



CONAMA10
CONGRESO NACIONAL
DEL MEDIO AMBIENTE

COMUNICACIÓN TÉCNICA

Emisiones no controladas a la atmósfera en centros de tratamiento de RSU

Autor: Nely Carreras Arroyo

Institución: Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y
Tecnológicas (CIEMAT)

e-mail: nely.carreras@ciemat.es

Otros Autores: Rosario González Cascón (Investigadora del Dto. Medio Ambiente
del INIA)

RESUMEN

Dentro de una estación de tratamiento de RSU se generan gases que son emitidos a la atmósfera. Los gases producidos pueden ser bien de origen biogénico, por acción de microorganismos sobre los RSU, o bien debido a un proceso de difusión de compuestos volátiles y semivolátiles presentes en los residuos. El flujo de emisión de ambos grupos de compuestos, denominados emisiones no controladas (ENC), así como su composición química, está condicionado por las técnicas de deposición y conservación de los RSU, así como por los sistemas de recuperación de gases empleados en las estaciones de tratamiento. El objetivo de este estudio fue aportar información sobre la influencia de diferentes sistemas de gestión de plantas de tratamiento de RSU en la emisión de gases a la atmósfera. Para ello se seleccionaron dos estaciones de tratamiento de RSU activas, con diferentes sistemas de manejo junto con una tercera clausurada y revegetada. Durante dos años se llevó a cabo un muestreo de las emisiones en diferentes localizaciones dentro de cada estación: zonas de descarga de los RSU, naves de compostaje, celdas de almacenamiento de rechazo, pozos y zonas alejadas de focos de emisión. La caracterización de las emisiones de origen biogénico se llevó a cabo mediante repetidas campañas de muestreo activo de aire y análisis de cuatro grupos de compuestos: componentes mayoritarios (CH_4 , CO_2 , O_2 y N_2), compuestos orgánicos volátiles (hidrocarburos aromáticos, hidrocarburos halogenados y terpenos), siloxanos (L3, D3, D4 and D5) y otros (H_2S , CO). Simultáneamente se llevó a cabo un muestreo pasivo de aire mediante membranas semipermeables (SPDMs) con objeto de capturar las emisiones de PBTs a la atmósfera. En el poster se presentan los resultados de los análisis de PCBs, separados en dos grupos: los congéneres más abundantes (28, 52, 101, 138, 153 y 180) y los PCBs de acción similar a las dioxinas (77, 81, 105, 114, 118, 123, 126, 156, 157, 167, 169 y 189). Este trabajo ha sido financiado con el proyecto S-0505/AMB-0352.

INTRODUCCIÓN

En los centros de tratamiento de residuos sólidos urbanos (RSU), tanto en los procesos de reciclaje de materiales recuperables o de compostaje, como en los tratamientos finalistas de incineración o vertido controlado, se producen una serie de impactos ambientales negativos como presencia de olores, ruidos, diseminación de materiales ligeros y material particulado, entre otros, derivados de los distintos procesos físicos, químicos y/o microbiológicos a los que son sometidos los residuos cuando llegan a planta. Entre estos impactos, cabe destacar los derivados de las emisiones de gases a la atmósfera.

El compostaje es una técnica viable y muy extendida en nuestro país para tratar la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos (FORSU). Mediante el compostaje se consigue la estabilización de la materia orgánica biodegradable a la vez que se reduce la cantidad del residuo que se destinaría a incineración o depósito controlado. No obstante, como cualquier proceso industrial, el compostaje lleva asociada una serie de impactos ambientales, como los derivados de las emisiones gaseosas.

Por su parte, el trasiego de los residuos, tanto en los procesos de reciclado como de depósito en vertedero, producen también emisiones gaseosas a la atmósfera. En el caso del vertedero además, como consecuencia de la degradación anaerobia de la materia orgánica depositada en su interior, se produce una mezcla gaseosa conocida como biogás, constituida principalmente por metano (50-65%) y dióxido de carbono (30-45%) y otra serie de gases presentes en pequeñas proporciones entre los que destacan los compuestos orgánicos volátiles y el ácido sulfhídrico. El biogás debe ser extraído y aprovechado energéticamente o quemado para evitar que se escapen a la atmósfera gases perjudiciales para el medio ambiente.

En cuanto a la incineración de RSU, el principal impacto ambiental de estas instalaciones está asociado a las emisiones de contaminantes atmosféricos. Uno de sus principales inconvenientes es la generación de gases que tiene lugar en el proceso, algunos de los cuales son sumamente tóxicos y deben ser tratados para evitar los daños a la salud. Es conocida la emisión a la atmósfera de compuestos tóxicos volátiles (dioxinas y furanos) a través de las chimeneas de los hornos de incineración, si no se llevan a cabo medidas adecuadas en el tratamiento de los gases de combustión.

Por lo tanto, en este tipo de instalaciones se pueden producir emisiones atmosféricas perjudiciales para la salud y el medio ambiente, en mayor o menor medida, si no se produce una adecuada gestión de la instalación correspondiente.

En consecuencia, por lo anteriormente expuesto, los gases producidos en este tipo de instalaciones pueden ser bien de origen biogénico, por acción de microorganismos sobre los RSU, o bien debido a un proceso de difusión de compuestos volátiles y semivolátiles presentes en los residuos o generados durante el proceso de gestión. El flujo de emisión de ambos grupos de compuestos, denominados emisiones no controladas (ENC), así

como su composición química, está pues condicionado por el sistema de gestión empleado para los RSU.

OBJETIVO

El objetivo de este estudio ha sido aportar información sobre la influencia de diferentes sistemas de gestión de plantas de tratamiento de RSU en la emisión de gases a la atmósfera. Para ello se ha realizado un estudio de las emisiones reales en dos instalaciones de reciclado de residuos con producción de compost y deposición del rechazo en vertedero controlado. La principal diferencia entre ellas estriba en que una dispone de un vertedero de media densidad con pozos cerrados y extracción activa de biogás (A) y otra, de un vertedero de alta densidad, residuos comprimidos en balas, con pozos abiertos (B). Junto a ellas se estudió un vertedero ya clausurado y revegetado.

METODOLOGÍA

Zonas de estudio

Descripción de las plantas de RSU

Instalación A:

Planta de reciclaje de RSU. Cuenta con planta de separación y recuperación de materiales, nave para producción de compost, zona de acopio de compost, zona de biometanización y vertedero para depositar el rechazo de la planta de reciclaje. El vertedero está en activo y cuenta con pozos de captación de biogás con cabezales, conducciones y antorcha.

