde:

MO<sub>in</sub> es el % de materia orgánica inicial y MO<sub>deg</sub> es la materia orgánica degradada durante el compostaje expresada en % de materia orgánica inicial y calculada como la diferencia entre MO<sub>in</sub> y la MO<sub>final</sub>.

En la tabla 4.5 se presentan los resultados obtenidos en la determinación del contenido metálico de varias muestras de residuos domiciliarios recogidos de manera

selectiva en la ciudad de Córdoba. Entre paréntesis se han expresado los valores de concentración que se obtendrían al multiplicar por los factores que el mismo Adrie Veeken (1998), plantea para este tipo de residuos.

	Cu	Cd	Cr	Ni	Pb	Zn
Textil	ND	1	ND	3	1	7
Vidrio	155	8	48	105	312	429
Legumbres	ND	ND	1 (2 <sup>**</sup> )	ND	ND	ND
Carne y pescado	12 (24 <sup>**</sup> )	ND	3 (6 <sup>**</sup> )	48 (96 <sup>**</sup> )	ND	10 (20 <sup>**</sup> )
Huesos	9 (11 <sup>*</sup> )	1 (1 <sup>*</sup> )	ND	31 (37 <sup>*</sup> )	2 (2 <sup>*</sup> )	3 (4 <sup>*</sup> )
Frutas	4 (8 <sup>**</sup> )	ND	ND	40 (80 <sup>**</sup> )	6 (12 <sup>**</sup> )	40 (80 <sup>**</sup> )
Plásticos	6	3	2	21	37	97
Metal	698	4	541	563	5	209
Papel	30 (30 <sup>*</sup> )	1 (1 <sup>*</sup> )	5 (5 <sup>*</sup> )	7 (7 <sup>*</sup> )	6 (7 <sup>*</sup> )	13 (13 <sup>*</sup> )
Vegetal	20 (40 <sup>**</sup> )	ND	5 (10 <sup>**</sup> )	ND	ND	25 (50 <sup>**</sup> )
Poda municipal	37 (44 <sup>*</sup> )	6 (7 <sup>*</sup> )	32 (38 <sup>*</sup> )	125 (150 <sup>*</sup> )	143 (172 <sup>*</sup> )	30 (36 <sup>*</sup> )

Tabla 4.5. Contenido metálico (ppm) de distintas fracciones del residuo.

\* Aplicación del factor de concentración (x1,2) para residuos procedentes de la recogida municipal exterior. \*\* Aplicación del factor de concentración (x2) para residuos procedentes de la recogida selectiva domiciliaria (Veeken A. 1998). ND= no detectable.

Los resultados que se han obtenido se encuentran dentro de los rangos que otros autores (ver tabla 70) han publicado para las fracciones de residuos especificadas en la tabla anterior, lo que, de alguna manera, también valida el método de análisis que se ha seguido.

	Residuo 1,2,3	Residuo 4
Cd	0,01-2 (0,2)	0,03-3 (3)
Cu	1-73 (7,2)	3-29 (28)
Pb	0,1-10 (1,6)	1-100 (71)
Zn	7-100 (16)	10-300 (27)

Tabla 4.6. Valores medios de concentración (ppm) de distintas fracciones del residuo.

1, 2,3: datos de frutas, vegetales, jardinería y restos alimentarios (Houba, 1991; Boxtel 1982); 4: datos de hierba, hojas finas, césped y otros restos vegetales (Kabata et al., 1985; Crump et al., 1982). Los datos entre paréntesis son los correspondientes a la media obtenida a partir de los resultados que en la tabla 23 se especifican para estas fracciones de residuos.

Los resultados mostrados en la tabla 4.5 confirman que las fracciones con mayor concentración metálica han sido las de vidrio, metal y poda municipal. Esto es importante, ya que es la fracción de vidrio la segunda que se encuentra en mayor proporción en el material de partida a compostar y, además, en muchas plantas, se utiliza la poda municipal como estructurante en la pila.

Por otra parte, es de destacar la elevada concentración de metal que al final del compostaje aportarían algunos residuos, de composición orgánica en su mayoría (altos valores finales de Ni o Zn en alimentos). Esto significa que aunque solamente sea la fracción de RSU tipificada como orgánica la que se recoja, ésta también contribuye de manera significativa al contenido metálico del compost final. Este hecho, verifica lo que Veeken A. (1998) afirma: "Sin la presencia en el material de partida a compostar de materiales inertes (no sólo aquellos con contenido orgánico) que diluyan el efecto de concentración debido a la degradación de materia orgánica, el compost difícilmente se incluiría dentro de los límites legales, ni se lograría un producto de máxima calidad".

En la siguiente tabla se expone, a partir de los resultados anteriores, la cantidad de metal que, por kilo de residuo, aportarían las fracciones más significativas en el material de partida.

Cantidad total de metal (mg) que aporta cada fracción en cada kilo de basura							
Fracción	Porcentaje medio	Cu	Cd	Cr	Ni	Pb	Zn
Materia orgánica	48%	8	ND	2	42	3	24
Vidrio	23%	36	2	11	24	72	99
Papel y cartón	16%	5	0,2	1	1	1	2
Plásticos	5%	0,3	0,1	0,1	1	2	5
<b>TOTAL</b>		<b>49,3</b>	<b>2,3</b>	<b>14,1</b>	<b>68</b>	<b>78</b>	<b>130</b>
Inicio del compostaje		73	2,0	93	83	62	101

Tabla 4.7. Masa de metal (mg) que aporta cada fracción de residuo por kilo de material de la pila a compostar.

\* En la segunda columna se presenta la media porcentual de cada fracción presente en el material de partida, obtenida a partir de los resultados presentados en el apartado 4.1. Con esta media y los valores de concentración iniciales de la tabla 4.5 se calcula la cantidad de metal aportada por cada fracción.

A pesar de la diferencia que supone la distinta metodología de preparación de las muestras para los análisis (al estudiar fracciones iniciales independizadas o al estudiar muestras tomadas de la pila de compostaje inicial, a las que se criba, antes de analizar) resulta alentador observar cómo hay una buena coincidencia global entre los datos estimados (penúltima fila de esta tabla) y los medidos experimentalmente, durante varios años, en los inicios de múltiples procesos de compostaje (línea adicional, al final de la tabla 4.7 para facilitar la comparación). Como se observa, la

fracción que mayor cantidad metálica aporta al contenido global del residuo es la de vidrio. Teniendo en cuenta esto, es importante una recogida estrictamente selectiva para dicha fracción.

Algunos autores (Veeken, 1998) han realizado el análisis de metales a distintas fracciones separadas por tamaños de partículas (entre 5 mm y 0,05 mm) de residuos recogidos de forma no selectiva y han enfrentado los resultados con los obtenidos en fracciones del mismo tamaño de partícula pero procedentes de residuos recogidos selectivamente. Los resultados evidencian que, efectivamente, existe un alto grado de contaminación en las partículas procedentes de los residuos no recogidos selectivamente (en algunos casos como el Zn se llega a multiplicar por 5 el contenido de metal).

A nivel de planta, la contaminación ocurre debido a que las fracciones de tamaño más pequeño (<0,05 mm), con una alta concentración metálica, que en el proceso de refinado serían normalmente rechazadas, quedan atrapadas en el interior de partículas de tamaño superior haciendo aumentar la concentración metálica global.

Todo lo anterior crea un conflicto entre dos políticas que aparecen antagónicas:

1. La que propugna la prevención de la acumulación de metales pesados en el suelo, o bien,
2. La que promueve el reciclado y la reutilización agraria de los residuos orgánicos.

### 4.3.2 Evolución de los metales durante el compostaje

En la tabla 4.8 se exponen las concentraciones de cada metal en las distintas pilas estudiadas, al inicio del compostaje; antes de refinado (A.R.); en el compost; y en el material de rechazo. Los espacios sombreados en gris indican ausencia de resultado experimental debido a que, por distintos motivos, no se pudo realizar el análisis.

Concentración de metales (mg/ kg materia seca)									
Pila	Periodo	pH	%M.O. s.m.s.	Cu	Cd	Cr	Ni	Pb	Zn
APF	Inicio	7,0	58,5	85	0,5	264	132	116	110
	A.R.	8,7	41,1	264	1,8	449	220	202	334
	Compost	8,1	34,4	354	2,0	216	100	109	521
	Rechazo			283	1,3	322	283	206	309
APL	Inicio	6,2	65,4	490	2,5	21	24	56	435
	A.R.	8,3	51,6	543	3,0	36	32	83	528
	Compost	8,1	54,2	537	3,0	38	36	103	663
	Rechazo			491	3,0	75	52	241	652
BPF	Inicio	6,6	53,3	66	2,0	24	13	58	121
	A.R.	7,2	51,2	199	2,0	111	44	90	308
	Compost	9,0	43,9	230	1,0	36	26	122	380
	Rechazo								
CFF	Inicio	5,7	49,9	78	ND	150	82	53	71
	A.R.	7,6	31,6	126	3,2	205	99	71	115
	Compost	7,7	41,3	281	2,6	38	34	124	233
	Rechazo			93	1,1	216	108	62	103
CTF	Inicio	5,7	49,9	78	ND	150	82	53	71
	A.R.	7,6	30,6	124	2,1	141	82	60	224
	Compost	7,5	40,42	192	2,3	49	45	121	409
	Rechazo			112	1,3	210	135	40	337
DPF	Inicio	6,9	60,9	81	2,4	56	22	142	110
	Compost	8,5	49,5	245	2,0	79	52	151	308
DTF1	Inicio	7,2	56,1	81	2,4	56	22	142	110
	14 días	8,1	51,4	251	2,0	121	121	188	252
DTF2	Inicio	7,1	61,2	81	2,4	56	22	142	110
	16 días	8,8	56,2	93	ND	102	58	410	586
DTF3	Inicio	7,3	65,4	81	2,4	56	22	142	110
	19 días	8,7	54,2	83	0,6	112	71	110	135
DTF3	Inicio	7,3	65,4	81	2,4	56	22	142	110
	Compost	8,3	40,8	280	2,0	62	52	223	400

Tabla 4.8. Resultados experimentales del análisis de pH, %M.O. y metales. s.m.s. (sobre materia seca). A.R.= antes de refinado.

En todos los casos analizados, la concentración de cada metal aumenta a lo largo del Compostaje (Inicio vs A.R.). En principio, esto podría atribuirse a la pérdida de materia total que se produce en el Compostaje por degradación y volatilización del CO<sub>2</sub> final. De hecho, en las pilas en que el porcentaje de materia perdida es menor, como en la APL, es donde la concentración metálica varía menos.

Pero, no sólo la degradación de materia orgánica, sino también, el pH, el grado de humificación y la relación [metal/sustancias húmicas] están entre los factores que, de manera más importante, influyen en la evolución de la concentración de metal a lo largo del compostaje (García-Mina J.M. 2006).

Analizando el conjunto de todos los resultados presentados en la tabla 4.8, se observa que la concentración final de Cu y Zn (A.R.) ha sido de media, 2,5 veces superior a la inicial. En el resto de los metales, el factor de proporción ha tenido un valor medio de 1,7. Globalmente, la proporción media se aproxima al factor de concentración asignado por Veeken para este tipo de residuos.

Numerosos trabajos científicos explican de forma teórica, y verifican de manera experimental la adsorción de Cu, Zn, y otros metales, a partículas orgánicas. Dicha adsorción se produce por un fuerte enlace, favorecido principalmente por la alta humificación de las fracciones orgánicas de menor tamaño, en las que se concentran el mayor número de grupos funcionales activos (en su mayoría grupos fenólicos) los cuales aumentan conforme lo hace el pH. Según bibliografía, son las fracciones menores de 5 mm las que contienen aproximadamente el 95% del contenido total en Cd, Cu, Pb y Zn y son donde más concentrados están dichos metales (Stevenson, F.J. 1982), (Veeken A. 1998), (García-Mina J.M. 2006), (Mantoura C. Et al., 1978), (Buffle J. 1998).

Las pilas APF, CTF, y DTF3, con un valor medio de pH en torno a 8 durante el compostaje (tabla 4.8) son las que han presentado un aumento de concentración de Cu y Zn superior al del resto de pilas.

Estos resultados concuerdan con lo recogido en bibliografía. Así, diversos autores (Antonelli et al. 2001; Gondar et al. 2000; Senesi, 1992; Liven 1991,) confirman que, en líneas generales, la capacidad máxima de complejación del Cu o el Zn y las sustancias húmicas se incrementa con la alcalinización del medio, concretamente en el rango de pH entre 6-10. Esto podría estar relacionado con la progresiva ionización de grupos fenólicos junto a la de grupos carboxílicos. La capacidad máxima de complejación de ambos metales disminuye a valores por encima de un pH= 10. Este hecho está relacionado con la hidrólisis de los complejos metal-sustancia húmica, debido a su baja estabilidad a estos valores de pH. Por otra parte, un rango de pH entre 5-7 disminuye la capacidad máxima de complejación debido a la protonización de grupos amino de los sistemas húmicos (García-Mina J.M. 2006).

### 4.3.3 Ciclo vital y destino final de los metales pesados

Solamente con los resultados obtenidos en el análisis mediante absorción atómica, resulta imposible explicar, si el incremento en la concentración metálica que se ha observado, se debe en mayor medida a las pérdidas de materia por oxidación, o bien, a la conjugación de dichas pérdidas con fenómenos de complejación, o con algún otro tipo de fenómeno. Para profundizar en este tema, es conveniente llevar a cabo un balance másico en el proceso.

Este cálculo solamente se ha podido llevar a cabo en cuatro de las nueve pilas estudiadas, ya que no se disponía de todos los datos necesarios para poder hacer el estudio a todo el conjunto.

El balance másico realizado a las pilas APF, APL, CPF y CTF con el análisis metálico a muestras de material procedente de dichas pilas (tomadas al material de partida (Inicio); al de antes de refino (A.R.); al compost; y al rechazo; tabla 4.8) ha permitido calcular un balance másico global de cada metal a lo largo del compostaje.

Como se observa en las tablas 4.9 - 4.12, existe en los datos obtenidos una discrepancia entre la masa total de metal antes del proceso de refino (A.R.) y el contenido másico de metal encontrado en el compost y en el rechazo de planta. El porcentaje medio de error es menor al 20%, un valor aceptable teniendo en cuenta la manera de obtener el balance másico de materia en el proceso, la heterogeneidad del residuo y los errores propios del método de análisis.

EVOLUCIÓN DE LOS METALES EN EL COMPOSTAJE (Cantidades en kg de metal)										
		Cu	Cd	Cr	Ni	Pb	Zn			
APF	Inicio	1,6	0,009	5,0	2,5	2,2	2,1			
	A.R.	3,0 (+13)*	0,020 (-15)	5,1 (-35)	2,5 (0)	2,3 (-13)	3,8 (+10)			
	Compost	1,2 35%**	0,007 41%	0,8 24%	0,3 12%	0,4 20%	1,8 43%			
	Rechazo	2,2 65%**	0,010 59%	2,5 76%	2,2 88%	1,6 80%	2,4 57%			

Tabla 4.9. Cantidades calculadas de cada metal, en diversos momentos del proceso. Pila APF. \* Los valores entre paréntesis expresan el error relativo (en %) por exceso (+) o por defecto (-) que se obtiene como resultado de sumar el contenido metálico del compost y el del rechazo, y restarle el contenido en A.R. que, a su vez, se toma como base de referencia. \*\*Coeficiente de reparto (en %) del metal entre el compost y el rechazo, tras el refino.

EVOLUCIÓN DE LOS METALES EN EL COMPOSTAJE (Cantidades en kg de metal)										
		Cu	Cd	Cr	Ni	Pb	Zn			
APL	Inicio	6,0	0,03	0,3	0,3	0,7	5,4			
	A.R.	4,7 (-4)	0,03 (0)	0,3 (+33)	0,3 (0)	0,7 (+57)	4,5 (+31)			
	Compost	3,6 80%	0,02 67%	0,3 75%	0,2 67%	0,7 64%	4,7 80%			
	Rechazo	0,9 20%	0,01 33%	0,1 25%	0,1 33%	0,4 36%	1,2 20%			

Tabla 4.10. Cantidades calculadas de cada metal, en diversos momentos del proceso. Pila APL.

EVOLUCIÓN DE LOS METALES EN EL COMPOSTAJE (Cantidades en Kg de metal)													
		Cu	Cd		Cr		Ni		Pb		Zn		
CPF	Inicio	1,0	ND		1,9		1,0		0,7		0,9		
	A.R.	1,4	(-7)	0,04	(-62)	2,3	(-10)	1,1	(-1)	0,8	(0)	1,3	(+13)
	Compost	0,5	38%	0,005	3%	0,07	3%	0,07	6%	0,2	25%	0,5	33%
	Rechazo	0,8	62%	0,01	97%	2,0	97%	1,0	94%	0,6	75%	1,0	67%

Tabla 4.11. Cantidades calculadas de cada metal, en diversos momentos del proceso. Pila CPF.

