

EMISIÓN DE COMPUESTOS ORGÁNICOS VOLÁTILES (VOC) DURANTE EL COMPOSTAJE DE BIOSÓLIDOS PROVENIENTES DE PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS

Claudia Ximena Ramos¹

Sandra Estévez²

Eugenio Giraldo³

Abstract

This work presents the results of VOC's emitted during the wastewater biosolids composting in two static piles. VOC's were isolated by Solid Phase Microextraction (SPME) and analysed by Gas Chromatography/Mass Spectrometry (GC/MS). More than 150 organic compounds were identified including aliphatic and aromatic hydrocarbons, chlorinated compounds, ketones, mercaptans, sulfides, alcohols and amines, a must of them in concentration above the USEPA inhalation standards.

Palabras Claves:

Compuestos orgánicos volátiles, VOC, compostaje, biosólido, SPME, cromatografía, Bogotá.

ANTECEDENTES

La mayor ventaja del compostaje de biosólidos es que la gran cantidad de lodos obtenidos durante el tratamiento de aguas residuales tanto domésticas como industriales, deja de constituirse en uno de los mayores problemas de este tipo de tratamiento, eliminando el impacto ambiental y económico que ocasionan ya que el costo de trasladar y disponer este material es elevado. Los lodos pasan a convertirse en una alternativa para el manejo de residuos sólidos donde los lodos o desechos orgánicos a través de un proceso de degradación se transforman en humus o bioabono al cual se le puede dar variados usos entre los que se destacan la remediación de suelos y planta-

ción, cambiando el concepto de desecho que ocasiona gastos por el concepto de un nuevo producto que puede ser comercializado (5).

Sin embargo, este tipo de tratamiento presenta algunas desventajas como la emisión de compuestos olorosos y peligrosos durante el proceso de degradación lo cual puede ser un gran inconveniente para las personas que trabajan en el área de compostaje y para las comunidades vecinas a las plantas.

Es por eso que la importancia de este estudio radica en el establecimiento del potencial de emisión de compuestos orgánicos volátiles en el compostaje a escala real (2), (4).

1 Estudiante de Magíster, Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad de los Andes.

2 Química Investigadora, Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad de los Andes.

3 Profesor Asociado, Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad de los Andes.

MATERIALES Y METODOS

Se realizaron muestreos de VOC emitidos por dos pilas estáticas de compostaje durante su periodo termofílico. Ambas pilas se montaron con lodos provenientes de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales "El Salitre" utilizando astillas de madera como agente abultante.

La pila 1, se montó con una relación de mezcla de 1.5 madera/lodo y se mantuvo sin aireación durante el periodo de muestreo, 18 días. La pila 2 se montó con una relación de mezcla de 1.0 madera/lodo, se mantuvo con un flujo de aireación negativa (succión de aire) a una frecuencia de 5 min. cada 25 min., durante su periodo de muestreo que también fue de 18 días (3), (4). Diariamente se tomaron muestras de compost (200g aprox.) que fueron llevadas al laboratorio para su análisis. Cada muestra (100g aprox.) se sometió a muestreo por Microextracción en fase sólida en estático y dinámico, como se explica a continuación (5).

Muestreo SPME estático: Ver figura 1. Consta de un montaje sencillo, en el cual el erlenmeyer que contiene la muestra de compost cuenta en su boca con un tapón de caucho agujereado en el centro, este agujero ha sido sellado previamente con silicona, esto para que la silicona sirva de septum perforable evitando la salida del aire una vez que el dispositivo SPME ha perforado y expuesto la fibra (7), (8), (9).

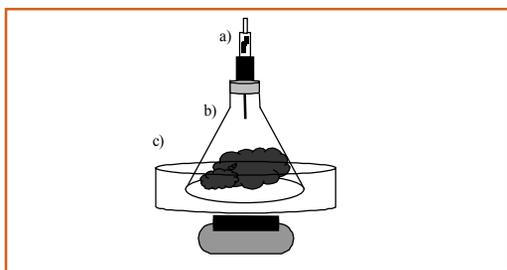


Figura 1. Montaje del muestreo SPME estático. a) Dispositivo SPME b) Erlenmeyer contenido la muestra de compost. c) Baño María

Muestreo SPME dinámico: Ver figura 2. Consta de un montaje herméticamente aislado en el que se succiona aire a una velocidad de flujo constante (200mL/min) con ayuda de una bomba. El aire succionado del erlenmeyer que contiene la muestra de compost es conducido a un bulbo de volumen conocido (400 ml) el cual posee un punto de muestreo al que se le ha acondicionado un septum para permitir la perforación y exposición del dispositivo SPME y evitar la salida del aire que se está monitoreando. Antes de llegar al bulbo, el aire debe

pasar por una trampa de CaCl_2 que retiene la humedad pero no las sustancias orgánicas. Cuando el aire sale del bulbo de muestreo, pasa por una trampa TENAXO (de sorbente sólido) que retiene los compuestos orgánicos remanentes y evita daños a la bomba de muestreo. La bomba utilizada es una bomba de muestreo Universal SKC 224-PCXR8 de SKC Inc. calibrada mediante un flujómetro de película de jabón (7), (8), (9).