Instalación B

Planta de reciclaje de RSU de menor tamaño. Cuenta con planta de separación y recuperación de materiales, nave para producción de compost, zona de producción de balas, donde los rechazos de la planta de reciclaje son compactados (1 m^3 con 1.2 t/m^3) y atados con alambres prensados, y vertedero donde se depositan las balas de forma ordenada. Es por tanto un vertedero de alta densidad. El vertedero está en activo y dispone de pozos de captación pasivos, abiertos y en la mayoría de los casos rellenos de grava.

Determinaciones realizadas

Para llevar a cabo el estudio, se han realizado dos tipos de determinaciones: emisiones de origen biogénico y emisiones difusas de PCBs.

A. Caracterización y cuantificación de emisiones de origen biogénico

La caracterización de las emisiones de origen biogénico se llevó a cabo mediante repetidas campañas de muestreo y análisis del biogás generado en los vertederos controlados de las instalaciones estudiadas.

Puntos de Muestreo

Vertedero de la Instalación A

Se realizaron análisis en tres puntos de muestreo. A1, pozo cerrado situado en la parte superior de la plataforma de vertido, A5, conducción situada a la entrada de la antorcha de seguridad y A9, pozo cerrado situado en zona perimetral. La Figura 1 muestra las imágenes de los tres puntos de muestreo descritos.



Fig. 1: Imágenes de los puntos de muestreo correspondientes al vertedero de la Instalación A

Vertedero de la Instalación B

Se realizaron muestreos en tres pozos (B1, B2 y B3) situados en la plataforma de vertido. Al ser un vertedero de balas de alta densidad los pozos no estaban cerrados, permanecían abiertos. Los pozos B2 y B3 estaban rellenos con grava, mientras que el B1 no tenía ningún tipo de relleno. La Figura 2 muestra las imágenes de los puntos de muestreo.



Fig. 2: Imágenes de los puntos de muestreo correspondientes al vertedero de la Instalación B

Muestreo y determinaciones analíticas

En los puntos de muestreo seleccionados, se han realizado análisis de cuatro grupos de compuestos: componentes mayoritarios (CH_4 , CO_2 , O_2 y N_2), compuestos orgánicos volátiles (hidrocarburos aromáticos, hidrocarburos halogenados y terpenos), siloxanos (L3, D3, D4 y D5) y otros (H_2S , CO).

Compuestos mayoritarios

En la determinación de los componentes mayoritarios se ha utilizado el analizador por Infrarrojos GA 2000 PLUS (Geotechnical Instruments), específicamente diseñado para el análisis de biogás. El equipo cuenta, entre otras, con sondas internas con los rangos de medida siguientes: $\text{O}_2 = 0 - 25 \%$, $\text{CO}_2 = 0 - 100 \%$, $\text{CH}_4 = 0 - 100 \%$.

Para determinar el contenido de compuestos mayoritarios, se hizo pasar el biogás por un filtro para eliminar la humedad y, a continuación, a través del analizador por Infrarrojos GA 2000 PLUS (Geotechnical Instruments), hasta la estabilización de la medida, para lo cual el equipo dispone de una pantalla que permite ver "in situ" las concentraciones de los compuestos. Una vez alcanzada la estabilización los valores eran grabados y almacenados en el propio equipo.

Compuestos orgánicos volátiles (VOCs)

Para determinar el contenido de VOCs se hizo pasar el biogás durante un tiempo determinado y a un flujo prefijado a través de cartuchos que contenían un compuesto adsorbente. En el laboratorio, la muestra fue extraída y analizada por técnicas cromatográficas (CG/MS). Los VOCs cuantificados fueron: α -pineno, tolueno, p-cimeno, etilbenceno, m- y p-xilenos, benceno, β -pineno, limoneno, o-xileno, tetracloroetano, propilbenceno, tricloroetano, 1,3,5-trimetilbenceno, isopropilbenceno, 1,4-diclorobenceno, 1,2,4-trimetilbenceno, estireno, sec-butilbenceno y butilbenceno.

Siloxanos

La determinación del contenido de siloxanos se llevó a cabo haciendo pasar al biogás durante un tiempo determinado y a un flujo prefijado a través de cartuchos que contenían una sustancia adsorbente. La cuantificación de los compuestos se realizó en el laboratorio por técnicas cromatográficas (GC/MS). Los siloxanos cuantificados en los puntos de muestreo fueron: hexametilciclotrisiloxano (D3), octametiltrisiloxano (L3), octametilciclote-trasiloxano (D4) y decametilciclopentasiloxano (D5).

Monóxido de carbono y sulfuro de hidrógeno

La determinación de los componentes traza CO y H₂S se ha llevado a cabo de forma similar a la expuesta para los compuestos mayoritarios. Se ha utilizado igualmente el analizador por Infrarrojos GA 2000 PLUS (Geotechnical Instruments), ya que este equipo también dispone de sondas internas para medir monóxido de carbono y sulfuro de hidrógeno, con los siguientes rangos de medida: CO = 0-2000 ppm y H₂S = 0-200 ppm. Asimismo, el equipo cuenta con sondas externas para los casos donde las concentraciones de estos compuestos sean superiores al límite de la sonda interna del equipo.

B. Caracterización y cuantificación de emisiones difusas de PCBs

Paralelamente al muestreo de biogás, se llevó a cabo un muestreo pasivo de aire en diferentes localizaciones de las plantas de tratamiento para conocer las emisiones difusas de PBTs, concretamente PCBs, asociadas a los diferentes sistemas de procesado de los RSU en las plantas de tratamiento.

Puntos de muestreo

Durante dos años se ha llevado a cabo un muestreo pasivo de emisiones en diferentes localizaciones dentro de cada instalación. Para este muestreo se utilizó como dispositivo de captación de PBTs los denominados “membranas semipermeables (SPMDs)”.

Instalación A

Se colocaron membranas en ocho puntos de muestreo: pared lateral de pozo situado en la parte superior de la plataforma de vertido (A1), valla perimetral de la plataforma (A2, A3, A4), exterior de la antorcha (A5), área de almacenaje de compost (A6), zona exterior instalaciones (A7), área de descarga de RSU (A8).

Instalación B

Se colocaron membranas en nueve puntos de muestreo, sin embargo no todas fueron recuperadas al final de las campañas de muestreo. Se pudieron recoger las que estaban situadas en: pozo abierto en celda de vertido sin relleno de grava (B1), dos pozos

abiertos en la celda de vertido con relleno de grava (B2 y B3), área de descarga de los RSU (B5), área de acceso al centro de RSU (B6), interior de la nave de compostaje (B7) y a 0,5 m sobre el filtro del aire procedente de la nave de compostaje consistente en una capa gruesa de cortezas de pino (B4).

Antiguo vertedero revegetado (background)

Se colocaron 5 membranas distribuidas entre el arbolado, soportadas en la copa de 5 árboles a una altura de 1,5-2 metros por encima de la superficie del suelo.