EVOLUCIÓN DE LOS METALES EN EL COMPOSTAJE (Cantidades en kg de metal)													
		Cu	Cd		Cr		Ni		Pb		Zn		
CTF	Inicio	6,1	ND		11,8		6,4		4,2		5,6		
	A.R.	8,7	(+2)	0,15	(-27)	9,9	(+28)	5,7	(+30)	4,2	(-9)	15,7	(+40)
	Compost	2,4	27%	0,03	27%	0,6	5%	0,5	7%	1,5	39%	4,5	20%
	Rechazo	6,5	73%	0,08	73%	12,1	95%	6,9	93%	2,3	61%	17,5	80%

Tabla 4.12. Cantidades calculadas de cada metal, en diversos momentos del proceso. Pila CTF.

En estas tablas se observa lo siguiente:

1. En todas las pilas, las cantidades de Cd, Cr, Ni, y Pb, medidas al Inicio del proceso coinciden prácticamente con las medidas al final del proceso (A.R.).
2. En las pilas constituidas con FORSU (Pilas APF, CPF, y CTF) las cantidades medidas de Cu y Zn al inicio del proceso son significativamente menores (entre un 30 y un 65%) que las medidas al final del proceso (A.R.).
3. En la pila APL, constituida con LD y poda triturada, las cantidades medidas de Cu y Zn al Inicio del proceso son parecidas, o en todo caso, algo mayores que las encontradas al final del proceso (A.R.). Se diferencian en un 20% aproximadamente.
4. En cuanto al reparto de metales entre compost y rechazo, que se consigue con el refino, en todas las pilas resulta ser sensiblemente mayor el porcentaje de Cu y Zn que pasa al compost que el de los otros 4 metales. En las pilas constituidas con FORSU todos ellos han pasado mayoritariamente al rechazo (entre un 60 y un 80% de media). En cambio, en la pila APL alrededor del 72% de los metales han quedado en el compost y sólo algo menos del 28% se ha eliminado en el rechazo.

Una posible interpretación de estos resultados se fundamentaría en dos líneas de razonamiento:

La primera induce a pensar que el método de análisis al inicio del proceso de compostaje es incompleto, ya que, como se indicó en materiales y métodos, antes de analizar metales, las muestras son manipuladas retirando las fracciones inertes de mayor tamaño, y triturando el resto. Parece evidente que, al retirar las fracciones inertes de mayor tamaño, se retiran metales del conjunto que, en el caso de Cu y Zn van pasando a la materia compostada a medida que avanza el proceso de compostaje, mientras que en el caso de los otros metales se quedan en las fracciones de mayor tamaño, que siguen retirándose del medio y que luego se eliminan también en el refino. A este respecto, ya se ha comentado, en capítulos anteriores, que ambos metales se complejan y adsorben a las fracciones orgánicas (1-0,05 mm) y orgánico-minerales (<0,05 mm), en su mayoría humus, que son analizadas en la muestra final.

La segunda es, que la pila APL al estar constituida por LD fundamentalmente, no tiene fracciones inertes de gran tamaño que deban ser eliminadas, por lo que la medida de metales al inicio representa mucho mejor el contenido real de éstos, en su mayoría unidos ya a la materia orgánica (lodos activados) que constituye el contenido fundamental de la pila. De esta manera, la cantidad detectada al final (A.R.) es casi la misma que al principio (si acaso se pierde posiblemente algo de Cu y Zn en los lixiviados), y además, el contenido metálico se reparte homogéneamente en el conjunto del material que se está compostando. Por ello, el coeficiente de reparto metálico entre compost y rechazo coincide prácticamente con el coeficiente de reparto másico entre compost (representa un 79% de la masa seca final) y rechazo (el 21% restante).

#### 4.3.4 Estudio de calidad del compost final, respecto al contenido en metales, producido en cada planta

En la tabla 4.13 se expresan los resultados hallados en el análisis de metales a cada una de las muestras de Compost.

Contenido metálico en el Compost producido (mg metal/ kg materia seca)									
	APF	APL	DPF	CPF	CTF	DPF	DTF1	DTF2	DTF3
Cu	354	537	230	261	192	245	170	78	260
Cd	2,0	3,0	1,0	2,6	2,3	2,0	1,0	1,3	2,0
Cr	216	36	36	36	49	79	30	47	62
Ni	100	36	26	34	45	52	45	29	52
Pb	109	103	122	124	121	151	386	145	223
Zn	521	663	380	233	409	308	298	176	400

Tabla 4.13. Concentración de metales (ppm) en el Compost producido.

Atendiendo a los resultados de los análisis y a los límites establecidos en el RD (tabla 4.14), solamente los productos de las pilas, BPF, DPF y DTF2 pertenecen a la clase B; mientras que los de la APF, CPF y CTF serían de la clase C. Ni el producto obtenido de la pila DTF1 ni el de la DTF3 podrían venderse comercialmente como compost, pues ambos han presentado un contenido en Pb superior al límite establecido en el RD para la clase C (200 mg/kg) que es la clase de peor calidad.

Límites en el contenido en metales (mg/ kg materia seca) según legislación.		Cu	Cd	Cr	Ni	Pb	Zn	Hg	Cr (%)
RD 824/2005	Clase A	70	0,7	70	25	45	200	0,4	0
	Clase B	300	2,0	250	90	150	500	1,5	0
	Clase C	400	3,0	300	100	200	1000	2,5	0
RD 1310/1990	Suelos pH<7	1500	20	1000	300	750	2500	16	-
	Suelos pH>7	1750	40	1500	400	1200	4000	25	-
Norma de Acreditación Ambiental de Calidad del Compost (Andalucía)	Solo de Calidad	400	3	300	100	200	1000	2,5	0
2 <sup>nd</sup> Draft Biological Treatment of Biowaste (2001).EC.	Class 1	100	0,7	100	50	100	200	0,5	-
	Class 2	150	1,5	150	75	150	400	1,0	-
	Stabilised biowaste	600	5,0	600	150	500	1500	5,0	-
	Ecobal	75	1,5	140	50	140	300	1	-
2001/666/CE									

Tabla 4.14. Límites de concentración metálica según la legislación actual.

El producto obtenido de la pila APL tiene un contenido en Cu y Zn (Cu- 537mg/Kg; Zn-663 mg/Kg) superior al establecido en el RD, por lo que no podría venderse como compost sino como lodos tratados y, en este sentido, su regulación se realiza a través del RD 1310/1990 sobre aplicación de lodos en agricultura. Según este RD, y en base a los resultados obtenidos, el producto podría ser aplicado a suelos de cualquier pH.

En las siguientes gráficas, se visualiza el contenido metálico en el compost de cada pila estudiada; y, con líneas de referencia, los límites establecidos por la legislación actual y la de los borradores europeos. Se puede observar que, de manera general, el Cu, Cd, Pb y Zn son los cuatro metales más problemáticos en el compost de las pilas de estudio.

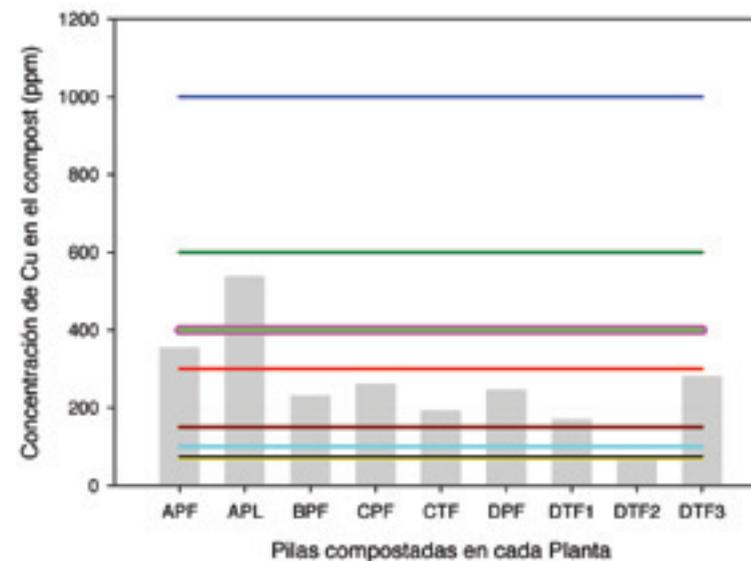


Figura 4.11. Nivel de concentración de Cu en el producto obtenido de cada pila estudiada.

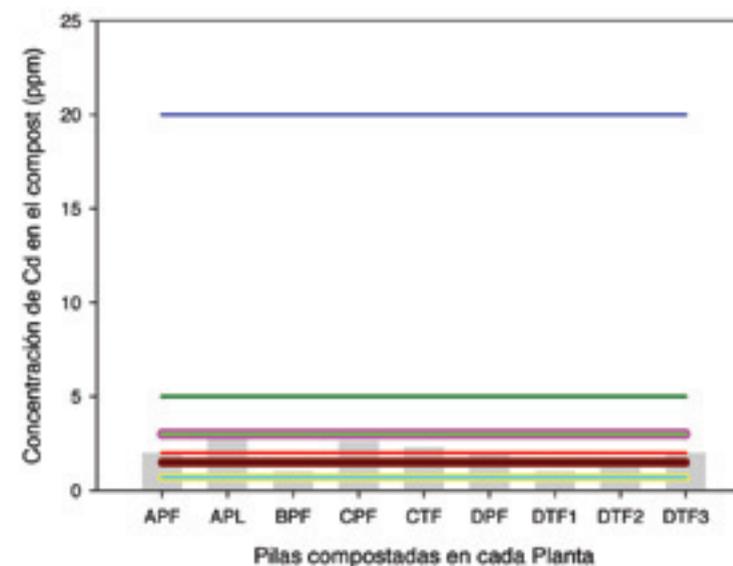


Figura 4.12. Nivel de concentración de Cd en el producto obtenido de cada pila estudiada.

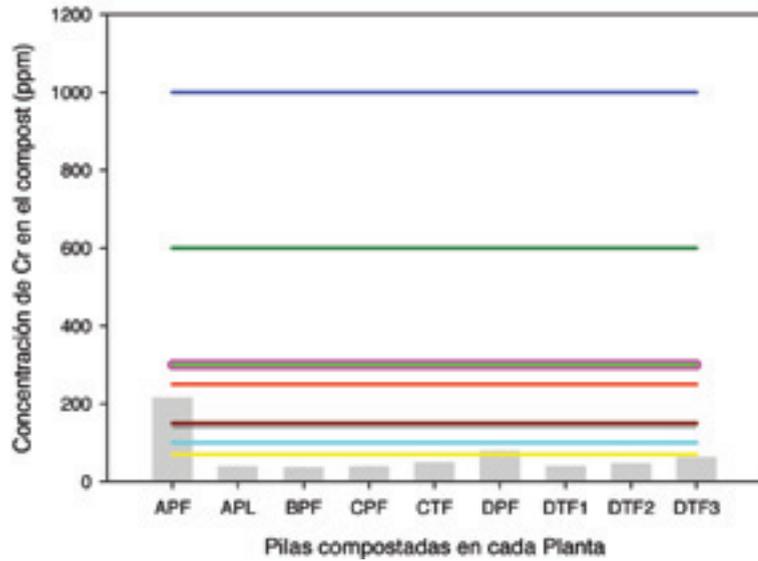


Figura 4.13. Nivel de concentración de Cr en el producto obtenido de cada pila estudiada.

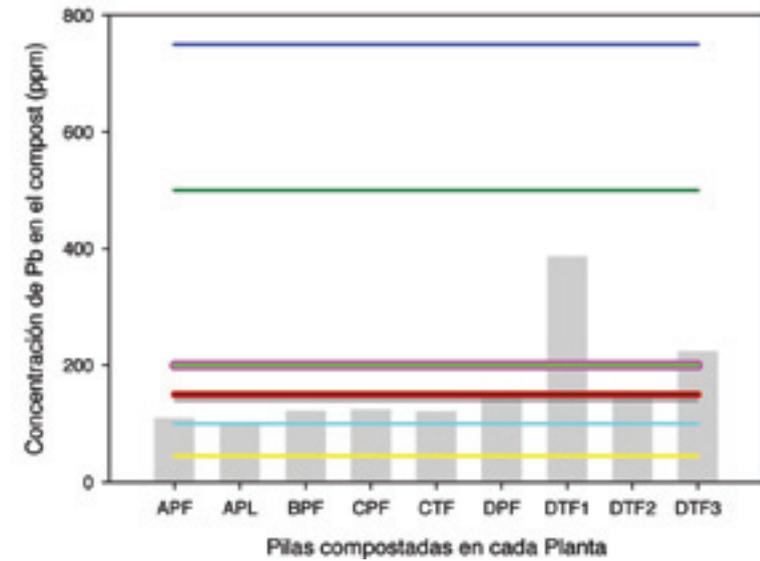


Figura 4.15. Nivel de concentración de Pb en el producto de cada pila estudiada.

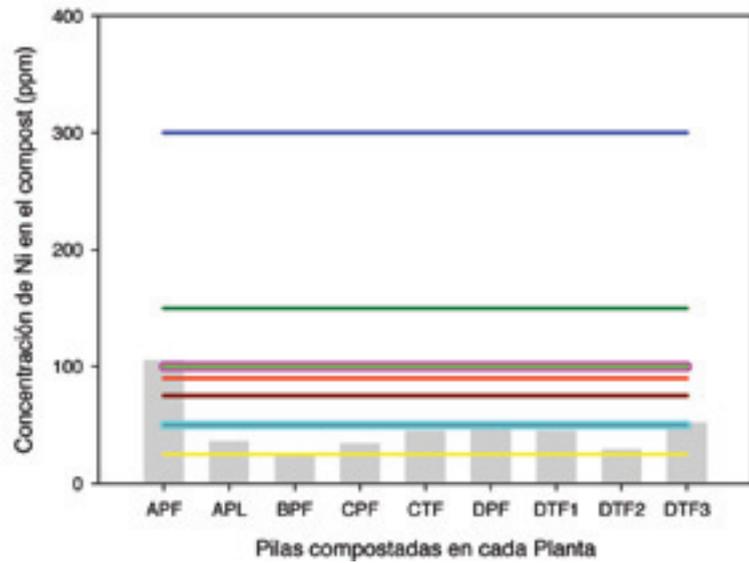


Figura 4.14. Nivel de concentración de Ni en el producto de cada pila estudiada.

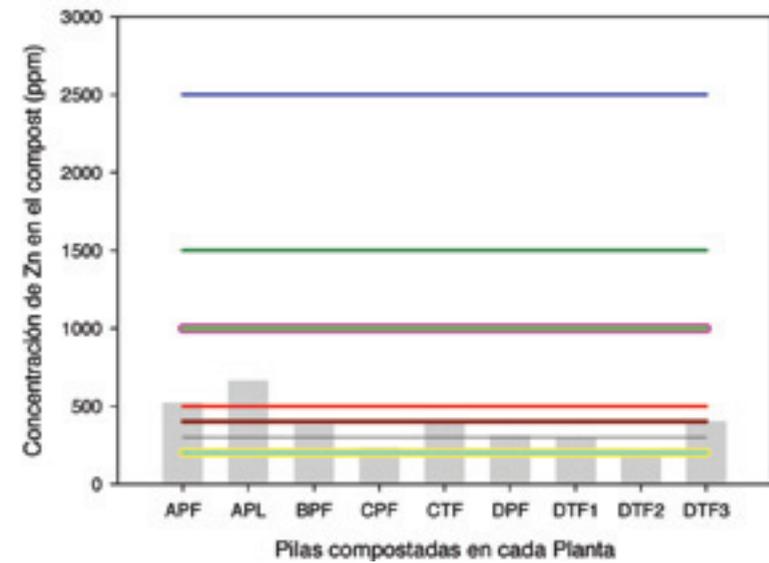


Figura 4.16. Nivel de concentración de Zn en el producto de cada pila estudiada.

Comparando los resultados del contenido en metales del compost obtenido en las diferentes pilas con los valores definidos en la futura directiva europea, en ningún caso se podría otorgar la clase I, mientras que la clase II solamente podría ser asignada al compost de la pila DTF2, y el resto, tendrían que ser considerados como bioresiduos estabilizados.