Identificación de los compuestos muestreados: Una vez los analitos fueron atrapados en la fibra SPME, ésta se inyectó inmediatamente en el cromatógrafo para desorberse y transferirse a la columna cromatográfica para su separación y posterior identificación en el detector selectivo de masas (8). La programación de temperatura del horno cromatográfico fue la siguiente: La temperatura seleccionada fue 40°C (5 min) @ $5^\circ\text{C}/\text{min}$ hasta 200°C (40 min) teniendo en cuenta la volatilidad de algunos compuestos y semivolatilidad de otros. La duración total de la corrida cromatográfica fue de 45 min. (6). La identificación de los compuestos detectados se realizó utilizando la librería de compuestos que posee el software del cromatógrafo, tomando como resultados confiables aquellos compuestos que fueron identificados con una certidumbre mayor o igual al 80%. (13), (17).

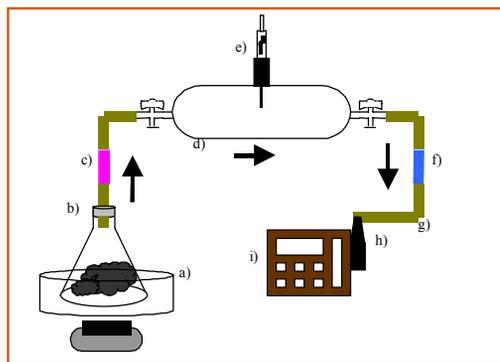


Figura 2. Montaje del muestreo SPME dinámico a) Baño María b) Erlenmeyer contenido la muestra de compost c) Trampa de CaCl_2 para agua d) Bulbo de muestreo de 400 ml. e) Dispositivo SPME f) Trampa TENAXO. g) Manguera plástica siliconada. h) Regulador de flujo de la bomba. i) Bomba para muestreo.

Semicuantificación de los compuestos identificados: La semicuantificación se realizó por medio de la obtención de curvas patrón utilizando Diesel como solución estándar (solución madre) aprovechando la variedad de hidrocarburos aromáticos y alifáticos presentes en este tipo de combustible. Se analizaron cromatográficamente 4 diferentes concentraciones de Diesel utilizando el mismo sistema que para las muestras de compost (Figura 1). Para los principales compuestos olorosos

encontrados (disulfuro de carbono y dimetildisulfuro) se manipuló de igual forma una mezcla de mercaptanos de densidad conocida.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En las tablas 1 y 2 se presentan los compuestos identificados en los muestreos estático y dinámico, respectivamente, realizados en ambas pilas de compostaje, adicionalmente se reportan los tiempos de retención en la columna cromatográfica. Se reportan en total 154 compuestos, discriminados así: 134 en el muestreo estático y 20 en el muestreo dinámico, 85 de estos compuestos se hallaron en la pila 1, 95 en la pila 2 y 24 en ambas pilas. La pila 2 presentó mayor variedad en tipos de compuestos que la pila 1.

Comportamiento de VOC en la pila 1: En el gráfico 1 se presentan algunos de los VOC más importantes identificados en la pila 1 que mostraron un comportamiento de emisión durante el tiempo de muestreo. Todos los compuestos se emiten de manera similar, lo que está relacionado con el comportamiento de la temperatura. La pila 1 tuvo un periodo termofílico con temperaturas máximas que oscilaron entre 40 y 50 °C en el punto de muestreo, la tendencia de los VOC fue aumentar su emisión con el aumento de la temperatura como se observó en el día 9 para la mayoría de los compuestos, día que presenta la máxima temperatura. Se observaron emisiones máximas de 940000 mg/m³aire/Kg.compost aproximadamente.

Comportamiento de VOC en la pila 2: En el gráfico 2 se presentan algunos de los VOC más importantes identificados en la pila 2 que mostraron un comportamiento de emisión durante el tiempo de muestreo de la misma forma que fue presentado para la pila 1.

Todos los compuestos emitidos por la pila 2 muestran una variación similar, lo que se relaciona con el sistema de aireación negativa utilizado (succión de aire), a pesar de que se alcanzó un periodo termofílico con temperaturas máximas que oscilaron entre 40 y 45°C en el punto de muestreo, los VOC identificados se presentaron con una concentración alta en los primeros días de muestreo disminuyendo hasta desaparecer en el día 18 aunque la pila todavía se encontraba alrededor de los 30°C, esto concuerda con los resultados de las investigaciones reportadas por Epstein (3) en donde se concluye que una aireación negativa disminuye las emisiones y los olores. Se observaron emisiones máximas de 380000 µg/m³aire/Kg.compost aproximadamente.

