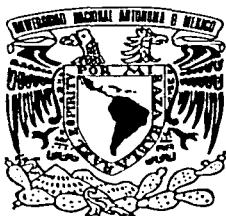


2



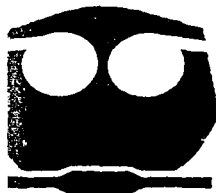
# UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE QUIMICA

EVALUACION FISICOQUIMICA DE CUATRO MEDIOS  
FILTRANTES PARA SISTEMAS DE TRATAMIENTO  
BIOLOGICO DE GASES BASADOS EN BIOFILTRACION

**T E S I S**

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:  
INGENIERO QUIMICO  
P R E S E N T A :  
SAULO AMAYA AGUILAR



TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

MEXICO, D.F.



2002

EXAMENES PROFESIONALES  
FACULTAD DE QUIMICA



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**


Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

**Jurado asignado:**

<b>PRESIDENTE</b>	<b>RODOLFO TORRES BARRERA</b>
<b>VOCAL</b>	<b>JOSE LUIS LOPEZ MARTINEZ</b>
<b>SECRETARIO</b>	<b>JUAN MANUEL MORGAN SAGASTUME</b>
<b>1er. SUPLENTE</b>	<b>JOSE SABINO SAMANO CASTILLO</b>
<b>2o. SUPLENTE</b>	<b>ALFONSO DURAN MORENO</b>

**Sitio donde se desarrolló el tema:**  
**Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México**

  
Asesor del tema  
**JUAN MANUEL MORGAN SAGASTUME**

  
Sustentante  
**SAULO AMAYA AGUILAR**

## DEDICATORIA

**A dios:**

por haberme permitido llegar a la realización de esta meta.

**A mis padres:**

*Ma. Guadalupe Aguilar Canales.*

*Rafael Amaya Tellez*

Un verdadero padre es aquel que batalla contigo en todo momento, que disfruta de tus éxitos y alienta a superar los fracasos, y te da todo su amor, ustedes han sabido ser verdaderos padres, doy gracias a ese ser supremo por haberme dado como padre a dos seres como ustedes

**A mis hermanos:**

*Rafael, Abraham, Isabel*

*Israel, Yidam, Tiyo+, Lila*

A todas aquellas personas que me ayudaron a madurar, superarme y entender que la amistad puede ser el don máspreciado que cualquiera puede tener.

## AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Nacional Autónoma de México y a la Facultad de Química por la oportunidad y privilegios concedidos dentro de la comunidad universitaria.

M. en C. *Juan Manuel Morgan Sagastume* por su invaluable apoyo para la culminación de la presente tesis, así como por su paciencia y conocimiento en la revisión de la misma.

Dr. *Adalberto Noyola Robles* por brindarme la oportunidad de pertenecer a su grupo de trabajo dentro del Instituto de Ingeniería

A todas las personas que me apoyaron antes, durante y después de la investigación de este trabajo.

## ÍNDICE GENERAL

	<b>Pág.</b>
Índice de Tablas	i
Índice de Figuras	iv
Glosario	viii

### INTRODUCCIÓN

I	Justificación	1
II	Antecedentes	2
III	Problemática	2
IV	Objetivos	4
IV-I	Objetivos generales	4
IV-II	Objetivos particulares	4
V	Hipótesis	5
VI	Descripción general	5
VII	Contenido	6

### CAPITULO I

1.	Marco teórico	7
1.1	Sistemas de tratamiento biológico de gases	7
1.1.1	Biolavadores	8
1.1.2	Biofiltro percolador o de lecho escurrido	10
1.1.3	Biofiltración	11
1.1.4	Comparación de biotecnologías	12
1.2	Proceso de biofiltración	14
1.3	Parámetros de diseño y operación de biofiltros	19
1.3.1	Fenómenos involucrados en su operación	19
1.3.1.1	Modelo básico	19
1.3.1.2	Fenómenos adsorción /absorción	20
1.3.2	Condiciones para diseño	20
1.3.2.1	Tiempo de contacto cama vacía	20
1.3.2.2	Carga superficial	20
1.3.2.3	Carga másica	21
1.3.2.4	Tasa de remoción	21
1.3.2.5	Dimensionamiento	21
1.3.2.6	Material filtrante	22

1.3.2.6.1	Composta	24
1.3.2.6.2	Suelo	25
1.3.2.6.3	Turba	26
1.3.2.7	Condiciones fluidodinámicas	27
1.3.2.8	Modelos	27
1.4	Parámetros de operación y características del proceso de biofiltración	28
1.4.1	pH y alcalinidad	28
1.4.2	Toxicidad	30
1.4.3	Nutrientes	30
1.4.4	Humedad	31
1.4.5	Temperatura	32
1.4.6	Microorganismos	33
1.4.7	Caída de presión y consumo energético	40
1.5	Pretratamiento del influente	42
1.5.1	Humidificación	42

## CAPITULO II

2.	Metodología experimental	44
2.1	Obtención de materiales	44
2.2	Cinéticas de secado y humidificación de tres medios filtrantes a distintas temperaturas	46
2.2.1	Metodología	46
2.3	Efectos de la composición del medio filtrante, el flujo de aire y la adición de agua sobre la humedad del medio filtrante, la densidad real, la densidad aparente, la porosidad, el tamaño efectivo de partícula y la compactación del medio.	50
2.3.1	Metodología	50
2.4	Estudios de la caída de presión en el lecho filtrante en función de la composición, del flujo de aire y el tiempo de operación	56
2.4.1	Metodología	56
2.5	Estudios de trazado en las columnas de biofiltración	57
2.5.1	Metodología	57

## CAPITULO III

3.	Resultados y discusión de resultados	61
3.1	Cinéticas de secado y humidificación de tres medios filtrantes a distintas temperaturas	61

3.2	Efectos de la composición del medio filtrante, el flujo de aire y la adición de agua sobre la humedad del medio filtrante, la densidad real y aparente, la porosidad y el tamaño efectivo.	76
3.3	Estudios de la caída de presión en el lecho filtrante en función de su composición, del flujo de aire y del tiempo de operación	88
3.3.1	Resultados obtenidos	88
3.4	Estudios de trazado en las columnas de biofiltración	96
3.4.1	Resultados obtenidos	96
3.4.1.1	Columna vacía vs. columnas empacadas con composta cada 20 cm. a lo largo de la columna sometidas a un flujo de aire de 10 l/min	98
3.4.1.2	Columna de composta en la cual se intercalan zonas de tezontle sometidas a un flujo de aire de 10 l/min	99
3.4.1.3	Columna empacada con tezontle sometida a flujos de aire de 10, 40 y 70 l/min.	100
3.4.1.4	Columnas empacadas con composta-lodo y composta-bagazo (50-50 %) sometidas a flujos de aire de 10, 40 y 70 l/min.	101
3.4.1.5	Comparación de los medios 100% composta, 75% composta-25% tezontle, 75% composta-25% lodo y 75% composta-25% bagazo, con y sin adición de agua sometidas a flujos de aire de 10, 40 y 70 l/min.	102

## CAPITULO IV

4.	Conclusiones y recomendaciones.	106
	Agradecimiento	110
	Referencias	111
	<b>Anexo I</b> Resultados de análisis de variancia	118
	<b>Anexo II</b> Gráficas de caída de presión	129
	<b>Anexo III</b> Curvas de distribución de tiempos de residencia	138
	<b>Anexo IV</b> Técnicas de laboratorio	157
	<b>Anexo V</b> Artículos publicados	168



---

Tabla 3.4.7	Columnas con 75% composta-25% lodo con y sin adición de agua sometidas a flujos de aire de 10, 40 y 70 l/min	103
Tabla 3.4.8	Columnas con 75% composta-25% bagazo con y sin adición de agua sometidas a flujos de aire de 10, 40 y 70 l/min	104
Tabla A1.1	Relación de distribución F con una significancia del 99% para experimentos con composta vs. composta + tezontle (75%-25%) con flujos de aire de 10, 40 l/min	120
Tabla A1.2	Relación de distribución F con una significancia del 99% para experimentos con composta vs. composta + tezontle (75-25%) con flujos de aire de 40 y 70 l/min	121
Tabla A1.3	Relación de distribución F con una significancia del 99% para experimentos con composta vs composta + tezontle con flujos de aire de 10 y 70 l/min	122
Tabla A1.4	Relación de distribución de F con una significancia del 99% para experimentos con composta vs. composta + lodo (75-25%) con flujos de aire de 10 y 40 l/min	123
Tabla A1.5	Relación de distribución F con una significancia del 99% para experimentos con composta vs. composta + lodo (75-25%) con flujos de aire de 40 y 70 l/min	124
Tabla A1.6	Relación de distribución F con una significancia del 99% para experimentos con composta vs composta-lodo (75, 25%) con flujos de aire de 10 y 70 l/min	125
Tabla A1.7	Relación de distribución F con una significancia del 99% para experimentos con composta vs. composta + bagazo (75, 25%) con flujos de aire de 10 y 40 l/min	126
Tabla A1.8	Relación de distribución F con una significancia del 99% para experimentos con composta vs. composta + bagazo (75, 25%) con flujos de aire de 40 y 70 l/min	127
Tabla A1.9	Relación de distribución F con una significancia del 99% para experimentos con composta vs. composta + bagazo (75, 25%) con flujos de aire de 10 y 70 l/min	128
Tabla A4.1	Serie Americana de tamices	159

---

**ÍNDICE DE FIGURAS**

	<b>Pág.</b>	
Figura 1.1	Aplicación de varias técnicas de tratamiento de gases como función del flujo y la concentración de contaminantes	7
Figura 1.2	Subdivisión de las diferentes biotecnologías para el tratamiento de gases	8
Figura 1.3	Esquema de un biolavador	9
Figura 1.4	Biofiltro percolador o de lecho escurrido	10
Figura 1.5	Esquema de un biofiltro	15
Figura 1.6	Versiones de biofiltros	16
Figura 1.7	Relación entre fases en un biofiltro	19
Figura 2.1	Imagen de la planta de producción de composta en Ciudad Universitaria	45
Figura 2.2	Esquema de una celda utilizada para llevar acabo las cinéticas de secado a temperatura constante	46
Figura 2.3	Disposición experimental de las cinéticas de secado con diferentes medios filtrantes y condiciones de humedad del aire	47
Figura 2.3-a	Fotografía de la instalación experimental para efectuar estudios de cinéticas de secado a distintas temperaturas con distintos medios filtrantes	48
Figura 2.3-b	Fotografía de las celdas utilizadas para las cinéticas de secado de distintos medios filtrantes a diferentes temperaturas	48
Figura 2.4	Diagrama de flujo del sistema experimental instalado	53
Figura 2.4-a	Fotografía de las columnas de biofiltración	55
Figura 2.4-b	Fotografía donde es posible apreciar los manómetros diferenciales para determinar la caída de presión	55

Figura 2.5	Instalación experimental para la ejecución de estudios de trazado	59
Figura 2.6	Instalación experimental para la ejecución de estudios de trazado	60
Figura 2.7	Muestra de una curva de distribución de tiempos de residencia obtenida en los estudios de trazado	60
Figura 3.1.1	Cinética de secado de composta sometida a aire con 35, 75 y 100% de humedad a 35 °C	62
Figura 3.1.2	Cinética de secado de composta con lodo sometida a aire con 35, 75 y 100% de humedad a 35 °C	63
Figura 3.1.3	Cinética de secado de composta con bagazo sometida a aire con 35, 75 y 100% de humedad a 35 °C	63
Figura 3.1.4	Curvas de equilibrio de distintos medios filtrantes a 35 °C	64
Figura 3.1.5	Cinética de secado de composta sometida a aire con 35, 75 y 100% de humedad a una temperatura ambiente que oscila entre 18 y 25 °C	66
Figura 3.1.6	Cinética de secado de composta con lodo sometida a aire con 35, 75 y 100% de humedad a una temperatura ambiente que oscila entre 18 y 25 °C	66
Figura 3.1.7	Cinética de secado de composta con bagazo sometida a aire con 35, 75 y 100% de humedad a una temperatura ambiente que oscila entre 18 y 25 °C	67
Figura 3.1.8	Curvas de equilibrio de distintos medios filtrantes a temperatura ambiente que oscila entre 18 y 25 °C	68
Figura 3.1.9	Cinética de secado de composta sometida a aire con 35, 75 y 100% de humedad a una temperatura de 5 °C	69
Figura 3.1.10	Cinética de secado de composta con lodo sometida a aire con 35, 75 y 100% de humedad a una temperatura de 5 °C	70
Figura 3.1.11	Cinética de secado de composta con bagazo sometida a aire con 35, 75 y 100% de humedad a una temperatura de 5 °C	70
Figura 3.1.12	Curvas de equilibrio de distintos medios filtrantes a temperatura de 5 °C	71

Figura 3.1.13	Cinética de secado de composta con esponja 1 a 35 °C	73
Figura 3.1.14	Cinética de secado de composta con esponja 2 a 35 °C	73
Figura 3.1.15	Cinética de secado de composta con fibra a 35 °C	74
Figura 3.1.16	Curvas de equilibrio de composta con esponjas a 35°C	75
Figura 3.3.1	Evolución de la relación caída de presión-flujo de aire (P/Q) en distintos medios filtrantes durante 7 días de operación en función del flujo de aire suministrado a cada columna, sometido a aire 100% húmedo y aire 100% húmedo con adición de agua al medio	91
Figura 3.3.2	Evolución de la relación de caída de presión-flujo de aire (P/Q) durante 7 días de operación en función de aire suministrado a cada columna (10, 40 y 70 l aire/min) en distintos medios filtrantes, sometidos a aire 100% húmedo y aire 100% húmedo con adición de agua al medio	92
Figura 3.4.1	Fotografía de un estudio de trazado con humo en una columna empacada con tezontle	96
Figura 3.4.2	Distribución de composta y tezontle dentro de las columnas de biofiltración	99
Figura A2.1	Evolución de los perfiles de caída de presión durante 7 días de operación utilizando 100% composta como medio filtrante sometido a aire 100% húmedo	130
Figura A2.2	Evolución de los perfiles de caída de presión durante 7 días de operación utilizando 100% composta como medio filtrante sometido a aire 100% húmedo con adición de agua	131
Figura A2.3	Evolución de los perfiles de caída de presión durante 7 días de operación utilizando 75% composta con 25% tezontle como medio filtrante sometido a aire 100% húmedo	132
Figura A2.4	Evolución de los perfiles de caída de presión durante 7 días de operación utilizando 75% composta con 25% tezontle como medio filtrante sometido a aire 100% húmedo con adición de agua	133

---

<b>Figura A2.5</b>	<b>Evolución de los perfiles de caída de presión durante 7 días de operación utilizando 75% composta con 25% lodo como medio filtrante sometido a aire 100% húmedo</b>	<b>134</b>
<b>Figura A2.6</b>	<b>Evolución de los perfiles de caída de presión durante 7 días de operación utilizando 75% composta con 25% lodo como medio filtrante sometido a aire 100% húmedo con adición de agua</b>	<b>135</b>
<b>Figura A2.7</b>	<b>Evolución de los perfiles de caída de presión durante 7 días de operación utilizando 75% composta con 25% bagazo de caña como medio filtrante sometido a aire 100% húmedo</b>	<b>136</b>
<b>Figura A2.8</b>	<b>Evolución de los perfiles de caída de presión durante 7 días de operación utilizando 75% composta con 25% bagazo de caña como medio filtrante sometido a aire 100% húmedo con adición de agua</b>	<b>137</b>

**GLOSARIO**

Biodegradable	Sustancia que puede descomponerse por acción de sistemas enzimáticos de bacterias u otros microorganismos.
Biopelícula	Capa delgada de microorganismos que se forma en la superficie de un material sólido.
Bagazo de caña	Producto resultante del prensado de la caña de azúcar.
Composta	Material orgánico que se genera por la descomposición microbiana de sólidos orgánicos, principalmente residuos urbanos.
Exotérmica	Proceso que se desarrolla con desprendimiento de energía
Fitotoxicidad	Capacidad de un compuesto químico de causar daño a las plantas.
Humedad absoluta	Cantidad de vapor de agua que contiene un aire húmedo, habitualmente expresada en kilogramos de vapor de agua por kilogramo de aire seco
Humedad relativa	Razón entre la presión parcial de vapor de agua en un aire húmedo y la presión parcial del agua, a la misma temperatura. Indica el grado de saturación del aire.
Humus	Componente orgánico de los suelos, que contiene principalmente ácido húmico. Se forma por descomposición de vegetales y animales y se emplea en la mejora de los suelos
Juncia	Planta de la familia de las juncáceas, que comprenden fanerógamas monocotiledóneas características de lugares húmedos, con hojas reducidas a escamas y fruto en cápsula
Mohos	Hongo ascomiceto, filamentosos, que se desarrolla sobre materia orgánica en descomposición
Permeabilidad	Capacidad de un material para ser atravesado por una sustancia líquida o gaseosa // Velocidad con la que un líquido o un gas atraviesan un cierto material
Suelo	Formación superficial de la corteza terrestre, resultante de la alteración de las rocas por meteorización y por la acción de los organismos.

---

<b>Tampón</b>	<b>Disolución cuyo pH se mantiene prácticamente constante cuando se añade una cantidad moderada de un ácido o una base.</b>
<b>Tezontle</b>	<b>Piedra volcánica usada en la construcción.</b>
<b>Turba</b>	<b>Producto de descomposición de materiales vegetales al quedar enterrados bajo el agua y sedimentos terrígenos en un proceso lento de carbonificación.</b>

# INTRODUCCION

## INTRODUCCIÓN

### I. Justificación

El desarrollo de la humanidad esta cada vez más determinado por sus necesidades del entorno ecológico, por lo que el hombre ha ideado diferentes sistemas de tratamiento de sus residuos, tanto de su aspecto del agua, del aire como de sus residuos sólidos.

Los gases residuales de origen urbano como industrial no han escapado ha esta evolución y una manera práctica de tratarlos, con métodos sencillos y económicos, son los sistemas biotecnológicos.

En la industria es muy común encontrar como base de control y tratamiento de los gases de desecho a los procesos fisicoquimicos con altos costos de inversión y de operación necesitando personal calificado para su buen funcionamiento, dentro de estos procesos se encuentran entre otros, la absorción, la adsorción, la oxidación térmica, química y catalítica, la centrifugación, la filtración y la electrofiltración

Una alternativa para el control y tratamiento de los gases generados en los procesos industriales son los sistemas biotecnológicos, que han sido ampliamente usados en el control y tratamiento de gases generados en las plantas de tratamiento de aguas residuales, en plantas de composteo y en el tratamiento de gases de compuestos orgánicos volátiles a escala industrial.

El tratamiento biológico de gases data desde 1920 en Alemania y Países Bajos, posteriormente la practica de utilizar tratamientos biológicos para gases de desecho se ha extendido por toda Europa y Estados Unidos. Los primeros sistemas se construyeron para tratar gases con olor generados en las plantas de tratamiento de aguas residuales y en plantas de composteo desde entonces el número de sistemas biológicos para tratar gases residuales generados en muchas industrias ha aumentado en el ámbito mundial, debido principalmente a las regulaciones ambientales de los diferentes países.



El proceso biotecnológico mas aplicado para el control y tratamiento de malos olores es la biofiltración. Este sistema se basa en la interacción del gas con un medio orgánico en cuya superficie se encuentran desarrollados microorganismos capaces de degradar los compuestos indeseables del gas, a lo cual se le denomina medio biológico filtrante.

El medio biológico filtrante se ve afectado por múltiples variables de operación entre las que se encuentra su composición, por lo que es recomendable generar información científica respecto a su mejor conformación, aunado con la utilización de componentes económicos y de fácil adquisición y aplicación en México.

## **II. Antecedentes**

La disposición y un aprovechamiento extensivo de los gases generados en las plantas de tratamiento de aguas residuales en nuestro país, contar con tecnología nacional competitiva que contribuya a la independencia tecnológica, así como la necesidad de contar con métodos económicos de tratamiento que puedan ser adaptados para tratar otro tipo de emisiones a la atmósfera como compuestos orgánicos volátiles generados en el sector industrial, motivo al grupo de Investigación del Departamento de Bioprocesos Ambientales del Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México a realizar el estudio "Control de malos olores en plantas de tratamiento de aguas residuales: Biofiltración", que en su primera etapa de investigación consistió en el estudio de los efectos de la composición del medio filtrante sobre diferentes factores, en función del flujo de gas y de la adición o no de agua al medio filtrante, con lo que se investiga información que soporte el desarrollo de la tecnología a fin de encontrar un medio filtrante adecuado para su aplicación.

## **III. Problemática**

El estudio de sistemas de tratamiento biológico de gases en México no esta bien definido (Revah y Noyola, 1996), por lo que su aplicación a escala industrial es muy limitado,

desconociéndose las grandes ventajas que este tipo de sistemas pueden generar en el control y tratamiento de gases de desecho.

La biofiltración de gases esta basada en la interacción del gas con un medio orgánico cuya actividad de degradación proviene de los microorganismos que viven y se desarrollan en él a lo cual se le denomina medio biológico filtrante.

El medio biológico filtrante es afectado por múltiples variables de operación, entre las que se encuentra su composición, la distribución de gas dentro del lecho filtrante y la caída de presión.

Entre los aspectos más importantes que determinan la operación de un biofiltro para el tratamiento de gases se refieren a la calidad del medio filtrante y a las condiciones de flujo de gas prevalencias dentro de la unidad de biofiltración. Por calidad de medio se entiende el tipo de microorganismos que viven en el medio, su tasa de crecimiento, la superficie ofrecida por el medio filtrante para el soporte de biomasa, la disponibilidad de nutrientes en el medio filtrante así como la humedad, pH, alcalinidad y temperatura entre lo más importantes.

Por otra parte, el concepto condiciones de flujo se refiere al grado de distribución del gas en el medio filtrante, las fuerzas cortantes debidas al rozamiento del gas con las partículas, y en general a las condiciones de mezclado existentes dentro del biofiltro.

La interdependencia de estos aspectos determina, en términos generales, su operación, además de la carga de sustrato aplicado.

El presente trabajo se enfoca al estudio de los efectos de la composición del medio filtrante (variación de agentes abultantes con composta) sobre factores como son la caída de presión, contenido de humedad, densidad real y aparente del medio, su porosidad y tamaño efectivo de partícula en función de tres cargas superficiales de aire y en función de la altura del biofiltro. Dentro de estos estudio se realizan estudios de secado de distintos medios filtrantes en función de la temperatura del aire y de su humedad.

Se espera obtener información que puede ser utilizada para el diseño y operación de los biofiltros, lo que proporcionaría al biofiltro alta competitividad y posibilidad de aplicación en el mercado nacional.

## **IV. Objetivos**

### **IV-I. Objetivo general**

Estudio fisicoquímico del medio filtrante para configurar sistemas de biofiltración para el control de malos olores relacionados con la producción del  $H_2S$  en plantas de tratamiento de aguas residuales.

### **IV-I. Objetivos particulares**

Determinar el tiempo de secado de diferentes medios filtrantes a temperatura constante y a diferentes condiciones de humedad del aire.

Cuantificar la influencia de tres variables como son la composición del medio filtrante, el flujo de aire y la existencia o no de adición de agua, sobre los parámetros de humedad del medio filtrante, las densidades real y aparente, la porosidad, el tamaño efectivo de partícula y la compactación del medio en función de la columna de biofiltración

Cuantificar la caída de presión en los medios filtrantes en función de la composición del medio, del flujo de aire y el tiempo de operación continua del sistema.

Caracterizar la tendencia del flujo de gas y cuantificar la dispersión y el tiempo de retención en las columnas en función de la composición del medio filtrante, del flujo de aire y de la adición o no de agua al medio filtrante.

## V. Hipótesis

Los efectos cualitativos que posee una proporción alta de composta en relación con el contenido de lodo biológico y agentes abultantes sobre la caída de presión, la retención de la humedad y la distribución del gas, será el incremento de la caída de presión, una mejor retención de la humedad y una mejor distribución de gas. Los efectos cualitativos que posee la introducción de agentes abultantes como el tezontle, el bagazo de caña en el medio filtrante son un decremento de la caída de presión y una mejora en las condiciones de distribución del gas en el medio filtrante. Esta hipótesis se fundamenta en lo encontrado por Feentra (1984) en Leson y Winer (1991) y Bohn (1992)

El introducir agentes abultantes en un medio filtrante ocasiona un decremento de la caída de presión y una mejor dispersión del gas en el medio. Esta hipótesis se fundamenta en lo encontrado por Feentra (1984) en Leson y Winer (1991) y Bohn (1992)

Las partículas de gas al interactuar con un medio constituido por partículas sólidas tiende a frenar el paso y a buscar mejores caminos de flujo en el espacio que les rodea produciéndose su dispersión dentro de la columna.

La corriente de gas al encontrar obstáculos en su paso dentro de columnas empacadas por partículas sólidas tiende a formar caminos de flujo dentro del medio sólido produciéndose canalizaciones dentro del mismo.

## VI. Descripción general

Instalación y operación del sistema de biofiltración en el laboratorio del Instituto de Ingeniería de la UNAM.

Para llevar a cabo el estudio se seleccionaron diferentes composiciones del medio filtrante (variación de diferentes agentes abultantes con composta) las cuales fueron sometidas a

pruebas fisicoquímicas para determinar su uso satisfactorio en unidades de biofiltración.

Las composiciones de lecho filtrante se sometieron entonces a pruebas de operación.

En estas pruebas se estudio el comportamiento del medio filtrante sobre factores como son: caída de presión, contenido de humedad, densidad real, densidad aparente, porosidad, tamaño efectivo de partícula, pH, y compactación del medio en función de tres cargas superficiales de aire y en función de la altura del biofiltro.

Además se realizan estudios de trazado en cada una de las corridas experimentales para cualificar y cuantificar las condiciones de flujo del gas en el medio filtrante.

Se realizan estudios de secado de distintos medios en función de la temperatura de aire y su humedad

## VII. Contenido

Se realiza un estudio del sistema de biofiltración, en el cual se describen las características más importantes del sistema, las variables y condiciones de operación de este tipo de sistemas.

En los procedimientos experimentales se describen los principales tópicos abordados en la investigación así como una descripción general sobre el contenido. Se realiza una descripción de los experimentos realizados.

En la sección de resultados y análisis de resultados se analizan, con base a los resultados experimentales obtenidos, los diferentes experimentos realizados a lo largo de la experimentación.

Existe el capítulo de conclusiones, fundamentadas en la experiencia obtenida durante el desarrollo de este trabajo.

Finalmente se mencionan los análisis fisicoquímicos realizados para la caracterización de los medios empleados en la experimentación.

# CADITULO I

## I. MARCO TEÓRICO

### I.1 Sistemas de tratamiento biológico de gases

La aplicación de los procesos biotecnológicos al tratamiento de gases de desecho industriales es reciente, fue establecida desde 1920 cuando el método fue propuesto para el tratamiento y control de olores generados en las plantas de tratamiento de aguas residuales y en las plantas de composteo. Hoy en día las biotecnologías para el control y tratamiento de gases residuales ofrecen amplias posibilidades para el tratamiento de un gran número de contaminantes gaseosos industriales. Estas tecnologías son útiles y competitivas para tratar ciertos intervalos de flujos de emisiones y concentraciones (Revah y Noyola, 1996).

En la Figura 1.1 se muestra los intervalos de aplicación de tecnologías de tratamiento de gases residuales industriales, en donde se puede apreciar la expansión que tienen los procesos biotecnológicos.

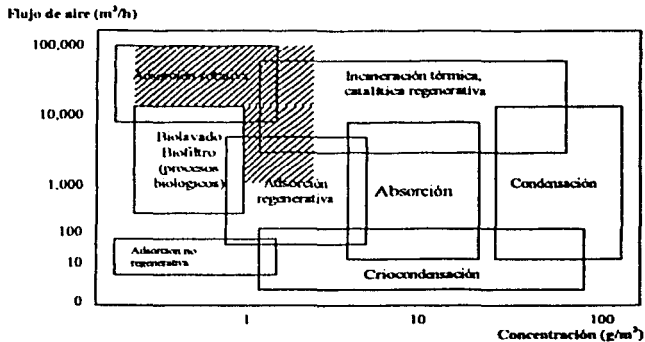


Figura 1.1 Aplicación de varias técnicas de tratamiento de gases como función del flujo y la concentración de contaminantes, el área sombreada indica la expansión que han tenido los procesos biotecnológicos (Adaptado de Van Groenestijn y Hesselink, 1993)

Los procesos biotecnológicos para el tratamiento de gases residuales se basan en la interacción del gas residual a tratar sobre una población de microorganismos adaptados para degradar los compuestos indeseables del gas.

La clasificación de los procesos biotecnológicos para el tratamiento de gases residuales se subdividen dependiendo de las condiciones en las que se encuentren los microorganismos en el sistema y el patrón de flujo de la fase líquida. (Diks y Ottengraf, 1991). En la Figura 1.2 se muestra los diferentes procesos y su subdivisión.

Dentro de las ventajas más importante de los procesos biotecnológicos para el tratamiento de gases sobre los procesos convencionales de tratamiento (físicoquímicos) es que pueden llevarse a cabo a temperatura del medio ambiente (10-45 °C) y a presiones atmosféricas. En general las ventajas de los procesos biotecnológicos son que transforman los contaminantes a sustancias no peligrosas o desechos de fácil manejo, tienen costos de operación bajos debido principalmente a las condiciones suaves de operación (T, P, pH etc.) a demás de poseer un balance energético adecuado (Revah y Noyola, 1996).