Muestreo y determinaciones analíticas

Entre los diferentes tipos de muestreadores pasivos de aire utilizados para el muestreo de PBTs por su habilidad para capturar compuestos lipofílicos (discos PUF, resinas XAD, POGs, POCIS, gomas de silicona, PSDs etc.), se seleccionaron las membranas semipermeables (SPMDs), ya que el mecanismo de retención de estos compuestos en los SPMDs se asemeja el mecanismo de difusión de PBTs a través de biomembranas y, por tanto, tienen mayor significado ecotoxicológico.

Los dispositivos SPMDs están compuestos por una membrana tubular plana de polietileno de baja densidad, rellena de una grasa de síntesis muy pura, la trioleína. Para el muestreo se prepararon SPMDs de 31,5*2 cm² de superficie de absorción, con una relación superficie/trioleína de 460 cm²/ml. Las membranas se cerraron mediante sellado térmico y se mantuvieron a -20°C hasta su colocación en campo. Se montaron dentro un cilindro de malla plástica (0,5*0,5 cm) para su utilización en las campañas de muestreo. El periodo de exposición de las SPMDs fue de 6 meses.

La extracción de los compuestos de interés fue llevada a cabo mediante diálisis (2 veces, con 170 mL de hexano durante 24 h cada vez). Las muestras se fortificaron con los congéneres de PCBs 29 y 155. Los extractos se evaporaron en rotavapor, y se llevó a cabo un ataque con ácido sulfúrico. La fase orgánica decantada se filtró con Na₂SO₄, se evaporó casi a sequedad, mediante evaporación por centrifugación a vacío (40°C y 10 mbar, GENEVAC). Se recuperó en 1 mL de patrón interna (40 ng de 3'-fluor,2,4,4' triclorobifenil en isoctano) y se centrifugó.

En los extractos se cuantificaron los siguientes congéneres: los seis más abundantes en el medio ambiente denominados PCBs indicadores (i-PCBs) 28, 52, 101, 138, 153 y 180 y los doce congéneres de PCBs que presentan propiedades toxicológicas similares a las de las dioxinas (dl-PCBs): 77, 81, 105, 114, 118, 123, 126, 156, 157, 167, 169 y 189. Para la determinación de estos compuestos se utilizó un cromatógrafo de gases con detector de masas de triple cuadrupolo (Waters® Quattro micro GCT). La cuantificación de los congéneres de PCBs estudiados se llevó a cabo con el software Quanlynx Application Manager (Waters).

RESULTADOS OBTENIDOS

A. Emisiones de origen biogénico.

Compuestos mayoritarios

Los resultados obtenidos de los compuestos mayoritarios analizados en el biogás extraído de los puntos de muestreo de las plantas A y B de tratamiento de RSU se muestran en la Figura 3.

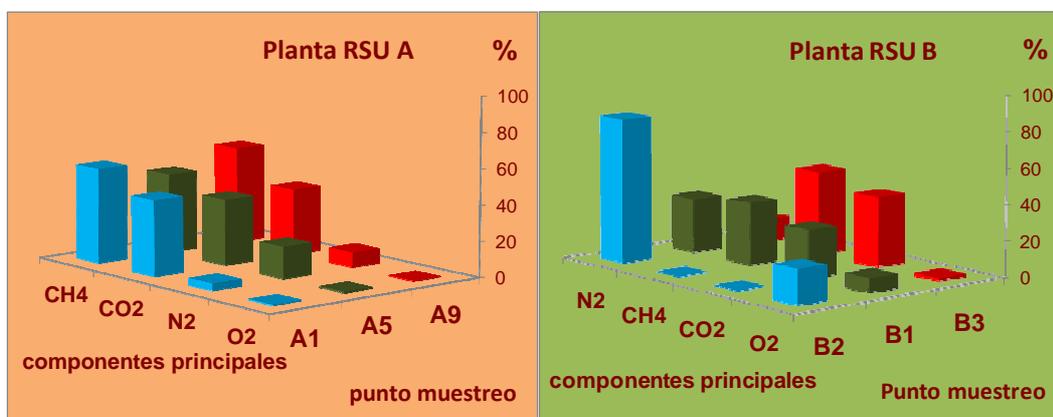


Fig. 3: Concentración de compuestos mayoritarios obtenida en los puntos de muestreo de las plantas de tratamiento A y B. A1, pozo cerrado situado en la parte superior de la plataforma de vertido, A5, conducción situada a la entrada de la antorcha de seguridad, A9, pozo cerrado situado en zona perimetral; B1, B2 y B3 pozos situados en la plataforma de vertido, el primero (B1) sin relleno de grava

Como se puede observar el biogás es más homogéneo en el vertedero A con una concentración de metano comprendida entre el 44,5% (A5) y el 54,3% (A9). En el vertedero B, sin embargo, las variaciones son más significativas, observándose una concentración de metano comprendida entre el 0,1% (B2) y el 46,6% (B3). Cabe destacar la importante presencia de metano en dos de los puntos estudiados del vertedero B, en concreto el B1 (34,8%) y el B3 (46,6%), ya que en principio, una de las razones de hacer un vertedero de balas, es por la reducción en la producción de metano esperada con este sistema, razón por la cual los pozos no se cierran. En caso del vertedero A la presencia de metano, dadas sus características, está dentro de los rangos esperados.

Siloxanos

La Figura 4 muestra los resultados obtenidos de los análisis de siloxanos realizados en el biogás extraído de los puntos de muestreo de las plantas A y B de tratamiento de RSU.

Se observa una mayor concentración de siloxanos en los puntos de muestreo del vertedero A frente los resultados obtenidos en el vertedero B donde la presencia de estos compuestos es mínima, siendo en todos los casos inferior a $0,04 \text{ mg/m}^3$, en concreto el L3 no ha sido detectado por encima de los límites de detección del equipo ($<0,005 \text{ mg/m}^3$) en ninguno de los tres puntos analizados. Por otra parte, de los siloxanos cuantificados, se observa una mayor presencia de D4 y D5 frente a L3 y D3. Cabe destacar la elevada concentración de D4 encontrada en el punto de muestreo A1 ($0,68 \text{ mg/m}^3$), más de dos veces superior al siguiente valor, A5 ($0,29 \text{ mg/m}^3$).