Contribución del agente abultante en la emisión de VOC: Las pilas de compostaje se montaron utilizando

astillas de madera como agente abultante, para dar cuerpo y crear espacios para un suministro eficiente del aire (3). Es importante verificar el aporte del agente abultante a las emisiones de VOC porque dependiendo del material éstas se pueden ver aumentadas considerablemente. Por tal motivo se realizó un muestreo por SPME en estático a una muestra de madera utilizada en el montaje de la pila 2 a temperatura ambiente (14°C aprox.) y a la temperatura máxima correspondiente a la obtenida en esta pila (45°C). En la figura 3 se presenta el cromatograma obtenido para la madera a temperatura ambiente. Se observó un comportamiento similar y dependiente del aumento de la temperatura para el tiempo de retención comprendido entre los 25 y 40 minutos.

Comparando los perfiles cromatográficos de la madera con los obtenidos para muestras de compost el perfil es muy similar especialmente para los tiempos de retención comprendidos entre 25 y 40 minutos. Se presentaron contribuciones de la madera a la emisión total entre el 10% y el 30%.

Curvas patrón y semicuantificación: El muestreo de patrones descrito anteriormente permitió la obtención de curvas patrón para semicuantificar los compuestos identificados en µg/m³. Se obtuvo una buena respuesta en el comportamiento de los patrones con R² mayores a 0.96. En las tablas 3 y 4 se presentan las concentraciones obtenidas de los diferentes compuestos con la utilización de las curvas patrón durante el tiempo de compostaje por peso de compost.

Las concentraciones de VOC totales emitidas al aire durante el periodo de compostaje de las pilas 1 y 2 se presentan en el orden de 100 a 940000 µg/m³Kg.

Comparando los niveles de emisión reportados por Van Durme (11), el heptano, el tolueno y los compuestos bencénicos en total presentan concentraciones mucho mayores, caso interesante teniendo en cuenta que las concentraciones reportadas corresponden a las emitidas por 1.0Kg de compost mientras los resultados de Van Durme (11) fueron obtenidos a partir de toda la masa disponible para emitir VOC a la atmósfera.

En la tabla 5 se presentan los coeficientes de transferencia de masa (Kc) para los compuestos emitidos por la pila 1 que se reportan en la tabla 4, útiles en la determinación de la concentración emitida en términos del área de transferencia (µg/m²d). Para los compuestos emitidos por la pila 2 que se reportan en la tabla 5, se utilizó un caudal de aireación a la succión de 439m³/d lo que permite la obtención de las concentraciones en el aire succionado en términos de la cantidad de biosólido compostado (µg/Kgd).

TABLA 1. COMPUESTOS IDENTIFICADOS EN EL MUESTREO ESTÁTICO.