Como conclusión, si se tiene en consideración que las plantas en estudio no gestionan residuos de ciudades especialmente industrializadas y se observan los valores iniciales del contenido metálico que presenta el material de partida y los valores del producto al final del compostaje, se puede afirmar que obtener un compost de calidad alta es prácticamente inalcanzable, salvo que se cambie radicalmente la filosofía de recogida y tratamiento de los residuos municipales; o se opte por la mezcla de compost con otros sustratos de bajo contenido metálico; o bien, se incluya en el proceso algún método efectivo de extracción de metales.

#### 4.4 Estudio de extracción de metales en pilas de FORSU (Escala piloto)

Se han descrito en bibliografía algunos métodos experimentales de extracción de metales en lodos residuales; sin embargo, son más escasos aquellos que se han aplicado al estudio, a escala piloto, de la lixiviación química de metales en material de tipo 100% FORSU.

Este estudio se ha llevado a cabo siguiendo un plan experimental de trabajo en el que, mediante una planta piloto expresamente diseñada, se ha estudiado la lixiviación química de metales en pilas de compostaje formadas únicamente con FORSU. Además, se ha llevado a cabo un análisis de especiación metálica, con el método BCR, para extraer conclusiones acerca del comportamiento de cada especie en el compostaje de cada una de las pilas estudiadas a escala piloto.

Se han realizado cinco experimentos con pilas de FORSU, que contienen alrededor de 100 kilogramos cada una, en los que se han estudiado los datos pertenecientes a un periodo de 55 días.

En el primer experimento (Testigo), no se ha añadido ningún extractante a la pila. A continuación, se han realizado tres experimentos en los que se ha añadido un extractante ácido, concretamente, ácido cítrico (0,25 M) a una relación [residuo seco (kg)/ extractante (mL)] de 1:15, 1:20 y 1:40 respectivamente, para cada ensayo. En el quinto experimento, se ha añadido como extractante ácido oxálico (0,25 M) a una relación de 1:40 [residuo seco (kg)/ extractante (mL)].

Teniendo en cuenta que la extracción de metales depende, entre otros factores, del grado de humificación de la materia orgánica y del tiempo de contacto entre residuo y extractante; para poder evaluar y comparar los resultados obtenidos en los distintos experimentos de extracción, todas las muestras han sido tomadas en el

mismo momento a lo largo del proceso de compostaje y el material ha sido volteado y regado (hasta alcanzar el 40% de humedad) el mismo número de veces y con la misma frecuencia en cada uno de los experimentos.

La adición del extractante se ha realizado en tres momentos puntuales del proceso: una primera vez, a los 10 días de compostaje, y una segunda y tercera, a los 20 y 35 días respectivamente. La selección de esos tres momentos se debe al intento de retirar los metales lo antes posible, pero al mismo tiempo, hacerlo cuando la pila esté a las temperaturas que la bibliografía señala como óptimas para la extracción, e interferir lo menos posible en la fase termófila del compostaje, que es el periodo de mayor degradación (en la figura 4.17 se muestra, a modo de ejemplo, la evolución de la temperatura durante el compostaje de una de las pilas estudiadas y los momentos de adición del extractante).

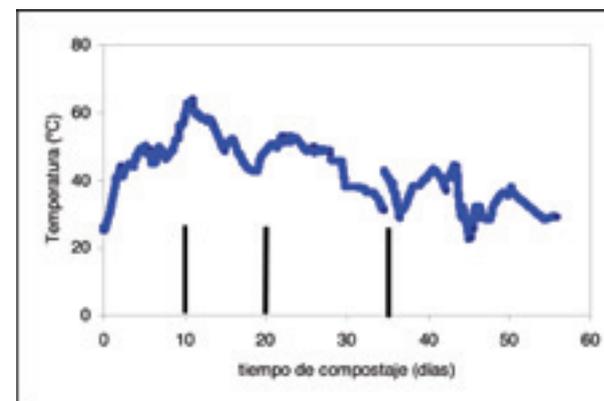


Figura 4.17. Evolución de la temperatura a lo largo del compostaje en uno de los experimentos a escala piloto. Las barras verticales indican las adiciones de ácido.

Para extraer conclusiones del análisis de los resultados obtenidos se ha supuesto que:

1. Al tratarse siempre de residuo tomado de la misma planta industrial se ha considerado, que las características físico-químicas iniciales del material de partida no han sido las condicionantes a tener en cuenta a la hora de evaluar y comparar el grado de extracción entre los distintos experimentos.
2. La concentración de oxígeno en el medio condiciona el potencial redox que exista en el mismo. Al aplicar en todos los experimentos el mismo número de volteos y con la misma frecuencia, se influye de manera similar en el potencial redox.

#### 4.4.1 Balance de materia seca durante el compostaje

En la tabla 4.15, se expone la evolución másica de cada pila durante su compostaje a escala piloto, así como, el resultado (en kilogramos) de someter el producto final a una operación de refinado, análoga a la real, y separar dicho producto en compost, por un lado, y rechazo de compostaje, por otro. Finalmente, se presenta el volumen total de lixiviado recogido en cada experimento. Aunque el peso inicial de las pilas experimentales no fue en los cinco casos exactamente el mismo, todas ellas se han normalizado a 100 kilogramos, para facilitar los cálculos y relaciones.

A modo de aclaración, el hecho de que el volumen de lixiviado recogido en el compostaje de la pila testigo haya sido, aproximadamente, el triple del volumen generado en cada uno de los restantes ensayos piloto, es debido a que ésta pila se vio afectada por la lluvia durante el desarrollo del experimento.

	Testigo	Exp. 1	Exp. 2	Exp. 3	Exp. 4
Masa inicial*	100	100	100	100	100
Masa a los 10 días*	68,0	96,5	77,0	71,9	66,1
Masa a los 20 días*	66,0	72,4	76,9	70,1	67,5
Masa a los 35 días*	63,9	70,6	67,3	69,7	57,4
Masa a los 45 días*	62,3	69,0	67,2	68,8	55,4
Masa a los 55 días (A.R.)*	43,6	49,4	50,5	67,0	54,9
Masa de Compost*	11,7	8,9	7,7	10,0	8,9
Masa de Rechazo*	31,9	40,5	42,8	57,0	46,0
Volumen total de lixiviado recogido (L)	22,0	6,5	7,7	7,5	5,8

Tabla 4.15. Evolución de la masa (kg de materia seca) de las pilas experimentales durante el proceso y volumen total de lixiviado recogido en los 55 días. \* Se ha tenido en cuenta, para el balance de materia seca, la cantidad de residuo que se ha tomado en cada muestreo del proceso y por tanto las pérdidas que hubieran existido en dicho residuo y lo que se hubiera acumulado de éste al final del proceso. Así mismo, los pesos calculados se han normalizado, dividiendo por el peso seco inicial real de cada experimento (que varió entre 80 y 120 kg).

Lo primero que se ha encontrado es que, tras las dos primeras semanas de tratamiento se había pasado ya por la fase termófila (figura 4.17), que en las pilas industriales (de mucho mayor tamaño) se mantiene durante más días, y se había producido una pérdida de materia, en todos los casos, superior al 30% del peso original.

El porcentaje de pérdidas totales, al final de los experimentos, alcanzó valores de entre un 33% y un 56% aproximadamente. Estos valores son altos, pero están en el rango de lo encontrado en los resultados de la pila industrial estudiada en la misma planta de recuperación y compostaje, en la que dicho porcentaje fue del 40,5%.

La proporción obtenida [Rechazo/Compost], aunque algo elevada en algunos casos, está dentro de lo habitual a escala industrial.

Finalmente, de la observación de la figura 4.18, que representa, para cada uno de los experimentos, las pérdidas de materia seca en función del tiempo de proceso, y en la que además, se han señalado los momentos de adición de ácido, no se puede deducir que éste haya afectado de forma alguna al avance de los procesos de compostaje.

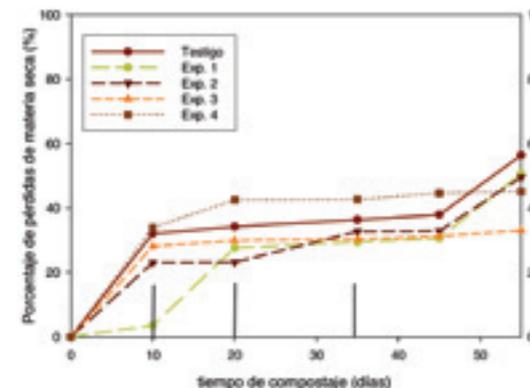


Figura 4.18. Evolución del porcentaje de pérdidas en materia seca de cada una de las pilas compostadas a escala piloto.

#### 4.4.2 Análisis del contenido metálico. Eficacia de la lixiviación química

Los resultados del análisis de metales realizados al residuo en compostaje en seis momentos del proceso, así como a las fracciones finales de compost y rechazo, para cada una de las pilas estudiadas a escala piloto se muestran en las tablas 4.16 a 4.20.

Experimento Testigo realizado sin adiciones de Ácido							
Días	Tipo de muestra	Cu	Cd	Cr	Ni	Pb	Zn
Inicio	Residuo	25	0,4	33	21	17	60
10	Residuo	44	ND	33	20	28	91
20	Residuo	72	1,9	71	47	31	119
35	Residuo	145	1,5	53	18	61	155
45	Residuo	158	1,2	45	14	114	250
55	Antes Refino	247	1,4	49	34	123	419
	Compost	315	ND	36	23	110	540
	Rechazo	191	1,2	44	47	115	359

Tabla 4.16. Determinación del contenido metálico durante el compostaje de la pila testigo. Los resultados, están expresados en ppm (mg metal/kg materia seca).

Adición de Ácido Cítrico en la proporción 1:15							
Días	Tipo de muestra	Cu	Cd	Cr	Ni	Pb	Zn
Inicio	Residuo	21	ND	67	25	94	42
10	Residuo	52	1	79	49	100	60
20	Residuo	77	2	54	39	72	63
35	Residuo	94	0,4	51	41	107	108
45	Residuo	101	ND	41	26	78	56
55	Antes Refino	72	2	54	34	68	145
	Compost	117	2	43	28	117	182
	Rechazo	75	3	71	32	46	194

Tabla 4.17. Determinación del contenido metálico durante el compostaje de la pila del experimento 1. Los resultados, están expresados en ppm (mg metal/kg materia seca).

Adición de Ácido Cítrico en la proporción 1:20							
Días	Tipo de muestra	Cu	Cd	Cr	Ni	Pb	Zn
Inicio	Residuo	21	ND	67	25	94	42
10	Residuo	50	2	81	55	24	100
20	Residuo	108	ND	37	29	18	127
35	Residuo	106	1	52	36	53	115
45	Residuo	95	1,5	36	28	154	132
55	Antes Refino	73	1,5	71	34	58	132
	Compost	110	1,5	63	32	32	180
	Rechazo	82	2	56	34	51	139

Tabla 4.18. Determinación del contenido metálico durante el compostaje de la pila del experimento 2. Los resultados, están expresados en ppm (mg metal/kg materia seca).

Adición de Ácido Cítrico en la proporción 1:40							
Días	Tipo de muestra	Cu	Cd	Cr	Ni	Pb	Zn
Inicio	Residuo	48	3	72	6	13	29
10	Residuo	53	1	29	9	42	44
20	Residuo	101	3	66	22	20	63
35	Residuo	93	3	10	12	16	91
45	Residuo	75	3	50	32	65	81
55	Antes Refino	75	1	38	24	24	130
	Compost	109	2	32	26	31	170
	Rechazo	83	1	31	24	17	109

Tabla 4.19. Determinación del contenido metálico durante el compostaje de la pila del experimento 3. Los resultados, están expresados en ppm (mg metal/kg materia seca).

Adición de Ácido Oxálico en la proporción 1:40							
Días	Tipo de muestra	Cu	Cd	Cr	Ni	Pb	Zn
Inicio	Residuo	48	3	72	6	13	29
10	Residuo	40	1	50	8	27	39
20	Residuo	137	3	75	27	17	118
35	Residuo	44	1	16	11	22	91
45	Residuo	50	1	67	39	51	115
55	Antes Refino	46	2	40	25	31	115
	Compost	52	2	39	22	32	162
	Rechazo	53	3	42	25	25	121

Tabla 4.20. Determinación del contenido metálico durante el compostaje de la pila del experimento 4. Los resultados, están expresados en ppm (mg metal/kg materia seca).

Para facilitar el análisis de estos resultados experimentales, se ha representado en cinco figuras (Figuras 4.19 a 4.23), una por cada experimento, la evolución de las concentraciones de cada metal desde el inicio del proceso hasta su posterior refino (55 días). Los valores de cada metal se han normalizado, dividiendo por el dato a tiempo cero, para unificar el eje de ordenadas. Finalmente, los datos del Cd no se han representado pues, al ser valores absolutos muy pequeños, y cerca de los límites de sensibilidad del método analítico, su variabilidad es elevada.

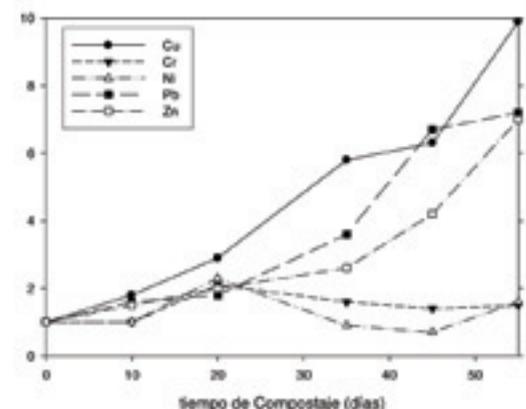


Figura 4.19. Evolución de los metales en la pila testigo.

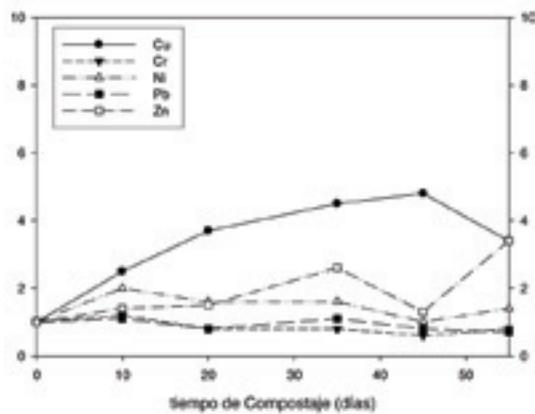


Figura 4.20. Evolución de los metales en la pila del experimento 1.

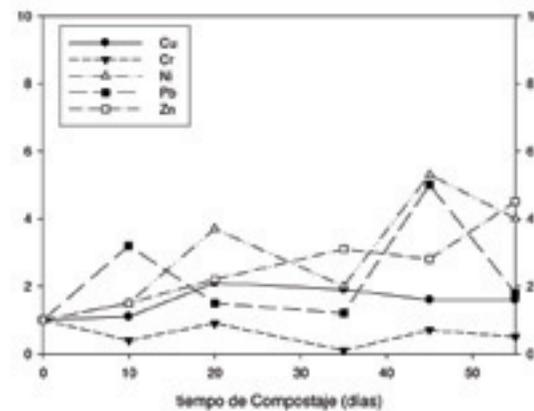


Figura 4.22. Evolución de los metales en la pila del experimento 3.

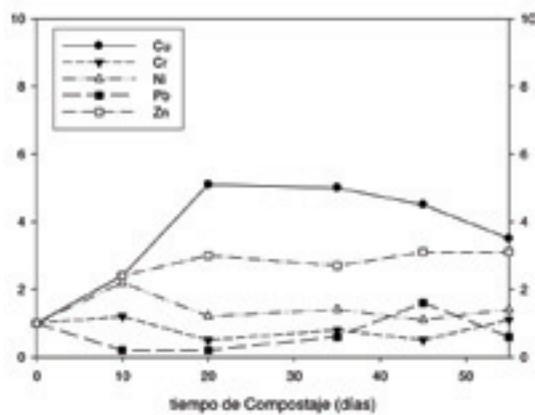


Figura 4.21. Evolución de los metales en la pila del experimento 2.

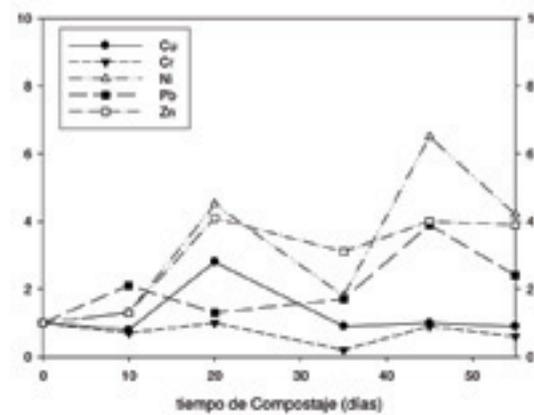


Figura 4.23. Evolución de los metales en la pila del experimento 4.