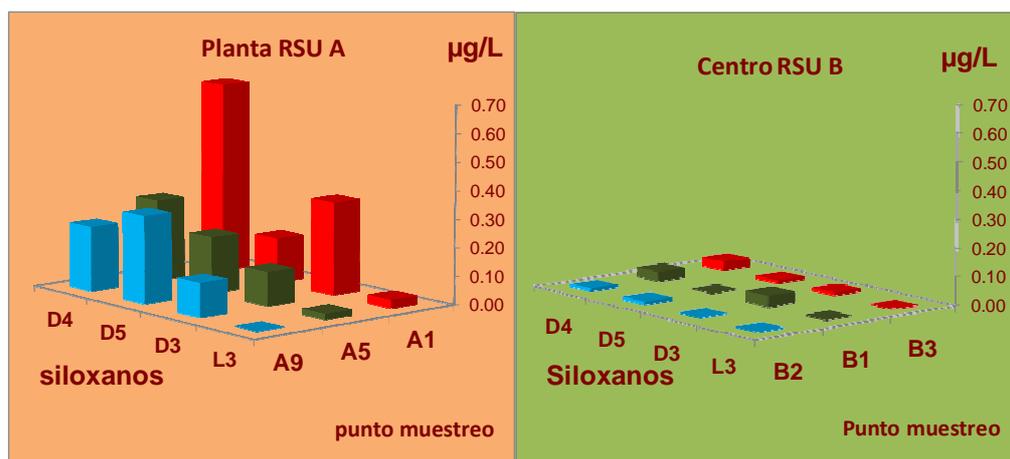


Fig. 4: Concentración de siloxanos obtenida en los puntos de muestreo de las plantas de tratamiento A y B. D3 (hexametilciclotrisiloxano), D4 (octametilciclotetrasiloxano), D5 (decametilciclopentasiloxano) y octametiltrisiloxano (L3). Los puntos de muestreo son los mismos de la figura 3

Compuestos orgánicos volátiles

Se detecta mayor número de VOCs y en mayor concentración en el vertedero de la planta de tratamiento A. En este vertedero se han cuantificado un total de 16 compuestos con valores superiores a $0,02 \text{ mg/m}^3$. Se observa una similitud en la composición en los tres puntos estudiados diferenciándose en la concentración de los compuestos, siendo ésta superior en el punto A1, seguido del A5 y éste del A9. Los compuestos que están presentes en mayor concentración en los tres puntos de muestreo son α -pineno y tolueno. Los valores obtenidos son: $141,2 \text{ mg/m}^3$ y $110,5 \text{ mg/m}^3$, respectivamente en el punto A1, $56,4 \text{ mg/m}^3$ y $50,7 \text{ mg/m}^3$, respectivamente en el punto A5 y $1,8 \text{ mg/m}^3$ y $0,9 \text{ mg/m}^3$, respectivamente en el punto A9. En lo que respecta al vertedero de la planta de

tratamiento B, las concentraciones son sensiblemente inferiores, pudiéndose cuantificar únicamente el benceno ($0,09 \text{ mg/m}^3$) en el punto B2, ocho compuestos en el B1, siendo el tolueno el de mayor concentración ($0,15 \text{ mg/m}^3$) y 17 en el B3, siendo tolueno ($8,66 \text{ mg/m}^3$), α -pineno ($6,75 \text{ mg/m}^3$) y limoneno ($5,75 \text{ mg/m}^3$) los que están presentes en mayor concentración. En la Figura 5 se muestran los resultados obtenidos del análisis de estos compuestos en las plantas de tratamiento A y B.

Por otra parte, se detecta la presencia de compuestos organohalogenados tales como tricloroetano, tetracloroetano y 1,4-diclorobenceno únicamente en el punto B3 del vertedero de la planta B en concentraciones de $1,20 \text{ mg/m}^3$, $0,10 \text{ mg/m}^3$ y $0,03 \text{ mg/m}^3$, respectivamente. Respecto al vertedero de la planta A se detecta presencia de tricloroetano y tetracloroetano en los puntos A5 ($1,6 \text{ mg/m}^3$ y $1,8 \text{ mg/m}^3$) y A1 ($2,7 \text{ mg/m}^3$ y $3,7 \text{ mg/m}^3$) y de 1,4-diclorobenceno en los puntos A5, A1 y A9, con valores de $0,04 \text{ mg/m}^3$, $0,7 \text{ mg/m}^3$ y $0,02 \text{ mg/m}^3$, respectivamente.

Monóxido de carbono y sulfuro de hidrógeno

La Tabla 1 muestra las concentraciones obtenidas de H_2S y CO en los puntos de muestro de las plantas A y B de tratamiento de residuos. Como se puede observar, las concentraciones de sulfuro de hidrógeno son significativamente mayores en los puntos de muestreo de la planta de tratamiento A. No ocurre lo mismo con las concentraciones de CO, ya que éstas son del mismo orden de magnitud en todos los puntos.

Tabla 1: Concentraciones de H_2S y CO obtenidas en los puntos de muestro de las plantas A y B de tratamiento de residuos

Punto de muestreo	H_2S (ppm)	CO (ppm)
A5	776	3
A1	783	4
A9	779	11
B1	0	4
B2	86	9
B3	2	8