| Tiempo de retención (min) | Compuesto | Pila 1 | Pila 2 | Tiempo de retención (min) | Compuesto | Pila 1 | Pila 2 |
|---------------------------|---------------------------------|--------|--------|---------------------------|-----------------------------------|--------|--------|
| 6,89 | Acetona (2-propanona) | X | X | 25,04 | 3-metil-decano | X | X |
| 7,32 | disulfuro de carbono | X | X | 25,44 | 1-metil-3-propil-benceno | X | |
| 7,63 | Diclorometano | | X | 25,45 | 1,3-dietyl-benceno | | X |
| 8,51 | hexano | X | X | 25,46 | 1-metil-3-propil-benceno | X | |
| 9,55 | 2-butanona | X | X | 25,63 | 1,3-dietyl-benceno | X | |
| 10,09 | Tricloro-metano (cloroformo) | | X | 25,65 | 1,4-dietyl-benceno | X | |
| 11,56 | Heptano | | X | 25,66 | 1-etil-2,3-dimetil-benceno | X | |
| 11,87 | 2-hepteno | | X | 25,74 | decahidro-naftaleno | X | |
| 12,55 | 2-pentanona | | X | 25,95 | 1-metil-2-(1-metiletil)-benceno | X | |
| 13,9 | 2-metil-heptano | | X | 26,96 | 2,8-dimetil-undecano | X | X |
| 14,52 | dimetildisulfuro | X | X | 25,97 | o-decil-hidroxilamina | X | |
| 14,79 | piridina | X | | 25,98 | 2-butil-1-octanol | X | |
| 15,04 | 1,3,5-cicloheptatrieno | | X | 25,99 | undecano | X | X |
| 15,06 | tolueno (metil-benceno) | X | X | 26,53 | 4-etil-1,2-dimetil-benceno | X | |
| 15,21 | octano | X | | 26,74 | 1,2,3,4-Tetrametilbenceno | | X |
| 15,31 | 3-metil-tiofeno | | X | 26,75 | 1-metil-4-(1-metiletil)-benceno | | X |
| 15,49 | 2-Octeno | | X | 26,77 | 1,2-dimetil-4-etil-benceno | X | |
| 15,71 | hexametil-triciclosiloxano | | X | 26,80 | o-hidroxilamina | X | |
| 15,72 | hexahidropiridina | X | | 26,93 | eicoseno | | X |
| 15,89 | Octan-3-eno | | X | 26,94 | 2,4-dimetil-heptano | | X |
| 17 | etilciclohexano | | X | 26,95 | 3,8-dimetil-undecano | X | |
| 17,24 | 2-metil-piridina | X | | 27,15 | decametil-ciclopentasiloxano | X | |
| 17,62 | 2-metil-octano | | X | 26,53 | 4-etil-1,2-dimetil-benceno | | X |
| 17,95 | 3-metil-octano | X | X | 27,63 | decahidro-2-metil-naftaleno | X | |
| 18,64 | etil-benceno | X | X | 27,79 | n-amilciclohexano | X | |
| 18,93 | nonano | X | X | 27,80 | pentil-ciclohexano | X | |
| 19,04 | cis-1-etil-3-metil-ciclohexano | X | | 27,91 | 1,2,3,4-Tetrametilbenceno | | X |
| 19,17 | 2-noneno | | X | 28,04 | 1,2,4,5-tetrametil-benceno | | X |
| 19,62 | 1,4-dimetil-benceno | | X | 28,05 | 2-metil-undecano | X | |
| 19,65 | 2,4-dimetil-hexano | X | | 28,31 | 3-metil-undecano | X | |
| 19,89 | 3,5-dimetil-octano | X | | 28,86 | 2,3-dihidro-5-dimetil-1h-indeno | | X |
| 19,90 | 2,5-dimetil-octano | X | | 29,17 | 1-metil-2-fenil-ciclopropano | | X |
| 19,98 | 1,2-dimetilbenceno | | X | 29,18 | dodecano | X | X |
| 20 | 3-metil-nonano | | X | 29,34 | 2,3-dihidro-4,6-dimetil-1h-indeno | | X |
| 20,24 | 2,4-dimetil-octano | X | | 29,64 | 2,6-dimetil-undecano | X | X |
| 20,25 | 3,6-dimetil-octano | X | | 29,65 | undecano | X | |
| 20,26 | 2,6-dimetil-octano | X | | 30,3 | 2,3-dihidro-1,3-dimetil-1h-indeno | | X |
| 20,65 | propil-ciclohexano | X | X | 30,47 | 2,3-dihidro-1,2-dimetil-1h-indeno | | X |
| 21,24 | 4-metil-nonano | X | | 30,78 | Tridecano | | X |
| 21,28 | 2-metil-nonano | X | X | 30,95 | 3,7,11-trimetil-1-dodecanol | X | X |
| 21,55 | 7-metil-tridecano | | X | 30,96 | tridecanol | X | |
| 21,56 | propil-benceno | | X | 31,00 | 1-(eteniloxi)-octadecano | X | |
| 21,58 | 3-metil-nonano | X | X | 31,13 | 2-metildodecano | X | |
| 21,8 | 1-etil-2,3-dimetil-ciclohexano | X | | 31,4 | 2,6,11,15-tetrametil-Hexadecano | | X |
| 21,90 | 1,1,2,3-tetrametil-ciclohexano | | X | 31,42 | 2,6-dimetil-undecano | X | |
| 22,09 | 1-etil-4-metil-benceno | | X | 31,77 | metil-eter-timol | X | |
| 22,54 | 1-etil-2-metil-benceno | | X | 31,78 | metil-eter-carvacrol | X | |
| 22,55 | decano | X | X | 32,17 | hexadecano | | X |
| 22,97 | 2-pentil-furano | X | | 32,20 | tridecano | X | |
| 23,39 | 4-metil-decano | X | X | 32,36 | 2,3-dihidro-4,7-dimetil-1h-indeno | | X |
| 23,4 | 2,6,7-trimetildodecano | X | | 34,00 | 1-cloro-tetradecano | | X |
| 23,12 | 1-etil-4-metil-benceno | | X | 34,01 | 3,5,24-trimetil-tetracontano | X | |
| 23,14 | 4-metil-decano | X | X | 34,02 | 1-cloro-octadecano | X | |
| 23,37 | 2,6-dimetil-nonano | | X | 34,45 | 2,7,10-trimetil-dodecano | X | |
| 23,41 | 4-metil-decano | X | | 34,46 | 2,6,10-trimetil-dodecano | X | X |
| 23,63 | 1,2,4-trimetil-benceno | X | X | 35,02 | tetradecano | X | |
| 24,03 | 3,7-dimetil-nonano | X | | 35,03 | 2-metil-5-(1-metiletil)-fenol | X | |
| 24,78 | 2-metil-decano | X | | 35,45 | 2,6,11-trimetil-dodecano | X | |
| 24,31 | butil-ciclohexano | X | | 35,75 | octahidro-4a-2(1h)-naftalenona | X | |
| 24,32 | (2-metil-propil)-ciclohexano | X | | 37,26 | junipeno (4-metanoazuleno) | X | |
| 24,38 | 1-metil-4-(1-metiletil)-benceno | X | | 37,66 | pentadecano | X | |
| 24,40 | limoneno | X | X | 38,88 | Bergamotano | | X |
| 24,55 | 1-metil-2-(1-metiletil)-benceno | X | | 38,89 | 1,2-Epoxy-1-vinilciclododecano | | X |
| 24,69 | 4-metil-decano | X | | 38,04 | 1-hexadeceno (cetenol) | X | |
| 24,78 | 2-metil-decano | X | X | 39,24 | 1-metil-2-(3-metil-2-buten-1-il) | | X |
| 24,9 | 3-noneno | | X | 40,89 | 1,2-epoxi-1-vinil-ciclododecano | X | |
| 24,91 | 1,2,3-trimetil-ciclohexano | | X | 42,8 | 2,6,11,15-tetrametil-Hexadecano | | x |
| 25,03 | 1-metil-2-propil-benceno | | X | | | | |