		Fase líquida	
		En movimiento	Estacionaria
Fase biológica	Dispersa	Biolavador	
	Inmovilizada	Bilavador de lecho escurrido	Biofiltro

(Adaptado de Revah *et al.*, 1996)

Figura 1.2 Subdivisión de las diferentes biotecnologías para el tratamiento de gases.

Las características de los tres procesos de tratamiento biológico de gases se desglosan a continuación:

### 1.1.1 Biolavadores

Generalmente consisten de un compartimiento biolavador y otro de generación. El primero es una columna atomizada de una suspensión de bacterias degradantes a los contaminantes del agua (Revah *et al.*, 1996)

Como primer paso el gas entra en contacto con agua en una torre de aspersión o empacada con material inerte en donde serán absorbidos o disueltos en el agua los compuestos indeseables del gas. Posteriormente, el agua con los compuestos disueltos es tratada aeróbicamente para su degradación biológica con un sistema de lodos activados. En los biolavadores el agua es una fase móvil que permite gran control de las condiciones de reacción tales como la adición de nutrientes y disoluciones tampón, temperatura, pH y fuerza iónica. (Van Groenestijn y Hesselink, 1993) Sin embargo, con este diseño, los biolavadores poseen una baja área de contacto entre el gas y el agua lo que restringe su uso a compuestos con constantes de Henry menores a 10 o inclusive menores a 0.01 si se requieren evitar torres aspersoras grandes y gran consumo de agua. (Kok, 1992)

Los procesos con biolavadores han sido empleados en varias ramas de la industria, en tratamiento de gases con ciertos alcoholes, glicoles, cetonas, productos aromáticos, resinas, etc., gases provenientes de incineradores y fundidoras que contienen aminas, fenoles, formaldehído, amonio etc. (Revah *et al.*, 1996)

En la Figura 1.3 se muestra un esquema del sistema biolavador.

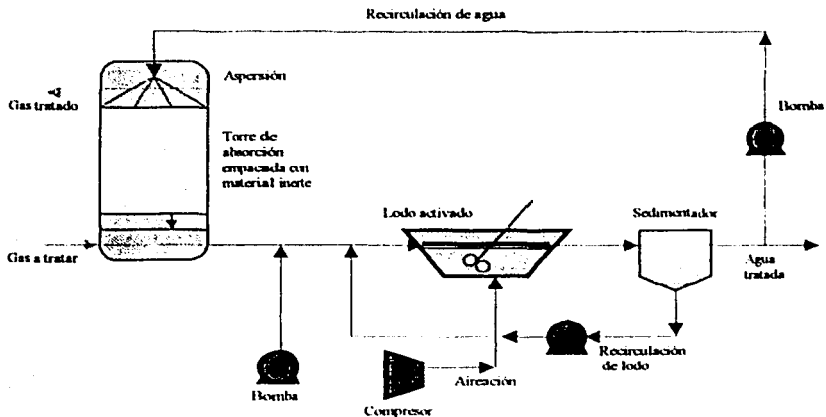


Figura 1.3 Esquema de un Biolavador



### 1.1.2 Biofiltro percolador o de lecho escurrido

Estos sistemas pueden ser considerados como intermediarios entre los biofiltros y los biolavadores.

Generalmente consisten en columnas empacadas con algún material que permita el desarrollo de una biopelícula de microorganismos de algunos milímetros de espesor. En los biofiltros percoladores el gas es puesto en contacto con material inerte en donde se ha desarrollado la biopelícula. El proceso de adsorción de gases y su degradación ocurre en el mismo equipo. El área específica de empaque es relativamente baja ( $100$  a  $300 \text{ m}^2/\text{m}^3$ ) lo que restringe el tratamiento de gases pocos solubles en agua (Ottengraf, 1987). En la Figura 1.4 se muestra un esquema de este proceso

Para el tratamiento de contaminantes con hidrocarburos halogenados,  $\text{H}_2\text{S}$ , y amoníaco los cuales producen metabolitos ácidos y alcalinos, el biofiltro percolador facilita su control y evita su acumulación en el sistema. Algunos otros contaminantes que han sido tratados con esta tecnología son el Isobutano, Isopentano, Benceno, Tolueno, Naftaleno, Acetona, Popionaldehído, Metilmetacrilato, etanol, Diclorometano y Dimetiltiosulfato. (Chou y Huang, 1997).

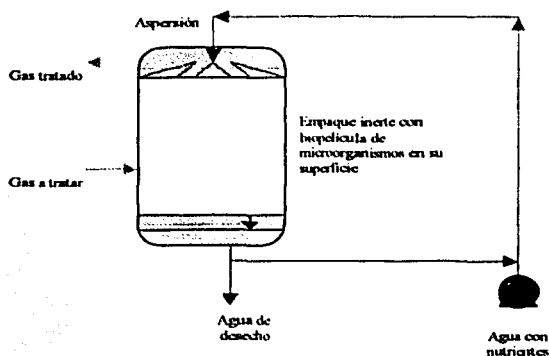


Figura 1.4 Biofiltro percolador o de lecho escurrido

Algunos factores que afectan la remoción son el tipo de contaminante, el material y la configuración del empaque, patrones de flujo del líquido y del gas, el tiempo de retención del gas, la tasa de recirculación del líquido, la adición de nutrientes y el pH (Chou y Huang, 1997).

### 1.1.3 Biofiltración

La biofiltración es el proceso de tratamiento biológico más usado en el mundo, primeramente usado para tratar gases con olor generados en las plantas de tratamiento de aguas residuales y en plantas de composteo. Actualmente es usado en un gran espectro según se muestra en la Tabla 1.1. En los biofiltro el gas a tratar es pasado a través de una cama de filtración biológicamente activa, la cual se encuentra inmovilizada sobre un material orgánico como puede ser composta, turba, desechos de madera, tierra, etc, los cuales sirven de soporte de la película microbiana y los abastecen de nutrientes inorgánicos necesarios para su metabolismo. Estos nutrientes son reciclados para finalmente ser liberados por el proceso de mineralización, por lo que el material de empaque será consumido y se debe de remover después de algunos años de operación. (Bohn *et al.*, 1988).

Esta tecnología se usa para la remoción de compuestos volátiles medianamente recalcitrantes como el tolueno y para altamente degradables como el etanol en equipos piloto (Morales *et al.*, 1994).

Adhesivos	Rastros	Sabores y fragancias
Recubrimientos	Reciclado de aceite	Procesado de tabaco
Manufactura química	Tostado de café y cocoa	Olores en plantas de tratamiento
Almacenamiento de productos químicos	Olor en beneficiadoras de aceite, pescado, plumas, etc.	Olores de plantas de tratamiento municipal
Fundidoras	Freidoras de pescado	Olores en plantas de composteo
Industria de pintura e impresión	Olores en plantas de alimentos para animales	Extracción de gas de rellenos sanitarios

(Adaptado de Leson y Winer, 1991)

**Tabla 1.1** Ejemplo de aplicación de biofiltros

### 1.1.4 Comparación de las biotecnologías

En la Tabla 1.2 se muestran las ventajas y desventajas de cada proceso biológico, en donde se puede observar que la biofiltración presenta ventajas importantes sobre las otras dos biotecnologías. En general la biofiltración no requiere de recirculación de agua, no genera desechos, como lodo o agua contaminada.

La selección del proceso biotecnológico para la purificación del gas depende no solo de los materiales utilizados sino también de los costos de operación e inversión, la generación de desechos, la escala de purificación, la pureza del gas obtenido y otros requerimientos. La selección más adecuada es función de las condiciones particulares de cada industria.

Los biofiltros y los biofiltros percoladores se prefieren su uso en las plantas de tratamiento de aguas residuales y en las plantas de composteo así como en la industria agrícola, mientras que en la industria de proceso se opta también por los biofiltros y los biolavadores (Ottengraf, 1987; Groenestijn y Hesselink, 1993). Por otra parte, Utkin *et al.*, (1992) y Leson *et al.*, (1991) afirman que el sistema de tratamiento más utilizado son los biofiltros debido a sus bajos costos de operación, al bajo costo del material de la cama y a los bajos consumos de agua además de poseer una alta eficacia en la remoción de distintos contaminantes, no generar desechos como lodo y agua contaminada.

Dentro de los procesos biotecnológicos, los biofiltros presentan los costos de inversión y operación más bajos sobretodo cuando hay que tratar grandes volúmenes de gas con bajas concentraciones de contaminantes (Leson *et al.*, 1991). Un estimado del costo de operación de los biofiltros en Holanda y Alemania incluyendo el costo de energía, reemplazo del medio filtrante y el mantenimiento en general es de 0.5 a 1.5 USD por cada 100,000 pies<sup>3</sup> de gas tratado (Leson y Winer, 1991). Para el caso de Estados Unidos es de 0.3 a 0.6 USD por cada 100,000 pies<sup>3</sup> de gas tratado en donde no se incluye cambio del material filtrante que generalmente se hace entre 5 y 10 años (Leson y Winer, 1991). Groenestijn y Hesselink (1993) reportan que el sistema biológico de lavado de gases (biolavador) posee un costo de operación y mantenimiento superior en casi 7 veces el costo de operación y mantenimiento de un biofiltro.

Tipo de sistema	Composición del medio	Circulación de agua	Descripción	Área de aplicación	Ventajas	Desventajas
Biofiltro	Microorganismos inmobilizados en soportes naturales con fuente de nutrientes	No hay circulación de agua	Adsorción de contaminantes en la biopelícula soportada en un medio natural que provee nutrientes a los microorganismos. Se usa un solo reactor.	Compuestos con concentraciones menores a 1 mg/L con coeficientes de Henry menores a 10.	Alta superficie de contacto gas-líquido. Fácil arranque y operación. Soporta períodos sin alimentación	Poco control sobre los fenómenos de reacción. Baja adaptación a altas fluctuaciones de flujo de gas. Mayor requerimiento de área
Biolavador	Empaque inerte	Agua en circulación constante	En una torre de aspersión se disuelven los contaminantes del gas que después son degradados biológicamente en un sistema de lodos activados. Se requieren dos sistemas, el absorbedor y el sistema de lodos activados	Compuestos con concentraciones menores a 5 mg/L y coeficientes de Henry menores a 0.01	Mayor control de la reacción. Posibilidad de evitar acumulación de subproductos. Equipos compactos. Baja caída de presión	Baja superficie de contacto gas-líquido. No soporta períodos sin alimentación. Genera lodo residual. Arranque complejo. Necesidad de aireación extra. Altos costos de inversión, operación y mantenimiento. Necesidad de suministrar nutrientes
Biofiltro percolador o de lecho escurrido	Soporte inerte con biopelícula en su superficie	Circulación de agua continua	El gas se disuelve en la película de agua para entrar en contacto con los microorganismos. La absorción y la degradación suceden en solo reactor	Compuestos con concentraciones menores a 0.5 mg/L con coeficientes de Henry menores a 1	Comparables a las del biolavador	Baja superficie de contacto gas-líquido. Generación de lodos. No resiste períodos sin alimentación. Necesidad de suministrar nutrientes. Arranque complejo. Altos costos de inversión, operación y mantenimiento.

(Adaptado de Utkin *et al.*, 1992 y Groenestijn y Hesselink, 1993)

Tabla 1.2 Características de los sistemas de tratamiento biológico de gases

## 1.2 Proceso de biofiltración

Este sistema fue propuesto desde 1920 para tratar olores en plantas de tratamiento de aguas residuales, sin embargo una propuesta más formal fue hecha por Prues en 1990 según afirma Utkin *et al.*, (1992).

Entre las características básicas del proceso de biofiltración es que se lleva acabo a temperatura ambiente y a la misma presión del gas a tratar, es un método simple con equipo poco complicado. Por lo general consiste en una o varias unidades de lechos fijos (sólido orgánico) a través del cual o cuales fluye el gas que se va a tratar. El gas es introducido a la cama por medio de un soplador o compresor, poniéndolo en contacto con el lecho sólido orgánico absorbente, en el cual se ha desarrollado una biopelícula de microorganismos especialmente adaptados para degradar los compuestos indeseables del gas. En algunas ocasiones es necesario un acondicionamiento del gas influente para asegurar un buen funcionamiento de las unidades de biofiltración, el acondicionamiento más importante es la humidificación del gas sucio.

El componente principal del biofiltro es el lecho de filtración debido a sus propiedades fisicoquímicas como son textura, estructura, permeabilidad, pH, concentración de nutrientes, humedad y población de microorganismos entre otros. El material de empaque del lecho generalmente es una mezcla de materiales naturales con un área específica y espacios vacíos grandes. Esta puede ser composta, tierra o turba mezclado con un material abultante (partículas de poliestireno, madera, plumas, hojarasca, piedras etc.) la cama posee los nutrientes y la superficie necesaria para que en ella se desarrollen los microorganismos que serán los responsables de la degradación de los compuestos indeseables del gas. Una fracción de espacios vacíos grandes (producidos por el material abultante) favorece una baja caída de presión del gas en la cama, así como una adecuada oxigenación del filtro y distribución homogénea del gas.

La biofiltración es un sistema complejo que es afectado por varios factores como la oxigenación del medio, el contenido de humedad, el pH, la temperatura y los patrones de flujo en el medio. Debido a ello y a pesar de numerosos estudios que se han efectuado aún no se ha comprendido con cabalidad su funcionamiento (Baltzis *et al.*, 1997).

En la Figura 1.5 se muestra un esquema de este proceso.

Por otro lado existen distintos diseños de biofiltros que se han utilizado para el tratamiento de malos olores y compuestos orgánicos volátiles. En la Figura 1.6 y la Tabla 1.3 se presentan los esquemas de proceso y características más relevantes de cada versión.

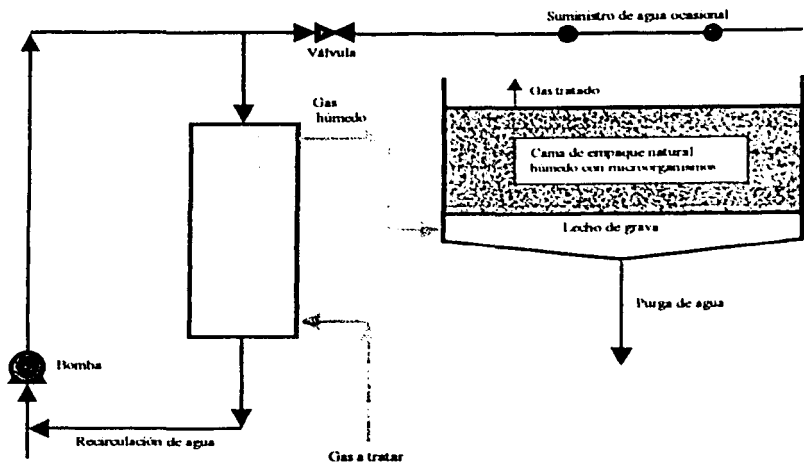


Figura 1.5 Esquema de un biofiltro

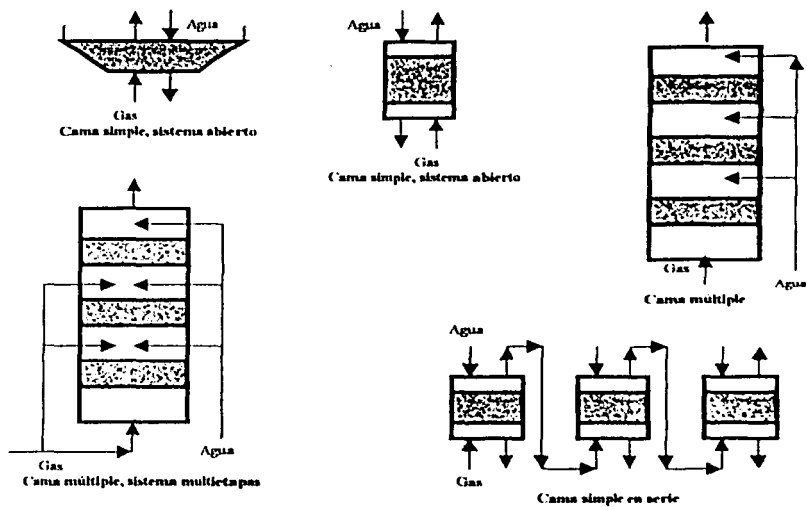


Figura 1.6 Versiones de biofiltros

Tipo de sistema	Ventajas	Desventajas	Aplicaciones
Cama simple, sistema abierto	Diseño simple, mantenimiento e inversión bajos	Funcionamiento variable, difícil de monitorear, control de proceso limitado, requerimientos de espacio	Usado para el control de olores y COV's
Cama simple, sistema cerrado	Diseño simple, mantenimiento e inversión bajos, se incrementa el control del proceso	Requerimientos de espacio	Tratamiento de COV's
Cama múltiple	Se reduce el espacio requerido, se incrementa la flexibilidad de operación del proceso, eficaz para el tratamiento de gases mixtos	Se incrementa la complejidad del diseño y la operación y su costo	Limitado para el uso a escala industrial. Se ha utilizado en plantas piloto y de laboratorio para la eliminación de COV's
Sistema cama simple en serie	Alta flexibilidad en su funcionamiento y muy efectivo para el tratamiento de mezcla de gases	Mayores costos de inversión y mantenimiento	Tratamiento de mezclas de COV's a nivel piloto.
Sistema Modular	Alta flexibilidad en su funcionamiento, automatizado y fácil de monitorear	Sistema patentado	Tratamiento de compuestos de azufre reducidos y Benceno, Tolueno, Etilbenceno y Xileno (BTEX)
Cama múltiple, sistema multietapas	Mejora la respuesta del sistema a picos orgánicos y de flujo. Gran flexibilidad en la operación y control del proceso.	Aún no probado a nivel piloto o escala industrial	Tratamiento de COV's a nivel laboratorio

(Adaptado de Swanson, 1997)

Tabla 1.3 Comparación de los diferentes tipos de biofiltros



Los biofiltros han sido aplicados con éxito en el tratamiento de malos olores en plantas de tratamiento de aguas residuales así como en plantas de composteo ( $H_2S$ ). También han sido igualmente exitosos en el tratamiento de los siguientes compuestos: Amoniaco, Monóxido de carbono, Acetona, Benceno, Butanol, Acetato de butilo, Dietilamina, Disulfuro de dimetilo, Etanol, Hexano, Etilbenceno, Butilaldehido, Metanol, Metiletilecetona, Estireno, Isopropanol, Metano, Metilmercaptano, Mono-, Di-, Tricloroetano, Oxido de nitrógeno, Dióxidos de nitrógeno, Pentano, Sulfuro de dimetilo, Tiofenos, Tolueno, Triclorometano, Tetracloroetano 2-etil-hexanol y Xileno. (Ottengraf y Van Den Oever, 1983; Mueller 1988; Hodge *et al.*, 1991; Barshter *et al.*, 1993; Apel *et al.*, 1995; Ergas *et al.*, 1995 y Mongenroth *et al.*, 1995). Muchos de estos compuestos se generan en la industria de la pulpa y el papel, de la química, petroquímica y farmacéutica, de la fabricación de pintura, adhesivos y recubrimientos así como de la industria alimenticia entre las que se encuentran la de saborizantes y fragancias, café, cocoa y pescado.

En la Tabla 1.4 se reportan tasas de remoción de algunos compuestos utilizando al biofiltro como proceso de tratamiento.

Compuesto	Tasa máxima de remoción
Formiato de metilo	35.0 g/Kg lecho seco/d
Sulfuro de hidrógeno	5.5 g/Kg turba seca/d
Acetato de butilo	2.41 g/Kg turba seca/d
Butanol	2.41 g/Kg turba seca/d
N-Butanol	2.40 g/Kg composta seca/d
Acetato de etilo	2.03 g/Kg turba seca/d
Tolueno	1.58 g/Kg turba seca/d
Metanol	1.35 g/Kg lecho seco/d
Metanotiol	0.90 g/Kg turba seca/d
Disulfuro de dimetilo	0.68 g/Kg turba seca/d
Sulfuro de dimetilo	0.38 g/Kg turba seca/d
Amoniaco	0.16 g/Kg turba seca/d

(Adaptado de Williams y Miller, 1992)

**Tabla 1.4** Tasas máximas de remoción de algunos compuestos con biofiltros

### 1.3 Parámetros de diseño y operación de biofiltros

#### 1.3.1 Fenómenos involucrados en su operación

##### 1.3.1.1 Modelo básico

La remoción de los compuestos químicos se lleva a cabo por tres etapas en la biopelícula, primero el gas cruza la interfase entre el flujo de gas y el espacio poroso y la biopelícula acuosa alrededor del medio sólido. Posteriormente se lleva a cabo la difusión a través de la biopelícula donde se encuentran aclimatados los microorganismos. Finalmente los microorganismos obtienen la energía por la oxidación de los compuestos. Simultáneamente a esto hay una difusión de oxígeno del gas al agua y a la biopelícula además de la expulsión de gases producto de la oxidación. Los microorganismos obtienen los nutrientes necesarios de la partícula sólida que los soporta. En la Figura 1.7 presenta lo que ocurre en el proceso.

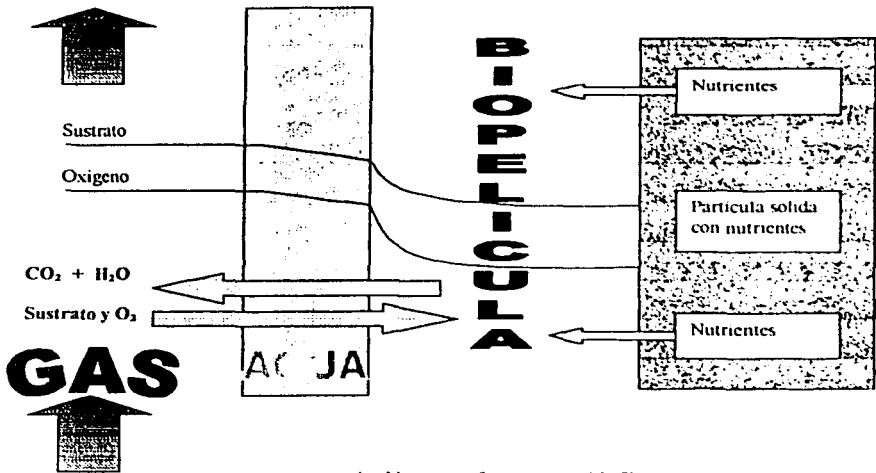


Figura 1.7 Relación entre fases en un biofiltro

### 1.3.1.2 Fenómenos adsorción / absorción

La biosorción de un compuesto consiste por una parte en la absorción del compuesto por la biopelícula y por otra en adsorción del compuesto por las partículas del medio no colonizado con microorganismos (Bardtke *et al.*, 1987). La medición de la sorción en un filtro completamente libre de humedad es debido a un fenómeno de adsorción mientras que la medición de la sorción en un filtro con humedad es la suma de la adsorción y la absorción. La diferencia cuantitativa de ambos fenómenos da la pauta para calcular la eficacia de interacción entre el biofiltro y el gas puesto que la degradación del gas contaminante sólo se puede llevar a cabo en un medio húmedo.

### 1.3.2 Consideraciones para diseño

#### 1.3.2.1 Tiempo de contacto cama vacía (TCCV)

Es una medida indirecta del tiempo de residencia del gas al considerar que dicha medición se realiza sin tomar en cuenta el volumen ocupado por el medio (Tabla 1.5). En el cálculo del volumen real habría que conocer la porosidad del medio cosa que raramente se sabe (Swanson *et al.*, 1997)

#### 1.3.2.2 Carga superficial

La carga superficial (Tabla 2.5) de gas es una medida del volumen del gas aplicado en una unidad de tiempo sobre la superficie del biofiltro. Para un biofiltro dado, una carga superficial alta puede ser causa de flujos de gas altos lo que baja el TCCV y la eficacia de remoción de contaminantes. Se recomienda aplicar cargas superficiales menores a  $200 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{h}$  (Sabo *et al.*, 1993)

### 1.3.2.3 Carga másica

La carga másica (Tabla 1.5) es la cantidad de masa aplicada al filtro por unidad de volumen por unidad de tiempo. Debido a que la carga másica incluye efectos de flujo volumétrico y de concentración, un biofiltro puede operar diferente a la misma carga másica. Otro factor que incluye en la operación de los biofiltros es el régimen de flujo pues al calcular una carga másica se supone un mezclado perfecto y generalmente los filtros tienden a trabajar como flujo pistón. Este hecho produce que algunas zonas se encuentren sobrecargadas y otras no.

### 1.3.2.4 Tasa de remoción

La tasa de remoción (Tabla 1.5) de contaminantes se define como la cantidad de masa eliminada por unidad de volumen por unidad de tiempo.

### 1.3.2.5 Dimensionamiento

Para un gas dado, el volumen de biofiltro requerido para una eficacia de remoción dada depende básicamente del flujo de gas y de la concentración de contaminantes a remover. El área de flujo de gas será calculada a través de la carga superficial (Flux de gas) mientras que la altura se calculará con el tiempo de permanencia del gas dentro del sistema.

Generalmente la altura de los biofiltros varía entre 0.5 a 2.5 metros siendo la más utilizada la de 1 m (Williams y Miller, 1992). Construir biofiltros altos reduce el área de construcción pero es posible ocasionar problemas de sobrecarga superficial y másica en el sector del biofiltro que recibe al gas además de ocasionar cortos circuitos y zonas muertas dentro del filtro. Existe la posibilidad de dimensionar los biofiltros al hacer uso de modelos cinéticos aunque no es la más utilizada.

Parámetro	Ecuación	Unidades típicas	Intervalo	Referencias
Tiempo de contacto en cama vacía (TCCV)	$V/Q$	Segundos	15-60 30-60 30	Pomeroy, (1982) Williams y Miller, (1992) Severin, (1993) Corsi y Seed, (1994)
Carga superficial	$Q/A$	$m^3/m^2/h$	50-200 300-500 18-96	Mueller, (1988) Williams y Miller, (1992) Leson y Winer, (1991) Sabo, (1993)
Carga másica	$QC_i/V$	$g/m^3/h$	10-160	Ottengraf y Van Den Oever, (1983) Leson y Winer, (1991) Medina, (1992) Severin <i>et al.</i> , (1993)
Tasa de remoción	$Q(C_i - C_e)/V$	$g/m^3/h$	10-160 10-110	Ottengraf y Van Den Oever, (1983) Devinny, (1993) Leson y Winer, (1991)
Eficacia de remoción	$(C_i - C_e)/C_i$	%	95-99	Leson y Winer, (1992) Marsh, (1992) Williams y Miller, (1992)

V: volumen del biofiltro, Q: flujo de gas A: área,  $C_i$ : concentración influente,  $C_e$ : concentración efluente

**Tabla 1.5** Algunas características recomendadas para el diseño y operación de biofiltros

### 1.3.2.6 Material filtrante

El material filtrante es la parte más importante y frecuentemente la parte más barata de un biofiltro. Según Clark y Wnoroswski, casi cualquier material orgánico que presente una composición y estructura satisfactoria podría usarse (Kennes y Thalaso, 1998). Smith, demostró la capacidad de los suelos para absorber  $SO_2$ ,  $H_2S$ ,  $CH_3SH$ ,  $CO$ ,  $C_2H_2$ , y  $C_2H_4$  (Pomeroy, 1992). Un gran número de medio se ha usado para los biofiltros, los más comunes son la composta, la turba, tierra, los lodos de una planta de tratamiento, corteza de árbol, aserrín y mezclas de ellos. Es útil poder encontrar un material filtrante adecuado que posea cualidades necesarias para la biofiltración, es posible desarrollar un material filtrante óptimo al mezclar dos o más sustancias juntas. Las experimentaciones actuales tratan de desarrollar nuevos materiales filtrantes. Se ha encontrado que las mezclas de composta con

corteza y composta con materiales inertes poseen propiedades beneficiosas (porosidad, retención de humedad, absorción de contaminantes etc.) que permiten lograr altas capacidades de degradación y ofrecen bajas caídas de presión. (Bardtke *et al.*, 1987).

Un material bueno para usarse como material básico del filtro debe cumplir varios criterios (Bardtke *et al.*, 1987; Leson y Winer, 1991; Williams y Miller, 1992)

1. Rico en diversos microorganismos
2. Una superficie grande para el crecimiento de la biopelícula
3. Composición química equilibrada
4. Buena disponibilidad de nutrientes (nitrógeno, fósforo y potasio)
5. Buena retención de la humedad
6. Buena capacidad de adsorción /absorción
7. Alta permeabilidad del aire
8. Densidad baja, para una operación de soporte más fácil y barata
9. Ofrezca bajas caídas de presión
10. Que no existan malos olores asociados con el medio filtrante
11. Evitar la compactación del medio para reducir la necesidad de mantenimiento y su reemplazo
12. Bajos costos
13. Alta disponibilidad

La turba, la composta, los suelos y lodo activado o una mezcla de estos son los materiales más comunes usados en los biofiltros. Hojas secas, plumas, pedazos de madera, arcilla porosa, partículas de lava, piedras, esferas de poliestireno y carbón activado pueden ser utilizados como agentes abultantes para incrementar la porosidad del medio, su superficie reactiva y reducir la caída de presión (Leson y Winer, 1991; Groenestijn y Heseelink, 1993). El carbón activado es adicionado al medio para incrementar la capacidad tampón del mismo y la adsorción de contaminantes lo que reduce considerablemente el volumen del biofiltro (Ottengraf, 1986). El medio también puede ser acondicionado con piedra caliza, alúmina, sílica y otras bases para incrementar la capacidad de adsorción así como la de

neutralización de los ácidos que se forman con el tiempo (Bohn, 1992; Williams y Miller, 1992). Medios filtrantes con base en composta y suelo son los más utilizados actualmente en un biofiltro, debido principalmente al bajo costo y alta disponibilidad (Bohn, 1992) dependiendo de las condiciones de operación del mismo.