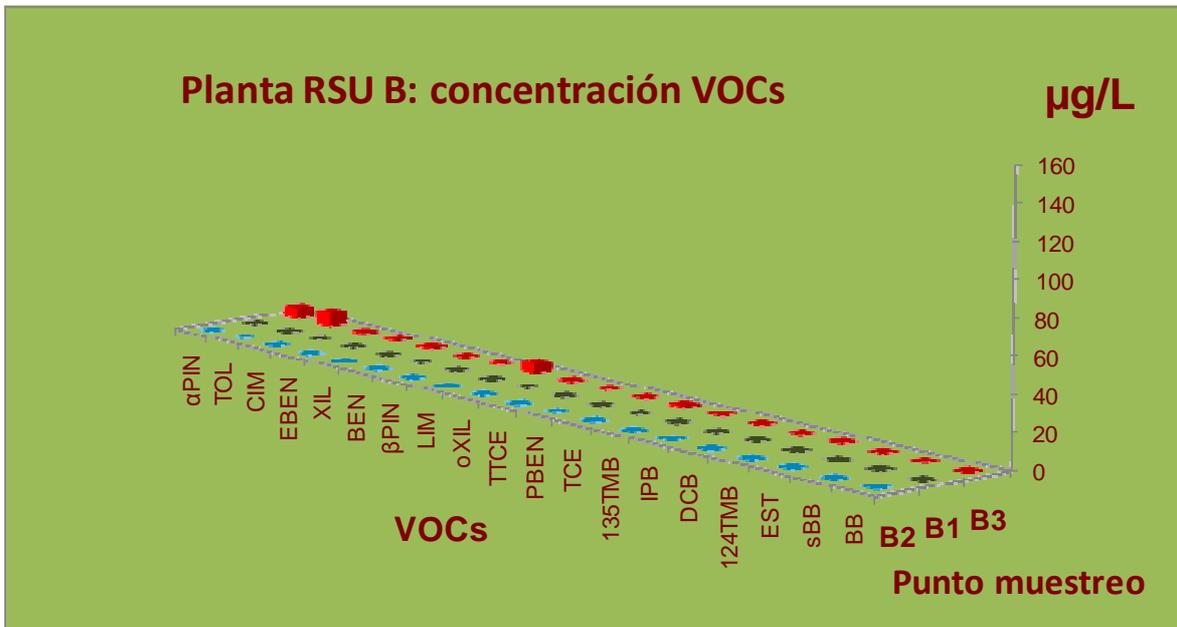
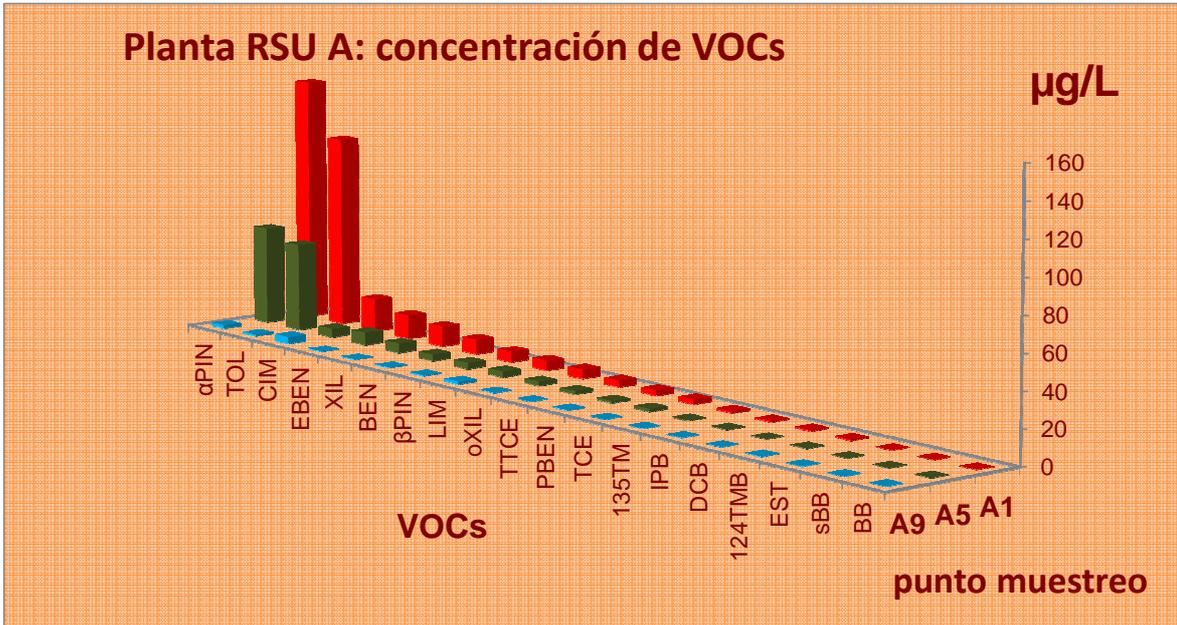


Fig. 5 : Concentración de VOCs en los puntos de muestreo de las plantas de tratamiento A y B: α-pineno (αPIN), tolueno (TOL), p-cimeno (CIM), etilbenceno (EBEN), m- y p-xilenos (XIL), benceno (BEN), β-pineno (βPIN), limoneno (LIM), o-xileno (oXIL), tetracloroetano (TTCE), propilbenceno (PBEN), tricloroetano (TCE), 1,3,5-trimetilbenceno (135TM), isopropilbenceno (IPB), 1,4-diclorobenceno (DCB), 1,2,4-trimetilbenceno (124TMB), estireno (EST), sec-butilbenceno (sBB) y butilbenceno (BB). Los puntos de muestreo son los mismos de la Figura 3.

B. Emisiones difusas de PCBs

En todos los dispositivos expuestos en campo se ha detectado la presencia de PCBs

En la planta de tratamiento A, de media densidad, los contenidos totales de PCBs en las membranas oscilan entre 13,5 y 45,2 ng/SPMD (tabla 2). Los PCBs indicadores tienen una presencia mayoritaria en las membranas representando entre el 88 y el 95 % del total cuantificado. Las concentraciones máximas se detectan en la valla perimetral que rodea la plataforma de vertido, en la zona de almacenamiento del compost y en el área de descarga de los RSU. Dentro de los i-PCBs los más abundantes son los más ligeros tri- y tetraclorados (CB-28 y CB-52) y un pentaclorado (CB-101). Dentro del grupo de los dl-PCBs, solo cuatro de los doce congéneres analizados han sido detectados: el tetraclorado CB-77 y los pentaclorados CB-118, CB-105 y CB-123, este último en la mayoría de los dispositivos por debajo del límite de cuantificación.

Tabla 2: Concentración de PCBs en ng/SPMDs en los puntos de muestreo de la planta de tratamiento de residuos de media densidad con pozos cerrados y extracción activa de biogás (A). “n.d.” (no detectado)

Punto	Situación	i-PCBs						dl-PCBs											total		
		28	52	101	138	153	180	77	81	105	114	118	123	126	156	157	167	169		189	
A1	cabezal pozo parte superior plataforma	9,3	2,5	3,5	2,8	3,3	0,8	0,9	n.d.	0,5	n.d.	0,6	0,2	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	24,2
A2	valla perimetral plataforma vertido	17,8	6,9	6,4	4,6	5,8	1,2	0,9	n.d.	0,5	n.d.	0,6	0,4	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	45,2
A3	valla perimetral plataforma vertido	11,0	7,2	8,2	4,8	5,6	1,2	1,7	n.d.	0,7	n.d.	0,9	0,3	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	41,5
A4	valla perimetral plataforma vertido	7,0	2,8	5,2	4,2	5,0	1,2	1,6	n.d.	0,5	n.d.	0,5	0,4	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	28,5
A5	exterior antorcha	5,0	1,2	2,3	1,8	2,4	0,6	0,7	n.d.	0,2	n.d.	0,2	0,1	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	14,3
A6	área almacenaje compost	5,5	2,0	6,3	5,1	6,9	1,4	1,5	n.d.	0,6	n.d.	0,9	0,3	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	30,3
A7	zona exterior instalaciones	1,7	0,4	2,6	2,6	3,3	1,0	1,1	n.d.	0,3	n.d.	0,4	0,3	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	13,5
A8	área descarga RSU	9,4	2,4	3,3	3,1	4,1	1,4	1,1	n.d.	0,4	n.d.	0,5	0,3	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	26,0

En la planta de tratamiento B, de alta densidad, se han detectado las concentraciones máximas de PCBs de las tres zonas de estudio (tabla 3). Las concentraciones totales de PCBs duplican el rango de las de la planta A y están comprendidas entre 6,9 y 109,6 ng/SPMD. De la misma forma que en el centro de RSU A, los PCBs indicadores representan el porcentaje mayor, que en este caso oscila entre un 80 y un 98 % del total. Las concentraciones son máximas en dos puntos de muestreo: el pozo abierto sin relleno de grava (109,6 ng PCBs/SPMD) y la planta de compostaje, tanto en el interior (96,6 ng PCBs/SPMD), como el aire de la zona por encima del filtro de esta planta (41,4 y 62,9 ng PCBs/SPMD). Las concentraciones en los pozos con relleno de grava se reducen un 80 % (puntos B2 y B3) con respecto al pozo abierto B1. En esta planta, por tanto, los focos de emisión están localizados en la planta de compostaje y los pozos abiertos sin relleno.