TABLA 2. COMPUESTOS IDENTIFICADOS EN EL MUESTREO DINÁMICO.

| Tiempo de retención (min) | Compuesto | Pila 1 | Pila 2 | Tiempo de retención (min) | Compuesto | Pila 1 | Pila 2 |
|---------------------------|-----------------|--------|--------|---------------------------|---------------------------------------|--------|--------|
| 6,3 | etanol | | X | 15,06 | tolueno | | X |
| 6,95 | Acetona | | X | 18,93 | Xileno | | X |
| 7,64 | Diclorometano | | X | 18,94 | 1,4-dimetil-benceno | | X |
| 8,07 | 3-metil-pentano | | X | 23,52 | dihidro-2(3h)-furanona | X | |
| 8,48 | 2-metil-butanal | | X | 29,04 | 2,6,11,15-tetrametil-hexadecano | | X |
| 8,51 | hexano | X | X | 29,11 | 2,6,10,15,19,23-hexametil-Tetracosano | | X |
| 10,12 | Cloroformo | | X | 29,14 | 2,6,11,15-tetrametil-Hexadecano | | X |
| 10,13 | Acido hexanoico | | X | 44,4 | hexahidropiridina | | X |

En la tabla 6 se presenta la comparación de los compuestos más importantes emitidos en las pilas con el valor umbral límite (TLV) y el umbral de olor de acuerdo a investigaciones realizadas por la American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH) (1). Todas las concentraciones reportadas son mucho más altas comparadas con los TLV y el umbral de olor,

aunque no se involucra la dispersión de los compuestos ya que las muestras son puntuales.

Las concentraciones tóxicas y peligrosas por ingestión y por inhalación para el ser humano (12), (14), (15), (16) de acuerdo a la base de datos IRIS (Integrated Risk Information System) de la EPA (12) muestran que las concentraciones son

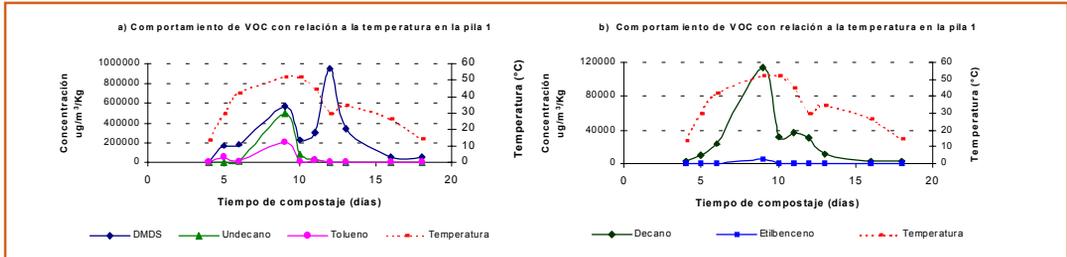


Gráfico 1. Comportamiento de VOC con relación a la temperatura durante el tiempo en la pila 1