La biofiltración con suelo se usa en EE.UU., en los países bajos la composta es favorecida como material del biofiltro y en Alemania la turba (Van Ligenhove, 1986). En un biofiltro dependiendo de las condiciones de operación del mismo la cama debe ser reemplazada en 1 a 5 años (Bohn, 1992). En la Tabla 1.6 se presentan las ventajas y desventajas de utilizar composta y suelo como medio filtrante.

	<b>Composta</b>	<b>Suelo arenoso</b>
<b>Ventajas</b>	<p>Mayor concentración de microorganismos.</p> <p>Alta capacidad tampón y de intercambio iónico.</p> <p>Mayor capacidad de tratamiento para flujos altos</p> <p>Menor requerimiento de área y volumen</p> <p>Tratamiento muy probado</p>	<p>Mayor estabilidad física con el tiempo.</p> <p>Mayor área superficial.</p> <p>Pueden neutralizar por si solos la acidez.</p> <p>El suelo tiende a ser hidrofílico cuando se seca lo que facilita su humidificación.</p>
<b>Desventajas</b>	<p>Su capacidad de degradación disminuye con el tiempo.</p> <p>Decrece el tamaño de partícula.</p> <p>Puede contener elementos tóxicos al provenir de residuos urbanos.</p> <p>La composta tiende a ser hidrofóbica cuando se seca lo que dificulta su rehumidificación.</p>	<p>Mayor caída de presión.</p> <p>Menor concentración de nutrientes.</p> <p>Menor tiempo de reemplazo.</p>

Información extraída de Bohn, (1992) y Williams y Miller, (1992)

**Tabla 1.6** Ventajas y desventajas del uso de suelo y composta como medio filtrante

### 1.3.2.6.1 Composta

La composta es el material de filtración más empleado como medio en las unidades de biofiltración. Muchos materiales son usados como composta, la basura de jardín, los fangos de aguas residuales, residuos municipales, residuos de comida y residuos de corral.

Como todo material, la composta debe reunir ciertos requisitos elementales como son: contenido de materia orgánica, nutrientes, buena capacidad de sorción, contenido de materia orgánica, retención de humedad y variedad de microorganismos.

La composta es un material orgánico que se genera por la descomposición microbiana de sólidos orgánicos por medio de una respiración aerobia que pasa por una fase termofílica. Un material compostado adecuadamente es un material tipo humus higiénico y libre de características desagradables libre de patógenos y sustancia fitotóxicas, una composta madura no produce olor, pudiendo almacenarse sin problema alguno (Metcalf y Eddy 1988, Sauri *et al.*, 2000 ).

El principal uso de la composta es en la agricultura y como material de cobertura de rellenos sanitarios o basureros controlados. (Metcalf y Eddy 1988; Sauri *et al.*, 2000 )

La composta contiene un alto nivel de microorganismos, el contenido de bacterias por gramo de material es de aproximadamente de un billón y la población de hongos es por arriba de 100,000 por gramo. (Bohn, 1992)

### 1.3.2.6.2 Suelos

Los suelos han sido utilizados como material filtrante en Estados Unidos en sustitución de la turba utilizada en Europa, al igual que la composta, los suelos deben cumplir con propiedades que satisfagan su uso en unidades de biofiltración.

El suelo es una matriz porosa de componentes orgánicos(humus) e inorgánicos con una porosidad entre 40-50%. La fracción orgánica varía desde 1 a 5 % pero puede tener depresiones de 0.5% o menos o tan altas como 100%.(Bohn y Bohn, 1988)

El suelo coloidal (< 2 micrómetros) es una fracción de arcilla más humus, Las fracciones coloidales varían desde menos del 1% en la arena de duna a 50% en la turba y arcillas pesadas. El área de superficie de los coloides del suelo varía desde 10 a 800 m<sup>2</sup>/g. Su bajo costo, alta disponibilidad y sus propiedades de regeneración continua del suelo arenoso lo hace un efectivo absorbente. (Bohn y Bohn, 1988).



Una propiedad importante de los suelos es su variedad de microorganismos, por lo general la distribución de la flora microbiana es como sigue:  $10^9$  bacterias por gramo,  $10^5$  hongos por gramo y arriba de  $10^7$  *actinomicetos* por gramo. (Bohn y Bohn, 1988).

Los suelos son químicamente estables y su tiempo de vida en unidades de biofiltración se alarga por varios años.

### 1.3.2.6.3 Turba

El uso de turbas como material filtrante tubo lugar en Alemania y Holanda, generalmente funcionan adecuadamente con diferentes tipos de gases contaminantes

La turba es un material heterogéneo que contiene sustancias húmicas, posee propiedades hidrológicas en particular características de retención de agua y conductividad hidráulica (Heiskanen, 1999; Vaillancourt et al., 1999).

Las turbas utilizadas como medios filtrantes se clasifican en: turbas de musgos, turba de juncia y carrizo y humus de turba. La turba de musgo se forma de la vegetación de musgo, la turba de juncia y carrizo de carrizos, juncias, tule y otras plantas asociadas, mientras que el humus de turba es cualquier turba que ha sufrido una descomposición considerable El uso principal de las turbas es como mantillo en la preparación de tierra en invernaderos Algunas propiedades de las turbas comunes se presentan en la Tabla 1.7

Tipo	Nitrógeno (%)	Capacidad de absorción de agua (%)	Contenido de cenizas (%)	pH
Turba de musgo esfagnineo	0.6-1.4	15.0-30.0	1.0-5.0	3.0-4.0
Turba de musgo "Hijnum"	2.0-3.5	12.0-18.0	4.0-10.	5.0-7.0
Turba de juncia carrizo	1.5-3.0	5.0-12.0	5.0-15.0	4.0-5.0
Turba desconpuesta	2.0-3.5	15.0-50.0	10.0-50.0	5.0-7.5

Tabla 1.7 Características de algunas turbas comunes.

### 1.3.2.7 Condiciones fluidodinámicas

El comportamiento fluidodinámico del gas dentro de un biofiltro ha sido reportado como tendiente a flujo pistón. Uno de los factores importantes a considerar para asegurar un buen funcionamiento de un biofiltro es la buena distribución y homogenización del gas con el objeto de evitar zonas muertas dentro del biofiltro. Conforme el gas ingresa a la cama de filtración, las partículas del medio filtrante ejercen influencia sobre el gas produciendo canalizaciones y zonas muertas dentro del mismo. Una investigación más profunda sobre los aspectos fluidodinámicos del gas deben llevarse a cabo para determinar con exactitud el grado de influencia del medio sobre el gas, las zonas muertas generadas y relacionar esto con el cambio en la capacidad de tratamiento del biofiltro.

### 1.3.2.8 Modelos

Los modelos permiten predecir la eficacia de eliminación de contaminantes como una función del diseño del reactor, de las propiedades del compuesto o compuestos a eliminar y de la microbiología del medio. Con ello es posible dimensionar y diseñar un biofiltro. Los modelos más utilizados para biofiltración relacionan la transferencia de masa con cinéticas de degradación y crecimiento tipo Michaelis Menten y Monod, respectivamente (Groenestijn y Hesselink, 1993)

Uno de los primeros modelos desarrollados fue presentado por Ottengraf y Van Den Oever, (1983) (en Groenestijn y Hesselink, 1993). En él se describe la difusión de los contaminantes de la fase gas a la fase líquida y la oxidación biológica en la biopelícula y hace la distinción entre los procesos micro y macrocinéticos involucrados en la operación del biofiltro (Leson y Winer, 1991). Aunque este modelo es referenciado como uno de los más importantes propuestos a la fecha Goving *et al.*, 1993 señala una limitación en el sentido de que no es aplicable cuando las concentraciones de sustrato sean menores a la constante de velocidad media de Monod.

Existen otro tipo de modelos o ajustes en los que intervienen cinéticas de primer orden y balances de masa con lo cual se relaciona la eficacia de remoción de contaminantes con el

tiempo de retención del gas en el biofiltro según se muestra en la ecuación 1. (Bardtke *et al.*, 1987; Cho *et al.*, 1991; Bohn, 1992 y Allen y Phatak, 1993; Sorial *et al.*, 1997):

$$\eta = 1 - e^{-kt} \quad (1)$$

Donde:

$\eta$  = eficacia de remoción

$k$  = constante de la velocidad de reacción o degradación

$t$  = tiempo de retención del gas

Aunque un modelo teórico como el de Ottengraf permite conocer los fenómenos internos del sistema y predecirlos, el manejo matemático y experimental del mismo es más complejo además de requerir una serie de suposiciones que eventualmente pueden estar lejos de las condiciones reales de operación. Un ajuste representado por la ecuación 1 permite efectuar un diseño de biofiltro acorde con la capacidad de degradación del medio filtrante visto como una caja negra. Ello facilita la experimentación y para situaciones prácticas puede ser más favorecido.

## 1.4 Parámetros de operación y características del proceso de biofiltración

### 1.4.1 pH y alcalinidad

Para la mayoría de los procesos biológicos el intervalo de pH óptimo en que crecen y se desarrollan los microorganismos es entre 7-8, pero, de acuerdo con la especie, requieren de un pH óptimo, los límites mínimos y máximos entre los cuales ocurre el desarrollo, también varían con la especie.

En un biofiltro al no existir una masa de agua que circule a través del medio es previsible la acumulación de ácidos como producto de la degradación de compuestos. Tal es el caso del  $H_2S$  y compuestos orgánicos azufrados que producen  $H_2SO_4$ , o la degradación de  $NH_3$  y compuestos orgánicos nitrogenados los cuales producen  $HNO_3$  en el medio así como la degradación de compuestos organoclorados que forman  $HCl$

Se ha notado con frecuencia que la proporción de hongos contra la de bacterias y *actinomicetos* es mayor en los medios ácidos que en los neutros, por lo tanto un medio ácido favorece el desarrollo de los hongos pero es desfavorable para el crecimiento de otras formas de vida. Generalmente, los microorganismos benéficos funcionan mejor en un medio que tiene un pH aproximadamente neutro. Como regla general, los actinomicetos prefieren un pH de 7 a 7.5, las bacterias y protozoarios de 6 a 8 y los hongos de 4 a 8. En medios fuertemente ácidos las bacterias no se desarrollan ni funcionan normalmente, y esto causa que se obtenga una inoculación pobre y que los microorganismos no persistan en el medio por periodos grandes de tiempo. Por lo que es evidente que la acidez óptima para la mayoría de las poblaciones del medio (en especial para los grupos más deseables) es esencialmente un pH neutro. La tolerancia de los microorganismos en el medio para la acidez, está influida considerablemente por otras condiciones como son el aprovisionamiento de nutrientes, la temperatura y el contenido de humedad

Para evitar los problemas de acidez del medio es posible agregar estequiométricamente compuestos básicos al medio filtrante y/o lavar periódicamente el medio con agua, considerando en ambas técnicas los inconvenientes de costo, disminución de vida útil del medio, consumo de agua y lavado de nutrientes que esto acarrea.

Se han reportado que para el tratamiento de  $H_2S$  y algunos compuestos orgánicos volátiles la eficacia de tratamiento no ha sido afectada por el descenso del pH debido a la proliferación de bacterias como la *Thiobacillus* sp. que puede desarrollarse a pH tan bajos como de 1 o 2 (Groenestijn y Hesselink, 1993; Webster *et al.*, 1996).

### 1.4.2 Toxicidad

Algunos compuestos fungen como sustrato o como toxico dependiendo de la concentración en que se encuentren. Los niveles máximos de contaminantes tolerables por un biofiltro deben ser determinados en pruebas piloto pues ello depende de varias condiciones como la temperatura, disponibilidad de nutrientes, de las características del medio utilizado y del compuesto a tratar.

### 1.4.3 Nutrientes

En los procesos biológicos los contaminantes son utilizados como alimento por los microorganismos presentes. De esta forma pueden obtener energia para reproducirse y llevar acabo sus funciones vitales (Noyola, 1996).

El medio filtrante tipico de los biofiltros requieren nutrientes para los microorganismos. La adición de nitrógeno es esencial como nutriente de las células. Otros nutrientes requeridos son: fósforo, azufre, potasio, magnesio, calcio, y hierro (MacFarlane *et al.*, 1997)

La eficiencia de remoción de un biofiltro depende del contenido de nutrientes en el material filtrante, cuando la eficiencia de remoción decrece es atribuido al bajo contenido de nutrientes resultando en una reducción en la actividad microbiana, asi como el exceso de nutrientes (alta concentración) creando el exceso de biomasa, ocasionando obstrucciones en el biofiltro. Los problemas de operación y mantenimiento están relacionados con la disponibilidad de nutrientes en el medio y la habilidad de proveerlos (Bohn *et al.*, 1992)

Los materiales orgánicos proveen los alimentos necesarios para la supervivencia y metabolismo de los microorganismos, sin necesidad de un abastecimiento de alimentos. Bohn *et al.* (1992) subraya que el contenido de nutrientes de los diferentes materiales usados en biofiltración es comúnmente suficiente con respecto a la carga de contaminantes aplicada. Pero no todos los medios utilizados los tienen por lo que requieren una adición de nutrientes suplementaria. Doluche *et al.*, declara la carencia de fósforo en la turba y Mongenroth *et al.*, reporta problemas de limitación de alimentos durante la degradación de hexano en un biofiltro de composta, para limitar tales efectos algunos autores han elegido

la opción de rociar con una solución de nutrientes el lecho (Kennes y Thalasso, 1998). Esto dependerá del tipo de medio filtrante con el que se esté trabajando. Los compuestos más utilizados para adicionar nutrientes son el  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  y  $\text{K}_2\text{HPO}_4$  debido a su alto contenido de nitrógeno y fósforo. (Hodge *et al.*, 1991)

#### 1.4.4 Humedad

La humedad es uno de los factores principales que afectan al número y a las actividades de los microorganismos del medio filtrante y es identificado como el parámetro más importante en la operación del biofiltro. La influencia de la humedad depende en gran parte de la naturaleza del medio y de la naturaleza de los microorganismos que en él se encuentren. La cantidad óptima de agua para la mayoría de los organismos del medio esta entre 40 y 60% cuando se usa composta o turba como medio filtrante y para un sistema de lechos de suelo debe estar entre 10 y 20 % de la capacidad de retención de agua del medio. (Kennes y Thalasso, 1998).

La mayor parte de los microorganismos son aeróbicos y tal vez solo unas cuantas bacterias pueden tolerar medios saturados con agua. Los actinomicetos son particularmente capaces de permanecer activos cuando el medio se seca y pueden permitir una gran amplitud de condiciones de humedad.

Bacterias y Hongos son afectados por los bajos contenidos de humedad (MacFarlane *et al.*, 1997)

Un alto contenido de humedad podría conducir a problemas serios como la formación de zonas estancadas con limitaciones de difusión y posibles condiciones anaerobias, aumento de la caída de presión, bajos tiempos de residencia, problemas de transferencia de oxígeno, lavado de nutrientes, alta resistencia al flujo, bajo pH y bajas relaciones de degradación. Un bajo contenido de humedad ocasiona que el material filtrante se compacte, se pulverice o se seque lo que afectaría la activación de los microorganismos ocasionando un incompleto tratamiento del gas. Por lo que la cantidad de agua no debe ser excesiva ni escasa sino la suficiente para evitar tales problemas.

Aunque el agua se fije en el material filtrante esta puede salir por evaporación. Los gases que pasan por el reactor recobran una parte del agua y por medio de esto se seca el material filtrante, la reacción de oxidación dentro del reactor es exotérmica liberando calor ocasionando que el flujo de gas se caliente y si llega con baja saturación es capaz de tomar agua del material filtrante, otro factor si no muy importante también se debe de tomar en cuenta que es el tipo de aislamiento que tenga el reactor con el medio ambiente ya que si la temperatura ambiente es muy alta y el aislamiento no es el adecuado ocasiona que también se evapore agua del medio filtrante.

Como la humedad es uno de los factores más importantes para mantener un buen funcionamiento del reactor y obtener altas eficacias de tratamiento algunos autores han propuesto diferentes maneras de controlar un balance de agua óptimo dentro del biofiltro. La prehumidificación del gas influente podría ser el medio mas adecuado para reducir la cantidad de agua perdida dentro del lecho de filtración, otros autores sugieren el rocío de agua en las partes altas del reactor, sin embargo este método no es tan adecuado ya que puede ocasionar que el agua se acumule en las partes altas del biofiltro ocasionando que el agua no pueda ser transportada lo suficientemente rápido a las partes inferiores del material filtrante ocasionando altas caídas de presión, lavado de nutrientes disminuyendo la calidad de los sedimentos del material para los microorganismos.

#### 1.4.5 Temperatura

La temperatura es un factor limitante para todos los microorganismos vivos y afecta todas las reacciones metabólicas en general. Regula las velocidades de reacción de los cambios biológicos y químicos que ocurren en el medio.

Los microorganismos presentan una variedad de ámbitos de temperaturas los cuales pueden sobrevivir. Todas las bacterias tienen tres límites de temperatura: la mínima, o sea la más baja a la que pueden reproducirse, la óptima, o la temperatura de crecimiento máximo y la máxima, que es la mayor temperatura a la cual aún hay reproducción. Estos límites difieren entre las especies bacterianas. De acuerdo con estos límites, las bacterias se clasifican en psicrófilicas cuando su temperatura óptima es de 15 a 20 °C, termófilicas cuando es de 45 a

65 °C, y mesofílicas cuando su temperatura óptima está entre estos dos extremos. Las bacterias entéricas pertenecen a este grupo.

El intervalo de temperatura a la cual un biofiltro puede funcionar adecuadamente es entre 25-35 °C siendo la temperatura de 35 °C la óptima para los microorganismos aerobios en el biofiltro ( Bohn y Bohn 1988; Muller, 1988 ). Se han reportado que a temperaturas bajas de 5 °C se ha tenido buenas eficiencias de tratamiento del gas sucio.

El límite superior de temperatura es de 55 °C, la actividad microbiana decrece dramáticamente alrededor de 65 °C (Bohn, 1988)

El efecto de la temperatura sobre las bacterias va estrechamente ligado al de la humedad. Así en los medios que operaran a temperatura templada y el medio está húmedo la sobrevivencia de las bacterias mesofílicas en el medio es mayor que en los medios que operen a temperaturas frías y medios secos. Sin embargo cuando la temperatura es baja pero el medio contiene suficiente humedad, la sobrevivencia se incrementa, ya que las bajas temperaturas inhiben el metabolismo bacteriano hasta el punto de suspender la reproducción, pero no destruye la viabilidad (Bohn, 1988)

Las recomendaciones que mencionan algunos autores con referencia al control óptimo de la temperatura en el lecho filtrante se enfocan en controlar la temperatura del gas a la entrada del reactor y tener un aislamiento térmico adecuado en el biofiltro para evitar fluctuaciones de la temperatura ambiente que pueden afectar el medio.

#### 1.4.6 Microorganismos

Los aspectos relacionados con la microbiología en los procesos de tratamiento de gases residuales no están bien definidos, pero muchos autores hacen declaraciones debido a sus experiencias o por las referencias en áreas similares en microbiología. (Groenestijn y Hesselink, 1993; Allen y Yang, 1999)

En condiciones naturales la población de microorganismos en los medios filtrantes (suelo, composta, turba, etc) usados en biofiltración es bastante inactiva, cuando se les suministra la energía necesaria, los microorganismos incrementan su actividad y desarrollo en respuesta al potencial suministrado originando tasas de degradación en magnitudes



mayores que la relativa inactividad natural (Bohn 1992). Los procesos biológicos como la biofiltración de gases se basan en el incremento de la actividad de los microorganismos para degradar y oxidar los compuestos contaminantes del gas a CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O y biomasa (Lighenhove y Scham, 1985; Bohn 1988; Pomeroy 1992; Macfarlane *et al.*, 1997). Los contaminantes del gas suministran las reservas de energía y carbón para el metabolismo de los microorganismos. (Noyola, 1996)

En la biofiltración de gases en donde los microorganismos son responsables de la descomposición de los compuestos contaminantes, los microorganismos son inmovilizados entre una fase acuosa y el material orgánico formando una biopelícula (Chris Van Lith 1989; Groenestijn y Hesselink, 1993; MacFarlane *et al.*, 1997; Utkin y Vakimov, 1999)

El desarrollo de los microorganismos en los medios filtrantes varía según el tipo de material y de las condiciones selectivas establecidas para una aplicación específica (Williams y Miller, 1992; Groenestijn y Hesselink, 1993) Esta supervivencia está influenciada por una variedad de factores entre los más importantes los del tipo físico y en menor grado los químicos y biológicos. En la Tabla 1.8 se muestra los factores más importantes que afectan la supervivencia de los microorganismos.

<b>Físicos</b>	Contenido de humedad y Temperatura
<b>Químicos</b>	pH, contenido de materia orgánica, nutrientes
<b>Biológicos</b>	Microorganismos autóctonos del medio

**Tabla 1.8.** Factores que influyen en la supervivencia de los microorganismos en medio filtrante

Los medios en su estado natural, contienen una amplia gama de microorganismo que pueden dividirse en cinco grupos (Bohn R, 1988; Leson y Miller, 1991; Groenestijn y Hesselink, 1993; MacFarlane *et al.*, 1997; Swanson y Locher, 1997)

- Bacterias

A) *Heterotróficas*

- 1) Fijadoras de nitrógeno (Simbióticas y Asimbióticas)
- 2) Requieren nitrógeno fijado

B) *Autotróficas*

- 1) Formadoras de nitritos
- 2) Formadoras de nitratos
- 3) Oxidadoras de azufre
- 4) Oxidadoras de hierro
- 5) Actúan sobre el hidrógeno y diversos compuestos hidrogenados

- *Actinomicetos*

- Hongos

- A) Levaduras y hongos semejantes a las levaduras
- B) Mohos
- C) Setas

- Algas

- A) Azul verde
- B) Verde
- C) Diatomáceas

#### ● Protozoarios

Las especies fluctúan su distribución con el tipo de material orgánico y de las condiciones selectivas establecidas para una aplicación específica. Según Pearson (1992) el contenido bacteriológico total en un empaque de biofiltro a base de turba esta en los rangos de  $5 \times 10^7$  y  $3 \times 10^{10}$  por gramo (turba seco), además las levaduras están presentes en la gama de  $10^6$ - $10^7$  por gramo de turba (Groenestijn y Hesselink, 1993). En la composta la población de hongos, bacterias y actinomicetos son significativamente más altos que en otros medios naturales. En suelos y composta el contenido de bacterias por gramo de material es de aproximadamente un billón y la población de hongos es por arriba de 100, 000 por gramo (Bohn, 1992; William y Miller, 1992).

#### ● Bacterias

Las bacterias pueden dividirse en forma general en dos grandes grupos, basándose en sus necesidades de energía: (1) bacterias heterotróficas, las cuales obtienen su energía y carbono de las sustancias orgánicas complejas y (2) bacterias autotróficas, las que obtienen energía por medio de la oxidación de elementos o compuestos inorgánicos, el carbono del dióxido de carbono, el nitrógeno y otros minerales de los compuestos inorgánicos. En el grupo autotrófico se encuentran organismos como los formadores de nitritos, los nitratos, las bacterias que oxidan el azufre, las que oxidan el hierro y las que actúan sobre el hidrógeno y sus compuestos.

La mayor parte de las bacterias requieren oxígeno del aire del medio y se clasifican como aerobias. Algunas de estas bacterias se pueden adaptar a vivir donde el aire del medio está desprovisto de oxígeno, son las aerobias facultativas. Otras bacterias no pueden vivir en presencia de oxígeno y se clasifican como anaerobias.

Las bacterias del medio también difieren considerablemente en su nutrición y en su respuesta a las condiciones ambientales. Consecuentemente, las clases y abundancias de las bacterias dependen tanto de los nutrientes asimilables presentes como de las condiciones ambientales del medio.

Se ha encontrado que la mayoría de las bacterias presentes en un medio orgánico son *Corineform endospore form (Basilli)* y ocasionalmente pseudomonas. La principal función de las bacterias es la descomposición de los materiales orgánicos e inorgánicos a través de los ciclos biogeoquímicos (Groenestijn y Hesselink, 1993)

#### ● Actinomicetos

Los actinomicetos ocupan, desde un punto de vista morfológico una posición intermedia entre las bacterias y los hongos. Los actinomicetos se parecen a las bacterias en que son unicelulares y de casi el mismo tamaño en su sección transversal. Se parecen a los hongos filamentosos en que producen una red filamentosa extensa y profusamente ramificada. Muchos de estos microorganismos se reproducen por medio de esporas, y éstos se parecen mucho a las células bacterianas.

Los actinomicetos se desarrollan más lentamente que las bacterias e incluso que los hongos, son representados principalmente en el medio por los *streptomictos spp.* (Groenestijn y Hesselink, 1993).

#### ● Hongos

Los hongos son plantas heterotróficas que varían bastante en tamaño y estructura, desde las levaduras unicelulares hasta los mohos y las setas. Los hongos típicamente crecen a partir de esporas, formando una estructura semejante a un hilo que puede o no tener paredes transversales. Los hilos individuales son las hifas y una masa grande de hilos constituye un micelio. El micelio es la estructura de trabajo que absorbe nutrientes, continúa creciendo y finalmente produce hifas especiales que forman esporas reproductoras. El diámetro

promedio de una hifa es aproximadamente de 5 micras y de 5 a 10 veces el tamaño de una bacteria típica.

Los hongos son importantes en todos los medios y su tolerancia a la acidez los hace particularmente importante en medios ácidos, además representan un factor de regulación de la flora bacteriana. La mayoría de los hongos pertenecen a los *Mucorales* (*Mortierella* y *Rhizopus*) y *Deuteromicetos* (*Penicillium*, *Aspergillus*, *Cladosporium*, *Fusarium* *Trichoderma*, *Alternaria* y *Botrytis*). (Groenestijn y Hesselink, 1993)

#### ● Algas

Las algas más comunes en los medios filtrantes son unicelulares o se presentan como pequeños filamentos, están distribuidas universalmente en la capa superficial del medio donde quiera que la humedad y la luz sean favorables. Pocas algas se encuentran bajo la superficie del medio filtrante en ausencia de luz y parece que funcionan heterotróficamente. El grupo de algas es el menos abundante y no interfiere con el desarrollo de la flora bacteriana, más bien la favorece, ya que una de sus principales funciones es generar material orgánico a partir de sustancias inorgánicas. (Groenestijn y Hesselink, 1993)

La presencia de microorganismos microaerófilos y anaerobios se presentan a menudo, debido a que las partes gruesas de la biopelícula presenta reducciones de oxígeno o por que no hay una distribución homogénea del gas a través del filtro. Sin embargo nunca se mencionan por los diferentes autores. (Groenestijn y Hesselink, 1993).

Generalmente es de esperarse que la población microbica esté en un pseudo estado constante después del periodo de adaptación. Esto implica que hay un importante incremento o disminución en números de microorganismos que están en o cerca de la fase estacionaria con respecto a su ecología microbica, a las condiciones fisiológicas a su ambiente y al abastecimiento de alimento antes de tener una biodegradación eficiente. (Groenestijn y Hesselink, 1993; Cox *et al.*, 1993).

Aunque una variedad amplia de microorganismos esté presente en empaques como la composta, en muchos casos una biodegradación más rápida puede ser lograda por inoculación con microorganismos especializados acortando el periodo de aclimatación. (William y Miller, 1992; Groenestijn y Hesselink, 1993; MacFarlane *et al.*, 1997).

Las inoculaciones de microorganismos que más frecuentemente se usan en biofiltración de gases son:

1. El uso de lodo activado generado en el tratamiento secundario de una planta de tratamiento de aguas residuales, que es una fuente de microorganismos para la remoción mejorada en un biofiltro (William y Miller, 1992; Groenestijn y Hesselink, 1993, Allen y Phatak, 1993; MacFarlane *et al.*, 1997; Swanson y Loehr, 1997).
2. Material filtrante que elimina o degrada pobremente a los compuestos xenobioticos puede mezclarse con nuevo material filtrante. De esta manera el material viejo se separa como un inoculo (Groenestijn y Hesselink, 1993).
3. Algunos compuestos es especial los xenobioticos, son únicamente degradados por un número limitado de microorganismos, en un filtro inoculado con lodo activado puede tomar meses su aclimatación (Cho *et al.*, 1992). Para acortar esta fase de retraso, cultivos puros o mixtos de microorganismos especializados pueden agregarse. Estos cultivo pueden obtenerse de la colección del cultivo o pueden aislarse desde el enriquecimiento de cultivos en el laboratorio. Una ventaja de los cultivos definidos es el conocimiento de sus propiedades. Las relaciones entre la actividad y las condiciones fisiológicas (pH, temperatura, concentración de sustrato) pueden conocerse y las reacciones catalizadas por intermediarios y productos finales pueden determinarse como una función de condiciones ambientales, por lo que la biodegradación puede ser perfeccionada. (Groenestijn y Hesselink, 1993).