Tabla 3: Concentración de PCBs en ng/SPMDs en los puntos de muestreo de la planta de tratamiento de residuos de alta densidad, con residuos comprimidos en balas y pozos abiertos sin extracción activa de biogás (B). “n.d.” (no detectado)

Punto	Situación	i-PCBs						dl-PCBs											total	
		28	52	101	138	153	180	77	81	105	114	118	123	126	156	157	167	169		189
B1	pozo sin relleno de canto rodado	59,0	24,6	2,4	4,8	7,5	1,2	0,8	n.d.	0,7	3,4	1,9	3,7	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	109,6
B2	pozo con relleno de canto rodado	5,3	2,6	1,3	0,6	0,8	0,2	0,4	n.d.	0,2	n.d.	11,3								
B3	pozo con relleno de canto rodado	7,2	2,8	1,7	1,0	1,4	0,3	0,4	n.d.	n.d.	0,4	0,5	0,4	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	15,8
B4-1	sobre capa filtrante aire planta compost.	26,9	8,0	3,4	0,6	1,7	0,3	0,4	n.d.	0,2	0,4	0,5	0,3	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	41,4
B4-2	sobre capa filtrante aire planta compost.	34,4	14,7	8,4	1,4	2,6	0,2	0,9	n.d.	0,2	n.d.	0,3	n.d.	62,9						
B7	interior planta compostaje	57,5	25,4	7,2	1,7	2,6	0,4	0,6	n.d.	0,5	n.d.	0,9	n.d.	96,6						
B5	área de descarga RSU	2,4	1,3	1,6	1,4	2,2	0,9	0,5	n.d.	0,2	0,2	0,4	n.d.	10,9						
B6	área acceso al centro RSU	1,5	0,7	1,1	0,9	1,2	0,2	0,4	n.d.	0,3	0,2	0,5	n.d.	6,9						

En los dispositivos situados en el antiguo vertedero reforestado los contenidos de PCBs son mínimos (tabla 4) y muy homogéneos, reflejando la ausencia de focos de emisión. El rango de contenidos totales oscila entre 5,5 y 6,8 ng/SPMDs. Las proporciones entre los dos grupos de congéneres i-PCBs y dl-PCBs son muy similares a las de los anteriores plantas de RSU. Manteniendo los congéneres más ligeros (CB-28 y CB-52) las concentraciones máximas por dispositivo.

Tabla 4: Concentración de PCBs en ng/SPMDs en los puntos de muestreo de un antiguo vertedero clausurado y reforestado (Background). “n.d.” (no detectado)

Punto	Situación	i-PCBs						dl-PCBs											total	
		28	52	101	138	153	180	77	81	105	114	118	123	126	156	157	167	169		189
C1	copa de árbol 1	2,7	1,4	0,7	0,3	0,6	0,1	0,3	n.d.	0,1	n.d.	0,1	n.d.	6,1						
C2	copa de árbol 2	1,6	0,7	1,4	0,8	0,9	0,1	0,3	0,1	0,2	n.d.	0,3	n.d.	6,3						
C3	copa de árbol 3	2,5	1,2	1,1	0,5	0,8	n.d.	0,3	n.d.	0,1	n.d.	6,3								
C4	copa de árbol 4	2,7	1,1	0,6	0,2	0,7	0,1	0,3	0,1	n.d.	5,5									
C5	copa de árbol 5	2,9	1,1	1,0	0,4	0,8	0,2	0,3	0,1	n.d.	6,8									

DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Emisiones de origen biogénico

El estudio de los gases generados en los vertederos se hace necesario desde el punto de vista medioambiental ya que producen distintos tipos de alteraciones en la zona, entre los que destacan: malos olores, explosiones e incendios, alteraciones en la vegetación y contaminación atmosférica. Existen estudios en vertederos de distintos países europeos y Estados Unidos donde se han identificado más de 100 tipos diferentes de VOCs, la mayoría de los cuales son tóxicos y cancerígenos cuando están presentes en altas concentraciones. Sin embargo los resultados obtenidos por investigadores en vertederos europeos o americanos no son extrapolables a los vertederos españoles, ya que la producción y composición del biogás está influenciada por multitud de factores que varían de unos países a otros e incluso de una zona a otras dentro de un mismo país. Entre estos factores se encuentran: la composición de la masa de vertido, la edad del vertedero, las condiciones climatológicas de su emplazamiento, el sistema de tratamiento

empleado, etc. La composición del biogás difiere por tanto de un vertedero a otro en base a estos factores, de mayor o menor influencia en función del caso analizado.

El creciente interés por la contaminación del aire debida a productos gaseosos ha motivado que se hayan realizado múltiples investigaciones sobre los compuestos traza del biogás de vertedero. En general, los VOCs observados en las muestras analizadas son muy similares, sin embargo, existen grandes diferencias relativas a la concentración, lo que refleja las distintas velocidades y mecanismos de descomposición del residuo.

Por otro lado, se comprueba cómo la composición del biogás de un vertedero no es homogénea dentro del mismo, ya que la antigüedad de los residuos de la zona analizada puede diferir. La composición del biogás obtenida en los puntos del vertedero de la planta A no ha sido muy diferente, sin embargo, es importante destacar la gran variación que ha existido en los puntos analizados en el vertedero de la planta B.

Por otra parte, aunque es sabido que la compactación ralentiza la degradación de la materia orgánica, es decir, se detiene más en el tiempo la producción de biogás, circunstancia principal por la que se ideó el vertedero de balas, esta circunstancia no se ha confirmado respecto a las concentraciones de metano obtenidas, ya que, en contra de lo previsto, éstas han sido superiores a lo esperado en dos de los puntos del vertedero de la planta B y del mismo orden de magnitud de las obtenidas en los puntos del vertedero de la planta A. Esta circunstancia es de gran relevancia por el hecho de que, si bien en el vertedero de la planta A hay una mayor producción de biogás, éste es extraído y quemado en una antorcha para prevenir emisiones directas a la atmósfera; mientras que en el vertedero B, aunque la producción de biogás es menor, éste se emite directamente a la atmósfera debido a que los pozos de extracción están abiertos.