En las figuras 4.19-4.23 se observa que, en el experimento Testigo, el Cu y el Zn han ido aumentando su concentración en el material que se está compostando de forma continuada, alcanzando finalmente concentraciones hasta 7-10 veces superiores a la inicial. Un comportamiento similar se ha observado en las pilas industriales y era, por tanto, esperable. El resto de metales se ha comportado, también como era de esperar, variando poco sus concentraciones durante el proceso de compostaje, excepto el Plomo, que en este caso ha aumentado su concentración de una forma más parecida a la del Cu y Zn, que a la de Cr, Ni, o Cd. Estos resultados coinciden con los reseñados, para este tipo de residuos, por otros autores (Iwegbue et al., 2007; Chica et al., 2005; Ciavatta et al., 1993).

En aquellos experimentos en los que se ha añadido ácido, el aumento de concentración que se producía en los metales mencionados, se ha visto mermado. Así, en los experimentos 1 y 2, con menores aportes de ácido, la concentración de Cu crece al principio, pero a partir de la segunda adición de extractante (a los 20 días) se mantiene más o menos estable. En los experimentos 3 y 4, con mayor relación de ácido aplicada, 1:40; este aumento de concentración se limita aún más. Si se observa el caso del Zn, su concentración aumenta a lo largo de todo el proceso de forma análoga en los cuatro experimentos de extracción, pero dicho aumento es más suave que el que se produce en el Testigo (tan sólo se multiplica por 3-4 la concentración inicial de este metal). En el resto, sus concentraciones varían poco a lo largo del proceso; salvo quizá en el caso del Ni, para el que en los dos últimos experimentos, aumenta algo más.

A continuación, se representa mediante diagramas de barras la concentración de cada metal en tres momentos clave: en el inicio; antes de refino, a los 55 días; y en el compost. En las figuras 4.24-4.29, la línea negra y la roja son los límites de aceptación para la clase A y la clase B respectivamente, respecto a la concentración metálica presente en el compost, según RD 824/2005.

#### Evolución de cada metal en las pilas de los experimentos piloto

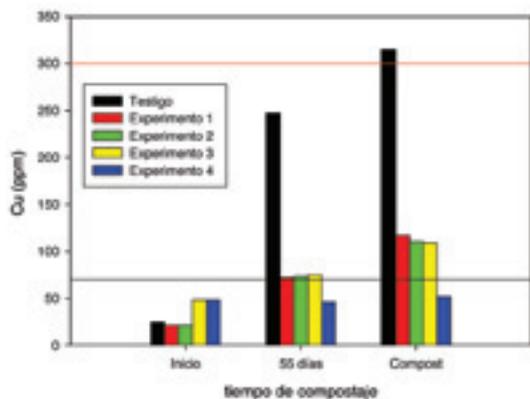


Figura 4.24. Concentración de Cu en cada pila piloto.

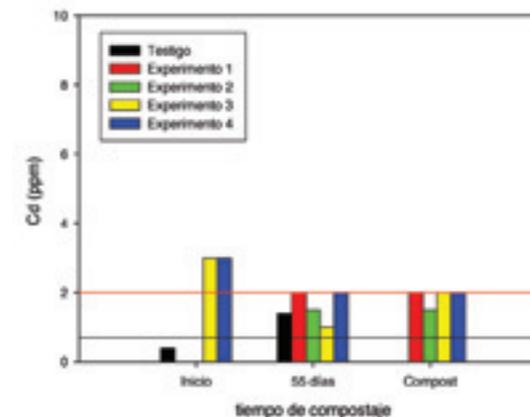


Figura 4.25. Concentración de Cd en cada pila piloto.

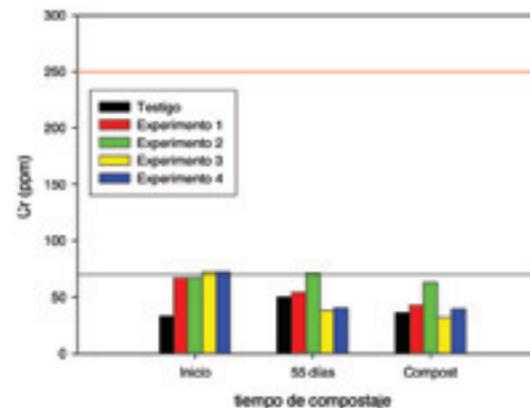


Figura 4.26. Concentración de Cr en cada pila piloto.

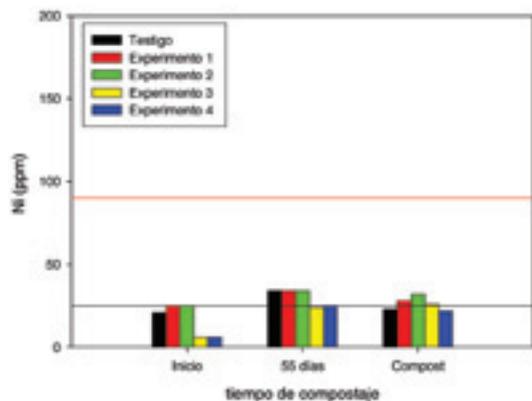


Figura 4.27. Concentración de Ni en cada pila piloto.

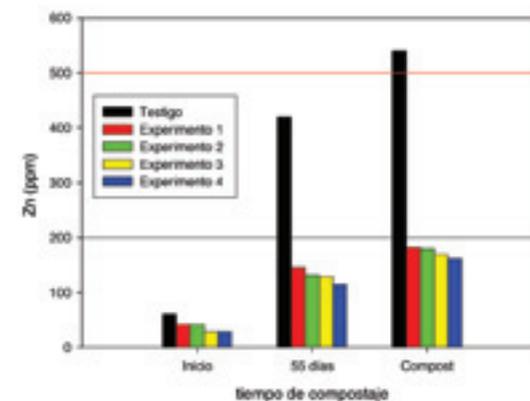


Figura 4.29. Concentración de Zn en cada pila piloto.

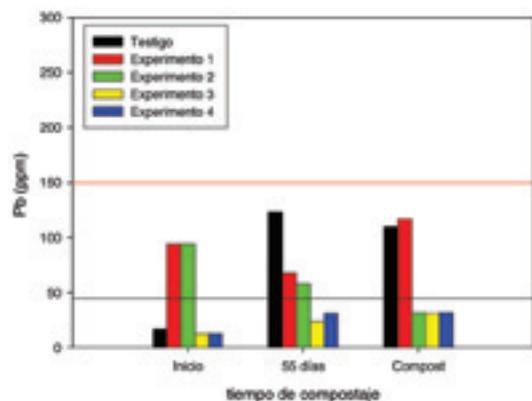


Figura 4.28. Concentración de Pb en cada pila piloto.

Esta representación, permite visualizar que en la pila testigo, los metales Zn y el Cu han aumentado drásticamente en el material destinado a la producción de compost, y que, además, han vuelto a aumentar su concentración tras el proceso de refino. Mientras tanto, Cr, Cd, y Ni, sólo se han concentrado en función de la disminución de materia en la pila, y el Plomo se ha comportado de forma intermedia. Estos cuatro últimos metales han reducido algo su concentración tras el refino, a diferencia del comportamiento del Cu y del Zn.

Si se observan los resultados para los tres experimentos con ácido cítrico añadido en diferentes proporciones, se aprecia la escasa diferencia existente entre ellos, lo que indica que aumentar la proporción de ácido añadido no ha mejorado la eficacia de extracción. Sin embargo, sí se han producido diferencias significativas con el experimento Testigo; aparentemente, la presencia del ácido y consecuente bajada en el pH ha impedido el extraordinario aumento de concentración de Cu y Zn, y en menor medida de Pb, tanto al final del proceso, como en el compost final obtenido.

Así, mientras que el compost del Testigo se clasifica dentro de la clase C, según el RD 824/2005, en compost procedente de los experimentos 1 a 3 se engloba en la clase B.

Finalmente, los resultados obtenidos con la adición de ácido oxálico son análogos a la de ácido cítrico exceptuando el Cu, cuya concentración en el compost de la pila tratada con oxálico es algo menor, ya que posee un valor por debajo del límite crítico para la clase A. De tal manera que, en este compost, excepto el Cd, el resto de metales están en concentraciones (figuras 4.24 a 4.29) que entran dentro del límite que el RD 824/2005 establece para los compost de mayor calidad.

En la tabla 4.21 se muestran los porcentajes de reducción metálica obtenidos a partir de la diferencia entre la concentración de Cu, Pb y Zn en el compost de cada pila tratada y la concentración determinada, de dichos metales, en el compost de la pila Testigo.

Porcentaje de reducción del metal respecto a la cantidad determinada en el Compost de la pila Testigo		Cu	Pb	Zn
Compost	Experimento 1	63%	No ha existido reducción	66%
	Experimento 2	65%	71%	67%
	Experimento 3	68%	72%	69%
	Experimento 4	83%	71%	70%

Tabla 4.21. Porcentaje de reducción obtenido en cada experimento.

Si obviamos el experimento 1, todos los demás han supuesto reducciones superiores al 65% y prácticamente análogas entre sí (a excepción de lo comentado para el Cu presente en el compost del experimento 4), sin importar el tipo de ácido ni su proporción.

#### 4.4.3 Ciclo vital de los metales en los experimentos piloto

Se ha realizado un balance másico a los metales en el conjunto de experimentos en planta piloto al igual que se realizó en las pilas de las plantas estudiadas.

El balance másico global presentado en la tabla 4.15 ,conjuntamente con el análisis metálico a muestras de material procedente de las pilas (tablas 4.16 a 4.20), ha permitido calcular un balance másico global de cada metal a lo largo del compostaje. Los resultados se muestran en las tablas 4.22 a 4.26. Como se observa en las mismas, existe una discrepancia entre la masa total de metal antes del proceso de refinado (A) y el contenido másico de metal encontrado en el compost más el del rechazo (D). El porcentaje medio de error es menor al 15%, aceptable teniendo en cuenta la manera de obtener el balance másico de materia en el proceso, la heterogeneidad del residuo y los errores propios del método de análisis. Este porcentaje da una idea del error global de este tipo de medidas y es algo menor que el que se obtuvo en las pilas industriales estudiadas en el apartado 4.3.

EVOLUCIÓN MEDIDA DE LOS METALES EN EL TESTIGO (Cantidades en g de metal)						
TESTIGO	Cu	Cd	Cr	Ni	Pb	Zn
Inicio	2,5	0,04	3,3	2,1	1,7	6,0
10 días	3,0	ND	2,2	1,4	1,9	6,2
20 días	4,7	0,1	4,7	3,1	2,0	7,8
35 días	9,3	0,1	3,4	1,1	3,4	9,9
45 días	9,8	0,07	2,8	0,9	7,1	15,6
55 días (A)	10,8	0,06	2,1	1,5	5,4	18,3
Compost	3,7(38)**	ND	0,4(22)	0,3(17)	1,3(26)	6,3(36)
Rechazo	6,1(62)	0,04	1,4(78)	1,5(83)	3,7(74)	11,4(64)
Suma (D)	9,8	0,04	1,8	1,8	5,0	17,7
% error (D-A/A)	-9,2	-----	-14,3	+20,0	-7,4	-3,3

Tabla 4.22. Cantidades calculadas de cada metal, en diversos momentos del proceso. Testigo. \*La última fila recoge el error relativo que se ha cometido, en la determinación de metal existente al final del Proceso (+ por exceso; - por defecto), a los 55 días, después de volver a medir el contenido metálico de las dos fracciones (Compost + Rechazo). Los datos de Cd no se recogen por ser poco significativos.

\*\*Coeficiente de reparto (en %) del metal entre el Compost y el Rechazo, tras el refinado. Los datos de Cd no se recogen por ser poco significativos.

EVOLUCIÓN MEDIDA DE LOS METALES EN EL EXPERIMENTO 1 (Cantidades en g de metal)						
Experimento 1	Cu	Cd	Cr	Ni	Pb	Zn
Inicio	2,1	ND	6,7	2,5	9,4	4,2
10 días	5,0	0,1	7,6	4,7	9,6	5,8
20 días	5,6	0,1	3,9	2,8	5,2	4,6
35 días	6,6	0,03	3,6	2,9	7,5	7,6
45 días	7,0	ND	2,8	1,8	5,4	3,9
55 días (A)	3,6	0,1	2,7	1,7	3,4	7,2
Compost	1,0(25)	0,02	0,4(12)	0,2(13)	1,0(34)	1,6(17)
Rechazo	3,0(75)	0,10	2,9(88)	1,3(87)	1,9(86)	7,9(83)
Suma (D)	4,0	0,12	3,3	1,5	2,9	9,5
% error (D-A/A)	+11,1	-----	+22,2	-11,8	-14,7	+31,9

Tabla 4.23. Cantidades calculadas de cada metal, en diversos momentos del proceso. Experimento 1.

EVOLUCIÓN MEDIDA DE LOS METALES EN EL EXPERIMENTO 2 (Cantidades en g de metal)						
Experimento 2	Cu	Cd	Cr	Ni	Pb	Zn
Inicio	2,1	ND	6,7	2,5	9,4	4,2
10 días	3,8	0,1	6,2	4,2	1,8	7,7
20 días	8,3	ND	2,8	2,2	1,4	9,7
35 días	7,1	0,07	3,5	2,4	3,6	7,7
45 días	6,4	0,1	2,4	1,9	10,3	8,9
55 días (A)	3,4	0,07	3,6	1,7	2,9	6,7
Compost	0,8(19)	0,01	0,5(17)	0,2(13)	0,2(08)	1,4(19)
Rechazo	3,5(81)	0,01	2,4(83)	1,4(87)	2,2(91)	5,9(81)
Suma (D)	4,3	0,02	2,9	1,6	2,4	7,3
% error (D-A)/A	+26,5	-----	-19,4	-5,9	-17,2	+8,9

Tabla 4.24. Cantidades calculadas de cada metal, en diversos momentos del proceso. Experimento 2.

EVOLUCIÓN MEDIDA DE LOS METALES EN EL EXPERIMENTO 3 (Cantidades en g de metal)						
Experimento 3	Cu	Cd	Cr	Ni	Pb	Zn
Inicio	4,8	0,3	7,2	0,6	1,3	2,9
10 días	3,8	0,07	2,1	0,6	3,0	3,2
20 días	7,1	0,2	4,6	1,5	1,4	4,4
35 días	6,5	0,2	0,7	0,8	1,1	6,3
45 días	5,2	0,2	3,4	2,2	4,5	5,6
55 días (A)	5,0	0,1	2,5	1,6	1,6	8,7
Compost	1,0(18)	0,02	0,3(14)	0,3(18)	0,3(23)	1,7(22)
Rechazo	4,7(82)	0,10	1,8(86)	1,4(82)	1,0(77)	6,2(78)
Suma (D)	5,7	0,12	2,1	1,7	1,3	7,9
% error (D-A)/A	+14,0	-----	-16,0	+6,2	-18,8	-9,2

Tabla 4.25. Cantidades calculadas de cada metal, en diversos momentos del proceso. Experimento 3.

EVOLUCIÓN MEDIDA DE LOS METALES EN EL EXPERIMENTO 4 (Cantidades en g de metal)						
Experimento 4	Cu	Cd	Cr	Ni	Pb	Zn
Inicio	4,8	0,3	7,2	0,6	1,3	2,9
10 días	2,6	0,1	3,3	0,5	1,8	2,6
20 días	7,9	0,2	4,3	1,5	1,0	6,8
35 días	2,5	0,1	0,9	0,6	1,3	5,2
45 días	2,8	0,1	3,7	2,2	2,8	6,4
55 días (A)	2,5	0,1	2,2	1,4	1,7	6,3
Compost	0,5(17)	0,02	0,3(14)	0,2(15)	0,3(21)	1,4(20)
Rechazo	2,4(83)	0,10	1,9(86)	1,1(85)	1,1(79)	5,6(80)
Suma (D)	2,9	0,12	2,2	1,3	1,4	7,0
% error (D-A)/A	+16,0	-----	0,0	-7,1	-17,6	+11,1

Tabla 4.26. Cantidades calculadas de cada metal, en diversos momentos del proceso. Experimento 4.