Después de la inoculación, los microorganismos, que son capaces de crecer, se acumulan en la biopelícula. Para la producción de energía y biomasa, los compuestos de carbón y el

oxígeno son abastecidos por el flujo continuo de gas. Los demás elementos necesarios para producir biomasa son liberados lentamente por el material de empaque del biofiltro. Puede ser que estos elementos se queden sobre el biofilm, incluyendo elementos de células muertas que son rehusados por las células crecientes.

El crecimiento continuará hasta que uno de los elementos como carbono, hidrógeno u oxígeno se reduzcan en el biofilm con el tiempo. La biomasa alcanza una fase estacionaria en que los compuestos con carbón son usados únicamente como mantenimiento de las células. La situación estacionaria se alcanza en uno o varios años.

Como la cantidad de carbono es comúnmente abundante y se abastece con los flujos de gas contaminado, la cantidad de biomasa en el biofiltro es función de la cantidad de minerales

La adición de nutrientes (ejemplo: potasio, y fosfato de calcio) pueden aumentar el espesor del biofilm lo puede conducir a altas actividades volumétricas a causa de la limitación de difusión de compuestos de carbono o del oxígeno. En general el incremento en la biomasa ocasiona atascamiento en los poros y limitaciones de transferencia (Groenestijn y Hesselink, 1993).

#### **1.4.7 Caída de presión y consumo energético**

El flujo de gas a través de la cama del biofiltro produce una caída de presión que impacta directamente la potencia requerida para sostener dicho flujo. La caída de presión se ve afectada por la compactación del medio en el transcurso del tiempo de operación. Un consumo energético típico está entre 1.8-2.5 Kwh./1000 m<sup>3</sup> de gas tratado (Leson y Winer, 1991).

Por otra parte, Williams y Miller (1992) recomiendan agitar y rehomogeneizar la cama compactada para evitar el incremento de las caídas de presión y mantener uniforme la actividad del lecho. En la Tabla 1.9 se presenta información relacionada con la caída de presión en distintas condiciones.

Carga superficial (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> /h)	Área de flujo (m <sup>2</sup> )	Altura de lecho (m)	Medio filtrante	ΔP (mmH <sub>2</sub> O)	Referencia
20	NE	0.8	Composta	50-80	Hartman, (1997) en Ottengraf <i>et al.</i> , (1984)
60-80	264-288	1.0	Composta con humus	160-180	Gust <i>et al.</i> , (1979) en Ottengraf <i>et al.</i> , (1984)
12	200	0.8	Composta	100	Ottengraf <i>et al.</i> , (1984)
17	12	1.0	Composta de: Basura corteza de árbol Turba	80-150 40-80 10-30	Bardtke <i>et al.</i> , (1987)
100-400	NE	NE	Composta Composta con agente abultante	50-300 25-90	Feenstra (1984) en Leson y Winer, (1991)
200	NE	NE	Composta con gránulos de polietileno	8	Utkin <i>et al.</i> , (1992)
7	0.017	1.0	Composta	80	Allen y Phatak (1993)
2.3	0.0091	0.25	Composta de: Basura Pollos Corteza de pino Turba	0.175 0.0 3.87	Holt y Lackey, (1995)
55	0.0044	1.0	Composta con carbón activado	25	Webster <i>et al.</i> , (1996)

NE: No especificado

Tabla 1.9 Caída de presión de gas a través de camas filtrantes bajo distintas condiciones



## 1.5 Pretratamiento del influente

Para asegurar un adecuado tratamiento del gas y funcionamiento del sistema es necesario incluir en el tratamiento del gas (si así lo requiere) distintas operaciones de acondicionamiento del gas previo a su ingreso al biofiltro.

Dentro de las operaciones más importantes se tienen la remoción de partículas grandes en suspensión en gas, la equalización de la carga másica cuando se presentan variaciones abruptas que pueden afectar el proceso, la regulación de la temperatura la cual se recomienda que se encuentre entre en un intervalo de 25 a 35 °C (Swanson *et al.*, 1997), una buena distribución del gas y sobre todo un buen control del contenido de agua del gas. La humidificación del gas así como el contenido de agua de la cama del biofiltro es el parámetro de control más importante del biofiltro (Bardtke *et al.*, 1987; Cho *et al.*, 1991, Leson y Winer, 1991; Bohn, 1992; Allen y Phatak, 1993; Groenestijn y Hesselink, 1993, Sorial *et al.*, 1997; Swanson *et al.*, 1997).

### 1.5.2 Humidificación

La humidificación del gas permite mantener con agua la cama del biofiltro lo cual es esencial para la supervivencia y el metabolismo de los microorganismos responsables de la degradación de los contaminantes del gas.

Se recomienda que el gas contenga una humedad relativa mayor al 95% y que la cama del biofiltro posea una humedad entre 40 y 60% en peso (Leson y Winer 1991; Bohn, 1992; Swanson *et al.*, 1997). En la Tabla 1.10 se muestran algunos problemas y factores asociados con la humidificación del medio filtrante del biofiltro.

Como regla heurística el consumo de agua en un biofiltro se encuentra entre 1.5 a 3 ml de agua por cada m<sup>3</sup> de gas tratado (Leson y Winer, 1991)

Alto contenido de agua	Bajo contenido de agua	Factores que complican el mantenimiento de humedad en el biofiltro	Técnicas de humidificación
<ul style="list-style-type: none"> <li>•Alta caída de presión</li> <li>•Disminución del tiempo de retención del gas</li> <li>•Problemas de oxigenación</li> <li>•Formación de malos olores debido a condiciones anaerobias</li> <li>•Lavado de nutrientes del medio</li> <li>•Compactación de la cama</li> <li>•Generación de residuos líquidos con pH bajo</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Disminución de la actividad microbiana</li> <li>•Dificultad para rehidratar materiales hidrofóbicos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Alta velocidad de gas con humedad relativa menor a 95% seca el medio</li> <li>•Reacciones exotérmicas las cuales incrementan la temperatura del medio y facilitan la evaporación del agua</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Torres humidificadoras empacadas o de aspersión de agua</li> <li>•Humidificación con tubos venturi puestos en la corriente del gas</li> <li>•Adición directa de agua al medio filtrante</li> <li>•Combinación de los dos anteriores</li> </ul>

Información obtenida de Leson y Winer, 1991; Bohn, 1992 y Swanson et al., 1997

**Tabla 1.10 Problemas y factores asociados con la humidificación del gas**

## CAPITULO II

### 2. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

#### 2.1 Obtención de materiales

La composta utilizada en la experimentación proviene de la planta de producción de composta de Ciudad Universitaria, UNAM.

La composta se genera de algunos desperdicios orgánicos recolectados en el campus universitario. La proporción de sus constituyentes es la siguiente (Información proporcionada por el Biólogo Javier Montoya, jefe de la planta de Composta de la UNAM):

4 partes de mezcla

1 parte de estiércol de caballo

1 parte de triturado

La mezcla es un 80% de hojas y ramas de eucalipto con un 20% de pasto, fresno y liquidambar. Una rama de eucalipto contiene aproximadamente 80% de madera y 20% de hojas.

El triturado se constituye por la mezcla de madera de eucalipto, fresno y liquidambar triturada.

El proceso de composteo se lleva a cabo por medio de pilas estáticas y dura aproximadamente 3 meses.

La relación carbono nitrógeno es de 20:1 en la composta resultante.

En la Figura 2.1 se muestra una imagen de la planta productora de composta de Ciudad Universitaria en la UNAM de la cual se obtuvo la composta para este estudio.

El lodo se obtuvo de la purga del sistema de tratamiento de lodos activados de la planta de tratamiento de aguas residuales de Ciudad Universitaria, UNAM con un 80-90% de humedad

El tezontle con diámetro de partícula entre 2 y 4 mm, se obtuvo directamente a través de los proveedores de material para construcción, quienes lo obtienen de diversas fuentes en función de costo y ubicación.

El bagazo de caña se obtuvo en los centros de distribución de alimentos en la Ciudad de México.



Figura 2.1 Imagen de la planta de producción de composta en Ciudad Universitaria

## 2.2 Cinéticas de secado y humidificación de tres medios filtrantes a distintas temperaturas

### 2.2.1 Metodología

Se determinó la cinética de secado a temperaturas controladas de 35 °C, 5 °C y a una temperatura ambiente que oscila entre 18 y 25 °C de tres medios filtrantes distintos, sometidos cada uno de ellos a un flujo de aire de 2.5 L/min con distinta humedad (30, 75 y 100% de humedad). El tiempo de contacto en cama vacía fue de 19.2 segundos, el tiempo de operación fue hasta llegar al equilibrio de humedad en los medio con las condiciones establecidas.

Los medios filtrantes utilizados fueron: Composta, composta con bagazo de caña (50/50%,v/v) y composta con lodo de purga de un sistema de lodos activados completamente mezclados (50/50 %, v/v). Se construyeron nueve celdas cuyas dimensiones se muestran en la Figura 2.2

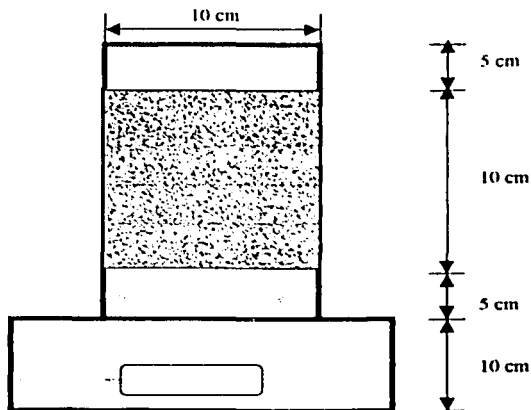


Figura 2.2 Esquema de una celda utilizada para llevar a cabo las cinéticas de secado a temperatura constante

Las celdas se empacaron con 10 cm de medio filtrante lo que representa un volumen de 0.807 litros.

En la Figura 2.3 se presenta la disposición experimental para tres medios filtrantes distintos sometidos a diferentes condiciones de temperatura (25, 5, 18-25 °C). En las Figuras 2.3 a y b se muestran fotografías del arreglo experimental y de las celdas utilizadas para efectuar las cinéticas en cuestión.

En la Tabla 2.1 se presentan los medios utilizados, su composición y humedad inicial.

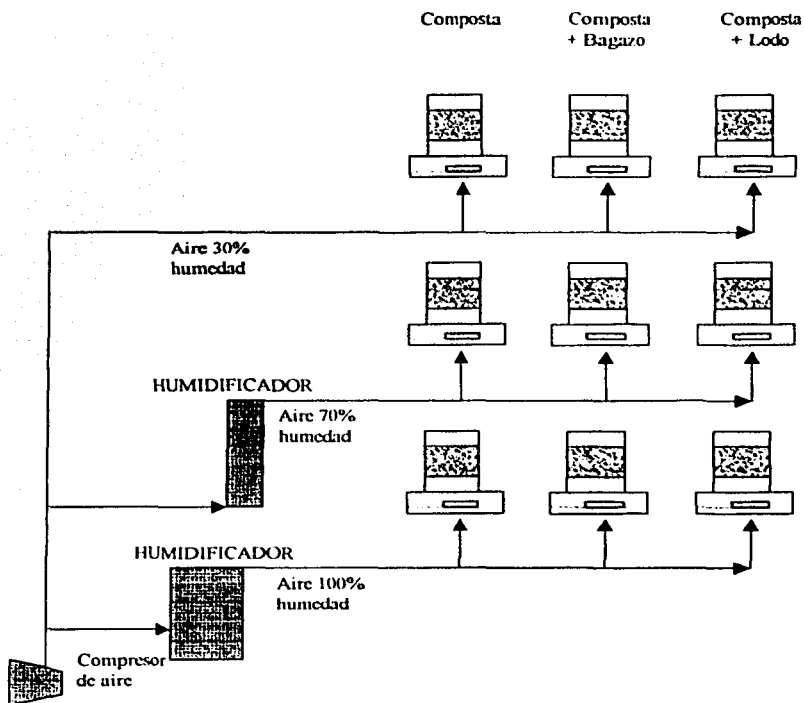
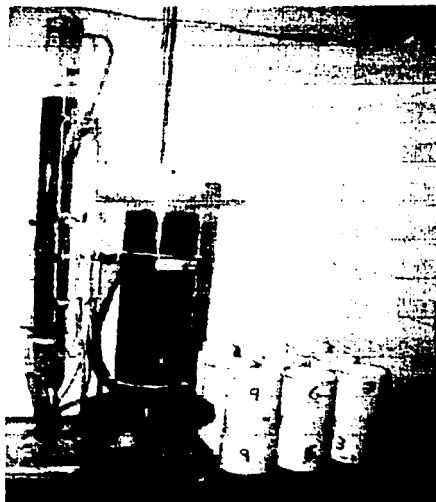
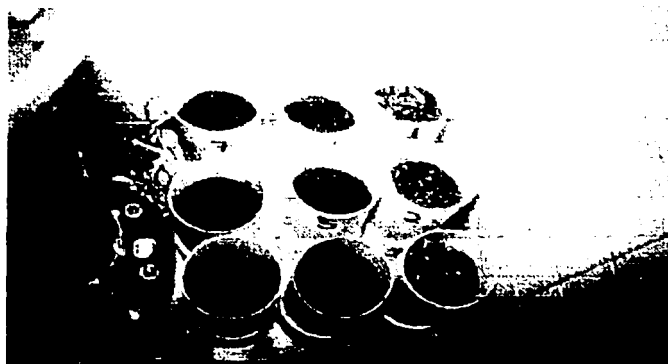


Figura 2.3 Disposición experimental de las cinéticas de secado con diferentes medios filtrantes y condiciones de humedad del aire



**Figura 2.3-a** Fotografía de la instalación experimental para efectuar estudios de cinéticas de secado a distintas temperaturas con distintos medios filtrantes.



**Figura 2.3-b** Fotografía de las celdas utilizadas para las cinéticas de secado de distintos medios filtrantes a diferentes temperaturas.

Filtro No.	Medio	Composición del medio	Humedad del aire empleado en el medio	Humedad inicial del medio
1	Composta + Bagazo	50 % v/v	100%	47%
2	Composta + Bagazo	50 % v/v	75%	47%
3	Composta + Bagazo	50 % v/v	30%	47%
4	Composta + Lodo	50 % v/v	100%	53%
5	Composta + Lodo	50 % v/v	75%	53%
6	Composta + Lodo	50 % v/v	30%	53%
7	Composta	100%	100%	49%
8	Composta	100%	75%	49%
9	Composta	100%	30%	49%

**Tabla 2.1** Condiciones de los experimentos efectuados a 35 y 5 °C y a temperatura ambiente (18-25 °C).

El bagazo de caña fue molido y triturado hasta obtener partículas o fibras de 2 o 3 mm de largo. El lodo utilizado para mezclarse con composta fue extraído del sistema de lodos activados de la planta de tratamiento de aguas residuales de Ciudad Universitaria de la UNAM. El lodo fue secado hasta alcanzar una humedad del 60% el cual fue mezclado en una proporción 50-50% v/v con la composta.



## **2.3 Efectos de la composición del medio filtrante, el flujo de aire y la adición de agua sobre la humedad del medio filtrante, la densidad real, la densidad aparente, la porosidad, el tamaño efectivo de partícula y la compactación del medio.**

### **2.3.1 Metodología**

En los experimentos se varió la composición del medio filtrante, es decir se utilizó un medio constituido por 100% composta, una combinación de 75% composta con 25% tezontle como agente abultante, una combinación de 75% composta con 25% de lodo biológico y una combinación de 75% composta con 25% de bagazo de caña triturada. Las columnas empacadas con los medios filtrantes se sometieron a tres flujos de aire 100% húmedo, consistentes en 10, 40 y 70 litros por minuto. A su vez, se efectuaron experimentos con aire húmedo y aire húmedo con adición de agua en la parte superior de las columnas.

En la Tabla 2.2 se resumen las condiciones experimentales antes expuestas.

Cabe señalar que los experimentos se efectuaron por duplicado.

En cada uno de los experimentos, al cabo de 7 días de operación a régimen permanente, se evaluaron los siguientes aspectos en función de la altura del medio filtrante cada 20 cm hasta 1m.

- Humedad
- Densidad real
- Densidad aparente
- Porosidad
- Tamaño efectivo
- pH
- Alcalinidad
- Compactación
- Temperatura

En el ANEXO IV se describen las técnicas para la elaboración de éstos análisis fisicoquímicos.

Experimento	Composición del medio filtrante	Flujo de aire 100% húmedo aplicado (L/min)	Adición de agua al medio filtrante
1	Composta 100%	10	Sin
2	Composta 100%	40	Sin
3	Composta 100%	70	Sin
4	Composta 100%	10	Con
5	Composta 100%	40	Con
6	Composta 100%	70	Con
7	Composta 75% + tezontle 25%	10	Sin
8	Composta 75% + tezontle 25%	40	Sin
9	Composta 75% + tezontle 25%	70	Sin
10	Composta 75% + tezontle 25%	10	Con
11	Composta 75% + tezontle 25%	40	Con
12	Composta 75% + tezontle 25%	70	Con
13	Composta 75% + lodo 25%	10	Sin
14	Composta 75% + lodo 25%	40	Sin
15	Composta 75% + lodo 25%	70	Sin
16	Composta 75% + lodo 25%	10	Con
17	Composta 75% + lodo 25%	40	Con
18	Composta 75% + lodo 25%	70	Con
19	Composta 75% + bagazo 25%	10	Sin
20	Composta 75% + bagazo 25%	40	Sin
21	Composta 75% + bagazo 25%	70	Sin
22	Composta 75% + bagazo 25%	10	Con
23	Composta 75% + bagazo 25%	40	Con
24	Composta 75% + bagazo 25%	70	Con

Tabla 2.2 Condiciones experimentales utilizadas en las columnas con distintos medios filtrantes.

## Materiales

Para cumplir con el objetivo planteado se construyó la planta piloto mostrada en la Figura 2.4 constituida por los siguientes materiales

- Dos torres para humidificación de aire
- Tres columnas de biofiltración
- Columna testigo
- Rotámetros

Torres de humidificación de aire: Ambas torres de humidificación fueron construidas utilizando un tubo de PVC de 6" (0.1515 m) de diámetro con una altura de 1.2 m. Las torres operan inundadas y con una altura de empaque de 90 cm. El empaque utilizado es de tipo Rashing obtenido de tubos de PVC de ½". En la Tabla 2.3 se presentan datos de operación de la torre de humidificación.

Flujo de aire (L/min)	$Y_{1, entrada}$ (Kg H <sub>2</sub> O/Kg A.S)	$Y_{2, salida}$ (Kg H <sub>2</sub> O/Kg A.S)	Humedad (%)	Evaporación de agua (ml/día)		$K_{ya}$ (m <sup>-1</sup> )
				Teórico	Experimental	
5	0.017	0.022	98	39.70	320	0.009
10	0.017	0.0215	95	59.52	380	0.014
15	0.017	0.0205	93	65.5		0.017
20	0.017	0.020	90	88.5		
25	0.017	0.020	90	99.14	800	0.013
30	0.017	0.0195	90	118.97		0.019
35	0.017	0.0190	90	115.97		0.012
40	0.017	0.0185	88	115.66		0.018
45	0.017	0.0180	85	105.75		0.018
50	0.017	0.0175	85	89.22	780	
55	0.017	0.0175	85	70.25		0.017
60	0.017	0.0175	85	36.0		0.012
65	0.017	0.0175	85	39.0		0.009
70	0.017	0.0175	85	46.0	550	0.009

Temperatura del agua = 23 °C

$P_i$  = 595 mm Hg

Diámetro de la torre = 0.1515 m

Altura del empaque = 0.9 m

Área Transversal de la torre = 0.018 m<sup>2</sup>

$PM_{aire}$  = 28.97 Kg A.S/Kgmol A.S

$PM_{agua}$  = 18 Kg H<sub>2</sub>O/Kgmol H<sub>2</sub>O

**Tabla 2.3** Datos de operación de la torre de humidificación

**Columnas para biofiltración:** Las columnas de biofiltración fueron construidas con tubos de PVC de 4" de diámetro con una altura de 1.2 m. Estas columnas se empacaron con los medios filtrantes a ser evaluados con una altura de 1m. Cada columna posee puertos de muestreo de temperatura cada 20 cm.

**Rotámetros:** Se construyeron cuatro rotámetros hechos con base de 2 "T" de PVC de 1" y una hoja de acetato para transparencias enrolladas adecuadamente para conformar un embudo con un ángulo casi recto. Como elementos indicadores de flujo, los cuales están suspendidos dentro del embudo, se usaron balines de acero para flujos grandes y bolitas de papel para flujos pequeños. Los rotámetros fueron calibrados por desplazamiento de agua en una cubeta al hacer ingresar un flujo de aire determinado.

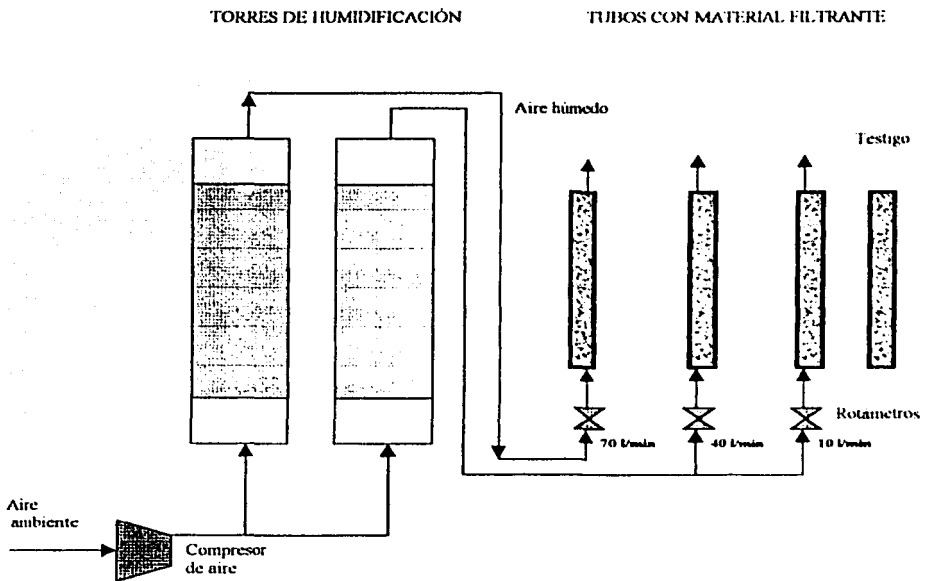


Figura 2.4 Diagrama de flujo del sistema experimental instalado

El aire húmedo obtenido en las torres de humidificación se hace ingresar a los tubos con medio filtrante a razón de 10, 40 y 70 L/min. Existe un tubo empacado con medio sin flujo de aire el cual fue tomado como testigo.

En el caso de los experimentos en donde se añadió agua directamente el medio filtrante desde la parte superior de las columnas se hizo según la regla heurística que recomienda agregar de 1.5 a 3 ml de agua por cada  $m^3$  de gas tratado. Para el cálculo de la cantidad de agua a agregar a cada columna diariamente se consideró agregar 2 ml de agua por cada  $m^3$  de gas tratado. Con base en esta información, en la Tabla 2.4 se resumen las dosis de agua agregadas al medio. En las Figuras 2.4 a y b se muestran fotografías de las instalaciones experimentales utilizadas.

Flujo de aire (L/min)	Cantidad de agua añadida (ml/día)
10	30
40	115
70	200

**Tabla 2.4** Dosis de agua agregadas al medio diariamente en función del flujo de aire aplicado.

La adición de agua se llevó a cabo manualmente a las 4 p.m, todos los días en la parte superior de cada columna.



**Figura 2.4-a** Fotografía de las columnas de biofiltración



**Figura 2.4-b** Fotografía donde es posible apreciar los manómetros diferenciales para determinar la caída de presión.

## **2.4 Estudios de la caída de presión en el lecho filtrante en función de su composición, del flujo de aire y el tiempo de operación**

### **2.4.1 Metodología**

Se determinó la caída de presión en las columnas empacadas con medio filtrante mediante manómetros diferenciales de agua durante 7 días de operación del sistema en cada uno de los experimentos descritos en la Tabla 2.1. Diariamente por un tiempo de 20 minutos, las columnas con medio filtrante fueron sometidas a distintos flujos de aire (de 0 a 120 L/min, cada 20 L/min) realizando 4 repeticiones, para conformar una gráfica que muestra la evolución de la caída de presión en función de los flujos aplicados a lo largo del tiempo de operación del sistema.

### **Materiales**

Se usó el mismo arreglo experimental descrito en el inciso 2.2.1

## 2.5 Estudios de trazado en las columnas de biofiltración

### 2.5.1 Metodología

El estudio de trazado debe de realizarse para cuantificar el volumen muerto de un biofiltro así como también la intensidad de mezclado del fluido dentro del medio. Las zonas muertas reducen el volumen útil del biofiltro y por tanto el verdadero tiempo de retención del gas y la eficiencia operativa decrece proporcionalmente.

Nos basamos en la inyección de una gas inerte (gas butano) en el sistema y la detección del gas en el efluente con respecto al tiempo, obteniendo curvas de distribución de tiempos de residencia del gas dentro de la columna. La curva de distribución de tiempos de residencia representa el comportamiento del fluido dentro de la columna

Se efectuaron estudios en distintas configuraciones de columnas que se describen a continuación junto con las curvas de distribución de tiempos de residencia obtenidas en cada experimento así como la curva promedio correspondiente.

Por cada columna se efectuaron tres experimentos de los cuales se determinó una curva promedio de distribución de tiempos de residencia.

Para el análisis de la curva de distribución de tiempos de residencia promedio se consideró el cálculo del tiempo de retención del gas en cama vacía, la variancia, el ajuste del modelo de dispersión axial y el modelo de tanques completamente mezclados puestos en serie junto con el calculo del índice semiempírico  $\phi$ .

Los experimentos efectuados se pueden resumir de la siguiente forma:

- Columna sin empaque.
- Columna que se empacó cada 20 cm con composta hasta 1 m de altura.
- Columna empacada con gravilla de 0.5" y sometida a flujos de 10, 40 y 70 l/min de aire.
- Columna empacada en forma alternada con composta y tezontle en capas sometida a 10 l/min de aire.



- Columna empaca con composta y lodo (50/50 % v/v) sometida a 10, 40 y 70 l/min de aire.
- Columna empaca con composta y bagazo (50/50 % v/v) sometida a 10, 40 y 70 l/min de aire.
- Columnas empacadas con composta sometidas a flujos de aire húmedo de 10, 40 y 70 l/min con filtro patrón con y sin adición de agua.
- Columnas empacadas con 75% de composta y 25% de tezontle sometidas a flujos de aire húmedo de 10,40 y 70 l/min con y sin adición de agua y con filtro patrón
- Columnas empacadas con 75% composta y 25% lodo sometidas a flujos de aire húmedo de 10, 40 y 70 l/min con y sin adición de agua con filtro patrón
- Columnas empacadas con 75% composta y 25% bagazo de caña sometidas a flujos de aire húmedo de 10, 40 y 70 l/min con y sin adición de agua con filtro patrón

#### **Materiales:**

Para la realización de los estudios de trazado se utilizó gas butano (GLP) como trazador y un detector de CO<sub>2</sub> con luz infrarroja instalado en una unidad para el análisis de Carbono Orgánico Total (COT). En la Figura 2.5 se muestra un esquema de la disposición experimental hecha. En la Figura 2.6 se presenta una fotografía del sistema construido para la realización de estudios de trazado.

La inyección del trazador fue de tipo pulso la cual se llevó a cabo a través de un sistema semiautomático por medio de un manómetro de mercurio que controla la presión de inyección y por tanto la cantidad de gas y su velocidad de inyección. Con ello se aseguró la inyección homogénea y reproducible del gas.

En la parte superior de las columnas se instaló un dispositivo dentro del cual existe un compresor de aire de diafragma que tiene la función de recolectar una muestra del gas efluente que acarrea el trazador y transportarlo a una trampa de CO<sub>2</sub> con base en KOH y posteriormente al TOC.

Al TOC se le conectó un sistema automático de adquisición de datos marca "Peaksimple" que reproduce en pantalla la curva de distribución de tiempos de residencia generada por el

trazador (Figura 2.7). Los estudios de trazado en cada columna fueron hechos por triplicado para obtener un comportamiento promedio del cual obtener la información deseada.