Respecto a los VOCs, los compuestos aromáticos son también componentes alarmantes que pueden aparecer en el biogás de vertedero. Uno de los compuestos aromáticos que aparece con cierta frecuencia es el benceno. Este compuesto se ha detectado en los seis puntos muestreados, si bien su presencia es más significativa en el vertedero de la planta A. Con respecto a los compuestos orgánicos halogenados, es un grupo de compuestos siempre presentes en el biogás emitido en vertederos, sin embargo no aparecen, en general, en el inicio de la descomposición del residuo. Se han cuantificado el tricloroetano, el tetracloroetano y el 1,4-diclorobenceno, este último en los tres puntos de vertedero de la planta A y en el B3.

El sulfuro de hidrógeno y los compuestos organosulfurados, normalmente mercaptanos, representan probablemente los compuestos más tóxicos y malolientes encontrados en el biogás de vertedero. Las concentraciones de sulfuro de hidrógeno son particularmente preocupantes debido a su elevado poder corrosivo y a las emisiones de SO₂ que resultan cuando se quema. Si la tierra de cobertura tiene cantidades importantes de sulfatos, entonces la producción de sulfuro de hidrógeno puede llegar a ser muy significativa. Este ha sido el motivo por el cual el vertedero de la planta A tiene un elevado contenido de este gas.

Emisiones difusas de PCBs

Los PCBs son compuestos orgánicos persistentes cuya síntesis industrial cesó en el último cuarto del siglo pasado. La elevada estabilidad fotoquímica y térmica de esta familia de compuestos, condiciona su persistencia en el medio ambiente. Su presencia en el medio ambiente está ligada principalmente a la actividad antrópica (Lohmann et al. 2007). Una de las rutas principales de enriquecimiento de COPs en suelo es el transporte atmosférico y su deposición en forma gaseosa, seca y húmeda. De acuerdo con ello y según los resultados del muestreo en aire realizado a escala mundial en el estudio GAPs (The Global Atmospheric Passive Sampling) en el año 2005, los PCBs ocupan el segundo lugar entre los COPs más abundantes en la atmósfera terrestre (Pozo. et al. 2009), asociados principalmente a la cercanía de núcleos urbanos y zonas industriales. En el aire se encuentran en fase gaseosa, siendo mayoritarios en esta fase los PCBs más ligeros, (Gouin, et al. 2002; García-Alonso and Pérez-Pastor 2003; Cindoruk and Tasdemir 2007), mientras que los más pesados se encuentran generalmente asociados a la fase particulada (van Drooge, et al. 2001; García-Alonso, Pérez-Pastor et al. 2002).

Entre 1-2 millones de toneladas de PCBs se fabricaron a nivel mundial entre 1954-1988, utilizándose principalmente en el hemisferio norte. En Europa se ha estimado la fabricación anual en 700.000 t (DEMEX 2003). Las mezclas industriales contienen entre 60-100 congéneres individuales (Hutzinger et al. 1974). Los productos comercializados por la industria contienen un pequeño porcentaje de dl-PCBs coplanares con factor de equivalencia tóxico (TEF) semejantes a las dioxinas. En cada producto comercial de mezclas de PCBs las proporciones de congéneres individuales varían, pero la proporción total PCB/PCB-TEF es de aproximadamente 10^5 a 10^6 (Falandysz et al., 2004; Ishikawa et al. 2007).

Los usos de los PCBs en España han sido muy variados. Se estima que la mayor cantidad se encuentra en la actualidad en transformadores, condensadores y otros equipos que hayan continuado utilizando PCBs como dieléctricos. El Plan Nacional de Descontaminación y Eliminación de PCBs, PCTs y Aparatos que los Contengan (2001-2010) estima que en el Estado español deben existir 210.000 toneladas de PCBs, en aparatos con PCBs, aceites dieléctricos y aparatos potencialmente contaminados con PCBs (Resolución_7512 2001). Aproximadamente un 30 % de los PCBs de fabricación industrial se han emitido al medio ambiente, pero el resto aún continúa en equipamientos y productos de larga vida. Por tanto, aunque la producción de estos compuestos se paralizó a finales de los años 80, la emisión al medio ambiente vía emisiones y desechos se mantiene en niveles importantes (BIPRO 2005).

En los seres vivos la vía principal de exposición se produce a través de la dieta. La agencia europea EFSA (EFSA, 2010) ha emitido recientemente un informe del contenido de estos compuestos en alimentos. En el estudio realizado en un amplio grupo de alimentos, se han detectado cantidades cuantificables de i-PCBs en el 86 % de los productos de consumo diario analizados. Los PCBs indicadores se encuentran en una

proporción cinco veces mayor que los dl-PCBs. Los congéneres hexaclorados CB-138 y CB-153 son los mayoritarios en alimentos, representado el 50 % del total del grupo de los i-PCBs presentes en estas matrices.

Los RSU contienen por tanto productos tanto de origen industrial como orgánicos que pueden tener una carga residual de PCBs. Su persistencia y volatilidad favorecen su emisión a la atmósfera tanto durante los procesos de gestión de los RSU como una vez que éstos han sido depositados. Los análisis de los SPMDs utilizados en este estudio revelan la presencia de estos compuestos en el aire de los Centros de RSU estudiados. Además confirman la predominancia de los congéneres denominados indicadores frente a los dl-PCBs, junto con la preponderancia de los congéneres más ligeros y por ello los más volátiles. Especialmente el congéner CB-28 que representa un 37 % de la concentración total de PCBs en todos los puntos de muestreo estudiados.

Las zonas estudiadas, que emiten una mayor cantidad de PCBs a la atmósfera, son las plantas de producción de compost y en segundo lugar las zonas de manipulación de los RSU: área de descarga y el área circundante de la plataforma de descarga. Una vez sellado y revegetado el vertedero, las emisiones se reducen a valores mínimos.

El sistema de Centro de RSU de alta densidad, en que el rechazo se deposita en balas, produce elevadas emisiones directas de PCBs a la atmósfera, si los pozos de ventilación no disponen de sistemas de filtrado del biogás, concretamente relleno de grava. Este relleno reduce en un 80 % dichas emisiones.