En estas tablas se observa lo siguiente:

1. En todas las pilas, las cantidades de Cd, Cr, y Ni, medidas al Inicio del proceso son mayores o del mismo orden que las medidas al final del proceso (día 55).
2. En la pila Testigo las cantidades medidas de Cu y Zn al Inicio del proceso son significativamente menores que las medidas al final del proceso. Esta observación y la anterior son plenamente coincidentes con lo encontrado en las pilas industriales. El Pb se comporta, en el Testigo, de forma análoga al Cu y Zn.
3. Las tablas correspondientes a los experimentos con ácido confirman lo indicado en apartados anteriores acerca de la variación en el comportamiento de Cu, Zn y Pb, con respecto a la pila Testigo, y también la escasa diferencia apreciable entre los 4 experimentos.
4. En cuanto al reparto de metales entre compost y rechazo que se consigue con el refino, una vez más, la pila Testigo reproduce el comportamiento observado en las pilas industriales, es decir, "es sensiblemente mayor el porcentaje de Cu y Zn que pasa al compost que el de los otros 4 metales, y todos ellos han pasado mayoritariamente al rechazo (entre un 60 y un 80% de media)". En cambio, en todos los experimentos con ácido, todos los metales han pasado mayoritariamente al rechazo (entre un 75 y un 90% de media) sin distinción de metal ni de condiciones experimentales.

Estas observaciones parecen corroborar la interpretación ya señalada:

A medida que se desarrolla el proceso de compostaje, las especies metálicas presentes (particularmente Cu y Zn; y en menor medida Pb) se enlazan a partir de interacciones covalentes o bien electrostáticas a los sitios activos (grupos carboxilos y fenólicos) que, en mayor densidad, se encuentran en los agregados organo-minerales de menor tamaño de partícula. De tal manera que la cantidad de metal que se determina en esas partículas, una vez transcurrido el periodo de compostaje, es mayor que la determinada al inicio.

Cuando se produce la adición de extractante, el protón del ácido entra en competencia con el metal por los sitios activos. La reacción, favorable al protón, es muy rápida y extremadamente desplazada hacia la derecha (Sparks D. L. et al., 1991). Esto tiene como consecuencia que el metal no llegue a unirse y, o bien queda adsorbido a fracciones inertes de mayor tamaño que terminan en el rechazo, o bien se lixivia a lo largo del compostaje.

#### 4.4.4 Caracterización metálica en los lixiviados generados durante el compostaje de las pilas estudiadas a escala piloto

A continuación, se expresa la cantidad de metal que ha sido determinada en los lixiviados de cada uno de los ensayos piloto.

Contenido en metales en el lixiviado (mg de metal)								
	Días de compostaje	Volumen (L)	Cu	Cd	Cr	Ni	Pb	Zn
Testigo	10	8,0	16,0	ND	8,0	8,0	8,0	336,0
	20	9,0	27,0	ND	ND	9,0	ND	18,0
	35	5,0	65,0	ND	ND	5,0	10,0	10,0
	<b>Total</b>		<b>108,0</b>	<b>ND</b>	<b>8,0</b>	<b>22</b>	<b>18</b>	<b>364,0</b>
Experimento 1	20	2,5	20,0	0,3	1,0	2,8	4,0	4,0
	35	3,5	7,0	ND	0,7	3,5	2,0	5,25
	55	0,5	1,5	ND	0,3	0,2	0,2	0,75
	<b>Total</b>		<b>28,5</b>	<b>0,3</b>	<b>2,0</b>	<b>6,5</b>	<b>6,2</b>	<b>10,0</b>
Experimento 2	20	3,0	75,0	ND	9,0	12,0	3,0	66,0
	35	3,5	24,5	ND	2,2	3,5	2,1	38,5
	55	1,2	3,6	ND	0,5	0,6	1,0	3,6
	<b>Total</b>		<b>103,1</b>	<b>ND</b>	<b>11,7</b>	<b>16,1</b>	<b>6,1</b>	<b>108,1</b>
Experimento 3	20	1,5	30,0	ND	5,0	6,5	1,0	35,0
	35	2,0	63,0	ND	6,0	9,0	1,0	50,0
	55	4,0	12,0	ND	ND	ND	4,0	20,0
	<b>Total</b>		<b>105,0</b>	<b>ND</b>	<b>11,0</b>	<b>15,5</b>	<b>6,0</b>	<b>105,0</b>
Experimento 4	20	1,0	74,0	ND	ND	12,0	2,0	65,0
	35	2,0	25,0	ND	ND	5,5	ND	30,0
	55	2,8	8,0	ND	ND	3,0	ND	8,0
	<b>Total</b>		<b>107,0</b>	<b>ND</b>	<b>ND</b>	<b>20,5</b>	<b>2,0</b>	<b>103,0</b>

Tabla 4.27. Contenido de metal (mg) analizado en el lixiviado recogido.

La cantidad metálica total determinada en el lixiviado generado en el compostaje de la pila Testigo ha sido mayor que la analizada para el resto de los casos estudiados. La causa es la pluviometría registrada, que ha provocado un mayor arrastre de metales (aunque la concentración metálica en los lixiviados del Testigo es claramente inferior a la de los experimentos con ácido, al ser mayor el volumen de lixiviados, es también algo mayor la masa de metal eliminada con ellos).

Se observa que en las pilas tratadas con extractante, la cantidad de metal determinada en el lixiviado aumenta con la proporción en la que se añade el ácido. El contenido de metal en el lixiviado ha aumentado cuanto más ácido ha sido el pH del mismo. (El estudio de pH ha sido estudiado aunque no se presentan en el trabajo).

La cantidad de metal presente en el lixiviado procedente de las pilas tratadas con extractante ha sido en torno a 0,1 g para el caso del Cu y del Zn y por debajo de 0,02 g para el resto de metales. Estos resultados son muy bajos si se comparan con las cantidades de cada metal (del orden de varios gramos, entre 2 y 10) determinadas en las pilas de compostaje. Por tanto, debe concluirse que prácticamente no se ha producido extracción de metal con el ácido; aunque sí parece haberse dificultado, en el caso de Cu y Zn, la unión del metal a la materia orgánica.

#### 4.4.5 Estudio de especiación metálica en las pilas compostadas a escala piloto. Movilidad y biodisponibilidad de los metales pesados

El término biodisponibilidad se refiere a las fracciones de metales en ciertas formas químicas que pueden ser asimiladas o absorbidas por determinados microorganismos y plantas. El término especiación se refiere a la identidad del elemento, su estado de oxidación y su estado físico. La especiación y disponibilidad de los metales están principalmente afectadas por el pH, composición y concentración de materia orgánica, la presencia de óxidos de Fe/Mn/Al, potencial redox y la concentración de sales y agentes quelatantes (García-Mina J.M. 2006), (Mench M. et al., 2000), (Brown G.E. Jr. et al., 1999), (Kabata-Pendias A. et al., 1985).

El método BCR utilizado para el estudio, determina el contenido de metal presente en cuatro formas químicas diferentes:

1. Fracción de metal móvil (IC).
2. Fracción de metal unida a óxidos (O).
3. Fracción de metal unida a la materia orgánica (MO).
4. Fracción de metal unida a estructuras cristalinas, también llamada Fracción residual (Rs).

Los resultados que se exponen en las figuras 4.30-4.35 son los porcentajes con los que las distintas fracciones de especies químicas de cada metal se presentan en la pila, tanto en el material de partida como en el compost producido. La primera de ellas (figura 4.30) representa los valores medios del conjunto de resultados hallados en los momentos de inicio de todas las pilas piloto estudiadas, que no diferían significativamente entre sí. Las otras cinco corresponden al análisis de especiación metálica del compost producido en cada experimento.

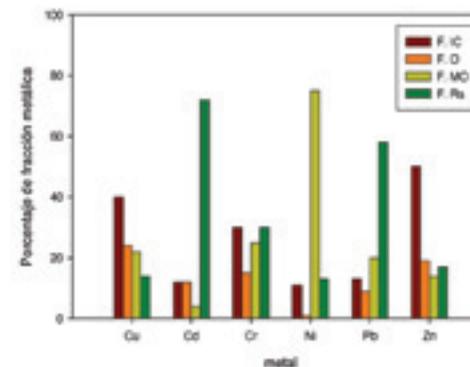


Figura 4.30. Especiación BCR al inicio.

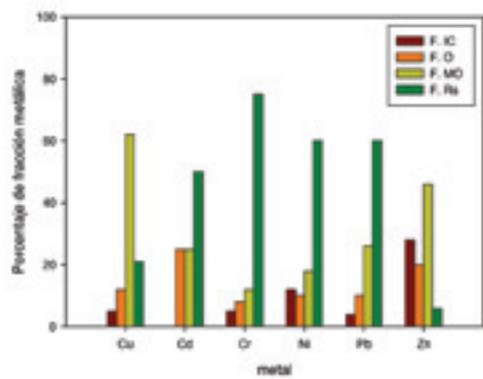


Figura 4.31. Especiación BCR en compost Testigo.

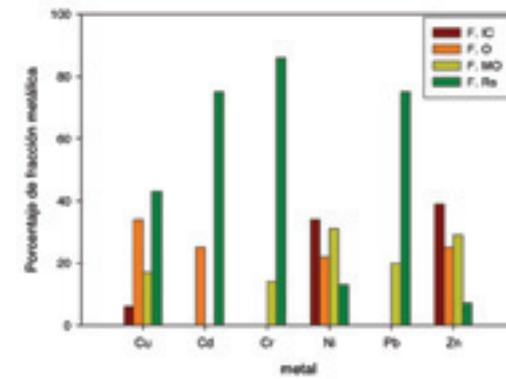


Figura 4.33. Especiación BCR en compost del experimento 2.

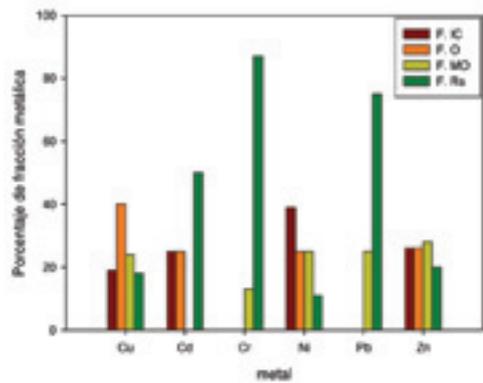


Figura 4.32. Especiación BCR en compost del experimento 1.

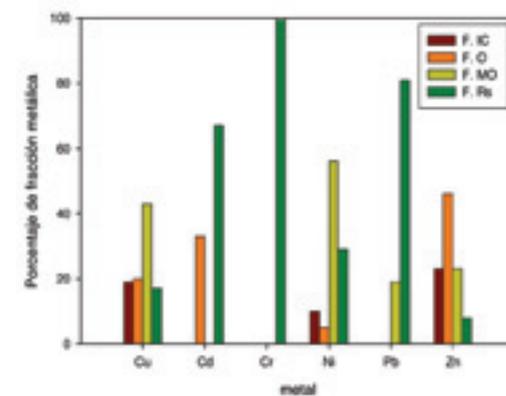


Figura 4.34. Especiación BCR en compost del experimento 3.

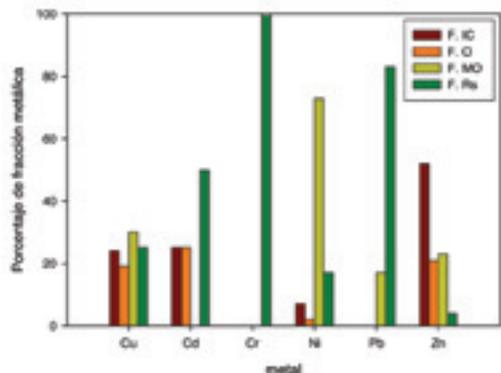


Figura 4.35. Especiación BCR en compost del experimento 4.

Al inicio del compostaje, el porcentaje en la fracción intercambiable (la más móvil) de Cu y Zn es superior al 40%; en cambio, el Cd, Cr, y Pb, predominan como fracción residual; mientras que en el Ni ha resultado ser más abundante como fracción de metal unida a la materia orgánica.

Partiendo de esta situación inicial, la evolución durante el compostaje, en la pila Testigo, ha conducido a una situación en que la mayor parte (más de la mitad) del Cu y del Zn presente en el compost está unida a la materia orgánica, mientras que los demás están, mayoritariamente (en un porcentaje, también, superior al 50%), unidos a formas cristalinas (Rs). Estos resultados han sido, para el Cu, Cr, Zn y Pb, similares a los determinados en este tipo de residuos por otros autores y sensiblemente diferentes para el Cd y Ni.

Frente a esta situación final, están las otras cuatro que se han dado al realizar la adición de ácido en diferentes condiciones. Sus 4 figuras representativas (figuras 4.32 a 4.35) no difieren significativamente entre sí. Se mantiene la preponderancia de la fracción residual, incluso algo aumentada (respecto al caso de la pila Testigo), en Cd, Cr, y Pb. Sin embargo, el comportamiento químico de Cu y Zn ha cambiado claramente: la presencia del ácido y consiguiente alteración del pH parece haber dificultado sensiblemente su unión a la materia orgánica (esta fracción ha aumentado, con respecto al inicio, pero no tanto como en el Testigo), con lo que se ha impedido la migración de estos metales desde los materiales “inertes” de los RSU al compost; su especiación indica que están, más o menos, uniformemente repartidos entre las 4 fracciones definidas.

Globalmente se observa que, en todos los casos estudiados, la fracción más móvil del Cu, Cd, Cr y Pb, se ha encontrado en el compost en porcentajes sobre el total, por debajo del 25%. Esto, aunque difiera en parte de los resultados que se presentan

en otros estudios (por ejemplo, Zheng et al., 2004, al estudiar la evolución de las especies químicas del Pb en el compostaje de lodos de aguas residuales); demuestra que, bajo las condiciones experimentales estudiadas, sólo una pequeña parte del contenido total de dichos metales se encuentra fácilmente biodisponible (Iwegbue C. et al., 2007). Para estos mismos metales, el valor medio de la suma de la fracción metálica precipitada como óxidos (O) y la complejada con materia orgánica (MO), consideradas ambas relativamente móviles (Iwegbue C. et al., 2007), (Mantoura C. et al., 1978) ya que dependerá de las propiedades físico-químicas del medio, no ha superado el 40%. Como resultado, el porcentaje medio de fracción residual de estos metales, fracción fija (Iwegbue C. et al., 2007), ha sido del 35%.

#### 4.5 Estudio de extracción de metales en pilas de lodos (Escala piloto)

Tras los experimentos para FORSU desarrollados en el punto anterior, se realizaron tres más con Lodos+Poda cuya planificación se detalla en la tabla 4.28.

En todos los experimentos, se ha pesado el material al inicio, en el momento de muestreo y antes y después del refino.

Los volteos se realizan utilizando una pala manual y con una frecuencia semanal. Con la misma frecuencia, se añadió una cantidad de agua para conseguir un 40% en humedad de la pila.

Para evitar que los ensayos estén sometidos a las inclemencias del tiempo meteorológico, se llevan a cabo bajo techado y la frecuencia de muestreo siempre es la misma.

	Ácido Cítrico Concentración del ácido 0,25 M	Ácido Oxálico Concentración del ácido 0,25 M
	1:40 kg residuo seco: mL extractante	1:40 kg residuo seco: mL extractante
Exp. L+P 4:1	SIN ADICIONAR (Noviembre 2007 -Enero de 2008)	
Exp. L+P 1:1	SIN ADICIONAR (Abril -Mayo de 2008)	
Exp. L+P 1:1	(Junio -Julio de 2008)	Adicionando en tres momentos puntuales del compostaje.

Tabla 4.28. Planificación de la experimentación con pilas de Lodos + Poda. Las adiciones se harán, aproximadamente, a los 7, 21 y 35 días del compostaje.

#### 4.5.1 Balance de materia seca

En la tabla 4.29, se expone la evolución másica de cada pila durante su compostaje a escala piloto, así como el resultado (en kg) de someter el producto final a una operación de refinado, análoga a la real, y separar dicho producto en compost por un lado y rechazo de compostaje por otro. Finalmente, se presenta el volumen total de lixiviado recogido en cada experimento. Aunque el peso inicial de las pilas experimentales no fue en todos los casos exactamente el mismo, todas ellas se han normalizado a 100 kilogramos para facilitar los cálculos y relaciones.