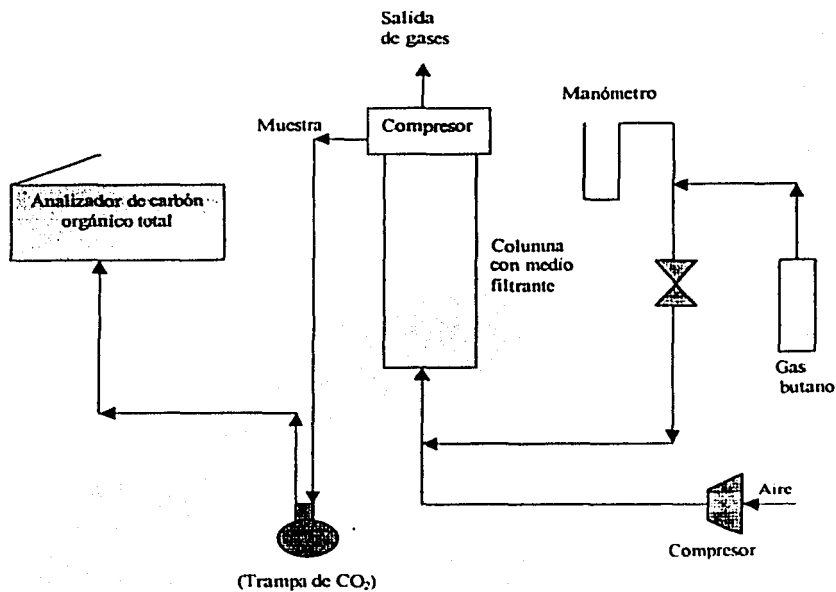
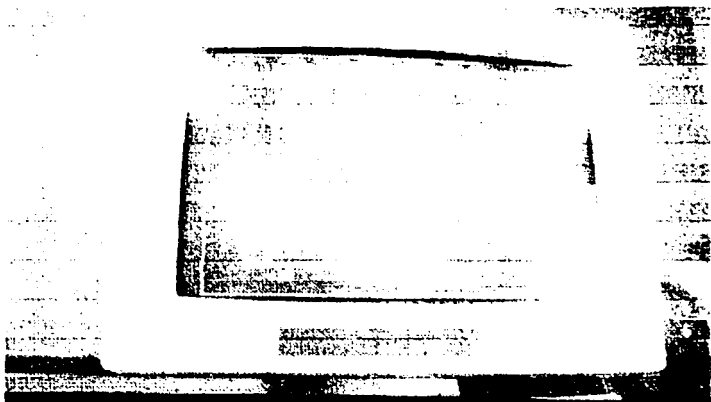


Figura 2.5 Instalación experimental para la ejecución de estudios de trazado



**Figura 2.6** Instalación experimental para la ejecución de estudios de trazado



**Figura 2.7** Muestra de una curva de distribución de tiempos de residencia obtenida en los estudios de trazado

## CAPITULO III

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

#### 3.1 Cinéticas de secado y humidificación de tres medios filtrantes a distintas temperaturas.

En las Figuras 3.1.1, 3.1.2 y 3.1.3 se presentan las cinéticas de secado de la composta, de la composta con lodo y de la composta con bagazo de caña, sometidas a un flujo constante de aire con 35, 75 y 100% de humedad y a una temperatura de 35 °C. De estas curvas se establecen los puntos de equilibrio de humedad entre en aire y el medio filtrante con los cuales se construye la Figura 3.1.4, correspondiente a las curvas de equilibrio para los distintos medios filtrantes a temperatura controlada de 35 °C.

Las Figuras 3.1.1, 3.1.2 y 3.1.3 ilustran el comportamiento de secado de la composta, de la composta-lodo y de la composta-bagazo de caña expuesto a un flujo constante de aire con diferentes condiciones de humedad (35, 70 y 100%) a una temperatura controlada de 35 °C. Los tres medios se secaron de forma gradual hasta alcanzar la concentración de humedad al equilibrio a las condiciones establecidas.

El comportamiento de secado de los tres medios es similar (se observa en las Figuras 3.1.1, 3.1.2 y 3.1.3) siguiendo en mismo patrón de secado, es decir pierden humedad por evaporación hasta llegar al equilibrio, se observa que el tiempo de secado varía de un material a otro dependiendo de la condición de humedad de aire a la cual fueron sometidos. Hay un secado más rápido independientemente del medio cuando se sometieron a un flujo de aire con 30% de humedad y más lento con aire 100% húmedo, lo que era de esperarse.

Cuando los tres medios se sometieron a un flujo de aire con una humedad del 35%, el secado es muy rápido llegando al equilibrio en poco tiempo de operación, obteniendo contenidos de humedad al equilibrio bajos (el caso de la composta y composta-lodo) e

incluso muy bajos como fue el caso del medio composta-bagazo de caña que tiene una humedad cercana a cero (Figura 3.1.3).

Un fenómeno que ocurre y a demás se repite se da en los medios composta y composta-lodo (Figuras 3.1.1 y 3.1.2), cuando se sometieron a un flujo constante de aire con 70% de humedad, este fenómeno se presenta un tiempo antes de llegar al equilibrio, hay un momento en que los medios recuperan humedad y posteriormente llegan al equilibrio, este fenómeno puede ser atribuido como un momento de histéresis en el cual estos dos medios llegan a un punto tal que ya no pierden humedad si no que la recuperan, pero también puede ser atribuido a factores no controlados en ese momento, como puede ser el cambio en la temperatura o cambio en la humedad del aire.

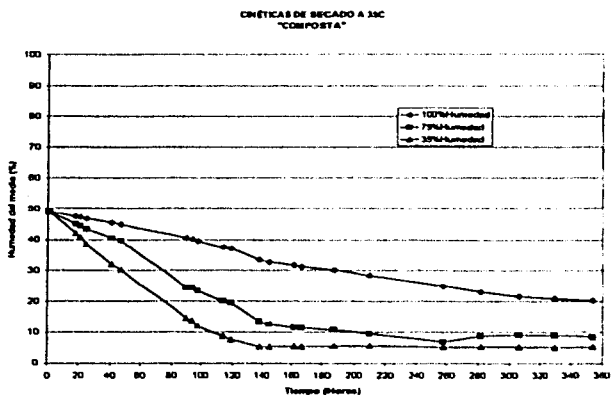
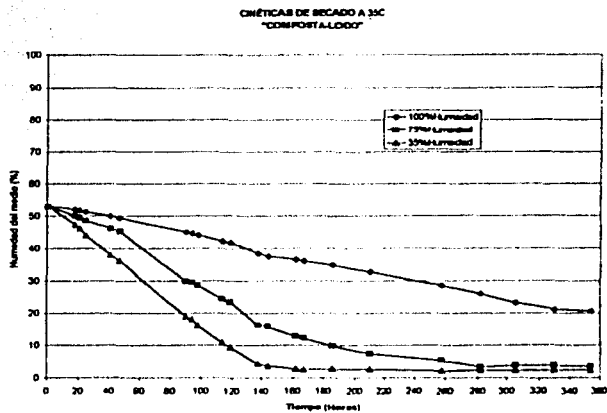
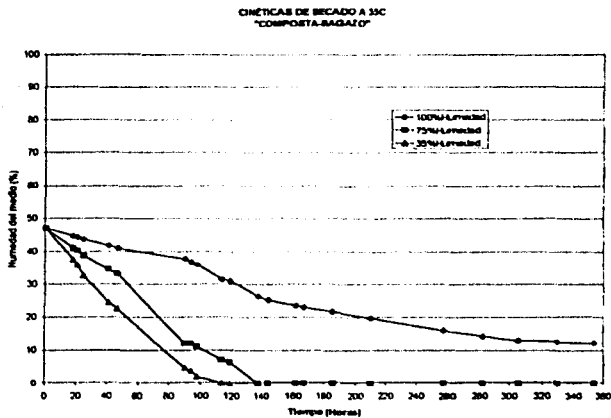


Figura 3.1.1 Cinética de secado de composta sometida a aire con 35, 75 y 100% de humedad a 35 °C.



**Figura 3.1.2** Cinética de secado de composta con lodo sometida a aire con 35, 75 y 100% de humedad a 35 °C



**Figura 3.1.3** Cinética de secado de composta con bagazo sometida a aire con 35, 75 y 100% de humedad a 35 °C

En la Figura 3.1.4 se muestra el contenido de humedad en el equilibrio a las condiciones establecidas de los tres medios. En donde se grafica humedad al equilibrio del medio ( $\text{Kg H}_2\text{O/Kg sólido seco}$ ) contra humedad relativa del aire (%). Esta figura nos permite visualizar el comportamiento de los tres medios empleados y poder compararlos

Se observa que el medio conformado por composta retiene más la humedad (su punto de equilibrio es mayor) cuando lo exponemos a un flujo continuo de aire con 30% de humedad seguido de los medios composta-lodo y composta-bagazo. El mismo comportamiento se observa cuando los exponemos a un flujo de aire con 70% de humedad. Cuando los tres medios los sometemos a un flujo de aire con 100% de humedad, la humedad al equilibrio de los medios composta y composta-lodo es similar no así el medio composta-bagazo que presenta un punto de equilibrio menor.

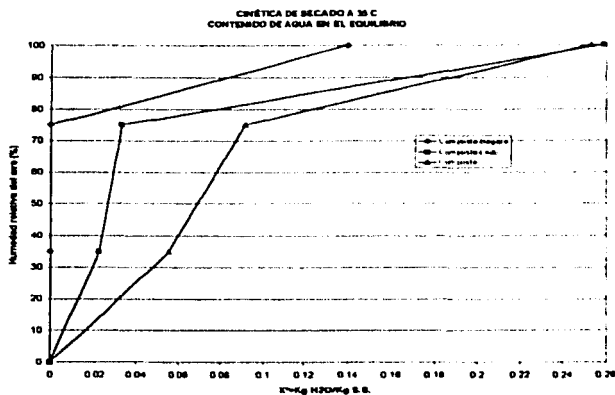


Figura 3.1.4 Curvas de equilibrio de distintos medios filtrantes a 35 °C

Podemos concluir que la composta sola tiene más capacidad de retención de humedad que los medios constituidos por la combinación equitativa de composta-bagazo y composta-lodo a una temperatura controlada de 35 °C

El medio composta-bagazo es el que menos capacidad de retención de agua posee de los tres medios utilizados para las condiciones establecidas.

En las Figuras 3.1.5, 3.1.6 y 3.1.7 se presentan las cinéticas de secado de la composta, de la composta con lodo y de la composta con bagazo de caña, sometidas a un flujo constante de aire con 35, 75 y 100% de humedad y a una temperatura ambiente que oscila entre 18 y 25 °C. De estas curvas se establecen los puntos de equilibrio de humedad entre el aire y el medio filtrante con los cuales se construye la Figura 3.1.8 correspondiente a las curvas de equilibrio para los distintos medios filtrantes a temperatura ambiente

Las Figuras 3.1.5, 3.1.6 y 3.1.7 ilustran el comportamiento de secado de los tres medios filtrantes empleados sometidos a un flujo constante de aire con diferentes condiciones de humedad (30, 70 y 100%) a una temperatura ambiente (no controlada) que oscilaba entre 18 y 25 °C. Los tres medios perdieron humedad por evaporación hasta que alcanzaron su concentración de humedad al equilibrio. En este caso la temperatura de operación es un factor el cual no lo podemos controlar por las fluctuaciones de temperatura durante el día, se determino parar las cinéticas cuando los medios no tuvieran pérdidas significativas de humedad (las concentraciones de la humedad fueran parecidas teniendo el mismo tiempo de operación). Los últimos puntos de las curvas de secado se tomaron como los puntos de equilibrio. En las Figuras se observa que los tres medios llegaron a sus puntos de equilibrio observándose mejor cuando se hace pasar una corriente de aire de 30 y 70 % de humedad no así para una corriente de aire de 100% de humedad.



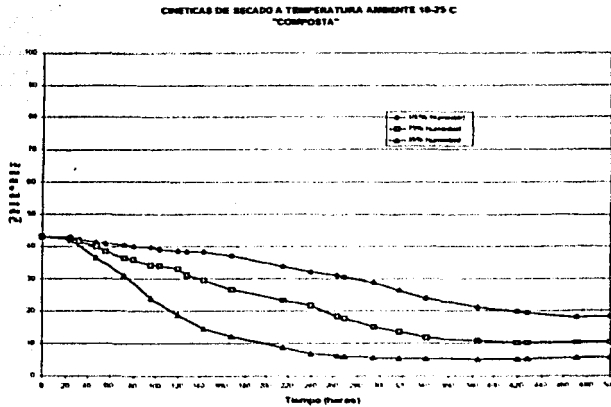


Figura 3.1.5 Cinética de secado de composta sometida a aire con 35, 75 y 100% de humedad a una temperatura ambiente que oscila entre 18 y 25 °C.

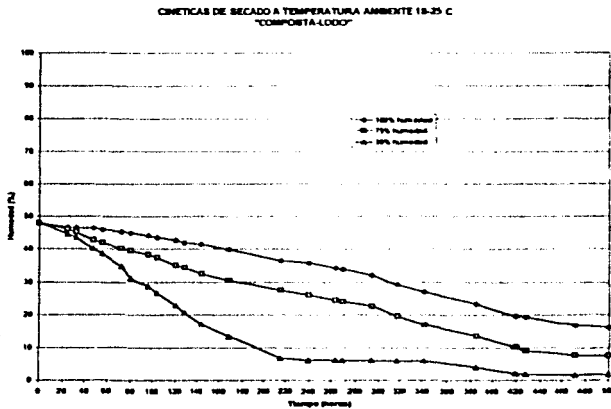


Figura 3.1.6 Cinética de secado de composta con lodo sometida a aire con 35, 75 y 100 % de humedad a una temperatura que oscila entre 18 y 25 °C.

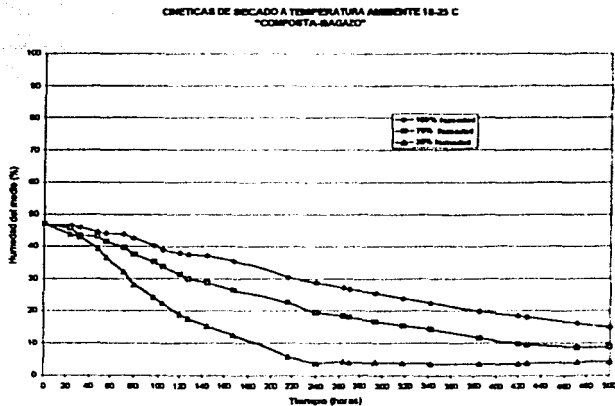


Figura 3.1.7 Cinética de secado de composta con bagazo sometida a aire con 35, 75 y 100% de humedad a una temperatura que oscila entre 18 y 25 °C.

En la Figura 3.1.8 se muestra el contenido de humedad en el equilibrio a las condiciones establecidas de los tres medios. En donde se grafica humedad al equilibrio del medio (Kg H<sub>2</sub>O/Kg sólido seco) contra humedad relativa del aire (%). Esta figura nos permite visualizar el comportamiento de los tres medios empleados y poder compararlos.

Se observa que el medio conformado por composta retiene más la humedad (su punto de equilibrio es mayor) cuando lo exponemos a un flujo continuo de aire con 30% de humedad seguido de los medios composta-lodo y composta-bagazo. El mismo comportamiento se observa cuando los exponemos a un flujo de aire con 70% de humedad. Cuando los tres medios los sometemos a un flujo de aire con 100% de humedad, la humedad al equilibrio de los medios composta-lodo y composta-bagazo es similar no así el medio composta que presenta un punto de equilibrio mayor.

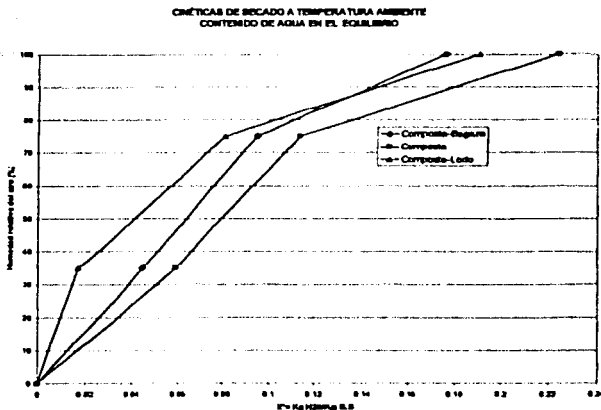


Figura 3.1.8 Curvas de equilibrio de distintos medios filtrantes a temperatura ambiente que oscilaba entre 18 y 25 °C.

De la Figura 3.1.8 concluimos que la composta sola tiene más capacidad de retención de agua que los medios constituidos por la combinación equitativa de composta-bagazo y composta-lodo.

El medio composta-lodo es el que menos capacidad de retención de agua posee de los tres medios utilizados a temperatura ambiente.

En las Figuras 3.1.9, 3.1.10 y 3.1.11 se presentan las cinéticas de secado de la composta, de la composta con lodo y de la composta con bagazo de caña, sometidas a un flujo constante de aire con 35, 75 y 100% de humedad y a una temperatura controlada de 5°C. De estas curvas se establecen los puntos de equilibrio de humedad entre el aire y el medio filtrante con los cuales se construye la Figura 3.1.12 correspondiente a las curvas de equilibrio para los distintos medios filtrantes a temperatura ambiente

Las Figuras 3.1.9, 3.1.10 y 3.1.11 ilustran el comportamiento de secado de los tres medios filtrantes empleados sometidos a un flujo constante de aire con diferentes condiciones de humedad (30, 70 y 100%) a una temperatura de 5°C. Se observa el comportamiento de

secado de los tres medios que perdieron humedad por evaporación hasta llegar a la concentración de humedad al equilibrio.

En las Figuras se observa que cuando aplicamos un flujo constante de aire con 100% de humedad, los tres medios filtrantes empleados no pierden humedad significativamente, aun cuando los expusimos por un periodo grande de tiempo.

Cuando aplicamos flujos de aire con 35 y 75% de humedad, los tres medios se comportaron de manera similar perdiendo humedad de forma gradual hasta que llegaron al equilibrio. Hay que hacer notar que el periodo de tiempo en el cual los tres medios llegaron a sus puntos de equilibrio a las condiciones establecidas no fue muy grande.

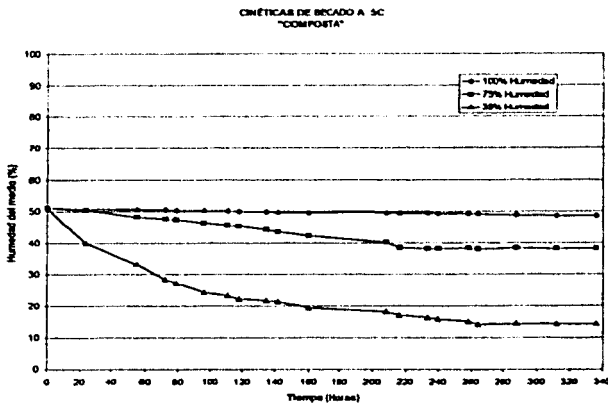


Figura 3.1.9 Cinéticas de secado de composta sometida a aire con 35, 75 y 100% de humedad a una temperatura de 5 °C.

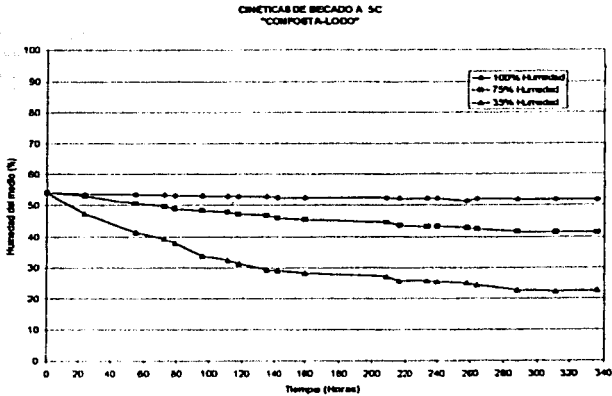


Figura 3.1.10 Cinética de secado de composta con lodo sometida a aire con 35, 75 y 100% de humedad a una temperatura de 5°C.

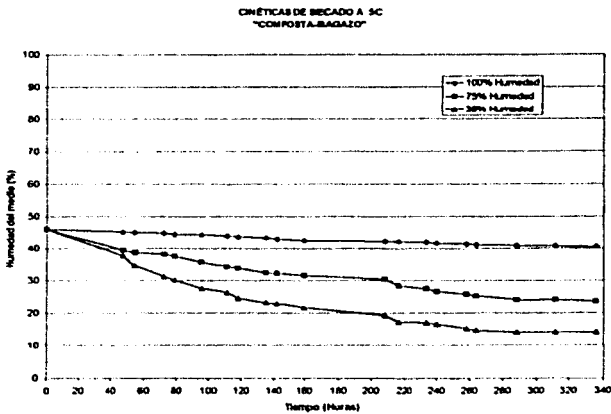


Figura 3.1.11 Cinética de secado de composta con bagazo sometida a aire con 35, 75 y 100% de humedad a una temperatura de 5°C.

En la Figura 3.1.12 se muestra el contenido de humedad en el equilibrio a las condiciones establecidas de los tres medios. En donde se grafica humedad al equilibrio del medio ( $\text{Kg H}_2\text{O/Kg sólido seco}$ ) contra humedad relativa del aire (%). Esta figura nos permite visualizar el comportamiento de los tres medios empleados y poder compararlos

Se observa que los tres medios retiene humedad sin pérdidas significativas, cuando los exponemos a un flujo continuo de aire con 100% de humedad.

La composta sola posee las mejores características en cuanto a retención de la humedad. Para el caso de una temperatura de  $5^\circ\text{C}$  es superada por el medio combinado compostado que en términos hipotéticos se afirmaría que el agregar materia orgánica al medio cuando existen temperaturas bajas, se favorece la retención de humedad.

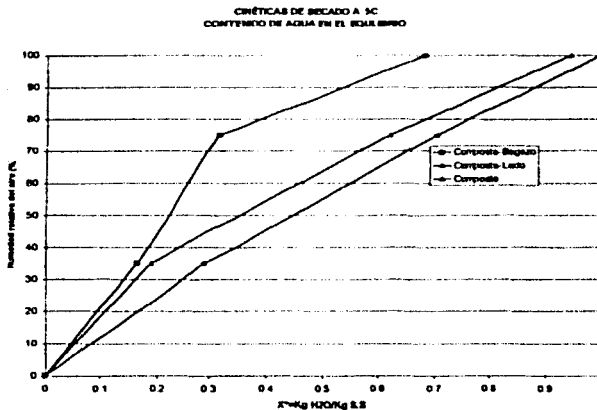


Figura 3.1.12 Curvas de equilibrio de distintos medios filtrantes a temperatura de  $5^\circ\text{C}$ .

### **Composta con esponja (experimento adicional)**

Se partió de la hipótesis de que al combinar composta con esponja se obtendría una mayor capacidad de retención del agua en el medio, debido a la porosidad de la esponja en donde es posible alojar el agua.

Se utilizaron tres tipos de esponjas: Espuma de poliuretano flexible (esponja 1), aglutinado (nombre comercial de la esponja 2) y fibra de DELCRON.

Las condiciones de operación que se utilizaron fueron: flujo constante de aire (2.5 l/min) con 30, 70 y 100% de humedad a una temperatura controlada de 35 °C. De estas curvas se establecen los puntos de equilibrio de humedad entre en aire y el medio filtrante con los cuales se construyó la Figura 3.1.16, correspondiente a las curvas de equilibrio para los distintos medios filtrantes a temperatura controlada de 35 °C

En las Figuras 3.1.13, 3.1.14 y 3.1.15 se muestran los resultados de las cinéticas de secado de estos medios compuestos.

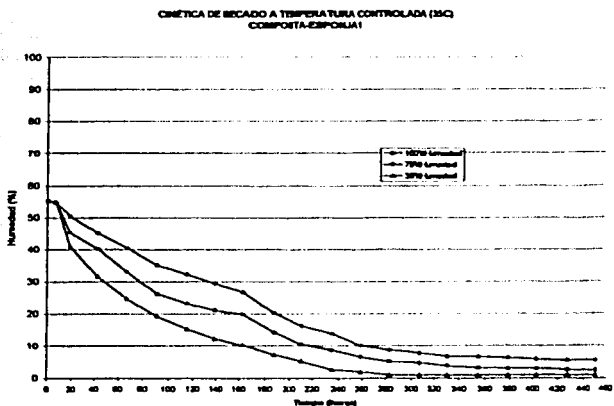


Figura 3.1.13 Cinéticas de secado de secado con esponja 1 a 35 °C

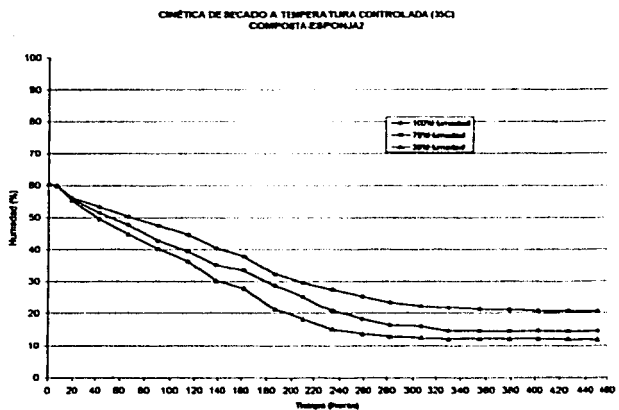
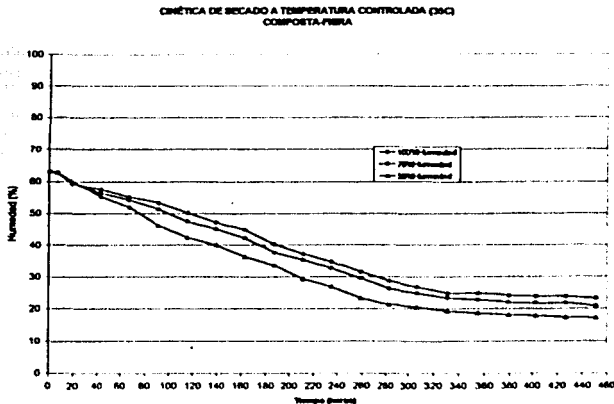


Figura 3.1.14 Cinética de secado de composta con esponja 2 a 35 °C.





**Figura 3.1.15** cinética de secado de composta con fibra a 35 °C.

Es posible observar en la Figura 3.1.16 que la composta combinada con esponja o fibra muestra contenidos relativamente bajos de humedad en el equilibrio. A diferencia de los medios estudiados anteriormente que muestran contenidos de humedad más altos. Lo que demuestra que los medios orgánicos de origen natural (composta, lodo y bagazo) retienen más la humedad que los medios sintéticos.

El combinar composta con esponja o fibra produce un medio filtrante con bajas características para la retención de la humedad en el medio. En este sentido la hipótesis planteada no es cierta..

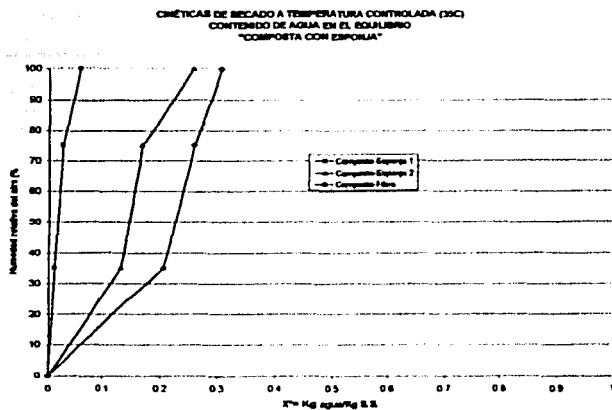


Figura 3.1.16 Curvas de equilibrio de composta con esponjas a 35 °C.

### **3.2 Efectos de la composición del medio filtrante, el flujo de aire y la adición de agua sobre la humedad del medio filtrante, la densidad real y aparente, la porosidad y el tamaño efectivo**

Los resultados obtenidos se presentan en las TABLAS 3.2.1 a la 3.2.8, correspondientes a los medios filtrantes utilizados, al flujo de aire introducido, a las columnas y al hecho de existir o no-adición de agua. En dichas Tablas se especifican los parámetros cuantificados en función de la altura de las columnas (existe una replica de resultados no mostrada en las Tablas).

El análisis de resultados se llevó a cabo por medio de un diseño factorial de experimentos  $2^3$  (análisis de variancia) con el objeto de cuantificar la significancia de la influencia de la composición del medio, del flujo de aire y de la adición de agua al medio filtrante sobre la distribución de la humedad en el medio filtrante, su densidad real y aparente, el tamaño efectivo de partícula, y la compactación del medio filtrante.

En el ANEXO I se listan los resultados del análisis de variancia (Tablas AI-1 a la AI-9) comparando los resultados de los experimentos con composta vs. composta-tezontle, composta vs. composta-lodo, composta vs. composta-bagazo. Este análisis se relaciona con experimentos factoriales  $2^3$ , es decir tres factores representados por las letras A, B y C con dos réplicas cada uno. En este caso los factores corresponden a la variación de flujo de aire (A), a la adición de agua al medio filtrante (B) y a la composición del medio (C).

En las tablas se hace comparación de las pruebas F con la distribución F con una significación del 99% de tal forma que aquellos datos que sean mayor a 1 (resultados en negritas) indican que el factor correspondiente posee una influencia significativa sobre el parámetro evaluado. Las tablas están en función de la altura de la columna.

Al analizar los resultados de significancia de los experimentos es posible interpretar los siguientes resultados:

### **Humedad:**

De la TABLAS AI-1 se desprende que al existir una variación en la composición del medio filtrante de 75% composta-25% tezontle a 100% composta hay un incremento significativo en la afectación de este cambio de composición en la retención de la humedad por parte del medio filtrante obteniéndose una mayor retención de la humedad en un medio con 100% composta, de tal forma que en las secciones superiores de la columna se retiene mas agua que en las inferiores (ver también TABLAS de la 3.2.1 a 3.2.4). Una causa probable de la distribución axial de la humedad mencionada se debe a que el aire no entra a la columna de biofiltración con un 100% de humedad de tal forma que las primeras capas de composta que entran en contacto con este aire se secan humedeciendo a la vez el aire que ya llega saturado con agua a la parte superior de la columna.

La adición directa de agua en la parte superior de la columna afectó significativamente la humedad del medio pero solamente en los últimos 20 cm de la parte superior de la columna.