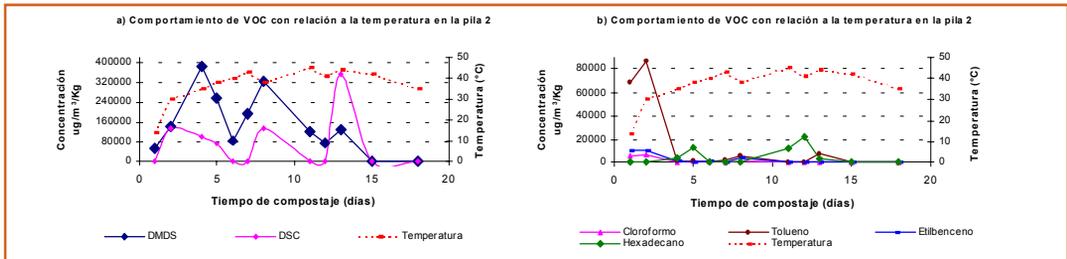


Gráfico 2. Comportamiento de VOC con relación a la temperatura durante el tiempo en la pila 2

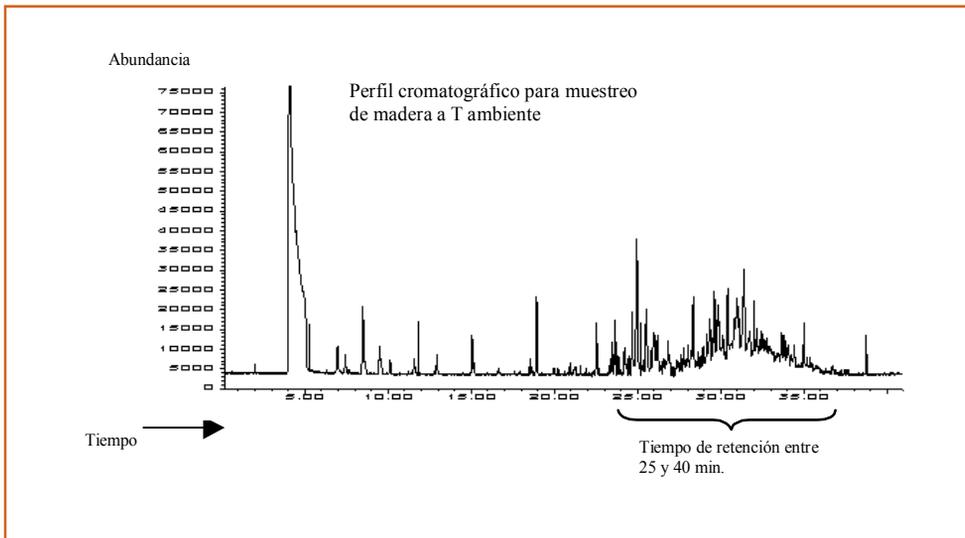


Figura 3. Cromatograma para una muestra de madera a temperatura ambiente (14°C).

TABLA 3. CONCENTRACIONES DETERMINADAS EN LA SEMICUANTIFICACIÓN PARA LA PILA 1.

| Días de compostaje | DMDS* | DECANO | UNDECANO | TOTAL COMPUESTOS BENCENICOS | TOLUENO | ETILBENCENO |
|--|--------|--------|----------|-----------------------------|---------|-------------|
| $\mu\text{g} / \text{m}^3$ de aire/Kg de compost | | | | | | |
| 4 | 0 | 2452 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 5 | 174940 | 9786 | 0 | 16761 | 47573 | 0 |
| 6 | 185780 | 23458 | 10990 | <33974 | 6626 | 0 |
| 9 | 573530 | 114557 | 500004 | 345613 | 219384 | 5140 |
| 10 | 232640 | 31873 | 79085 | <33974 | 9352 | <1859.3 |
| 11 | 306970 | 37647 | 27203 | <33974 | 17330 | 0 |
| 12 | 944140 | 30773 | <32334 | <33974 | 0 | 0 |
| 13 | 343060 | 11092 | 0 | <33974 | 0 | 0 |
| 16 | 48410 | 2666 | 0 | <33974 | 0 | 0 |
| 18 | 53350 | 2554 | | | | |

*DMDS = Dimetildisulfuro.

TABLA 4. CONCENTRACIONES DETERMINADAS EN LA SEMICUANTIFICACIÓN PARA LA PILA 2.