	L+P 4:1	L+P 1:1	L+P 1:1 A
<b>Masa inicial (kg)*</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>
<b>Masa a los 10 días*</b>	<b>66,7</b>	<b>85,7</b>	<b>73,3</b>
<b>Masa a los 20 días*</b>	<b>58,3</b>	<b>57,1</b>	<b>53,3</b>
<b>Masa a los 35 días*</b>	<b>41,7</b>	<b>42,9</b>	<b>33,3</b>
<b>Masa a los 45 días*</b>	<b>33,2</b>	<b>28,6</b>	<b>26,7</b>
<b>Masa a los 55 días (A.R.)*</b>	<b>33,2</b>	<b>28,6</b>	<b>26,7</b>
<b>Masa de Compost (kg)*</b>	<b>9,1</b>	<b>10,0</b>	<b>9,0</b>
<b>Masa de Rechazo (kg)*</b>	<b>24,2</b>	<b>18,6</b>	<b>17,7</b>
<b>Volumen total de lixiviado (L)</b>	<b>23,5</b>	<b>17,6</b>	<b>19,3</b>

Tabla 4.29. Evolución de la masa de las pilas experimentales durante el proceso y volumen total de lixiviado recogido en los 55 días.

Se ha tenido en cuenta para el balance de materia seca, la cantidad de residuo que se ha tomado en cada muestreo del proceso y por tanto las pérdidas que hubieran existido en dicho residuo, y lo que se hubiera acumulado de éste al final del proceso. Así mismo, los pesos calculados se han normalizado, dividiendo por el peso inicial real de cada experimento (que varió entre 80 y 120 kg).

El porcentaje de pérdidas totales al final de los experimentos alcanzó valores de un 90% aproximadamente para los distintos experimentos. Esta pérdida de masa no indica necesariamente un proceso de compostaje adecuado, sino que puede deberse a la gran pérdida de humedad del material de partida (se ha realizado un estudio de humedad aunque los resultados no se presentan en este trabajo)

#### 4.5.2 Análisis del contenido metálico. Eficacia de la lixiviación química

Los resultados del análisis de metales realizados al residuo en compostaje en seis momentos del proceso, así como a las fracciones finales de compost y rechazo, para cada una de las pilas estudiadas a escala piloto, se muestran en las siguientes tablas (tablas 4.30 a 4.32). Los resultados de las siguientes tablas se encuentran todos expresados en ppm (mg metal/kg materia seca).

Experimento 4:1. Sin adiciones de Ácido							
Días	Tipo de muestra	Cu	Cd	Cr	Ni	Pb	Zn
Inicio	Residuo	407	2,6	22	27	50	499
10	Residuo	432	2,5	27	28	63	541
20	Residuo	446	2,7	34	31	64	552
35	Residuo	493	2,9	45	32	62	586
45	Residuo	510	3	43	37	65	603
55	Antes Refino	580	3,5	38	31	67	626
	Compost	589	3,1	33	33	78	672
	Rechazo	510	2,5	129	41	73	573

Tabla 4.30. Determinación del contenido metálico durante el compostaje de la pila Testigo.

Experimento 1:1. Sin adiciones de Ácido							
Días	Tipo de muestra	Cu	Cd	Cr	Ni	Pb	Zn
Inicio	Residuo	340	2,3	24	27	38	387
10	Residuo	353	2,4	32	34	43	401
20	Residuo	355	2,5	30	33	41	423
35	Residuo	362	2,8	33	29	46	429
45	Residuo	368	2,8	31	30	49	438
55	Antes Refino	386	3,1	30	32	45	446
	Compost	417	3,7	29	33	48	610
	Rechazo	284	2,8	15	30	36	397

Tabla 4.31. Determinación del contenido metálico durante el compostaje de la pila del experimento 1.

Experimento 1:1. Adición de Ácido Cítrico (1:40)							
Días	Tipo de muestra	Cu	Cd	Cr	Ni	Pb	Zn
Inicio	Residuo	331	2,3	24	27	38	387
10	Residuo	338	2,2	27	31	49	379
20	Residuo	346	2,4	29	33	47	389
35	Residuo	344	2,6	25	30	50	403
45	Residuo	349	2,6	26	35	52	417
55	Antes Refino	351	2,5	29	32	55	487
	Compost	361	3,7	32	37	53	594
	Rechazo	277	1,7	19	24	47	406

Tabla 4.32. Determinación del contenido metálico durante el compostaje de la pila del experimento 2.

En dichas tablas se observa que, en la evolución de todos los experimentos, tanto el Cr como el Ni se han mantenido prácticamente constante durante todo el proceso de compostaje, siendo los valores iniciales para los metales citados, ligeramente menores que para el producto final obtenido.

El Cd, sin embargo, ha experimentado un aumento más significativo que los metales citados en el párrafo anterior si tenemos en cuenta los valores del material de partida y los de los productos finales.

El Pb, Cu y Zn han seguido una evolución similar en los tres experimentos, consistente en un aumento de su concentración a medida que el proceso va evolucionando, comportamiento que cabía esperar, ya que la concentración metálica durante el proceso de compostaje aumenta por la pérdida de masa inherente al proceso de compostaje. Sin embargo, es en estos tres metales pesados donde se detectan las mayores diferencias si contrastamos los tres experimentos realizados con lodos y poda. Estas diferencias consisten básicamente en que los niveles de Pb, Cu y Zn son mayores en el experimento realizado en proporción 4:1. Se puede deducir por tanto que, a mayor proporción de poda en el material inicial a compostar, la concentración de estos tres metales pesados va a ser menor, por lo que se debería tener en cuenta dichas proporciones en futuros experimentos.

La reducción de los metales pesados citados se representa en la tabla 4.33, siendo ésta más importante en el Cu y en el Pb, mientras que la reducción para valores del Zn es más moderada.

Porcentaje de reducción del metal respecto a la cantidad determinada en el Compost de la pila L+P (4:1)	Cu	Pb	Zn
Experimento L+P 1:1	29,2%	38,5 %	9,2%
Experimento L+P 1:1 ÁCIDO	38,7%	32%	11,6%

Tabla 4.33. Porcentaje de reducción obtenido al comparar concentraciones de metal en el compost procedente de pilas 1:1 con los valores de analizados en el compost procedente de la pila proporción 4:1.

Por otro lado se puede observar, a excepción del Pb, que la reducción de las especies metálicas que estamos tratando, se da en mayor medida en el experimento en el que se adiciona el ácido, sobre todo para el caso del Cu.

## 4.6 Estudio de la acumulación y asimilación de metales pesados en cultivos de campo experimentales y en semilleros, fertilizados total o parcialmente con compost

En este capítulo, se detallan los resultados obtenidos en el análisis de metales a suelos de cultivo los cuales han tenido distinto tratamiento de fertilización. En dichos suelos se ha estudiado la acumulación metálica a lo largo de cuatro años de cosechas de trigo y ajo y la asimilación de metales por parte de los cultivos.

También se ha estudiado en semilleros de invernadero la bioacumulación metálica en plantas de tomate y melón, utilizando como medio de cultivo, mezclas de distintos sustratos.

### 4.6.1 Caracterización del compost empleado en los ensayos agronómicos experimentales

La tabla 4.34 que se muestra a continuación, detalla la caracterización de los distintos compost empleados en los cuatro años de cosechas, todos ellos procedentes de la planta de recuperación y compostaje denominada como PRC-A. A excepción del compost 1, el resto tiene un porcentaje en materia orgánica por encima del 35%, límite establecido en la legislación (RD 824/2005). La relación C/N, en todos los casos, es menor de 20, límite también exigido por el mismo RD.

Varios autores establecen que la relación óptima de C/P entre 30-200 es un indicador de que el P presente se encuentra en formas químicas fácilmente asimilables por las plantas (Haug R. T. 1993). En este sentido, mientras el compost 1 y 2 cumplen el rango, el 3 y 4 lo superan.

Los resultados en el análisis del contenido metálico han mostrado valores por encima de los límites establecidos para la clase B (señaladas en amarillo en la tabla), por lo que solamente pueden ser clasificados como compost de clase C.

PARAMETROS FÍSICO-QUÍMICOS	COMPOST 1	COMPOST 2	COMPOST 3	COMPOST 4
pH	8,1	8,4	8,8	8,1
Conductividad eléctrica (µS/cm)	1143	1320	1980	1431
%Carbono Orgánico Oxidable	19,4	21,3	20,9	26,9
%Materia Orgánica	33,3	36,0	37,0	46,2
%Nitrógeno Total	2,7	2,6	2,9	2,4
C/N	7,1	8,2	7,2	11,2
%P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,1	0,2	0,1	0,1
C/P	194	106	209	269
% Ácidos húmicos	13,7	nd	nd	11,6
Cu (mg metal/ kg muestra)	373	292	280	400
Cd (mg metal/ kg muestra)	2,0	3,0	1,0	0,5
Cr (mg metal/ kg muestra)	64	57	30	123
Ni (mg metal/ kg muestra)	64	57	50	119
Pb (mg metal/ kg muestra)	144	165	170	190
Zn (mg metal/ kg muestra)	903	415	420	900

Tabla 4.34. Caracterización físico-química de los compost empleados en ensayos agronómicos. Todos los análisis realizados sobre muestra seca. nd= no determinado.

#### 4.6.2 Análisis del contenido de metales en suelos de cultivo y plantas

Una parcela experimental se dividió en 8 zonas; cuatro de ellas dedicadas al cultivo de trigo y las cuatro restantes al de ajo. Durante cuatro años cada zona del cultivo de trigo se sometió a un tratamiento distinto de fertilización, aunque, en todos los casos, siempre aplicando la dosis óptima de nitrógeno (180 kg de nitrógeno/ ha). Teniendo en cuenta esto; una fue abonada con nitrógeno mineral (N-Mineral, Nm en las tablas); otra con una mezcla al 50% de compost y 50% de N-Mineral (50C-50NM); la tercera con 100% compost (C en las tablas), y una última que se utilizó como Testigo que no fue abonada (Control, Co en tablas). Las zonas con cultivo de ajo recibieron un tratamiento similar.

En las distintas zonas, se tomaron muestras de suelo (entre 1-15 cm de profundidad) y del producto cultivado, a las que se les hicieron un análisis por triplicado de metales (tablas 4.35-4.38). El análisis estadístico de los datos se ha llevado a cabo con el programa informático StatAdvisor a través del cual se ha analizado la diferencia significativa (LSD) a  $P \leq 0,05$  (tablas 4.39-4.42).

Grano trigo	Cu	Cd	Cr	Ni	Pb	Zn
Nm	7e3	ND	15e4	1e0.5	ND	33e1
	14e5	ND	11e3	1e0.5	ND	23e1
	5e0.5	ND	12e2	1e0.5	ND	20e1
	6e1	ND	13e2	2e0.5	ND	21e1
50C-50NM	6e1	ND	12e4	2e0.5	ND	27e6
	15e5	ND	18e4	4e1	ND	23e2
	5e1	ND	15e3	2e1	ND	20e1
	5e2	ND	16e2	1e0	ND	25e1
C	7e2	ND	16e6	1e0	6e2	30e3
	13e1	ND	12e3	1e0	8e2	32e1
	5e0.5	ND	13e3	1e0	7e1	30e1
	6e1	ND	14e2	1e0	7e2	26e1
Co	6e2	ND	12e3	ND	ND	29e1
	14e2	ND	10e2	ND	ND	23e2
	5e0.5	ND	11e1	ND	ND	19e2
	5e1	ND	10e3	ND	ND	23e1

Tabla 4.35. Valores medios del contenido (ppm) de cada metal en el grano de trigo determinado en los cuatro años de cosechas.

Suelo-trigo	Cu	Cd	Cr	Ni	Pb	Zn
Nm	12e2	1e0.5	21e2	16e5	24e1	23e2
	22e6	2e1	23e4	21e1	34e5	30e3
	14e3	1e0	25e7	22e1	21e4	31e1
	18e4	1e0	25e6	23e2	25e0.5	33e1
50C-50NM	13e1	1e0	20e3	21e6	29e3	28e3
	24e5	2e1	29e4	21e1	40e7	32e3
	16e3	1e0	30e2	24e2	25e1	33e5
	15e1	1e0	21e4	22e1	24e1	36e1
C	15e2	ND	20e3	24e7	33e2	26e1
	21e1	ND	28e6	20e4	49e4	29e3
	16e2	ND	27e2	25e2	25e3	35e3
	16e1	1e0	22e5	22e1	24e2	40e5
Co	14e1	ND	20e2	17e5	21e2	19e5
	25e4	ND	30e3	21e4	39e6	34e1
	15e1	ND	25e3	25e1	25e2	35e4
	16e2	1e0.5	20e1	22e1	23e1	34e3

Tabla 4.36. Valores medios del contenido (ppm) de cada metal en el suelo donde se ha cultivado trigo, determinados estos en los cuatro años de cosechas.

Ajo bulbo	Cu	Cd	Cr	Ni	Pb	Zn
Nm	9e3	1e0.5	9e1	8e2	38e4	13e1
	9e2	1e0.5	9e0.5	9e1	42e5	14e1
	10e2	2e0.5	11e2	9e1	48e5	14e1
	12e1	1e0.5	14e2	9e1	53e4	15e1
50C-50NM	6e1	1e0.5	7e2	8e2	34e5	14e2
	6e3	1e0.5	9e0.5	7e2	35e5	15e1
	9e2	2e0.5	9e0.5	7e3	41e5	14e1
	17e1	2e0.3	9e0.5	9e2	42e4	15e0.5
C	8e1	1e0.5	9e0.5	10e1	41e4	16e1
	8e1	1e0.5	9e1	10e1	46e4	16e1
	9e3	1e0.2	10e2	10e1	49e5	16e1
	18e2	1e0.5	10e2	12e2	55e3	18e2
Co	10e1	1e0.5	9e2	9e1	43e5	15e0.5
	10e1	1e0.5	10e1	9e1	44e4	16e1
	11e2	1e0.5	12e0.5	9e0.5	46e4	15e0.5
	15e1	1e0.5	13e0.5	11e2	47e3	15e0.5

Tabla 4.37. Valores medios del contenido (ppm) de cada metal en el bulbo de ajo, determinados estos en los cuatro años de cosechas.

Suelo-ajo	Cu	Cd	Cr	Ni	Pb	Zn
Nm	12e2	1e0,5	17e3	20e1	21e2	30e2
	13e1	1e0,5	18e2	20e1	23e4	32e2
	14e1	0e0,5	20e2	19e2	23e2	32e2
	14e1	1e0,5	22e2	23e2	22e3	31e1
50C-50M	11e2	ND	14e1	19e1	21e3	31e1
	14e1	ND	15e3	20e2	23e2	32e4
	16e1	ND	15e1	22e2	23e6	37e4
	24e4	2e1	22e2	24e3	25e6	46e3
C	15e3	1e0,5	17e1	21e3	22e1	39e5
	19e3	1e0,5	17e1	22e3	25e1	42e5
	25e3	1e0,5	18e1	22e3	27e4	50e7
	24e2	1e0,5	23e1	24e5	25e5	57e4
Co	13e2	1e0,5	17e2	22e5	22e3	32e1
	15e4	1e0,5	19e2	25e3	23e3	33e2
	14e3	1e0,5	19e4	19e3	23e5	33e1
	17e2	1e0,5	18e3	23e2	24e1	34e4

Tabla 4.38. Valores medios del contenido (ppm) de cada metal en el suelo donde se ha cultivado el ajo, determinados estos en los cuatro años de cosechas.

En todos los casos, los valores de concentración de metales en suelos y cosecha son muy bajos y en algunos casos despreciables. Tras cuatro años de aportación de compost al suelo, el contenido de metales pesados en el mismo no ha mostrado diferencias significativas según los distintos tratamientos, excepto para el cobre y el zinc. En el caso de estos metales, se han registrado niveles más altos de cobre en las parcelas donde el compost ha formado parte del sustrato y niveles más altos de zinc en aquellas donde solamente se ha aportado compost.

Tratamiento de fertilización	mg/kg de materia seca					
	Cu	Cd	Cr	Ni	Pb	Zn
Nm	8,3a	0,0a	13,1a	1,5a	0,0a	24,3a
50C-50M	8,3a	0,0a	14,8a	2,5a	0,0a	23,6a
C	7,9a	0,0a	14,0a	1,3a	0,0a	30,7b
Co	8,1a	0,0a	11,0a	0,0a	0,0a	23,4a

Tabla 4.39. Media del contenido en metales pesados en grano de trigo durante los 4 años. \* Letras diferentes indican diferencia significativa al 95%.

Tratamiento de fertilización	mg/kg de materia seca					
	Cu	Cd	Cr	Ni	Pb	Zn
Nm	18,1a	1,2a	24,1a	20,5a	25,8a	29,4a
50C-50M	18,1a	1,2a	26,8a	22,0a	29,3a	32,2b
C	17,8a	1,2a	25,7a	22,6a	32,8a	32,4b
Co	18,8a	0,5a	25,1a	21,2a	27,1a	30,6a

Tabla 4.40. Media del contenido en metales pesados en el suelo plantado con trigo, durante los 4 años de tratamientos de fertilización. \* Letras diferentes indican diferencia significativa al 95%.