Al observar la TABLA AI-2 con respecto al factor de humedad, de nueva cuenta la variación en la composición del medio filtrante ha afectado significativamente la retención de la humedad en el medio aunque en menor significancia que en la TABLA AI-1 debido al incremento de flujo de aire. En la TABLA AI-1 se hace el análisis de variancia para flujos de aire de 10 y 40 l/min. A un flujo mayor de aire que contiene una humedad relativa menor al 100%, el efecto de secado del medio es más intenso, lo que hace tender el medio filtrante a condiciones de baja retención de la humedad en las distintas capas de la columna, efecto que tiende a homogenizar el medio filtrante lo cual se ve reflejado en los datos de F0/F1% de la TABLA AI-2. De nueva cuenta, para un intervalo de flujo de aire entre 40 y 70 l/min, la adición directa de agua sobre el medio filtrante solamente cambia significativamente la humedad del medio en la parte superior de la columna

Las variaciones entre los medios composta vs. Composta-lodo y composta vs. Composta-bagazo no afectan significativamente el contenido de humedad en las columnas (TABLAS AI-4 a la AI-9) a diferencia de lo observado en los medios composta vs. Composta-tezontle.

El efecto de la adición de agua al medio filtrante con respecto al contenido de humedad sobre los estratos superiores de la columna es significativo independientemente del flujo de aire y composición del medio filtrante.

De las TABLAS AI-3, AI-6 y AI-9 correspondientes a la comparación de composta vs. Composta-tezontle, composta vs. Composta-lodo y composta vs. Composta-bagazo para flujos de aire entre 10 y 70 l/min, es una constante de variación significativa de la humedad en los primeros 20 cm debido al cambio de flujo de aire.

### **Densidad real:**

Al comparar los resultados de las TABLAS 4.2.1 y 4.2.7 en cuanto al comportamiento de la densidad real del medio filtrante es posible observar un decremento de los valores de densidad de un medio con 100% composta a uno con 75% composta con 25% de bagazo de caña. En las Tablas de análisis de variancia se muestra que los cambios significativos en densidad real del medio se llevan a cabo al cambiar de medio filtrante de composta a composta con bagazo de caña únicamente y ello transcurre en las dos primeras etapas de 20 cm de la columna.

### **Compactación:**

Al cabo de 7 días de operación, donde la columna está sometida a un flujo constante de aire y a la adición de agua y en el caso particular del medio que en las primeras etapas de la columna se somete al peso del resto del medio filtrante, es de esperarse el fenómeno de compactación e incremento de la densidad en esa zona. La adición de bagazo de caña a la

composta amortigua el fenómeno de compactación lo cual es una de las funciones de los agentes abultantes.

### **Otros factores:**

Con respecto a los demás factores analizados no hay cambios en sus valores en función de la composición del medio, del flujo de aire o adición de agua.

A continuación se muestran los resultados obtenidos (Tablas 3.2.1 a la 3.2.8) en los experimentos realizados.

Estos resultados sirvieron como base para la interpretación de los mismos, ya que el análisis se llevo a cabo con las tablas presentadas en el **Anexo I**.

**TABLA 3.2.1 RESULTADOS DE LOS EXPERIMENTOS CON COMPOSTA CON AIRE HÚMEDO**

<b>FILTRO PATRÓN</b>		<b>Altura en la columna de biofiltración de abajo hacia arriba, cm.</b>				
<b>Parámetros</b>	<b>0-20</b>	<b>20-40</b>	<b>40-60</b>	<b>60-80</b>	<b>80-100</b>	
% de humedad	52.36	54.33	54.29	54.37	54.1	
Densidad real (g/ml)	0.98	0.99	1.03	0.99	1.01	
Densidad aparente (g/ml)	0.66	0.67	0.69	0.66	0.68	
Porosidad (%)	32.10	32.09	32.50	33.21	32.31	
Tamaño efectivo	1.25	1.30	1.25	1.25	1.30	
Coefficiente de uniformidad	3.36	3.23	3.20	3.04	3.23	
Ph	7.30	7.25	7.20	7.20	7.50	
Alcalinidad (mg CaCO <sub>3</sub> /L)	360	350	325	320	370	
Compactación del medio	7.5					
<b>FILTRO CON 10 L/MIN DE AIRE</b>		<b>Altura de la columna de biofiltración de abajo hacia arriba, cm.</b>				
<b>Parámetros</b>	<b>0-20</b>	<b>20-40</b>	<b>40-60</b>	<b>60-80</b>	<b>80-100</b>	
% de humedad						
Densidad real (g/ml)						
Densidad aparente (g/ml)						
Porosidad (%)						
Tamaño efectivo						
Coefficiente de uniformidad						
PH						
Alcalinidad (mg CaCO <sub>3</sub> /L)						
Compactación del medio						
* Esta tabla esta vacia debido a que los resultados obtenidos no corresponden a las condiciones establecidas para realizar el experimento, causando una mala interpretación del análisis de resultados en general.						
<b>FILTRO CON 40 L/MIN DE AIRE</b>		<b>Altura de la columna de biofiltración de abajo hacia arriba, cm.</b>				
<b>Parámetro</b>	<b>0-20</b>	<b>20-40</b>	<b>40-60</b>	<b>60-80</b>	<b>80-100</b>	
% de humedad	16.32	49.94	48.46	48.33	49.60	
Densidad real (g/ml)	1.37	1.16	0.92	0.88	0.85	
Densidad aparente (g/ml)	0.82	0.70	0.62	0.60	0.62	
Porosidad (%)	40.1	39.5	32.7	31.9	27.2	
Tamaño efectivo	0.35	0.65	0.7	0.7	0.7	
Coefficiente de uniformidad	8.28	5.23	6.35	6.35	6.35	
PH	7.5	7.35	7.3	7.4	7.22	
Alcalinidad (mg CaCO <sub>3</sub> /L)	350	345	330	340	325	
Compactación del medio	10					
<b>FILTRO CON 70 L/MIN DE AIRE</b>		<b>Altura de la columna de biofiltración de abajo hacia arriba, cm.</b>				
<b>Parámetro</b>	<b>0-20</b>	<b>20-40</b>	<b>40-60</b>	<b>60-80</b>	<b>80-100</b>	
% de humedad	14.47	41.27	44.70	48.44	46.80	
Densidad real (g/ml)	1.46	1.35	1.33	1.23	1.12	
Densidad aparente (g/ml)	0.84	0.82	0.80	0.80	0.76	
Porosidad (%)	42.3	38.9	39.6	34.9	32.2	
Tamaño efectivo	0.45	0.59	0.59	1.2	1.4	
Coefficiente de uniformidad	10.55	7.62	7.62	3.25	3.07	
PH	7.40	7.36	7.58	7.20	7.80	
Alcalinidad (mg CaCO <sub>3</sub> /L)	360	375	355	330	380	
Compactación del medio	11					

**TABLA 3.2.2 RESULTADOS DE LOS EXPERIMENTOS CON COMPOSTA CON AIRE HÚMEDO Y ADICIÓN DE AGUA AL MEDIO FILTRANTE**

<b>FILTRO PATRÓN</b>	<b>Altura en la columna de biofiltración de abajo hacia arriba, cm.</b>				
<b>Parámetros</b>	<b>0-20</b>	<b>20-40</b>	<b>40-60</b>	<b>60-80</b>	<b>80-100</b>
% de humedad	52.36	54.33	54.29	54.37	54.1
Densidad real (g/ml)	0.98	0.99	1.03	0.99	1.01
Densidad aparente (g/ml)	0.66	0.67	0.69	0.66	0.68
Porosidad (%)	32.10	32.09	32.50	33.21	32.31
Tamaño efectivo	1.25	1.30	1.25	1.25	1.30
Coefficiente de uniformidad	3.36	3.23	3.20	3.04	3.23
PH	7.30	7.25	7.20	7.20	7.50
Alcalinidad (mg CaCO <sub>3</sub> /L)	360	350	325	320	370
Compactación del medio	7.5				
<b>FILTRO CON 10 L/MIN DE AIRE</b>	<b>Altura de la columna de biofiltración de abajo hacia arriba, cm.</b>				
<b>Parámetros</b>	<b>0-20</b>	<b>20-40</b>	<b>40-60</b>	<b>60-80</b>	<b>80-100</b>
% de humedad	9.88	12.21	23.60	30.08	31.19
Densidad real (g/ml)	1.24	1.29	1.34	1.30	1.32
Densidad aparente (g/ml)	0.74	0.71	0.78	0.85	0.89
Porosidad (%)	39.7	40.2	41.6	38.5	31.9
Tamaño efectivo	0.7	1.3	1.3	1.4	1.4
Coefficiente de uniformidad	No detectado	No detectado	No detectado	No detectado	No detectado
PH	6.91	7.02	6.95	7.15	7.06
Alcalinidad (mg CaCO <sub>3</sub> /L)	280	260	320	120	250
Compactación del medio					
<b>FILTRO CON 40 L/MIN DE AIRE</b>	<b>Altura de la columna de biofiltración de abajo hacia arriba, cm.</b>				
<b>Parámetro</b>	<b>0-20</b>	<b>20-40</b>	<b>40-60</b>	<b>60-80</b>	<b>80-100</b>
% de humedad	6.95	15.12	27.16	30.82	32.51
Densidad real (g/ml)	1.21	1.22	1.24	1.23	1.24
Densidad aparente (g/ml)	0.63	0.76	0.71	0.82	0.77
Porosidad (%)	47.91	45.23	42.84	43.50	38.23
Tamaño efectivo	1.1	1.2	1.2	1.3	1.4
Coefficiente de uniformidad	No detectado	No detectado	No detectado	No detectado	No detectado
PH	7.4	7.23	7.25	7.15	7.35
Alcalinidad (mg CaCO <sub>3</sub> /L)	320	260	120	260	280
Compactación del medio					
<b>FILTRO CON 70 L/MIN DE AIRE</b>	<b>Altura de la columna de biofiltración de abajo hacia arriba, cm.</b>				
<b>Parámetro</b>	<b>0-20</b>	<b>20-40</b>	<b>40-60</b>	<b>60-80</b>	<b>80-100</b>
% de humedad	5.04	4.23	5.29	10.08	15.19
Densidad real (g/ml)	1.35	1.38	1.43	1.25	1.04
Densidad aparente (g/ml)	0.73	0.68	0.60	0.65	0.69
Porosidad (%)	45.8	47.2	57.7	40.2	33.6
Tamaño efectivo	0.8	1.3	1.3	1.3	1.4
Coefficiente de uniformidad	No detectado	No detectado	No detectado	No detectado	No detectado
PH	7.14	6.78	6.63	6.85	6.96
Alcalinidad (mg CaCO <sub>3</sub> /L)	600	450	240	240	240
Compactación del medio					



**TABLA 3.2.3 RESULTADOS DE LOS EXPERIMENTOS CON COMPOSTA CON TEZONTLE CON AIRE HÚMEDO**

<b>FILTRO PATRÓN</b>		<b>Altura en la columna de biofiltración de abajo hacia arriba, cm.</b>				
<b>Parámetros</b>	<b>0-20</b>	<b>20-40</b>	<b>40-60</b>	<b>60-80</b>	<b>80-100</b>	
% de humedad	38.75	38.98	37.52	37.88	38.21	
Densidad real (g/ml)	1.32	1.34	1.33	1.34	1.33	
Densidad aparente (g/ml)	0.85	0.89	0.86	0.89	0.86	
Porosidad (%)	35.06	33.30	34.74	33.13	35.24	
Tamaño efectivo	0.7	0.68	0.65	0.67	0.63	
Coefficiente de uniformidad	4.88	5.02	5.53	5.52	5.42	
PH	8.14	8.52	8.04	7.89	7.33	
Alcalinidad (mg CaCO <sub>3</sub> /L)	425	420	550	520	500	
Compactación del medio	9					
<b>FILTRO CON 10 L/MIN DE AIRE</b>		<b>Altura de la columna de biofiltración de abajo hacia arriba, cm.</b>				
<b>Parámetros</b>	<b>0-20</b>	<b>20-40</b>	<b>40-60</b>	<b>60-80</b>	<b>80-100</b>	
% de humedad	17.08	31.94	32.45	35.73	36.18	
Densidad real (g/ml)	1.23	1.23	1.28	1.30	1.32	
Densidad aparente (g/ml)	0.71	0.74	0.78	0.85	0.89	
Porosidad (%)	41.98	39.44	39.08	34.41	31.98	
Tamaño efectivo	0.6	0.7	0.75	0.72	0.73	
Coefficiente de uniformidad	No detectado	No detectado	No detectado	5.68	5.47	
PH	7.46	8.1	8.25	7.76	8.08	
Alcalinidad (mg CaCO <sub>3</sub> /L)	380	415	450	410	420	
Compactación del medio	8					
<b>FILTRO CON 40 L/MIN DE AIRE</b>		<b>Altura de la columna de biofiltración de abajo hacia arriba, cm.</b>				
<b>Parámetro</b>	<b>0-20</b>	<b>20-40</b>	<b>40-60</b>	<b>60-80</b>	<b>80-100</b>	
% de humedad	12.78	34.74	34.43	34.10	33.41	
Densidad real (g/ml)	1.29	1.20	1.28	1.30	1.33	
Densidad aparente (g/ml)	0.63	0.71	0.76	0.82	0.87	
Porosidad (%)	51.14	45.26	40.55	36.63	34.79	
Tamaño efectivo	0.9	0.89	0.82	0.8	0.78	
Coefficiente de uniformidad	No detectado	No detectado	No detectado	5.75	5.76	
PH	8.19	8.25	7.58	7.85	7.25	
Alcalinidad (mg CaCO <sub>3</sub> /L)	460	420	320	380	360	
Compactación del medio	8					
<b>FILTRO CON 70 L/MIN DE AIRE</b>		<b>Altura de la columna de biofiltración de abajo hacia arriba, cm.</b>				
<b>Parámetro</b>	<b>0-20</b>	<b>20-40</b>	<b>40-60</b>	<b>60-80</b>	<b>80-100</b>	
% de humedad	9	23.2	24.2	32.48	31.69	
Densidad real (g/ml)	1.23	1.25	1.28	1.29	1.32	
Densidad aparente (g/ml)	0.60	0.68	0.73	0.76	0.82	
Porosidad (%)	51.06	45.27	43.07	40.59	37.47	
Tamaño efectivo	0.82	0.82	0.75	0.69	0.60	
Coefficiente de uniformidad	No detectado	No detectado	No detectado	No detectado	No detectado	
PH	8.41	7.65	7.88	7.75	8.05	
Alcalinidad (mg CaCO <sub>3</sub> /L)	450	340	435	365	440	
Compactación del medio	8					

**Tabla 3.2.4 RESULTADO DE LOS EXPERIMENTOS CON COMPOSTA CON TEZONTLE CON AIRE HÚMEDO Y ADICIÓN DE AGUA AL MEDIO FILTRANTE**

<b>FILTRO PATRÓN</b>		Altura en la columna de biofiltración de abajo hacia arriba, cm.				
Parámetros	0-20	20-40	40-60	60-80	80-100	
% de humedad	30.98	30.25	29.25	32.15	32.33	
Densidad real (g/ml)	0.97	0.98	0.96	0.98	0.97	
Densidad aparente (g/ml)	0.82	0.81	0.79	0.78	0.79	
Porosidad (%)	15.41	17.56	17.88	19.87	18.00	
Tamaño efectivo	0.4	0.41	0.41	0.38	0.35	
Coefficiente de uniformidad	7.5	7.31	7.31	7.89	10.2	
PH	7.35	8.37	7.10	8.18	8.43	
Alcalinidad (mg CaCO <sub>3</sub> /L)	300	350	350	250	400	
Compactación del medio	8					
<b>FILTRO CON 10 L/MIN DE AIRE</b>		Altura de la columna de biofiltración de abajo hacia arriba, cm.				
Parámetros	0-20	20-40	40-60	60-80	80-100	
% de humedad	20.31	30	33.89	41.65	45.48	
Densidad real (g/ml)	1.11	1.14	1.06	0.93	1.01	
Densidad aparente (g/ml)	0.74	0.77	0.71	0.71	0.81	
Porosidad (%)	33.27	32.37	33.14	24.19	19.66	
Tamaño efectivo	0.24	0.25	0.24	0.75	1.2	
Coefficiente de uniformidad	9.91	10.00	6.25	4.66	2.91	
PH	7.56	7.82	7.69	8.57	7.86	
Alcalinidad (mg CaCO <sub>3</sub> /L)	320	390	375	410	420	
Compactación del medio	11					
<b>FILTRO CON 40 L/MIN DE AIRE</b>		Altura de la columna de biofiltración de abajo hacia arriba, cm.				
Parámetro	0-20	20-40	40-60	60-80	80-100	
% de humedad	8.28	20.32	23.94	45.65	51.32	
Densidad real (g/ml)	1.34	1.09	0.99	0.98	1.04	
Densidad aparente (g/ml)	0.66	0.72	0.83	0.87	0.90	
Porosidad (%)	50	33.35	15.76	14.27	13.70	
Tamaño efectivo	0.25	0.25	0.25	1.20	1.40	
Coefficiente de uniformidad	19.04	9.2	5.75	3.75	3.40	
PH	8.21	8.32	7.56	8.10	8.45	
Alcalinidad (mg CaCO <sub>3</sub> /L)	360	435	390	300	320	
Compactación del medio	12					
<b>FILTRO CON 70 L/MIN DE AIRE</b>		Altura de la columna de biofiltración de abajo hacia arriba, cm.				
Parámetro	0-20	20-40	40-60	60-80	80-100	
% de humedad	5.6	21.72	34.4	34.31	42.41	
Densidad real (g/ml)	1.04	1.03	1.02	1.02	0.99	
Densidad aparente (g/ml)	0.63	0.79	0.79	0.79	0.83	
Porosidad (%)	39.56	22.94	21.69	21.08	16.20	
Tamaño efectivo	0.2	0.27	0.40	1.25	1.40	
Coefficiente de uniformidad	7.5	10	9.25	3.52	3.40	
PH	8.15	8.52	8.36	7.86	8.12	
Alcalinidad (mg CaCO <sub>3</sub> /L)	350	410	375	315	365	
Compactación del medio	13					

**TABLA 3.2.5 RESULTADOS DE LOS EXPERIMENTOS CON COMPOSTA CON LODO CON AIRE HÚMEDO**

<b>FILTRO PATRÓN</b>		<b>Altura en la columna de biofiltración de abajo hacia arriba, cm.</b>				
<b>Parámetros</b>	<b>0-20</b>	<b>20-40</b>	<b>40-60</b>	<b>60-80</b>	<b>80-100</b>	
% de humedad	52.82	53.11	55.12	53.45	53.96	
Densidad real (g/ml)	1.09	1.02	1.03	1.06	1.04	
Densidad aparente (g/ml)	0.81	0.79	0.80	0.82	0.81	
Porosidad (%)	25.7	22.1	22.5	22.8	22.1	
Tamaño efectivo	0.68	0.68	0.75	0.68	0.65	
Coefficiente de uniformidad	3.5	3.5	3.1	3.5	3.5	
PH	7.2	7.63	7.37	7.35	7.5	
Alcalinidad (mg CaCO <sub>3</sub> /L)	120	165	130	140	150	
Compactación del medio	5					
<b>FILTRO CON 10 L/MIN DE AIRE</b>		<b>Altura de la columna de biofiltración de abajo hacia arriba, cm.</b>				
<b>Parámetros</b>	<b>0-20</b>	<b>20-40</b>	<b>40-60</b>	<b>60-80</b>	<b>80-100</b>	
% de humedad	48.19	51.1	52.9	51.4	52.0	
Densidad real (g/ml)	0.90	0.91	0.93	0.95	0.95	
Densidad aparente (g/ml)	0.66	0.71	0.72	0.74	0.75	
Porosidad (%)	26.88	21.43	22.83	21.80	21.17	
Tamaño efectivo	0.58	0.52	0.61	0.61	0.60	
Coefficiente de uniformidad	3.96	4.61	4.26	3.63	3.6	
PH	4.65	7.45	7.3	7.42	7.40	
Alcalinidad (mg CaCO <sub>3</sub> /L)	160	140	125	130	135	
Compactación del medio	14					
<b>FILTRO CON 40 L/MIN DE AIRE</b>		<b>Altura de la columna de biofiltración de abajo hacia arriba, cm.</b>				
<b>Parámetro</b>	<b>0-20</b>	<b>20-40</b>	<b>40-60</b>	<b>60-80</b>	<b>80-100</b>	
% de humedad	41.46	41.88	43.59	44.7	44.9	
Densidad real (g/ml)	1.12	1.08	0.95	0.92	0.91	
Densidad aparente (g/ml)	0.62	0.63	0.65	0.68	0.67	
Porosidad (%)	44.5	41.4	30.9	25.5	25.9	
Tamaño efectivo	0.36	0.38	0.40	0.45	0.42	
Coefficiente de uniformidad	6.11	5.21	4.75	4.44	4.2	
PH	7.3	7.26	7.35	7.45	7.25	
Alcalinidad (mg CaCO <sub>3</sub> /L)	130	125	140	145	130	
Compactación del medio	9					
<b>FILTRO CON 70 L/MIN DE AIRE</b>		<b>Altura de la columna de biofiltración de abajo hacia arriba, cm.</b>				
<b>Parámetro</b>	<b>0-20</b>	<b>20-40</b>	<b>40-60</b>	<b>60-80</b>	<b>80-100</b>	
% de humedad	19.45	27.11	37.35	37.65	38.2	
Densidad real (g/ml)	1.03	0.93	0.88	0.88	0.87	
Densidad aparente (g/ml)	0.51	0.64	0.66	0.71	0.71	
Porosidad (%)	50.8	30.8	24.4	18.7	18.5	
Tamaño efectivo	0.35	0.29	0.40	0.30	0.30	
Coefficiente de uniformidad	6.8	5.2	7.2	5.4	5.2	
PH	7.4	7.2	7.1	7.2	7.3	
Alcalinidad (mg CaCO <sub>3</sub> /L)	130	140	110	120	125	
Compactación del medio	7					

**TABLA 3.2.6 RESULTADOS DE LOS EXPERIMENTOS CON COMPOSTA CON LODO CON AIRE HÚMEDO Y ADICIÓN DE AGUA AL MEDIO FILTRANTE**

<b>FILTRO PATRÓN</b>	<b>Altura en la columna de biofiltración de abajo hacia arriba, cm.</b>				
<b>Parámetros</b>	<b>0-20</b>	<b>20-40</b>	<b>40-60</b>	<b>60-80</b>	<b>80-100</b>
% de humedad	53.56	52.98	52.75	53.65	54.12
Densidad real (g/ml)	0.95	1.01	0.93	0.95	0.95
Densidad aparente (g/ml)	0.78	0.80	0.74	0.74	0.74
Porosidad (%)	18.11	20.89	20.09	22.07	22.09
Tamaño efectivo	1.08	0.76	0.76	0.76	0.85
Coefficiente de uniformidad	2.53	2.85	3.6	3.6	3.76
PH	7.25	7.31	7.24	7.19	7.26
Alcalinidad (mg CaCO <sub>3</sub> /L)	125	130	125	120	130
Compactación del medio	7				
<b>FILTRO CON 10 L/MIN DE AIRE</b>	<b>Altura de la columna de biofiltración de abajo hacia arriba, cm.</b>				
<b>Parámetros</b>	<b>0-20</b>	<b>20-40</b>	<b>40-60</b>	<b>60-80</b>	<b>80-100</b>
% de humedad	42.12	48.40	54.51	55.64	56.2
Densidad real (g/ml)	1.12	1.09	0.95	0.96	1.11
Densidad aparente (g/ml)	0.63	0.75	0.75	0.76	0.88
Porosidad (%)	43.7	30.75	20.72	20.44	20.74
Tamaño efectivo	0.43	0.62	1.32	1.75	1.68
Coefficiente de uniformidad	5.62	5.11	2.7	2.21	2.61
PH	7.23	7.37	7.34	7.19	7.17
Alcalinidad (mg CaCO <sub>3</sub> /L)	120	130	130	110	105
Compactación del medio					
<b>FILTRO CON 40 L/MIN DE AIRE</b>	<b>Altura de la columna de biofiltración de abajo hacia arriba, cm.</b>				
<b>Parámetro</b>	<b>0-20</b>	<b>20-40</b>	<b>40-60</b>	<b>60-80</b>	<b>80-100</b>
% de humedad	50.88	57.75	57.89	58.45	59.75
Densidad real (g/ml)	1.01	1.03	0.98	0.99	0.95
Densidad aparente (g/ml)	0.68	0.76	0.78	0.78	0.78
Porosidad (%)	32.6	26.45	20.1	20.9	17.9
Tamaño efectivo	0.5	0.98	1.22	1.46	1.28
Coefficiente de uniformidad	4.6	2.9	2.6	2.7	2.2
PH	7.12	7.45	7.32	7.42	7.35
Alcalinidad (mg CaCO <sub>3</sub> /L)	110	130	125	130	135
Compactación del medio	15				
<b>FILTRO CON 70 L/MIN DE AIRE</b>	<b>Altura de la columna de biofiltración de abajo hacia arriba, cm.</b>				
<b>Parámetro</b>	<b>0-20</b>	<b>20-40</b>	<b>40-60</b>	<b>60-80</b>	<b>80-100</b>
% de humedad	15.72	52.58	54.98	56.10	56.65
Densidad real (g/ml)	1.19	1.01	0.92	0.90	0.90
Densidad aparente (g/ml)	0.76	0.70	0.71	0.70	0.71
Porosidad (%)	36.4	30.9	22.9	22.6	21.2
Tamaño efectivo	0.59	0.52	1.32	1.48	1.4
Coefficiente de uniformidad	4.4	3.11	2.57	2.36	2.57
PH	7.35	7.41	7.38	7.26	7.48
Alcalinidad (mg CaCO <sub>3</sub> /L)	135	140	140	130	145
Compactación del medio	9				

**TABLA 3.2.7 RESULTADO DE LOS EXPERIMENTOS CON COMPOSTA CON BAGAZO DE CAÑA CON AIRE HÚMEDO**

<b>FILTRO PATRÓN</b>		Altura en la columna de biofiltración de abajo hacia arriba, cm.				
Parámetros	0-20	20-40	40-60	60-80	80-100	
% de humedad	48.2	48.56	48.23	46.85	47.1	
Densidad real (g/ml)	1.001	1.045	0.996	0.989	1.002	
Densidad aparente (g/ml)	0.684	0.695	0.684	0.679	0.677	
Porosidad (%)	31.66	33.51	31.34	31.29	32.41	
Tamaño efectivo	0.48	0.48	0.48	0.48	0.48	
Coefficiente de uniformidad	4.95	4.95	4.16	4.16	4.95	
PH	7.25	7.16	7.21	7.2	7.32	
Alcalinidad (mg CaCO <sub>3</sub> /L)	110	105	110	110	120	
Compactación del medio	15					
<b>FILTRO CON 10 L/MIN DE AIRE</b>		Altura de la columna de biofiltración de abajo hacia arriba, cm.				
Parámetros	0-20	20-40	40-60	60-80	80-100	
% de humedad	40.25	43.26	46.52	47.25	48.1	
Densidad real (g/ml)	0.89	0.91	0.96	0.97	0.98	
Densidad aparente (g/ml)	0.65	0.65	0.66	0.66	0.67	
Porosidad (%)	27.1	28.1	31.4	32.0	32.0	
Tamaño efectivo	0.30	0.33	0.35	0.42	0.47	
Coefficiente de uniformidad	5.6	5.9	5.36	4.64	4.14	
PH	7.30	7.12	7.05	7.40	7.16	
Alcalinidad (mg CaCO <sub>3</sub> /L)	110	105	110	115	105	
Compactación del medio	9					
<b>FILTRO CON 40 L/MIN DE AIRE</b>		Altura de la columna de biofiltración de abajo hacia arriba, cm.				
Parámetro	0-20	20-40	40-60	60-80	80-100	
% de humedad	25.36	34.21	38.56	41.26	45.29	
Densidad real (g/ml)	0.96	0.94	0.89	0.85	0.80	
Densidad aparente (g/ml)	0.56	0.59	0.60	0.61	0.63	
Porosidad (%)	41.7	36.7	32.6	28.4	21.5	
Tamaño efectivo	0.20	0.28	0.28	0.47	0.47	
Coefficiente de uniformidad	7.6	5.4	5.8	4.4	4.4	
PH	7.0	6.9	6.8	7.1	7.2	
Alcalinidad (mg CaCO <sub>3</sub> /L)	85	80	85	100	110	
Compactación del medio	18					
<b>FILTRO CON 70 L/MIN DE AIRE</b>		Altura de la columna de biofiltración de abajo hacia arriba, cm.				
Parámetro	0-20	20-40	40-60	60-80	80-100	
% de humedad	12.35	28.26	35.26	38.20	42.15	
Densidad real (g/ml)	1.15	0.88	0.85	0.80	0.77	
Densidad aparente (g/ml)	0.52	0.58	0.64	0.65	0.64	
Porosidad (%)	54.5	34.1	24.6	18.8	16.3	
Tamaño efectivo	0.25	0.30	0.30	0.35	0.25	
Coefficiente de uniformidad	7.92	4.33	4.16	4.00	5.20	
PH	7.26	7.40	7.29	7.17	7.11	
Alcalinidad (mg CaCO <sub>3</sub> /L)	115	125	120	115	110	
Compactación del medio	8					