| DÍAS DE COMPOSTAJE | DMDS* | DSC* | CLOROFORMO | DECANO | UNDECANO | TOTAL COMPUESTOS BENCENICOS | TOLUENO | ETILBENCENO |
|--|-------------|---------|------------|-----------|-------------|-----------------------------|-------------|-------------|
| $\mu\text{g} / \text{m}^3$ de aire/Kg de compost | | | | | | | | |
| 1 | 51840 | | 5336 | 11787 | <42764 | 283330 | 68607 | <70639 |
| 2 | 143120 | 134450 | 6173 | 38823 | 6675 | 181261 | 86476 | |
| 4 | 381710 | 101290 | 307 | 23173 | 15787 | 8982 | 1080 | |
| 5 | 257800 | 71580 | 809 | 29404 | 36931 | 13592 | 1224 | |
| 6 | 82920 | | 540 | 12627 | <42764 | 44222 | | |
| 7 | 193200 | | 86 | 61112 | | 39876 | 1802 | 6996 |
| 8 | 323900 | 132930 | 837 | 50319 | 39559 | 236268 | 5023 | <70639 |
| 11 | 121190 | | <532.51 | 22850 | 39764 | 18162 | | <70639 |
| 12 | 74660 | | <532.51 | 32274 | 77909 | 7919 | <27633 | <70639 |
| 13 | 128890 | 354860 | <532.51 | 60963 | 191256 | 204546 | 6864 | 90592 |
| 15 | | | | 8118 | <42764 | <33923 | | <70639 |
| DÍAS DE COMPOSTAJE | ETILBENCENO | HEPTANO | HEXADECANO | TRIDECANO | TETRADECANO | NONADECANO | PENTADECANO | |
| $\mu\text{g} / \text{m}^3$ de aire/Kg de compost | | | | | | | | |
| 1 | 9925 | 1109 | | <65639 | | | | |
| 2 | 9762 | | | | | | | |
| 4 | 567 | | 3405 | <65639 | | | | |
| 5 | 435 | 364 | 12654 | | | | | |
| 6 | 697 | | | | | | | |
| 7 | <16721 | 363 | | <65639 | 23240 | 2133 | | |
| 8 | 3908 | 1109 | | <65639 | 15022 | | | |
| 11 | | | 11707 | <65639 | <28612 | 1470 | | |
| 12 | | | 22488 | 24747 | 36837 | 18163 | | |
| 13 | | | 2458 | 80602 | 92394 | 36968 | | 15314 |
| 15 | | | | <65639 | | | | |

*DMDS = Dimetildisulfuro, DSC = Disulfuro de carbono.

TABLA 5. COEFICIENTES DE TRANSFERENCIA DE MASA PARA COMPUESTOS EMITIDOS POR LA PILA 1.

| COMPUESTO | Kc (m/d) |
|------------------|----------|
| Dimetildisulfuro | 0.0085 |
| Decano | 0.0154 |
| Undecano | 0.0146 |
| Benceno | 0.0163 |
| Tolueno | 0.0177 |
| Etilbenceno | 0.0165 |

TABLA 6. COMPARACIÓN DE ALGUNAS CONCENTRACIONES MÁXIMAS DE VOC OBSERVADAS CON RELACIÓN AL TLV (THRESHOLD LIMIT VALUE) EN EL AIRE DEL LUGAR DE TRABAJO Y SU UMBRAL DE OLOR (1).

| COMPUESTO | MÁXIMA CONCENTRACIÓN OBSERVADA $\mu\text{g}/\text{m}^3/\text{Kg compost}$ | TLV $\mu\text{g}/\text{m}^3$ | Umbral de olor $\mu\text{g}/\text{m}^3$ | |
|----------------------|---|------------------------------|---|--------|
| | | | Bajo | Alto |
| Disulfuro de Carbono | 354860 | 31000 | 24.3 | 230000 |
| Dimetildisulfuro | 944140 | | 0.1 | 346 |
| Cloroformo | 6170 | 49000 | | |
| Benceno | 345613 | 32000 | | |
| Tolueno | 219384 | 188000 | | |
| Etilbenceno | 9925 | 434000 | | |

muy altas con respecto a las concentraciones que afectan al hombre, por lo que es importante medir la dispersión de los VOC en el aire y el impacto real que estos puedan tener sobre las poblaciones cercanas ya que las mediciones se realizaron simulando la emisión, haría falta hacer mediciones en el aire ambiente para tener en cuenta cuánto de los compuestos tienen el potencial de dispersarse hasta llegar a las comunidades cercanas. Adicionalmente, se hace necesario el uso de equipo de protección respiratoria y de seguridad industrial para los empleados de la planta de compostaje.