Tratamiento de fertilización	mg/kg de materia seca					
	Cu	Cd	Cr	Ni	Pb	Zn
Nm	10,1a <sup>1</sup>	1,4a	10,7a	9,1a	45,3a	14,1b
50C-50M	9,4a	1,9a	9,2a	8,2a	38,0a	14,2b
C	10,7a	1,6a	9,9a	10,9a	47,7a	16,6a
Co	11,4a	1,3a	11,4a	9,6a	44,9a	15,4a

Tabla 4.41. Media del contenido en metales pesados en bulbos de ajo durante los 4 años de tratamientos de fertilización. \* Letras diferentes indican diferencia significativa al 95%.

Tratamiento de fertilización	mg/kg de materia seca					
	Cu	Cd	Cr	Ni	Pb	Zn
Nm	13,3b <sup>1</sup>	1,0a	19,3a	20,5a	22,3a	31,3b
50C-50M	16,3a	1,9a	16,5a	21,3a	23,5a	36,5b
C	20,8a	1,0a	18,8a	22,0a	24,8a	47,0a
Co	14,8b	1,3a	18,3a	22,3a	23,3a	33,0b

Tabla 4.42. Media del contenido en metales pesados en el suelo plantado con ajo, durante los 4 años de tratamientos de fertilización. \* Letras diferentes indican diferencia significativa al 95%.

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos, el tratamiento aplicado en las distintas zonas de campo no supone una variación significativa en la concentración de metales acumulados ni en los suelos ni en los correspondientes productos obtenidos.

### 4.6.3 Análisis del rendimiento productivo obtenido a través de los cultivos que han recibido distinto tratamiento de fertilización

Finalmente, se hizo un estudio de producción en cada cosecha, cuyos resultados se presentan a continuación (tablas 4.43 y 4.44):

	Rendimientos de trigo (kg/ha)			
	1ª cosecha	2ª cosecha	3ª cosecha	4ª cosecha
Nm	5.950	4.860	9.350	5.720
50C-50M	6.100	5.080	10.100	5.900
C	5.920	4.500	9.200	5.100
Co	4.950	4.340	8.150	4.050

Tabla 4.43. Rendimiento en la producción de trigo (kg/ha) por año de cosecha.

	Rendimientos de bulbos de ajo (kg/ha)			
	1ª cosecha	2ª cosecha	3ª cosecha	4ª cosecha
Nm	9.165	8.130	15.235	8.030
50C-50M	8.500	7.470	14.013	7.808
C	7.290	6.590	12.350	6.910
Co	6.481	5.600	10.492	5.063

Tabla 4.44. Rendimiento en la producción de bulbos de ajo (Kg/ha) por año de cosecha.

De las tablas anteriores se deduce que:

Existen diferencias significativas de producción del suelo tratado con N-Mineral con respecto al suelo control.

La sustitución parcial de N-Mineral por compost da valores de producción similares a los de las zonas de campo tratadas sólo con N-Mineral.

Los suelos tratados solamente con compost dieron valores de producción intermedios entre el control y el resto.

Se puede concluir que el compost producido, puede ser perfectamente un buen sustituto, al menos parcialmente, de los fertilizantes químicos utilizados en agricultura.

#### 4.6.4 Ensayos experimentales en semilleros con compost aplicado

En el periodo de dos años se ha llevado a cabo la siembra, en cajas de polietileno con 150 compartimentos, de plantas de tomate y de melón. Los compartimentos se han rellenado con mezclas de distintos sustratos:

Tr + Tn Turba rubia (65%)+ turba negra (35%)+ perlita (5%).

Tn + C Turba negra (65%)+ Compost (35%)+ perlita (5%).

Tn + Tr Turba negra (65%)+ turba rubia (35%)+ perlita (5%).

Tr + C Turba rubia (65%)+ Compost (35%)+ perlita (5%).

C + Tr Compost (65%)+ turba negra (35%)+ perlita (5%).

En las siguientes tablas (4.45-4.49) se detallan los resultados de todos los análisis de metales realizados a las mezclas de sustratos y a las plantas de tomate y melón.

	Sustrato	Cu	Cd	Cr	Ni	Pb	Zn
Análisis de metales a las mezclas de sustratos fertilizantes empleados	Tr + Tn	7	-	-	-	-	1
	Tn + C*	98	-	9	12	31	110
	Tn + Tr	8	-	-	-	-	1
	Tr + C*	333	2	32	39	130	463
	C* + Tr	381	2	30	46	124	508

Tabla 4.45. Concentración de metal en cada uno de los sustratos empleados. Los resultados están expresados en mg metal/kg muestra seca. \*Compost 1.

Las mezclas con compost han presentado mayor contenido en todos los metales que aquellas donde no forma parte del sustrato, como era de esperar.

	Sustrato	Cu	Cd	Cr	Ni	Pb	Zn
Análisis de metales pesados en TOMATE sembrado en semilleros con distintas mezclas de sustrato (Compost 1)	Tr + Tn	33	0,5	8	8	17	44
	Tn + C*	320	1	22	42	119	484
	Tn + Tr	13	0,5	10	6	7	13
	Tr + C*	265	1	20	34	103	574
	C* + Tr	384	3	26	48	139	597

Tabla 4.46. Concentración de metal (mg/kg) en tomate sembrado en semillero con varias mezclas de sustratos. \* Compost 1.

	Sustrato	Cu	Cd	Cr	Ni	Pb	Zn
Análisis de metales pesados en MELÓN sembrado en semilleros con distintas mezclas de sustrato. (Compost 1)	Tr + Tn	18	-	8	6	15	21
	Tn + C	252	2	18	31	91	402
	Tn + Tr	15	-	2	4	4	14
	Tr + C	254	2	21	33	93	414
	C + Tr	375	3	30	48	142	443

Tabla 4.47. Concentración de metal en melón sembrado en semillero con varias mezclas de sustratos.\* Compost 1

Análisis de metales pesados en TOMATE sembrado en semilleros con distintas mezclas de sustrato (Compost 2)	Sustrato	Cu	Cd	Cr	Ni	Pb	Zn
	Tr + Tn	25	-	20	17	10	49
	Tn + C**	152	1	28	27	59	217
	Tn + Tr	16	-	25	17	11	20
	Tr + C**	258	2	31	50	83	354
	C** + Tr	280	2	36	42	96	483

Tabla 4.48. Concentración de metal en tomate sembrado en semillero con varias mezclas de sustratos. \*\*Compost 2.

Análisis de metales pesados en MELÓN sembrado en semilleros con distintas mezclas de sustrato (Compost 2)	Sustrato	Cu	Cd	Cr	Ni	Pb	Zn
	Tr + Tn	21	-	51	43	5	22
	Tn + C**	141	-	25	31	44	222
	Tn + Tr	25	-	26	23	3	18
	Tr + C**	180	1	31	35	53	239
	C** + Tr	273	1	40	46	106	406

Tabla 4.49. Concentración de metal en melón sembrado en semillero con varias mezclas de sustratos. \*\*Compost 2.

La bioasimilación de metales en la planta de tomate y en la de melón ha sido mayor cuando la mezcla de sustratos ha contenido compost. A mayor porcentaje de éste en la mezcla sustrato, mayor concentración de metal se ha determinado en el cultivo.

La planta de tomate ha presentado mayor contenido de metales que la de melón. El Zn, seguido del Cu, y en menor medida el Pb, son los tres metales que en mayor proporción se han encontrado en la planta, precisamente son los que más se concentran en el compost y además los que tienen mayor porcentaje de metal en forma de fracción móvil y fracción unida a la materia orgánica (IC+MO [ver en la figura 70](#)).



## 5. Conclusiones

Con el objetivo central de contribuir a la mejora de calidad del compost obtenido en procesos de compostaje, se han realizado diferentes experimentos diseñados para satisfacer los objetivos en que se ha estructurado la investigación:

Estudio del contenido en metales del compost procedente de cada una de las pilas estudiadas.

Estudio de la lixiviación química a escala piloto, en el compostaje de material constituido únicamente con FORSU, y de otras constituidas por una mezcla de lodos y poda como método de eliminación de metales en el compost.

Análisis de la bioacumulación de metales pesados en suelos y de la bioasimilación en vegetales a partir de ensayos experimentales de cultivos y siembra de semilleros a los que se les ha aplicado compost.

Así, para el primero de estos tres puntos se han estudiado un total de 8 pilas industriales constituidas por, entre 20 y 180 toneladas de material denominado FORSU (Fracción Orgánica de Residuos Sólidos Urbanos) que proviene de un tratamiento de selección de los RSU recogidos selectivamente o no, según la planta, y que se destina a obtener un compost comercial. Son las pilas identificadas como APF, BPF, CPF, CTF, DPF, DTF1, DTF2 y DTF3. Además, se ha estudiado otra pila, APL, constituida con lodos de EDAR y poda de jardines en relación volumétrica 5:1.

Del análisis de esas pilas de FORSU se han obtenido las siguientes conclusiones:

**1.** La recogida selectiva implantada sólo en la zona de servicio de la planta PRC-A, conduce, a un material inicial para el compostaje (FORSU) que contiene una mayor proporción, en base seca, de materia orgánica, 52%, frente a una media para las otras tres, que sólo efectúan la separación de fracciones en planta, del 47%.

**2.** En la pila APF la pérdida de materia seca, por oxidación, ha sido del 40%, mientras que, en las otras 7 pilas de FORSU, este porcentaje se ha situado entre un 10 y un 18%. El rechazo, en base seca, ha sido de un 40% para la pila APF frente a un 67% de media para las otras 7. Por consiguiente, el rendimiento industrial conseguido en la pila APF ha sido el mayor de todos (20,5%). Esta pila, además de ser la que mayor frecuencia de riegos y volteos ha tenido, es la que más ha prolongado el tiempo de compostaje. Un desglose de estos parámetros de actuación para las 8 pilas de FORSU estudiadas parece dejar clara la existencia de una correlación directa entre tiempo de compostaje y grado de humedad por un lado y rendimiento industrial másico por otro.

**3.** Concretamente, la disminución porcentual en la cantidad de materia orgánica presente en las pilas APF, CTF y DTF3, ha sido mayor que en el resto (incluida también la pila de LD y poda) coincidiendo que son las que han tenido mayor periodo de compostaje, 190, 119 y 116 días respectivamente.

**4.** El contenido metálico inicial que presentan algunos residuos orgánicos imposibilita en gran medida obtener un compost de calidad. Así, el análisis de metales a residuos domiciliarios ha dado como resultado una concentración de 40 ppm en Ni. Teniendo en cuenta que el límite para compost clase A según el RD 824/2005 es de 25 ppm en este metal, resulta difícil obtener esta calidad superior. Ante ello, cabe preguntarse, si se debe prevenir la acumulación de metales pesados en el suelo, o bien, promocionar el reciclado y la reutilización de los residuos orgánicos.

**5.** El análisis de metales al inicio del compostaje y en la etapa anterior al refinado en planta ha evidenciado el aumento de concentración metálica a lo largo del proceso. Este aumento no se produce por igual en todos los metales, mientras la concentración media final del Cu y del Zn en pilas constituidas con FORSU ha sido 2,5 veces la inicial, en el resto de metales la media ha sido de 1,7 veces. Las pilas APF, CTF, y DTF3, con un valor medio de pH en torno a 8 durante el compostaje y con mayor contenido en ácidos húmicos, han presentado un aumento de concentración de Cu y Zn superior al del resto de pilas.

**6.** El análisis de la masa total de cada metal medida en diversos momentos del compostaje indica que, en todas las pilas estudiadas las cantidades de Cd, Cr, Ni, y Pb, medidas al inicio del proceso coinciden prácticamente con las medidas al final del proceso. Sin embargo, en las pilas constituidas con FORSU las cantidades medidas de Cu y Zn al inicio del proceso son significativamente menores (entre un 30 y un 65%) que las medidas al final. Esto sólo puede explicarse aceptando que, a medida que avanza el proceso, el Cu y el Zn, presentes en los impropios, se transfieren a la materia orgánica, adsorbiéndose a las fracciones orgánicas (1-0,05 mm) y orgánico-minerales (<0,05 mm) que quedan finalmente en el compost.

**7.** En cuanto al reparto de metales entre compost y rechazo, que se consigue con el refinado, en todas las pilas resulta ser sensiblemente mayor el porcentaje de Cu y Zn que pasa al compost que el de los otros 4 metales. Además, en las pilas constituidas con FORSU, todos los metales han pasado mayoritariamente al rechazo (entre un 60%-80% de media).

**8.** La pila constituida con lodos y poda, APL, ha tenido un comportamiento totalmente diferente a las demás. Su humedad se ha mantenido en valores incluso demasiado altos; sin embargo, el compostaje se ha producido, aunque lentamente, proporcionando un valor de pérdida de materia seca en el proceso del 30%, un elevado rendimiento en materia seca transformada en compost, 55%, y un rechazo reducido prácticamente a la poda estructural añadida. El compost producido en 185 días está aceptablemente estabilizado, y la cantidad total de metales medida al inicio y al final del proceso ha sido la misma, produciéndose el lógico aumento de la concentración de éstos al disminuir la masa total de la pila. Al rechazo (21% de la masa seca total presente al final del proceso) ha pasado un 28% como promedio, de la masa de cada metal.

**9.** En cuanto al contenido en metales, según las exigencias del RD 824/2005, solamente los productos de las pilas, BPF, DPF y DTF2 pertenecen a la clase B; mientras que los de la APF, CPF y CTF serían de la clase C. Ni el producto obtenido de la pila DTF1 ni el de la DTF3 podrían venderse comercialmente como compost pues ambos han presentado un contenido en Pb superior al límite establecido en el RD 824/2005. El producto obtenido de la pila APL tiene un contenido en Cu y Zn (Cu-537mg/kg; Zn-663 mg/kg) superior a los establecidos en el RD, por lo que no podría venderse como compost sino como lodos tratados. En este sentido, su uso estaría regulado por el RD 1310/1990 sobre aplicación de lodos en agricultura.

Para el caso del estudio de pilas a escala piloto, constituidas por una mezcla de lodos y poda, las conclusiones son las siguientes:

**10.** En lo que respecta a la eliminación de metales pesados mediante la adición de ácidos orgánicos durante el proceso de compostaje, es despreciable, o incluso aumenta la concentración de estos metales como ocurre en caso del Pb.

**11.** De los experimentos realizados se concluye que, a mayor proporción de poda en la mezcla del material inicial a compostar, los niveles de Cu, Pb y Zn, son significativamente menores, tanto en el material inicial como en el producto final obtenido.

**12.** Cuando el material se seca parcialmente (pérdida de humedad), la pérdida de volumen y masa es muy significativa, tanto que no existe una masa mínima considerable a escala piloto para que se pueda desarrollar un proceso adecuado de compostaje. Por tanto, no se considera viable la experimentación de pilas de lodos y poda a escala piloto, siendo la alternativa en próximos experimentos realizarla a escala industrial.

Para el segundo de los puntos en que se ha estructurado la investigación, basado en el estudio de la lixiviación química a escala piloto, de material constituido exclusivamente por FORSU, se han extraído las siguientes conclusiones:

**13.** La planta piloto diseñada ha permitido, eficazmente, el estudio del compostaje en condiciones análogas a las de un proceso industrial de pilas volteadas y regadas, con aireación natural, y la realización de experimentos de extracción de metales con agentes ácidos a una escala semi-industrial.

**14.** El porcentaje de pérdidas totales de materia al final de los experimentos alcanzó valores de entre un 33% y un 56% aproximadamente. Estos valores son altos, pero están en el rango de lo encontrado en la pila industrial estudiada en la misma planta de recuperación y compostaje, APF, en la que dicho porcentaje fue del 41%. La adición de ácido no parece haber afectado de forma alguna al avance del proceso de compostaje.