**TABLA 3.2.8 RESULTADO DE LOS EXPERIMENTOS CON COMPOSTA CON BAGAZO DE CAÑA CON AIRE HÚMEDO Y ADICIÓN DE AGUA AL MEDIO FILTRANTE.**

<b>FILTRO PATRÓN</b>		Altura en la columna de biofiltración de abajo hacia arriba, cm.				
Parámetros	0-20	20-40	40-60	60-80	80-100	
% de humedad	48.2	49.5	48.6	48.2	47.2	
Densidad real (g/ml)	1.00	1.02	0.99	0.99	0.98	
Densidad aparente (g/ml)	0.68	0.68	0.67	0.68	0.67	
Porosidad (%)	31.66	33.23	32.4	31.5	31.6	
Tamaño efectivo	0.42	0.42	0.42	0.42	0.42	
Coefficiente de uniformidad	3.8	4.6	3.8	3.8	3.9	
PH	7.15	7.22	7.16	7.09	7.11	
Alcalinidad (mg CaCO <sub>3</sub> /L)	90	95	90	85	88	
Compactación del medio	10					
<b>FILTRO CON 10 L/MIN DE AIRE</b>		Altura de la columna de biofiltración de abajo hacia arriba, cm.				
Parámetros	0-20	20-40	40-60	60-80	80-100	
% de humedad	36.5	48.0	49.7	51.0	53.5	
Densidad real (g/ml)	0.84	0.97	1.13	0.98	0.91	
Densidad aparente (g/ml)	0.64	0.69	0.77	0.74	0.76	
Porosidad (%)	23.9	28.8	32.1	24.3	16.7	
Tamaño efectivo	0.31	0.49	0.65	0.65	0.61	
Coefficiente de uniformidad	4.83	3.63	3.41	3.10	3.36	
PH	7.8	7.6	7.1	7.5	7.1	
Alcalinidad (mg CaCO <sub>3</sub> /L)	110	115	115	110	90	
Compactación del medio	11					
<b>FILTRO CON 40 L/MIN DE AIRE</b>		Altura de la columna de biofiltración de abajo hacia arriba, cm.				
Parámetro	0-20	20-40	40-60	60-80	80-100	
% de humedad	33.37	45.16	46.24	47.52	48.94	
Densidad real (g/ml)	0.77	0.88	0.93	0.97	0.86	
Densidad aparente (g/ml)	0.67	0.66	0.75	0.66	0.64	
Porosidad (%)	13.09	24.51	19.92	31.82	25.20	
Tamaño efectivo	0.45	0.55	0.62	0.65	0.70	
Coefficiente de uniformidad	3.66	2.90	3.87	3.00	2.85	
PH	7.12	7.16	7.21	7.22	7.30	
Alcalinidad (mg CaCO <sub>3</sub> /L)	90	95	105	110	95	
Compactación del medio	12					
<b>FILTRO CON 70 L/MIN DE AIRE</b>		Altura de la columna de biofiltración de abajo hacia arriba, cm.				
Parámetro	0-20	20-40	40-60	60-80	80-100	
% de humedad	46.71	50.34	50.86	51.93	53.08	
Densidad real (g/ml)	0.93	0.96	1.00	1.02	1.03	
Densidad aparente (g/ml)	0.75	0.75	0.75	0.72	0.77	
Porosidad (%)	19.21	21.36	24.90	29.37	24.83	
Tamaño efectivo	0.48	0.60	0.65	0.76	0.76	
Coefficiente de uniformidad	6.12	3.50	3.23	2.76	2.65	
PH	7.15	7.20	7.25	7.30	7.05	
Alcalinidad (mg CaCO <sub>3</sub> /L)	100	105	98	95	85	
Compactación del medio	11					

### **3.3 Estudios de la caída de presión en el lecho filtrante en función de la composición, del flujo de aire y el tiempo de operación**

#### **3.3.1 Resultados Obtenidos**

En las Figuras A2.1 a la A2.12 (ANEXOII) y las Figuras 3.3.1 y 3.3.2 se presentan diversas gráficas que se refieren, por un lado a la evolución de la caída de presión en función del flujo de aire aplicado cada 20 l/min, por otro lado, a la caída de presión en función del flujo aplicado en el experimento y de los días de operación transcurridos, a la caída de presión por unidad de flujo en función del medio filtrante y de los días de operación del sistema y a la caída de presión por unidad de flujo en función de los días de operación y de los flujos utilizados en las columnas

La evolución de la relación entre caída de presión y flujo de aire P/Q en los medios filtrantes, durante 7 días de operación con base al aire suministrado a cada columna (10, 40 y 70 l/min) sometidos a aire húmedo y a aire húmedo con adición de agua se muestran en las Figuras 3.3.1 y 3.3.2. La P/Q es una relación de la caída de presión y flujo de aire, con una tendencia lineal, muestra una tendencia directamente proporcional entre estos factores dentro del intervalo aplicado de carga superficial (0 a 120 litros de aire/min)

Una comparación entre medio filtrantes y la adición o no de agua la proporciona la Figura 3.3.1 De ella se desprende en términos generales que la caída de presión en los medios filtrante, bajo las mismas condiciones de experimentación de este trabajo, disminuyen en función del tiempo de operación de la columna y para el caso de las columnas sometidas al mayor flujo se observa un decremento en las caídas de presión.

Por otro lado, al adicionar agua al medio, se confirma el incremento en la caída de presión con respecto a la adición de agua al medio filtrante. Para el caso particular del medio composta-tezontle se observa una diferenciación en los perfiles de caída de presión/flujo de aire conforme transcurren los días de operación de la columna en donde la columna que es

sometida al menor flujo de aire presenta las mayores caídas de presión. Debido a que cuando agregamos agua a los medios, produce aglutinación de las partículas de composta que aumenta la caída de presión, además la compactación debido al peso del tezontle con respecto a medios que son 100% composta y composta-lodo, en donde hay un aumento pequeño por agregar agua a los medios, aunque la caída de presión no es modificada durante el tiempo de operación

El medio composta-bagazo incrementa su relación caída de presión/flujo de aire (pendiente de los perfiles de caída de presión vs. Flujo de aire) en función del tiempo de operación. Este fenómeno resulta por que el agente abultante de origen orgánico retiene agua y aumenta el volumen del empaque obstruyendo el flujo de aire.

De la Figura 3.3.2 se observa que los medios filtrante composta-bagazo en primer término y composta-tezontle en segundo lugar, presentan las mayores caídas de presión y que el adicionar agua al medio filtrante se invierten los lugares de estos medios filtrante a demás de que se incrementan las caídas de presión en los medios con respecto a la no adición de agua al medio filtrante.

En términos generales la caída de presión en los medios filtrantes, bajo las condiciones experimentales de este trabajo, disminuye como una función del tiempo de operación. Para el caso de las columnas sometidas a un flujo máximo (70 l/min) disminuye la caída de presión como una función del tiempo de operación. Este hecho puede ser explicado por la canalización (observada directamente en la parte alta de cada columna) producido por el aire que se mueve entre los medios con respecto al tiempo, de tal manera que las corrientes mayores forzarán a formar canales a mayor velocidad que flujos inferiores

Estos canales ofrecen menor resistencia al flujo de aire que los medios filtrantes por sí mismos. La formación de canales en los medios filtrantes de origen natural se asocia también a una humedad excedente o deficiente, que produce aglutinación o fragmentación de partículas en los medios.



Este fenómeno lo reportan Deshuses y Cox (1998) que observaron canales que se formaban por el flujo de aire en medios formados por composta con trozos de madera principalmente en regiones cerca de las paredes del biofiltro. Morales *et al.*, (1998) informa el efecto de la humedad sobre el medio filtrante cambiando la homogeneidad y su desactivación para tratar gases con tolueno.

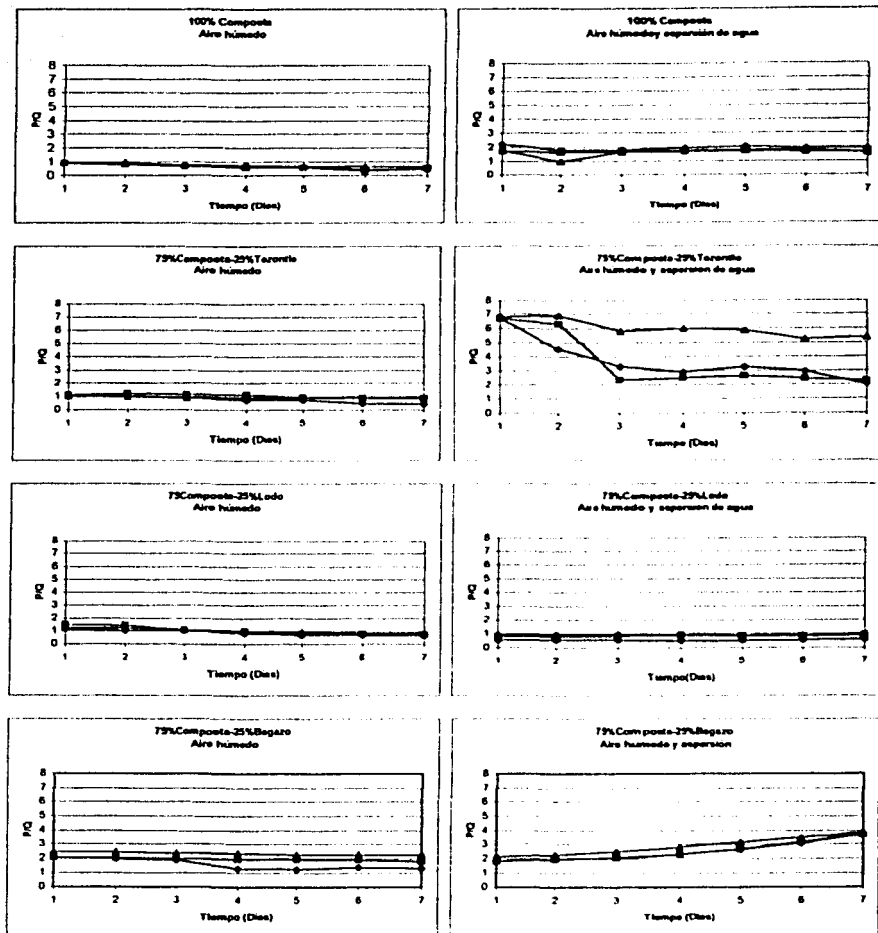


Figura 3.3.1 Evolución de la relación caída de presión-flujo de aire (P/Q) en distintos medios filtrantes durante 7 días de operación en función del flujo de aire suministrado a cada columna ( $\blacktriangle$ :10,  $\blacksquare$ :40 y  $\blacklozenge$ :70 l/min) sometido a aire 100% húmedo y aire 100% húmedo con adición de agua al medio.

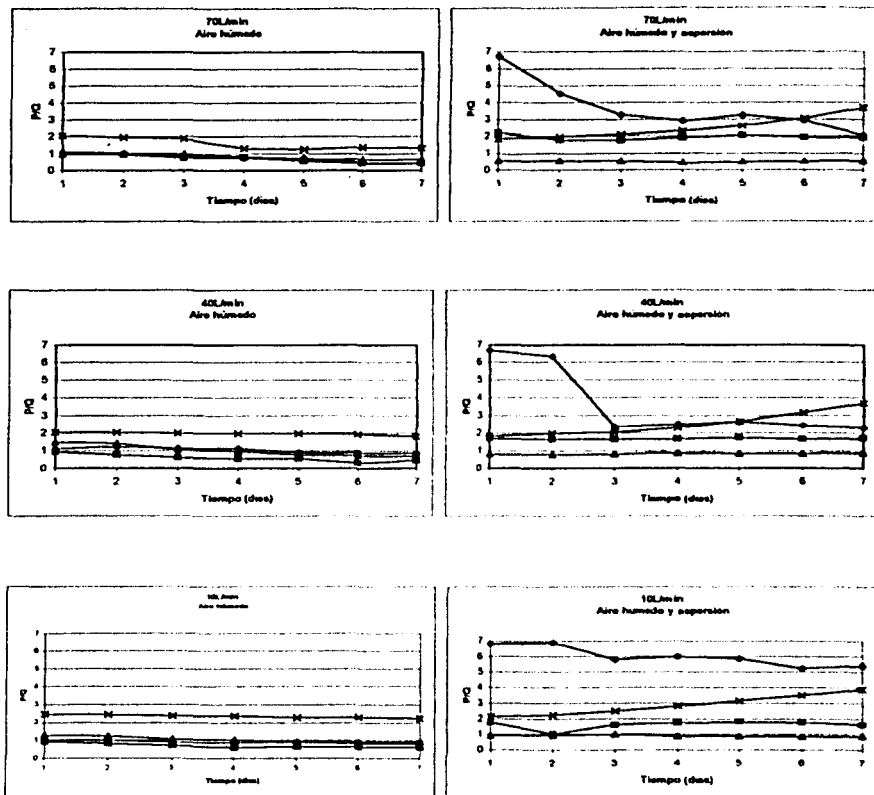


Figura 3.3.2 Evolución de la relación caída de presión-flujo de aire ( $P/Q$ ) durante 7 días de operación en función del flujo de aire suministrado a cada columna (10, 40 y 70 l aire/min) en distintos medios filtrantes (■: 100% composta, ◆: 75% composta-25% tezontle, ▲: 75% composta-25% lodo, x: 75% composta-25% bagazo) sometidos a aire 100% húmedo y aire 100% húmedo con adición de agua al medio.

De las graficas presentadas en el **Anexo II** es posible obtener las siguientes conclusiones:

### **Composta**

Al cabo de 7 días de operación se evidencia un perfil de caída de presión donde a menor flujo constante de aire (10 l/min) hay mayores caídas de presión y a mayor flujo de aire (70 l/min) se observan menores caídas de presión. Al incrementar el flujo de aire para cada prueba (0 a 120 l/min) se incrementa la caída de presión (Figura A2.1).

La adición de agua al medio filtrante (Figura A2.2) produce una clara diferenciación en los perfiles de caída de presión en donde la columna que estuvo sometida a un flujo de 70 l/min presenta durante los siete días de operación siempre las mayores caídas de presión. En este caso, no hay una diferenciación clara de los perfiles de la caída de presión para las columnas sometidas a 10 y 40 l/min de aire.

Se presentan caídas de presión máximas a un flujo de 120 l/min de 70 mmH<sub>2</sub>O en columnas sin adición de agua y casi 250 mmH<sub>2</sub>O en columnas con adición de agua lo que representa un incremento en la caída de presión del 35%.

La adición de agua al medio filtrante produce una compactación de las partículas de composta que incrementa la caída de presión.

### **Composta-Tezontle**

De La Figura A2.3 es posible observar el mismo fenómeno presentado cuando se tiene solamente composta, en el sentido de que la columna sometida al mayor flujo (70 l/min) muestra menores caídas de presión al cabo de siete días de operación, sin embargo a diferencia del medio filtrante con 100% de composta, al adicionar agua al medio (Figura A2.4) se presenta el mismo comportamiento en el sentido de que a las columnas sometidas a un flujo menor, aunque el efecto de adicionar agua al medio es incrementar las caídas de presión máximas de 100 mmH<sub>2</sub>O a 600 mmH<sub>2</sub>O (600%). Es de suponer que el haber un agente abultante en el medio favorece canalizaciones de aire a altos flujos lo que conlleva una menor caída de presión que a flujos bajos, además de la generación de zonas muertas en el medio filtrante.

### **Composta-Lodo**

En las Figuras A2.5 y A2.6 se observa la misma tendencia que en los medios anteriores en el sentido de que las columnas sometidas a un flujo mayor presentan un perfil de caída de presión con valores menores a los perfiles de caídas de presión correspondientes a flujos de aire menores, conclusión aplicable independientemente de si se agrega agua o no al medio filtrante.

Es de observar en la gráfica A2.5 que para un flujo de 120 l/min, en el primer día de operación, se presentó un intervalo de caída de presión entre 130 y 180 mmH<sub>2</sub>O y que al cabo de 7 días de operación continua de la columna fue modificada a un intervalo de 60 a 110 mmH<sub>2</sub>O para el mismo flujo. En términos generales, hay una disminución de la caída de presión del orden del 38%. La adición de agua al medio no afecta este comportamiento (Figura A2.6).

### **Composta-Bagazo de caña**

De la Figura A2.7 se observa la misma tendencia que en los medios anteriores en el sentido de que la columna sometida a un flujo mayor durante siete días de operación presenta las menores caídas de presión. En este sentido, la adición de agua al medio filtrante no provocó una diferenciación en los perfiles de caída de presión para las columnas, aunque sí se ve incrementada la caída de presión en un 160% (de 250 a 400 mmH<sub>2</sub>O).

De las Figuras A2.9 a la A2.12 es posible generalizar el efecto de la adición de agua al medio filtrante en el sentido de que incrementa la caída de presión y uniformiza los perfiles de caída de presión disminuyendo su intervalo de variación.

El medio filtrante que menor caída de presión presenta es la composta 100%.

En la TABLA 3.3.1 se resume información en cuanto a caídas de presión en las columnas en el primer y séptimo día de operación a un flujo de aire de 120 l/min con y sin adición

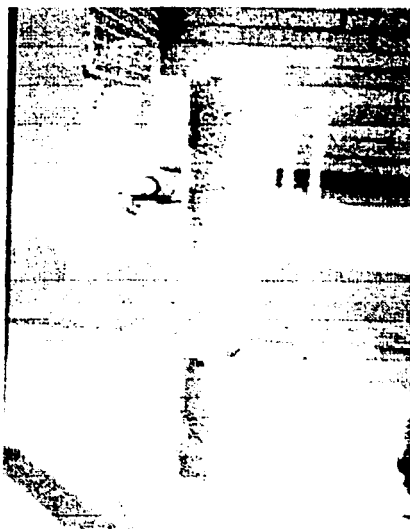
**TABLA 3.3.1 RESUMEN DE CAÍDAS DE PRESIÓN Y SUS PORCENTAJES DE CAMBIO EN LAS COLUMNAS DE EXPERIMENTACIÓN.**

	Intervalo de $\Delta p$ , día 1, 120 l/min	Intervalo de $\Delta p$ , día 7, 120 l/min	% de cambio, "+" aumento, "-" disminución	Intervalo de $\Delta p$ , día 1, 120 l/min, con adición de agua	Intervalo de $\Delta p$ , día 7, 120 l/min, con adición de agua	% de cambio, "+" aumento, "-" disminución	Orden de $\Delta p$ (de mayor a menor) según flujo de aire a 120 l/min en día 7, sin agua	Orden de $\Delta p$ (de mayor a menor) según flujo de aire a 120 l/min en día 7, con agua
Composta (Figs. 4.3.1 y 4.3.2)	120- 120	50 - 70	38' - 41'	200 - 275	200 - 250	0 - 10'	10 40 70	70 10 - 40
Composta + tezontle (Figs. 4.3.3 y 4.3.4)	130- 130	60 - 100	53' - 23'	800 - 800	300 - 650	62' - 18'	10 - 40 70	10 70 40
Composta + Lodo (Figs. 4.3.5 y 4.3.6)	130- 180	60 - 110	53' - 38'	70 - 110	70 - 110	0 - 0	40 10 70	40 - 10 70
Composta + Bagazo (Figs. 4.3.7 y 4.3.8)	250- 300	150- 200	40' - 16'	200 - 225	375 - 400	43' - 37'	10 40 70	10 40 70

### 3.4 Estudios de trazado en las columnas de biofiltración

#### 3.4.1 Resultados obtenidos

En la Figura 3.4.1 se muestra una fotografía de una columna empacada con piedras de tezontle de 0.5 " de diámetro operando a régimen permanente con aire. A la corriente se le introdujo humo como trazador para poder visualizar zonas muertas. En la fotografía es posible observar regiones de la columna que no se encuentran en contacto con el humo lo que indica la existencia de zonas muertas.



**Figura 3.4.1** Fotografía de un estudio de trazado con humo en una columna empacada con tezontle. Se visualizan zonas muertas.

En el ANEXO III se presentan las curvas de distribución de tiempos de residencia obtenidas en cada experimento así como la curva promedio correspondiente.

### Cálculos efectuados

Para el análisis de la curva de distribución de tiempos de residencia se utilizó una hoja de cálculo en Excel que calcula el tiempo de retención promedio del gas, la variancia, la fracción de volumen muerto y la desviación estándar de los datos así como el ajuste del modelo de dispersión axial y el modelo de tanques completamente mezclados puestos en serie.

Por otro lado se determina el Índice  $\phi$  (Morgan-Sagastume *et al.*, (1999)) de las curvas de distribución de tiempos de residencia.

Para poder comparar los resultados en los experimentos, los datos se normalizaron.

Este trabajo de estudios de trazado no pretende llegar a conclusiones directas, debido a las limitaciones del modelo físico. Sin embargo pueden obtenerse elementos que permitan evaluar la magnitud del cambio en la hidrodinámica del biofiltro. En el Anexo III se muestran las graficas correspondientes a los experimentos.

Los valores de tiempo de retención medio, el coeficiente de variación, el número de dispersión, el número de tanques en serie y el índice  $\phi$  son presentados para cada experimento.



### 3.4.1.1 Columna vacía vs. Columnas empacadas con composta cada 20 cm. a lo largo de la altura de la columna sometidas a un flujo de aire de 10 l/min.

Los resultados de este experimento se muestran en la TABLA 3.4.1

**TABLA 3.4.1 RESULTADOS DE AJUSTE DE MODELOS A LAS CURVAS DE DISTRIBUCIÓN DE TIEMPOS DE RESIDENCIA. COLUMNAS VACÍA VS COLUMNAS EMPACADAS CON COMPOSTA**

Experimento	Tiempo de retención medio	Coefficiente de variación	Número de dispersión axial	Número de tanques mezclados en serie	Índice $\phi$
Columna vacía	278	0.40	0.086	6	0.288
Columna con 20 cm de composta	283	0.42	0.107	6	0.349
Columna con 40 cm de composta	271	0.40	0.105	6	0.442
Columna con 60 cm de composta	263	0.40	0.122	6	0.469
Columna con 80 cm de composta	245	0.38	0.147	7	0.566
Columna con 100 cm de composta	231	0.41	0.173	8	0.668

De la Tabla 3.4.1 es posible observar que el empacar la columna con composta el flujo de gas tiende a un comportamiento fluidodinámico disperso que al estar la columna vacía. Esto se observa en el comportamiento del coeficiente de variación y en el número de dispersión, no así en el modelo de tanques mezclados en serie que resulta poco sensible a los cambios acaecidos en los perfiles de las curvas de distribución de tiempos de residencia.

El índice  $\phi$  confirma este comportamiento al existir un incremento en su valor al empacarse con composta la columna.

Una hipótesis que explica esto es el que las partículas de gas al interactuar con un medio constituido por partículas sólidas tiende a frenarse en su paso y a "buscar" mejores caminos de flujo en el espacio que les rodea produciéndose su dispersión dentro de la columna.

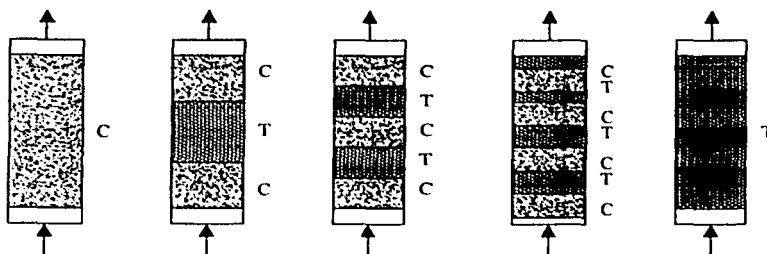
### 3.4.1.2 Columna de composta en la cual se intercalan zonas de tezontle sometidas a un flujo de aire de 10 l/min.

En la TABLA 3.4.2 se presentan los resultados correspondientes a este experimento en la Figura 3.4.2 se muestra la forma en que las columnas fueron empacadas intercalando composta con tezontle.

**TABLA 3.4.2 RESULTADOS DE AJUSTE DE MODELOS A LAS CURVAS DE DISTRIBUCIÓN DE TIEMPOS DE RESIDENCIA. COLUMNAS CON COMPOSTA INTERCALANDO ZONAS DE TEZONTLE.**

Experimento	Tiempo de retención medio	Coefficiente de variación	Número de dispersión axial	Número de tanques mezclados en serie	Indice $\phi$
100% Composta	231	0.41	0.17	6	0.668
C-T-C	214	0.45	0.21	5	0.506
C-T-C-T-C	216	0.39	0.086	6	0.453
C-T-C-T-C-T-C	213	0.41	0.166	6	0.489
100% Tezontle	245	0.43	0.072	5	0.284

C-T-C: Columna empacada con tres zonas, composta-tezontle-composta repartidas equitativamente en el volumen de la columna



**Figura 3.4.2** Distribución de composta y tezontle dentro de las columnas de biofiltración

Este experimento confirma el resultado del experimento anterior donde una columna empacada al 100% con composta tiende a un flujo mezclado mientras que una columna empacada al 100% con tezontle con partículas de medio mucho mayores en tamaño a las partículas constituidas de la composta presentan una tendencia de flujo pistón. Esto se refleja en el comportamiento del índice  $\phi$  y en el número de dispersión axial. El modelo de tanques mezclados puestos en serie permanece constante así como el coeficiente de variación

### 3.4.1.3 Columna empaca con tezontle sometida a flujos de aire de 10, 40 y 70 l/min.

En la TABLA 3.4.3 se muestran los resultados de este experimento.

**TABLA 3.4.3 RESULTADOS DE AJUSTE DE MODELOS A LAS CURVAS DE DISTRIBUCIÓN DE TIEMPOS DE RESIDENCIA. COLUMNAS EMPACADAS CON TEZONTLE SOMETIDAS A DISTINTOS FLUJOS**

Flujo de aire (l/min)	Tiempo de retención medio	Coefficiente de variación	Número de dispersión axial	Número de tanques mezclados en serie	Índice $\phi$
10	245	0.43	0.072	5	0.284
40	158	0.42	0.100	6	0.531
70	154	0.39	0.106	6	0.597

En una columna empacada con tezontle y la cual se encuentra sometida a 10, 40 y 70 l/min de aire es posible observar en la TABLA 3.4.3 que el incrementar el flujo de aire, éste tiende a un flujo completamente mezclado. Esto se refleja en el comportamiento del índice  $\phi$  y en el número de dispersión.

### 3.4.1.4 Columnas empacadas con composta-lodo y composta-bagazo (50-50%) sometidas a flujos de aire de 10, 40 y 70 l/min.

En la TABLA 3.4.4 se presentan los resultados correspondientes a este experimento.

**TABLA 3.4.4 RESULTADOS DE AJUSTE DE MODELOS A LAS CURVAS DE DISTRIBUCIÓN DE TIEMPOS DE RESIDENCIA. COLUMNAS CON COMPOSTA-LODO Y COMPOSTA-BAGAZO (50-50%)**

Flujo de aire l/min	Experimento	Tiempo de retención medio	Coefficiente de variación	Número de dispersión axial	Número de tanques mezclados en serie	Índice $\phi$
10	Composta-lodo	251	0.45	0.110	5	0.440
	Composta-bagazo	211	0.30	0.040	11	0.310
40	Composta-lodo	160	0.45	0.110	5	0.480
	Composta-bagazo	153	0.36	0.070	8	0.490
70	Composta-lodo	138	0.37	0.096	7	0.450
	Composta-bagazo	142	0.36	0.071	8	0.250

Para los flujos de aire de 10 y 40 l/min utilizados, el medio compuesto por composta-bagazo al 50-50% presenta los menores tiempos de contacto, sin embargo para el caso del flujo de 70 l/min esta relación se invierte. A un flujo de 10 l/min, con respecto al tiempo de retención, la diferencia entre medios es del 15.6%, siendo que para un flujo de 40 l/min es del 4.3% y para uno de 70 l/min se invierte la relación siendo mayor el tiempo de retención en el medio composta-bagazo que en el de composta-lodo.

En cuanto a la dispersión de datos es posible observar una variación sistemática de un medio a otro de tal forma que el medio composta-bagazo presenta una menor dispersión del gas que el medio composta-lodo, ello independientemente del flujo de aire manejado, aunque la diferencia de los valores de dispersión se aproximan uno a otro al incrementarse el flujo de aire. Este resultado también es posible observarlo con el comportamiento del número de tanques mezclados puestos en serie.

En el caso del medio composta-bagazo, una mayor dispersión de datos conjuntamente con un tiempo de retención medio menor para los flujos de 10 y 40 l/min denotan

canalizaciones de gas dentro del medio filtrante. Cuando el flujo de aire se ve incrementado, la dispersión del gas y el tiempo de retención medio, prácticamente se igualan para ambos medios.

Aunque es posible la existencia de canalizaciones en el flujo de gas, la dispersión del gas, debido al incremento en los flujos de aire, se ve homogenizado, independientemente del medio utilizado

### 3.4.1.5 Comparación de los medios 100% composta, 75% composta-25% tezontle, 75% composta-25% lodo y 75% composta-25% bagazo, con y sin adición de agua sometidos a flujos de aire de 10, 40 y 70 l/min

En las TABLAS 3.4.5, 3.4.6, 3.4.7 y 3.4.8 se presentan los resultados de los ajustes a las curvas de distribución de tiempos de residencia correspondientes a los medios 100% composta, 75% composta-25% tezontle, 75% composta-25% lodo y 75% composta-25% bagazo, con y sin adición de agua sometidos a flujos de aire de 10, 40 y 70 l/min.