CONCLUSIONES

- La temperatura juega un papel fundamental en la cantidad de VOC emitidos. Un aumento de temperatura que asegura un buen proceso de compostaje, favorece la volatilización de compuestos orgánicos como se observó en el sistema sin aireación, donde se favorecieron las más altas temperaturas (52°C) durante un tiempo menos corto (6 días) mientras el sistema con aireación a la succión alcanzó temperaturas menos altas (45°C) durante un tiempo más prolongado (15 días) con menos cantidad de emisiones.
- El agente abultante utilizado en el montaje de las pilas de compostaje puede tener una incidencia importante en las emisiones originadas durante la degradación. En un muestreo por SPME estático realizado a la madera a temperatura ambiente (14°C) y la temperatura máxima obtenida en la pila 2 (45°C) se evidencia el aporte apreciable de VOC por parte de la madera y un comportamiento de emisión dependiente también de la temperatura del proceso. A temperatura ambiente se detectaron concentraciones menores de los compuestos emitidos que a 45°C.
- Durante el muestreo en compost tratado sin aireación se presentaron concentraciones mayores a las evidenciadas durante el muestreo en compost tratado aerobiamente (sistema de succión de aire) el cual presentó concentraciones con tendencia a disminuir hasta desaparecer. Un adecuado sistema de aireación puede disminuir las emisiones de VOC notoriamente.
- De los 154 compuestos identificados durante el muestreo, 14 compuestos son regulados por la EPA (12), 11 tienen regulación por ingestión, 5 por inhalación y 8 son precursores de cáncer. Para los demás compuestos se conoce de su poder de intoxicación al ingerirlos de acuerdo a estudios realizados por la OSHA (16) y la NIOSH (14) pero estos no son regulados por la EPA debido a que los estudios no han sido finalizados a satisfacción por lo que no se han determinado con precisión las concentraciones exactas que pueden causar daño a los seres humanos.
- Las concentraciones emitidas por kilogramo de compost son muy altas considerando que el proceso de compostaje a gran escala se realiza en el orden de toneladas de biosólido, comparadas con las concentraciones halladas por Van Durme (11) que provienen de la masa total de las pilas, esto puede deberse a la calidad de las aguas residuales de las que proviene el biosólido a compostar y que depende de los hábitos y tipos de desechos que produzca la población.
- Las concentraciones determinadas son altas comparadas con las normas de la EPA para inhalación de VOC, debido a que los muestreos se realizaron directamente del compost. Es necesario complementar estos resultados con estudios de dispersión de los compuestos volátiles para predecir el potencial real

de afectación a los seres humanos que habitan en zonas aledañas. El personal que trabaja in situ debe portar equipo de protección respiratoria.

REFERENCIAS

1. ACGIH. 1992. American Conference of Governmental Industrial Hygienists, 1992-1993. Threshold Limit Values for Chemical Substances and Physical Agents and Biological Exposure Indices. Cincinnati, OH.
2. EITZER, B.D. 1995. Emissions of Volatile Organic Chemicals from Municipal Solid Waste Composting Facilities.
3. EPSTEIN, Eliot. The Science of Composting. Technomic Publishing Co. Inc. Lancaster-Basel. 1997.
4. Evaluación del Potencial Agronómico de los Lodos de la Planta "El Salitre" Primera Etapa. Convenio de investigación. Universidad de los Andes, DAMA, Asociflores. Centro de Investigaciones en Ingeniería Ambiental. CIIA. Bogotá. 2000.
5. HAUG, Roger T. The Practical Handbook of Compost Engineering. Lewis Publishers, 1993.
6. LOZANO, Juan Pablo. ESTÉVEZ, S., GIRALDO, E. Evolución de Compuestos Volátiles de Azufre Durante el Compostaje Aerobio Termofílico de Lodos de Aguas Residuales Domésticas. Tesis de Maestría en Ingeniería Civil. Universidad de los Andes. Bogotá. 1999.
7. LLOMPART, M. Et al. Headspace solid phase microextraction for the determination of volatile and semivolatile pollutants in water and air. Journal of Chromatography A, 824 (53-61), 1998.
8. NAMIESNIK, J. Et al. Analysis of Selected Gaseous Organic micro pollutants in air by means of SPME - gas chromatography - mass spectrometry. Calibration problems. Analysis. 26 (170 - 174), 1998.
9. POPP, P. Et al. Solid Phase Microextraction of volatile organic compounds using carboxen/polydimethylsiloxane fibers. Chromatographia Vol. 46 No. 7/8, october 1997.
10. SMET, Erik et al. The emission of volatile compounds during the aerobic and the combined anaerobic/aerobic composting of biowaste. Atmospheric Environment No. 33 pág 1295 - 1303. 1999.
11. McGinley, C.M., 1992. Bench-scale removal of odor and volatile organic compounds at a composting facility. Water Environment Research 64, 19-27.

Internet:

12. EPA: Environmental Protection Agency. <http://www.epa.gov> ó <http://www.epa-iris.gov>
13. <http://www.chemfinder.com>
14. NIOSH: National Institute For Occupational Safety and Health. <http://www.cdc.gov/niosh/homepage.html>
15. NTP: National Toxicology Program (USA). <http://ntp-server.niehs.nih.gov/cgi/>
16. OSHA: Occupational Safety and Health Administration. http://www.osha-lc.gov/OshStd_data/1915_1000.html
17. SUPELCO: <http://www.sigma.com/saws.nsf/SupProducts?OpenFrameset>