El material compostado en las plantas de tratamiento de RSU se compone de dos fases principales: materia orgánica y material inerte, ambas de tamaño inferior a 5 cm². Es la fracción de menor tamaño de los RSU, lo que implica que es también la de mayor superficie específica. Una vez en la planta de compostaje, este material de elevada superficie específica, sufre dos procesos que facilitan la liberación de compuestos volátiles presentes en él, como es el caso de los PCBs: el aumento de temperatura durante el proceso de compostaje y el volteo y trasiego hasta su embalaje final. Este proceso produce un empobrecimiento de estos compuestos en el compost y un flujo de los mismos hacia la atmósfera. Los análisis de los SPMDs situados en el interior y exterior de la planta de compostaje B y en los alrededores de la de la A, confirman la emisión difusa de estos compuestos al aire.

En la planta de tratamiento B, que dispone de un filtro del aire procedente de la planta de compostaje, la capa de cortezas de pino utilizada como filtro, no ejerce una acción filtrante de estos compuestos suficientemente eficaz, ya que, el aire inmediatamente por encima de la capa de cortezas, tiene una concentración media de PCBs un 46 % inferior a la del aire del interior de la planta, produciéndose, por tanto, emisiones directas aun elevadas de estos compuestos a la atmósfera. El canto rodado utilizado en el relleno de los pozos abiertos parece tener una eficacia considerablemente superior en la reducción de estas emisiones (80%).

Estos resultados deberían confirmarse ampliando el muestreo a un mayor número de plantas de tratamiento de RSU.

CONCLUSIONES

Las técnicas de tratamiento aplicadas a los RSU, así como a los gases generados en las plataformas de vertido ejercen una influencia notable en las emisiones no controladas a la atmósfera en las plantas estudiadas

Se han detectado emisiones directas a la atmósfera de biogás y PCBs en la planta de tratamiento de RSU que dispone de vertedero de balas con pozos abiertos. Las emisiones de PCBs se reducen considerablemente mediante el uso de filtros del biogás emitido en los pozos de ventilación de la plataforma de vertido.

El proceso de producción de compost genera emisiones considerables de PCBs a la atmósfera. La instalación de filtros eficaces para el aire emitido por la planta de compostaje, reduciría notablemente estas emisiones.

Se han detectado también, aunque en menor intensidad, emisiones difusas a la atmósfera de PCBs en la planta de tratamiento de RSU que dispone de sistema de recuperación de gases

BIBLIOGRAFIA

Barlaz M. and Dunn S. (2009). A Comparison of Alternative Solid Waste Management Practices. North Carolina State University. SUR-Center for the study of Sustainable Use of Resources.

BIPRO (2005). Study to facilitate the implementation of certain waste related provisions of the Regulation on Persistent Organic Pollutants (POPs), European Commission, Brussels.

Cindoruk, S.S. and Tasdemir Y. (2007). The determination of gas phase dry deposition fluxes and mass transfer coefficients (MTCs) of polychlorinated biphenyls (PCBs) using a modified water surface sampler (WSS). *Science of the Total Environment* 381(1-3): 212-221.

DEMEX (2003). Study on the different open uses of Polychlorinated Biphenyls and Polychlorinated Terphenyls in products and determination of best available technology for the disposal of Polychlorinated Biphenyls. Study Contract, B4-3040/2001/329152/MAR/A2; Draft final report, European Commission DG Environment.

E.F.S.A. (2010) Scientific Report of EFSA. *EFSA Journal*, 8 (7):1701, 1-30.
<http://www.efsa.europa.eu/en/scdocs/doc/1701.pdf>.

E.P.E. (2010) Protocol for the quantification of greenhouse gases emissions from waste management activities. Version 4.0.

Falandysz J., Taniyasu S., Flisak M., Swietojańska A., Hori Y., Hanari N., and Yamashita N. (2004). Composition of chlorobiphenyl congeners in the Chlorofen formulation. *Roczniki Panstwowego Zakladu Higieny* 55(4):313-24, 2004.

García-Alonso S., Pérez-Pastor R. M. and Quejido-Cabezas A.J. (2002). Chemometric study of selected polychlorinated biphenyls in ambient air of Madrid (Spain). *Talanta* 57: 773–783.

García-Alonso, S. and Pérez-Pastor R. M. (2003). Occurrence of PCBs in Ambient Air and Surface Soil in an Urban Site of Madrid. *Water, Air, & Soil Pollution* 146(1-4): 283-295.

Gendebien A., Pauwels, M., Constant, M., Ledrut, M.J., Nyns, E.J., Willumsen, H.C., Butson, J.; Fabry, R. and Ferrero, G.L. (1992). Landfill gas from environment to energy. Ed by Commission of the European Communities. ISBN 92-826-3672-0.

Gouin T., Thomas G.O., Cousins I., Barber J., Mackay D. and Jones K.C. (2002). Air–surface exchange of polybrominated diphenyl ethers and polychlorinated biphenyls. *Environ. Sci. Technol.* 36: 1426–1434.

Health Consultation. U.S. Department of Health and Human Services. (2005). Public health evaluation of Gas vent sampling data reports.

Hutzinger O., Safe S. and . Zitko V. Eds. (1974). Chemistry of PCBs, Press,Cleveland, OH, USA. 278 pp..

Ishikawa Y., Noma Y., Mori Y. and Sakai S. (2007). Congener profiles of PCB and a proposed new set of indicator congeners. *Chemosphere* 67(9): 1838-1851.

Koo J., Yoon S.P., Shin H.S. and Lee J.J. (1991). Emission control of VOCs under influence of landfill gas flow. Proc. 3th Int. Symp. Landfill, Cagliari, Italy, Oct. CISA.

Lohmann R., Breivik K. Dachs J. and Muir D.G. (2007). Global fate of POPs - current and future research directions. *Environmental Pollution*: 150, 150-165.

Pozo K., Harner T., Lee S.C., Wania F., Muir D.C.G., and Jones K.C. (2009). Seasonally Resolved Concentrations of Persistent Organic Pollutants in the Global Atmosphere from the First Year of the GAPS Study. *Environ. Sci. Technol.*, 43(3), 796-803.

Van Drooge B.,L., Grimalta J.O., Torres-García C.J. and Cuevas E. (2001). Deposition of Semi-Volatile Organochlorine Compounds in the Free Troposphere of the Eastern North Atlantic Ocean. *Marine Pollution Bulletin* 42(8): 628-634.

Weitz K.A, Thorneloe S.A, Nishtala S.R., Yarkosky S. and Zannes M., (2002). The impact of municipal solid waste management on greenhouse gas emissions in the United States. *J. Air & Waste Mngmnt. Asscn.* 52(9), 1000-11.

Willumsen H.C.; Burian-Hansen P. and Jensen P.E. (1988). Toxic components in biogas extracted from landfills. In Proc. 5th International Symposium on Anaerobic Digestion, Bologna, Italy. May. Pergamon Press, Oxford, UK. ISBN 0 08 036634 1.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido realizado dentro de los proyectos S-0505/AMB-0352 y P2009/AMB-14