**15.** En cuanto al contenido metálico en las pilas a escala piloto, el experimento Testigo, sin aporte de ácido, ha reproducido lo observado a escala industrial en las pilas constituidas con FORSU: el Cu y el Zn han aumentado drásticamente su presencia en el material destinado a producir el compost, y han vuelto a aumentar su concentración tras el refinado. Mientras tanto, Cr, Cd, y Ni, sólo se han concentrado en función de la disminución de materia en la pila, y el Pb se ha comportado de forma intermedia. Estos cuatro metales han reducido algo su concentración tras el refinado. Al analizar, en los tres experimentos con ácido cítrico añadido en distintas proporciones, los resultados obtenidos al determinar el contenido metálico presente en el periodo de compostaje considerado, se observa que apenas existen diferencias entre sí, lo que indica que aumentar la proporción de ácido añadido no ha mejorado la eficacia de extracción. Sin embargo, sí que se han producido diferencias significativas con el experimento Testigo; aparentemente, la presencia del ácido y la consecuente bajada en el pH ha impedido el extraordinario aumento de concentración de Cu y Zn, y en menor medida Pb, tanto al final del proceso, como en el compost final obtenido. Así, mientras que el compost del Testigo es de clase C, según el RD 824/2005, los de los experimentos 1 a 3 son de clase B. Finalmente, los resultados obtenidos con el ácido oxálico son análogos a los comentados para el ácido cítrico, sin más diferencia que una apreciable mayor reducción en el contenido final de Cu. Esto indica que el efecto obtenido no se debe a la naturaleza del ácido aportado, sino a su esencia misma de ácido y afección al pH del medio. Exceptuando el experimento con menor proporción de ácido cítrico aplicada, en todos los demás se han producido reducciones en el contenido de Cu, Zn, y Pb en el compost, superiores al 65% y prácticamente análogas entre sí, sin importar el tipo de ácido ni su proporción.

**16.** El análisis de la cantidad de metal presente en los lixiviados indica que no es correcto hablar de extracción, sino de variación de las condiciones de compostaje (pH) que conduce a dificultar la unión de algunos metales (Cu y Zn, especialmente) a la materia orgánica.

**17.** El análisis de especiación, BCR, indica que, al inicio del compostaje, el porcentaje de fracción intercambiable (la más móvil) en Cu y Zn es superior al 40%; en cambio, para el Cd, Cr, y Pb, la fracción preponderante es la más fija, la denominada fracción residual; mientras que en el Ni ha resultado ser, ya en el inicio, más abundante la fracción unida a la materia orgánica. Partiendo de esta situación inicial, la evolución durante el compostaje, en la pila Testigo ha conducido a una situación en que la mayor parte (más de la mitad) del Cu y del Zn presentes en el compost están unidos a la materia orgánica, mientras que los demás están presentes, mayoritariamente (en un porcentaje también superior al 50%), unidos a formas cristalinas. Al añadir ácido, en todos los casos, se mantiene la preponderancia de la fracción residual, incluso algo aumentada (respecto a la pila Testigo), en Cd, Cr, y Pb. Sin embargo, el comportamiento químico de Cu y Zn ha cambiado claramente: la presencia del ácido y consiguiente alteración del pH parece haber dificultado sensiblemente su unión a la materia orgánica.

**18.** Del análisis BCR del compost final en los 5 experimentos, incluido el Testigo, resulta que, la fracción más móvil del Cu, Cd, Cr y Pb, se ha encontrado en el compost en porcentajes sobre el total por debajo del 25% mientras que el porcentaje medio de fracción residual de estos metales, fracción fija, ha sido del 35%. Ello hace pensar que sería aconsejable replantear los límites establecidos por la legislación.

Finalmente, para el tercero de los puntos en que se ha estructurado la investigación, se han realizado experimentos para estudiar los efectos de la aplicación de compost clase C, obtenido a partir de FORSU, a suelos de cultivo y a semilleros.

Con los experimentos realizados se han extraído las siguientes conclusiones:

**19.** Teniendo en cuenta los resultados obtenidos en el estudio de las cosechas de trigo y ajo, se observa que el tratamiento aplicado en las distintas zonas de campo no ha supuesto una variación significativa en la concentración de metales acumulados, ni en los suelos, ni en los correspondientes productos obtenidos. El rendimiento productivo fue mayor en las parcelas abonadas con N mineral y con la mezcla al 50% que en los otros casos.

**20.** Se ha sustituido en diversas proporciones turba por compost, para su utilización en semilleros de melón y tomate. La bioasimilación de metales en la planta de tomate y en la de melón ha sido mayor cuando la mezcla de sustratos ha contenido compost. A mayor porcentaje de éste en la mezcla sustrato, mayor concentración de metal se ha determinado en el cultivo. La planta de tomate ha presentado mayor contenido de metales que la de melón. El Zn, seguido del Cu, y muy alejado el Pb, son los tres metales que en mayor proporción se han encontrado en la planta, precisamente son los tres que más se concentran en el compost y además los que tienen mayor porcentaje de metal en forma de fracción móvil y fracción unida a la materia orgánica.

## 6. Bibliografía



---

ALVARENGA P., PALME P., GONÇALVES A.P., FERNÁNDEZ R.M., CUNHAQUEDA A.C., DUARTE E., VALLINI G. (2007). Evaluation of chemical and ecotoxicological characteristics of biodegradable organic residues for application to agricultural land. *Environmental International*, 33, 505- 513.

---

ANTONELLI M., CALACE N., CENTIOLI D., PETRONIO B. M. (2001). Complexing capacity of different molecular weight fractions of sedimentary humic substances. *Analytical Letters*, 34, 989-1002.

---

BOXTEL L. (1982). Samenstelling en contaminatie van Voedselresten Afkomstig van Particuliere Huishoudingen. CIVO Instituten TNO, Zeist.

---

BROWN G.E. JR., FOSTER A.L., OSTERGREN J.D. (1999). Mineral surfaces and bioavailability of heavy metals: a molecular scale perspective. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 96, 3388-3395.

---

BUFFLE J. (1998). Complexation reactions in Aquatic Systems Analytical Approach. Chichester, Ellis Horwood Limited.

---

CIAVATTA C., GOVI A., SIMONI A., SEQUI P. (1993). Evaluation of heavy metals during stabilization of organic matter in compost produced with municipal solid wastes. *Bioresource Technology*, 43, 147-153.

---

CHICA A., DIOS M., ROSAL A., ARCOS M. (2005). Compostaje de lodos de EDARs y de la fracción orgánica de los RSU. *Infoenviro* 10, pp. 54-59.

---

COSTA F., GARCIA C., HERNANDEZ T., POLO A. (1995). Residuos orgánicos urbanos. Manejo y utilización. CSIC. Centro de Edafología y Bibliografía Aplicada del Segura. Murcia (ESPAÑA).

---

CRUMP D., BARLOW P. (1982). Factors controlling the lead content a Pasture Grass. *Environmental Pollution*, 3, 181-192.

---

DAS K.C., TOLLNER E.W., TORNABENE T.G. (2002a). Pulp and paper industry byproducts composting: process development and implementation, en JG Press, Emmaus, Proceedings of the 2002 International Symposium Composting and Compost Utilization, pp. 392-400.

---

DAS K.C., TOLLNER E.W., TORNABENE T.G. (2002b). Windrow composting of paper mill by-products: scale-up and seasonal effects. *Compost Science and Utilisation* 10, pp. 347-355.

---

DE BERTOLDI M., MARCO R. AND CIVILINI C. (2005). The quality of compost with regard to process management, en Actas del II Congreso sobre bioresiduos y compost, Sevilla, 2005.

---

---

DE BERTOLDI M., VALLINI G., PERAA. (1983). The biology of composting: a review, *Waste Management and Research* 1, pp. 157-176.

---

DIAZ M.J., MADEJÓN E., LÓPEZ F., LÓPEZ R., CABRERA F. (2002). Optimization of the rate vinasse/grape marc for co-composting process. *Process Biochemistry*, 37, pp. 1143-1150.

---

EKINCI K., KEENER H.M., ELWELL D.L. (2002). Composting short paper fiber with broiler litter and additives. Part II. Evaluation and optimization of decomposition versus mixing ratio. *Compost Science Utilization* 10, pp. 16-28.

---

ELWELL D.L., BORGER D.C., BLAHO D.V., FAHRNI J.K., KEENER H.M., WILLET L.B. (2004). Changes in Concentrations of Malodorous Compounds During Controlled Aeration Composting. *Compost Science and Utilization* 12, pp 102-107.

---

EPSTEIN E.E. (1993). Neighbourhood and worker protection for composting facilities: Issues and actions, en Hoitink, H.A.J. and Keener, H.M., Science and Engineering of Composting: Design, Environmental, Microbiological and Utilization Aspects, 1993, pp. 319-338.

---

EPSTEIN K. (1997). The Science of Composting, en Technomic Publishing, Lancaster. European Community, Working Document- Biological Treatment of Biowaste 2nd draft, 2001.

---

ESAKKU S., SELVAM A., JOSEPH K., PALANIVELU K. (2005). Assessment of heavy metal species in descomponed municipal solid waste. *Chemical Speciation and Bioavailability*. 17, 95-101.

---

ESCALANTE N. (2005). Material Flow Simulation-based Life Cycle Assessment of Household Waste Management Strategies. Universität Stuttgart. Doktoranden Seminar. 2005.

---

GARCÍA-MINA J.M. (2006). Stability, solubility and maximum metal binding capacity in metal- humic complexes involving humic substances extracted from peat and organic compost. *Elsevier. Organic Geochemistry* 37. 1960-1972.

---

GONDAR D., FIOL S., LÓPEZ R., RAMOS M.A., ANTELO J.M., ARCE F. (2000). Determination of intrinsic complexation parameters for Cu and a soil fulvic acid by ion selective electrode. *Chemical Speciation and Bioavailability*, 12,89-96.

---

HAUG R. T. (1993). The Practical Handbook of Compost Engineering. Lewis Publishers, Boca Raton, USA.

---

HOUBA V., UITENBOGAARD J., LANGE-HARMSE A. (1991). Chemical composition of various plants species. International Plant-Analytical Exchange. Wageningen, Agricultural University.

---

---

IWEGBUEC., EMUHF., ISIRIMAHN., EGUNA. (2007). Fractionation, Characterization and speciation of heavy metals in composts and compost-amended soils. *African Journal of Biotechnology* 6, pp. 67-78.

---

JUSTE C. Y POMMEL. (1977). La valorisation agricole des déchets.I. Les compost urbain. Ministère de la culture et de L'Environnement. Ministère de l'Agriculture. 75p.

---

KABATA-PENDIAS A. AND PENDIAS H. (1985). Trace elements in soils and plants. Boca raton: CRC Press, Inc.

---

LIVENS F. R. (1991). Chemical reactions of metals with humic material. *Environmental Pollution*, 70, 183-208.

---

MANTOURA C., DICKSON A., RILEY P. (1978). The complexation of metals with humic materials in natural waters. *Estuar. Coast. Mar. Sci.* 6, pp. 387-408.

---

MENCH, M., VANGROSVELD J., CLIJSTERS H., LEPP, N. W., EDWARDS R. (2000). In situ metal immobilisation and phytostabilisation of contaminated soils. In *Phytoremediation of contaminated soils and water*; Terry, N.; Bañuelos, G.,; Eds. Lewis Publishers, CRC Press: Boca Raton, FL, pp. 323-358.

---

SÁNCHEZ- MONEDERO M.A., CAYUELA M. L., ROIG A. (2006). Bioaerosoles en el compostaje de residuos orgánicos. *Red Española de Compostaje*, pp, 181 –197.

---

SÁNCHEZ- MONEDERO, STENTIFORD E. I., MONDINI C. (2003). Biofiltration at composting facilities: effectiveness for bioaerosol control. *Environmental Science et Technology*. 37(18), 4299- 4303.

---

SENESI N. (1992). Metal-humic substance complexes in the environment. Molecular and mechanistic aspect by multiple spectroscopic approach. *Biogeochemistry of trace metals*. Lewis Publissers, Boca Ratón, pp. 429-496.

---

SPARKS D. L. AND SUAREZ D. L. (1991). Rates of Soil Chemical Processes, *Soil American Society of America*, Special publication 27.

---

STEVENSON, F.J. (1982). *Humus Chemistry: Genesis, Composition, Reactions*. John Wiley & Sons; New York, USA.

---

SUNDBERG C. (2005). Thesis improving Compost Process Efficiency by Controlling Aeration, Temperature and pH". Faculty of natural Resources and Agricultural Sciences. Department of Biometry and Engineering. Uppsala.

---

TESSIERA., CAMPBELL P.G. C., BISSON M. (1979). Sequential extraction procedure for the especiation of particulate trace metals. *Analyt. Chem.* 51, pp, 844- 851.

---

Veeken A. 1998. "Removal of heavy metals from biowaste".

---

WONG J.W. C. AND SELVAM A. (2005). Speciation of heavy metals during co-composting of sewage sludge with lime. In: *Elsevier Chemosphere*.

---

ZENNARO M.,CRISTOFORI F., FORMIGONI D., FRIGNANI F., PAVONI B. (2005). Heavy metal contamination in compost. A possible solution. *Annali di Chimica*, 95.

---

ZHENG- YEI, HSEU. (2004). Evaluating heavy metal, contents in nine composts using four digestion methods. *Bioresource Technology*, 95, 53-59.

---

## 7. Abreviaturas y nomenclatura



## 7.1 Abreviaturas

AA = Absorción Atómica.

APF = Pila de FORSU compostada en la Planta A.

APL = Pila-mezcla de lodos y poda compostada en la Planta A.

A.R. = Masa antes de Refino.

A.R.S = Masa Seca Antes de Refino.

BCR = Community Bureau of Reference.

BPF = Pila de FORSU compostada en la Planta B.

C = Compost.

Compost-S = Compost seco.

CPF = Pila de FORSU compostada en la Planta C.

CTF = Pila de FORSU compostada en túnel en la Planta C.

DPF = Pila de FORSU compostada en la Planta D.

DPTA = Ácido dietilentriaminopentaacético.

DTF1 = 1ª Pila de FORSU compostada en túnel en la Planta C.

DTF2 = 2ª Pila de FORSU compostada en túnel en la Planta C.

DTF3 = 3ª Pila de FORSU compostada en túnel en la Planta C.

EDARs = Estación Depuradora de Aguas Residuales.

EDTA = Ácido etilendiaminotetraacético.

E.T.S.I.A.M = Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos y de Montes.

F.C = Factor de Concentración.

F.O.R.S.U = Fracción Orgánica de los Residuos Sólidos Urbanos.

IC = metales en forma de Iones Intercambiables y Carbonatos.

ICP = Inductively Coupled Plasma.

LD = Límite de Detección.

LSD = Test de Diferencia Significativa.

M.I = Masa Inicial.

M.I.S = Masa Inicial Seca.

MO = metal ligado a materia orgánica.

MO<sub>in</sub> = Porcentaje de Materia Orgánica Inicial.

MO<sub>deg</sub> = Porcentaje de Materia Orgánica Degradada.

MO<sub>final</sub> = Porcentaje de Materia Orgánica Final.

ND = No detectable.

NM = Nitrógeno Mineral.

NTA = Ácido nitrilotriacético.

O = metal asociado a óxidos de hierro y manganeso.

PC = Personal Computer (Ordenador)

PEAD = Polietileno de Alta Densidad.

PEBD = Polietileno de Baja Densidad.

PET = Polietileno tereftalato.

PID = Proporcional Integral Derivativo.

PLC = Controlador Lógico Programable.

PRC = Planta de Recuperación y Compostaje.

PVC = Policloruro de vinilo.

Rechazo-S = Rechazo seco.

RI = Rendimiento Industrial.

Rs = metal ligado a la Fase Residual o litogénica.

---

RS = Rendimiento Seco.

---

RSUs = Residuos Sólidos Urbanos.

---

s.m.s = Sobre materia seca

---

Spp. = Especies.

---

Tn = Turba Negra.

---

Tr = Turba Rubia.

---

VECO = Velocidad de Consumo de Oxígeno.

---

WTT = Waste Treatment Technology.

---

## 7.2 Nomenclatura

### 7.2.1 Unidades de medida

---

bar = bares.

---

cm = Centímetro.

---

g = Gramos.

---

h = Hora.

---

kg = Kilogramos.

---

l = Litros.

---

m = Metros.

---

M = Molar.

---

mg = Miligramos.

---

min = Minutos.

---

mL = Mili litros.

---

mM = Mili moles.

---

mm = Milímetros.

---

N = Normalidad.

---

nm = Nanómetros.

---

ppb = Partes por billón.

---

ppm = Partes por millón.

---

rpm = Revoluciones por minuto.

---

T = Temperatura.

---

Tm = Toneladas.

---

v = Volumen.

---

μm = micrómetros.

---

### 7.2.2 Compuestos

---

Ag = Plata.

---

Cd = Cadmio.

---

CO<sub>2</sub> = Dióxido de carbono.

---

Cr = Cromo.

---

Cu = Cobre.

---

Fe = Hierro.

---

Hg = Mercurio.

---

N = Nitrógeno.

---

Ni = Níquel.

---

O = Oxígeno.

---

P = Fósforo

---

Pb = Plomo.

---

Zn = Zinc.

---

# un i Universidad Internacional de Andalucía A