**TABLA 3.4.5 COLUMNAS CON 100% COMPOSTA CON Y SIN ADICIÓN DE AGUA SOMETIDAS A FLUJOS DE AIRE DE 10, 40 Y 70 L/MIN.**

Flujo de aire l/min	Experimento	Tiempo de retención medio	Coefficiente de variación	Número de dispersión axial	Número de tanques mezclados en serie	Índice $\phi$
10	Aire húmedo	237	0.438	0.598	9	0.463
	Aire húmedo + adición de agua	252	0.356	0.589	12	0.405
40	Aire húmedo	156	0.440	0.665	8	0.480
	Aire húmedo + adición de agua	165	0.423	0.591	8	0.470
70	Aire húmedo	153	0.435	0.689	6	0.492
	Aire húmedo + adición de agua	154	0.434	0.653	7	0.495

**TABLA 3.4.6 COLUMNAS CON 75% COMPOSTA-25% TEZONTLE CON Y SIN ADICIÓN DE AGUA SOMETIDAS A FLUJOS DE AIRE DE 10, 40 Y 70 L/MIN.**

Flujo de aire l/min	Experimento	Tiempo de retención medio	Coefficiente de variación	Número de dispersión axial	Número de tanques mezclados en serie	Índice $\phi$
10	Aire húmedo	436	0.300	0.454	7	0.419
	Aire húmedo + adición de agua	225	0.327	0.450	11	0.354
40	Aire húmedo	180	0.386	0.568	6	0.461
	Aire húmedo + adición de agua	153	0.380	0.549	10	0.398
70	Aire húmedo	159	0.405	0.602	6	0.472
	Aire húmedo + adición de agua	140	0.405	0.536	6	0.465

**TABLA 3.4.7 COLUMNAS CON 75% COMPOSTA-25% LODO CON Y SIN ADICIÓN DE AGUA SOMETIDAS A FLUJOS DE AIRE DE 10, 40 Y 70 L/MIN**

Flujo de aire l/min	Experimento	Tiempo de retención medio	Coefficiente de variación	Número de dispersión axial	Número de tanques mezclados en serie	Índice $\phi$
10	Aire húmedo	225	0.437	0.657	6	0.472
	Aire húmedo + adición de agua	221	0.350	0.598	8	0.438
40	Aire húmedo	164	0.439	0.658	7	0.448
	Aire húmedo + adición de agua	162	0.408	0.600	7	0.420
70	Aire húmedo	156	0.422	0.665	6	0.531
	Aire húmedo + adición de agua	156	0.419	0.612	6	0.458

**TABLA 3.4.8 COLUMNAS CON 75% COMPOSTA-25% BAGAZO CON Y SIN ADICIÓN DE AGUA SOMETIDAS A FLUJOS DE AIRE DE 10, 40 Y 70 L/MIN.**

Flujo de aire l/min	Experimento	Tiempo de retención medio	Coefficiente de variación	Número de dispersión axial	Número de tanques mezclados en serie	Índice $\phi$
10	Aire húmedo	266	0.338	0.456	8	0.336
	Aire húmedo + adición de agua	215	0.234	0.456	9	0.276
40	Aire húmedo	154	0.385	0.459	7	0.376
	Aire húmedo + adición de agua	172	0.313	0.458	7	0.348
70	Aire húmedo	141	0.427	0.665	5	0.382
	Aire húmedo + adición de agua	155	0.415	0.504	5	0.359

De las TABLAS anteriores es posible visualizar que el hecho de agregar agua al medio filtrante produce que la dispersión del gas dentro de la columna sea menor comparada con la dispersión del gas en un medio donde no se ha adicionado agua y conforme se incrementa el flujo de gas dentro de la columna se obtiene una dispersión mayor.

Los cambios más intensos con referencia a lo dicho anteriormente se observa en el menor flujo manejado (10 l/min). Estas afirmaciones se sustentan en los cambios acaecidos en el coeficiente de variación, en el modelo de dispersión axial y en el índice  $\phi$  de las TABLAS 3.4.5, 3.4.6, 3.4.7 y 3.4.8.

El hecho de que al agregar agua al medio filtrante produzca que la dispersión del gas dentro de la columna sea menor comparada con la dispersión del gas en un medio donde se ha adicionado agua se explica con base en los experimentos 3.4.1, 3.4.2 y 3.4.3 con relación a que el medio filtrante con una granulometría pequeña favorece más el mezclado que en uno con una granulometría mayor. El hecho de agregar agua al medio permite que las partículas del medio filtrante se aglutinen en partículas de mayor tamaño reduciendo así la granulometría del medio filtrante.

Los tiempos de retención medio en los experimentos disminuyen al incrementarse el flujo de gas dentro de las columnas y de un medio filtrante a otro permanecen prácticamente

iguales. Es posible pensar, el efecto de la humedad en el medio filtrante está orientado básicamente a fenómenos de dispersión y no tanto a la retención del gas en la columna

El medio constituido por 100% composta produce la mayor dispersión del gas en la columna, seguido del medio composta-lodo, del medio composta-tezontle y del medio composta-bagazo.

Independientemente del medio filtrante utilizado, al incrementar el flujo de aire a través de la columna se incrementa la dispersión del gas.

El efecto de la adición de agua al medio filtrante produce la disminución de la dispersión del gas en el medio.



## CADITULO IV

### 4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Los resultados obtenidos nos proporcionan una visión global del comportamiento del medio filtrante y los efectos que tienen los agentes abultantes sobre este, cuando son sometidos a diferentes condiciones de operación. Con los experimentos realizados se tiene la información suficiente para determinar que composición de medio filtrante es el adecuado para ser utilizado en la siguiente etapa de la investigación, la cual consiste en diseñar un sistema piloto de biofiltro para tratar  $H_2S$ .

Con la información obtenida queda concluido el estudio: "evaluación fisicoquímica de cuatro medios filtrantes para sistemas de tratamiento biológico de gases basados en biofiltración".

Con Lo resultados que se han obtenido se puede establecer un medio filtrante adecuado para su uso. Recomendándose un medio filtrante basado en composta al 100% (de acuerdo a los resultados de este trabajo) como la mejor opción de las cuatro composiciones estudiadas.

Se Recomienda el uso de la composta al 100% por que presenta las mejores características de retención de humedad, en un intervalo de temperatura de aire comprendido entre 5 y 35 °C. Que es el rango de temperatura con la que trabajaran los biofiltros en la siguiente etapa de la investigación. El combinar composta con un agente abultante celulósico (bagazo de caña) o poroso (tezontle) produce un medio filtrante con bajas características para la retención del agua en el medio filtrante.

La composta al 100% es el medio filtrante que menor caída de presión presenta, a las diferentes condiciones de operación, comparado con los medios filtrantes basados en

agentes abultantes como el tezontle y el bagazo de caña, que incrementan la caída de presión.

El estudio de trazado nos proporciona una visión del comportamiento del gas dentro de las columnas de biofiltración, nos indica que composición de medio filtrante tiene una mayor interacción con el gas suministrado. El medio constituido por 100% composta produce la mayor dispersión del gas en la columna, seguido del medio composta-lodo, del medio composta-tezontle y del medio composta-bagazo.

Se deben de tomar en cuenta las siguientes consideraciones para mantener en buen estado a la cama de filtración cuando esté en operación:

La adición directa de agua al medio filtrante en la parte superior de la columna afecta significativamente la humedad del medio pero únicamente en la parte superior de la columna.

Agregar agua al sistema produce la cohesión de partículas finas lo que se refleja en el incremento del tamaño efectivo de partícula así como en la distribución del coeficiente de uniformidad, lo que ocasiona caídas de presión altas y una mala distribución del gas dentro de la columna, lo que lleva a tener altos costos y un deficiente tratamiento del gas.

Se debe de trabajar a temperaturas del gas no mayores a 35 °C, debido a que altas temperaturas del aire influente incrementa la velocidad de secado del medio, ocasionando desmoronamiento, mayor compactación, produce canalizaciones, lo que lleva a tener menor dispersión del gas dentro de la columna y afecta el crecimiento de los microorganismos teniendo bajas tazas de tratamiento.

Trabajar con altos flujos de gas produce canalizaciones dentro del medio filtrante, que ofrecen poca resistencia al flujo de gas, ocasionando bajas caídas de presión y una mala dispersión del gas dentro del medio, Por otro lado trabajar con bajos flujos de gas ocasiona

altas caídas de presión y una mejor distribución de gas, por lo que se deberá trabajar con flujos moderados que no nos lleven a estos extremos

Una columna empacada con un medio filtrante partículas finas produce que el gas que fluye a través de este medios tienda a poseer un comportamiento fluidodinámico de tipo disperso, El fenómeno inverso se presenta cuando el medio filtrante posee un tamaño de partícula mayor haciendo que el gas tienda a un comportamiento de fluidodinámico tipo pistón.

Se debe tener en cuenta las siguientes recomendaciones:

Un biofiltro es un sistema de tratamiento de gases que opera en continuo, los estudios realizados se efectuaron solo para 7 días de operación, por lo que se debe de tener en cuenta todos los factores que afectan la operación de un biofiltro como son el adicionar o no agua al sistema para mantener la humedad recomendada para el metabolismo de los microorganismos responsables de la degradación de compuestos indeseables del gas, evitar la compactación de la cama de filtración y mantener caídas de presión bajas, debido a que este es el factor económico que hace que un biofiltro sea o no rentable.

Los resultados obtenidos por los estudios de trazado sobre las columnas de biofiltración pueden ser tomados como una evaluación global del fenómeno hidráulico suficiente como para permitir una primera interpretación de los efectos positivos y/o negativos de los patrones de flujo sobre el sistema.

Se debe tomar en cuenta que la información proporcionada por una curva de distribución de tiempo de residencia depende del tipo del trazador utilizado (gas butano en este caso), el comportamiento de éste no es del todo igual a las del fluido que se hará pasar por el biofiltro, por lo que la exactitud con la cual se ve representado el comportamiento hidráulico del sistema a través de la curva del trazador no es del todo bueno. Se recomienda realizar esfuerzos para el desarrollo de modelos que traten de representar con mayor exactitud y precisión el comportamiento hidráulico de los biofiltros esto demanda tiempo y conocimiento especializado

Es necesario realizar estudios posteriores que determinen la existencia y el tipo de microorganismos presentes en el medio filtrante con el propósito de determinar su aplicabilidad en el tratamiento de gases.

## **AGRADECIMIENTO**

**Extiendo un agradecimiento al CONACYT (Proyecto 27776-B) por el apoyo económico  
brindado para la realización de esta tesis**

---

**REFERENCIAS**

- 1.- Allen E. R. and Phatak S. (1993)  
"Control of organosulfur compound emissions using biofiltration. Methyl mercaptan"  
Proceedings of the 86<sup>th</sup> Air and Waste Management Association Annual Meeting and  
Exhibition, Denver, Colorado, June 13-18
  
- 2.- Allen E. R. and Yang Y. (1991)  
"Biofiltration control of hydrogen sulfide emissions"  
Proc. Air and Waste Mgmt. Assn. 84<sup>th</sup> Annual Meeting and Exhibition.
  
- 3.- Apel W. A., Barnes J. M. and Barret K. B. (1995)  
"Biofiltration of nitrogen oxides from fuel combustion gas streams"  
Proceeding of Air and Waste Management Association, 88<sup>th</sup> Annual Meeting and  
Exhibition
  
- 4.- Baltzis B. C., Wojdyla S. M. and Zarook S. M. (1997)  
"Modeling biofiltration of VOC mixtures under steady-state conditions"  
Journal of Environmental Engineering, Vol. 123, No. 6, June, ASCE
  
- 5.- Bardke D., Fisher K. and Sabo F. (1987)  
"Air purification with biofilters, field of application and design criteria"  
Proceedings of the 80<sup>th</sup> Annual Meeting of APCA, New York, June 6-21
  
- 6.- Bohn Hinrich and Bohn Robert (1988)  
"Soil beds weed out air pollutants"  
Chemical Engineering, Vol. 32, No. 5, April 25, pp. 185-196

- 7.- Bohn H. (1992)  
"Consider biofiltration for decontaminating gases"  
Chemical Engineering Progress, April, pp. 34-40
- 8.- Burschter D. N. , Paff S. W. and King A. B. (1993)  
"Biofiltration room temperature incineration"  
Proceeding of Air and Waste Management Association, 86<sup>th</sup> Annual Meeting and Exhibition
- 9.- Cho, K. S., Hirai M. and Soda M. (1992)  
"Removal of Dimethyl Disulfide by the peat seeded with night soil sludge"  
J. Ferment Bioeng., Vol. 71 pp. 289-291
- 10.- Chris Van Lith (1989)  
"Design criteria for biofilter"  
In: 82<sup>th</sup> Annual Meeting Exhibition. Anaheim, California
- 11.- Cho, K. S., Hirai M. and Soda M. (1992)  
"Degradation of hydrogen sulfide by Xanthomonas sp. Strain DY44, isolated from peat"  
Applied and Environmental Microbiology, Vol. 58, No.4, April, pp. 1183-1189
- 12.- Chou M.S. and Huang J. J. (1997)  
"Treatment of Methyl ethyl ketone in air stream by biotrickling filter"  
Journal Of Environmental Engineering, Vol. 123, No. 6, June ASCE
- 13.- Corsi R. L. and Seed I. P. (1994)  
"Biofiltration of BTEX contaminated gas stream: Laboratory studies"  
Proceedings of air Waste Management Association, 87<sup>th</sup> Annual Meeting and Exhibition

- 14.- Deviny J. S., Medina V. F. and Hodge D. S. (1993)  
"Biofiltration for treatment of gasoline vapors"  
Proc. Insitu and Onsite Bioreclamation, 2<sup>th</sup> Int. Symp.
- 15.- Deshusses, M.A. and Cox, H.H.J (1998)  
"The use of CAT Scanning to characterize bioreactors for waste air treatment"  
Air and Waste management Association. 91<sup>st</sup> Annual Meeting and Exhibition, San Diego California, June 14-18, paper 98-TA20B.04
- 16.- Ergas S. J., Shroeder E. D., Chang D. P. and Mortan R. L. (1995)  
"Control of volatile organic compound emissions using a compost biofilter"  
Water Environmental Research, Vol. 67, No.5, pp. 816-821
- 17.- Govind R., Utgikar V., Zhao W., Shan Y., Parvatiyar M. and Bishop D. F. (1993)  
"Development of novel biofilters for treatment of volatile organic compounds (VOC's)"  
Colorado Springs, C. O., November 29-December 3
- 18.- Hodge D. S., Medina D. F., Islander R. and Deviny S. S. (1991)  
"Biofiltration of hydrocarbon fuel vapors in biofilters"  
Environmental Technology. Vol. 12, pp. 655-662
- 19.- Holt T. and Lackey L. (1995)  
"Control of gas contaminants in air streams through biofiltration"  
50<sup>th</sup> Purdue Industrial Waste Conference Proceedings, pp. 593-599
- 20.- Kennes Christian and Frederic Thalasso (1988)  
"Waste gas biotreatment technology"  
J. Chem. Technol. Biotechnol. Vol. 72, pp. 303-319



- 21.- Janssen A. J. H., Sleyster R., Van der Kaa C., Jochemsen A., Buntsema J. and Lettinga G. (1995)  
"Biological sulphide oxidation in a fed batch reactor"  
Biotechnology and Bioengineering. Vol. 47, pp. 327-333
- 22.- Kok H. J. G. (1992)  
"Bioscrubbing of air contaminated with high concentrations of hydrocarbons"  
In: Dragt A. J. and Ham J. Van, Eds. Biotechniques for air pollution abatement and odour control polices, Proceedings of an International Symposium Maastrich, The Netherlands, 27-29 October, pp. 77-82
- 23.- Lang M. E. and Jager R. A. (1992)  
"Odor control for municipal sludge composting"  
BioCycle, August, pp. 76-85
- 24.- Leson G. and Smith B. J. (1997)  
"Petroleum environmental research forum field study on biofilters from control of volatile hydrocarbons"  
Journal of Environmental Engineering, ASCE, June, pp. 556-562
- 25.- Leson G., Rickun J. and Henson M. (1991)  
"Biofiltration. An innovative control technology for odors and air toxics"  
Environmental Conference TAPPI Proceeding, pp. 349-354
- 26.- Leson G. and Winer A. (1991)  
"Biofiltration: An Innovative air pollution control technology for VOC emissions"  
Journal of Air Waste Management Association, Vol. 41, No. 8, pp. 1045-1054

- 27.- Medina V. F., Webster T. Ramaratnam M., Hodge D. S. and Deviny J. S.. (1992)  
"Treatment of soil vapor extraction off gases by GAC based on biological filtration"  
Proc. Am. Chemical Soc., Div, of Industrial and Eng. Chem., Espec Symp. for  
ememrging technologies for hazardous waste treatment.
- 28.- Metcalf and Eddy, Inc. (1998)  
"Wastewater Engineering: treatment, disposal and reuse"  
Third edition  
McGraw Hill
- 29.- Morgenroth E. E., Schoeder D., Chang D. P. Y. and Scow K. M. (1995)  
"Nutrient limitation in a compost biofilter degrading Hexane"  
Proceeding of air and Waste Management Association, 88<sup>th</sup> Annual Meeting and  
Exhibition
- 30.- Mueller J. C. (1988)  
"Biofiltration of gases, a manure technology for control of a wide range of air  
pollutants"  
British Columbia Res. Corp. Vancouver B. C. Canada, pp. 1-22
- 31.- Ottengraf S. P. P. and Van Den Oever A. H. C. (1983)  
"Kinetics of organic compound removal from waste gases with a biological filter"  
Biotechnol. and Bioengrg. Vol. 25, pp. 3089-3102
- 32.- Ottengraf S. P. P. (1987)  
"Biological systems for waste gas elimination"  
Tibtech, Vol. 5, pp. 132-136

- 33.- Pomeroy Richard D. (1982)  
"Biological treatment of odorous air"  
Journal WPFC, Vol. 52, pp. 1541-1544
- 34.- Revah S. y Noyola A (1996)  
"El mercado de la biotecnología ambiental en México y las oportunidades de vinculación Universidad-Industria"  
Galindo E, Ed. Fronteras de la biotecnología y Bioingeniería, SMBB, pp. 121-133
- 35.- Sabo F., Motz U. and Fisher K. (1993)  
"Development and testing of high efficiency biofilters"  
Bioprocess Engrg. Vol. 1, pp. 61-69
- 36.- Severin B. F., Shi J. and Hayes T. (1993)  
"Destruction of gas industry VOC's in a biofilters"  
Proc., IGT 6<sup>th</sup> Int. Symp. on Gas. Oil and Envir. Technol.
- 37.- Sorial G. A., Smith F. L., Suidan M. T., Pandit A., Biswas P. and Brenner R. (1997)  
"Evaluation of trickle bed biofilter performance for BTEX removal"  
Journal of Environmental Engineering, ASCE, June, pp. 530-537
- 38.- Utkin J. B., Yakimov M. M., Kozlyak E. I. And Rogozhin J. S. (1992)  
"Biological air purification"  
BioCycle, October, pp. 613-620
- 39.- Van Ligenhove H., Wuyts and Schamp N. (1986)  
"Elimination of hydrogen sulphide from odorous air by a woob bark biofilter"  
Wat. Res. Vol. 20, No. 12, p. p. 1476-14

- 
- 40.- Van Groenestijn J. W. and Hesselink P. G. M. (1993)  
"Biotechniques for air pollution control"  
Biodegradation. Vol 4, pp. 283-301
- 41.- Warren J. Swanson and Raymond C. Loehr (1997)  
"Biofiltration: fundamental, design and operations. Principles, and applications"  
Journal of Environmental Engineering. p. p. 538-545
- 42.- Webster T. S., Devanny J. S., Torres E. M. and Barrai S. S. (1996)  
"Biofiltration of control, toxics and volatile organic compounds from publicly owned treatment works"  
Environmental progress, Vol. 15, No. 3, pp. 141-147
- 43.- Williams T. O. and Miller F. (1992)  
"Odor control using biofilters: Part I"  
BioCycle, October, pp. 235-241

**ANEXO I**  
**RESULTADOS DE ANÁLISIS DE VARIANCIA**

El análisis de resultados se llevó a cabo por medio de un diseño factorial de experimentos  $2^3$  (análisis de variancia) con el objeto de cuantificar la significancia de la influencia de la composición del medio, del flujo de aire y de la adición de agua al medio filtrante sobre la distribución de la humedad en el medio filtrante, su densidad real y aparente, el tamaño efectivo de partícula y la compactación del medio filtrante.

En este Anexo se listan los resultados del análisis de variancia (Tablas AI-1 a la AI-9) comparando los resultados de los experimentos con composta vs. composta-tezontle, composta vs. composta-lodo, composta vs. composta-bagazo. Este análisis se relaciona con experimentos factoriales  $2^3$ , es decir tres factores representados por las letras A, B y C con dos réplicas cada uno. En este caso los factores corresponden a la variación de flujo de aire (A), a la adición de agua al medio filtrante (B) y a la composición del medio (C).

En las Tablas se hace comparación de las pruebas  $F_0$  con la distribución  $F_1$  con una significancia del 99% de tal forma que aquellos datos que sean mayores a 1 (resultados en negritas) indican que el factor correspondiente posee una influencia significativa sobre el parámetro evaluado. Las Tablas están en función de la altura de la columna.

**TABLA A1.1 RELACIÓN DE DISTRIBUCIÓN F CON UNA SIGNIFICANCIA DEL 99% PARA EXPERIMENTOS CON COMPOSTA VS. COMPOSTA + TEZONTLE (75, 25%) CON FLUJOS DE AIRE DE 10 Y 40 L/MIN**

A: Flujo de aire, l/min

B: Adición de agua al medio filtrante (hay o no hay)

C: Composición del medio filtrante (de 75% a 100% composta)

HUMEDAD			F0/F1%				
Altura	A	B	C	AB	AC	BC	ABC
0-20 cm.	0.10035738	0.08403371	1.22856811	0.00128124	0.03242434	0.01086131	0.00584294
20-40 cm.	0.00090734	0.00011824	1.06507437	0.01336653	0.0236729	0.04520058	0.00933457
40-60 cm.	1.23E-05	0.02733431	2.69225887	0.00114016	0.00862244	0.00354057	0.01515931
60-80 cm.	8.23E-06	0.47846789	3.86088685	0.01753603	0.07610432	0.04960395	0.03776498
80-100 cm.	0.02383587	2.337618	6.79047807	0.20281553	0.09010016	0.32775597	0.03550598
DENSIDAD REAL			F0/F1%				
Altura	A	B	C	AB	AC	BC	ABC
0-20 cm.	1.13425127	0.30770719	0.13933353	0.33556943	0.12827436	0.06271237	1.3753295
20-40 cm.	0.0022318	0.35235891	0.35235891	0.45266422	0.01228035	0.68712517	0.74993197
40-60 cm.	0.05607201	0.01874133	0.36666308	0.00565383	0.0011112	0.81045663	0.00765453
60-80 cm.	0.00135449	0.06942916	0.09628302	0.14268953	0.02577148	1.76960588	0.08968200
80-100 cm.	0.05291477	0.27493547	0.81067784	0.07264966	0.01134174	1.25597371	0.05783305
DENSIDAD APARENTE			F0/F1%				
Altura	A	B	C	AB	AC	BC	ABC
0-20 cm.	0.01887157	0.00035964	0.12585947	0.82719793	1.63878781	0.53250741	0.51200687
20-40 cm.	0.00071647	0.07705054	0.5770136	0.21269642	0.01846484	0.00054522	0.10077169
40-60 cm.	1.60E-05	0.17955989	1.61830075	0.04284132	0.00810725	0.00124956	0.01527964
60-80 cm.	0.03627887	0.07472501	2.52540948	0.42973251	0.00272899	0.19393178	0.05355434
80-100 cm.	0.05005687	0.01290834	1.65500541	0.25341293	0.01155564	0.15398463	0.02502309
POROSIDAD			F0/F1%				
Altura	A	B	C	AB	AC	BC	ABC
0-20 cm.	0.60925046	0.12937823	0.00556155	0.05918557	0.32516465	0.45753276	0.10088836
20-40 cm.	0.15504224	0.7067124	0.2521449	0.00623916	0.09907742	1.02234436	0.0299919
40-60 cm.	0.07002925	0.33044276	1.83E-01	0.05788019	0.00354881	1.13929028	0.00666701
60-80 cm.	0.00114125	0.56221678	0.19996527	0.07885779	0.00081247	1.36761808	0.02541179
80-100 cm.	0.04105769	0.45667246	0.04041784	0.10016532	0.01213601	0.66465395	0.06675464
TAMAÑO EFECTIVO			F0/F1%				
Altura	A	B	C	AB	AC	BC	ABC
0-20 cm.	0.05167426	0.15037387	0.17183031	0.01144343	0.04577374	0.52139145	0.15037387
20-40 cm.	0.00099849	0.04892603	0.00024962	0.01678462	0.00255614	0.10799672	0.04218622
40-60 cm.	0.04953479	0.05727228	0.00742249	0.05278213	0.05727228	0.15216672	0.05388749
60-80 cm.	0.01695421	0.47367988	0.02214427	0.02059079	0.02458043	0.05593265	0.02059079
80-100 cm.	0.00432503	0.49308537	0.03976691	0.00016202	0.00378497	0.00328091	0.01843428

**TABLA A1.2 RELACIÓN DE DISTRIBUCIÓN F CON UNA SIGNIFICANCIA DEL 99% PARA EXPERIMENTOS CON COMPOSTA VS. COMPOSTA + TEZONTLE (75, 25%) CON FLUJO DE AIRE DE 40 Y 70 L/MIN.**

A: Flujo de aire, l/min

B: Adición de agua al medio filtrante (hay o no hay)

C: Composición del medio filtrante (de 75% a 100% composta)

HUMEDAD			F0/F1%				
Altura	A	B	C	AB	AC	BC	ABC
0-20 cm.	0.33886635	0.03863432	0.57407492	0.0101187	0.10756646	0.00065317	7.18E-05
20-40 cm.	0.19021011	0.00030308	0.61126657	0.01727702	9.72E-05	0.05132248	0.00272771
40-60 cm.	0.53265302	0.02425862	1.94255746	0.00197919	0.00115877	0.02902867	0.10551057
60-80 cm.	0.07011771	0.68786431	1.36107637	0.11545558	0.02665249	0.07963655	0.00118847
80-100 cm.	0.10107425	2.05461682	1.85598591	0.10656211	0.03373493	0.05777985	0.0006471
DENSIDAD REAL			F0/F1%				
Altura	A	B	C	AB	AC	BC	ABC
0-20 cm.	0.07987375	0.2929928	0.00727009	0.00112434	0.00602185	0.41078284	0.03006888
20-40 cm.	0.29253577	0.32701516	0.17798944	0.0063345	0.00354431	0.09235756	0.08113503
40-60 cm.	0.5601603	1.05567498	0.34109481	0.54820418	0.07875205	0.21953034	0.39877447
60-80 cm.	0.15608506	0.41902158	0.21703972	0.59642812	0.07256185	0.85882598	0.73261521
80-100 cm.	0.03607867	0.07737582	0.14110079	0.01093893	0.09625752	0.28837212	0.1522911
DENSIDAD APARENTE			F0/F1%				
Altura	A	B	C	AB	AC	BC	ABC
0-20 cm.	0.12168456	0.20856542	0.00109145	0.11185833	0.00761376	0.85641717	0.22429399
20-40 cm.	0.05041797	0.0376288	0.39255557	0.01046681	0.00471314	1.54727986	0.64825325
40-60 cm.	0.10805059	0.18994193	0.18060962	0.03215435	0.52982375	0.27057598	0.13332541
60-80 cm.	0.04145508	0.4449506	0.31553965	0.03823564	0.74903174	0.00202009	0.35525621
80-100 cm.	0.14605755	0.04827218	0.04827218	0.00040324	0.22040999	0.25133424	0.1538231
POROSIDAD			F0/F1%				
Altura	A	B	C	AB	AC	BC	ABC
0-20 cm.	0.0168582	0.00921239	0.1679128	0.0034572	0.06212495	0.27716074	0.00244298
20-40 cm.	0.07019622	0.36678677	0.07092251	0.05815718	0.00879538	0.95547273	0.03236816
40-60 cm.	0.14193804	3.55860337	8.62E-05	0.43119383	0.30089375	1.73000585	0.1830297
60-80 cm.	0.15966588	8.49865754	0.0131958	0.59126031	0.76564848	2.56696778	1.35773502
80-100 cm.	0.09519682	3.16463355	0.00375499	0.07158486	0.10289245	2.47581555	0.17130897
TAMANO EFECTIVO			F0/F1%				
Altura	A	B	C	AB	AC	BC	ABC
0-20 cm.	0.00770785	0.04417235	0.05606414	0.03369794	0.06937061	0.70230579	0.00204552
20-40 cm.	0.00073915	0.00110416	0.01460042	0.00295658	0.0237348	0.16141672	0.01182634
40-60 cm.	0.00016662	0.14711584	0.00285975	0.00048968	0.09257648	0.04896607	0.00664827
60-80 cm.	0.00876302	0.30743174	0.02103824	0.00800958	0.02286682	0.00729	0.1440867
80-100 cm.	0.00232452	0.10347254	0.01921362	0.00025027	0.03268858	0.07727274	0.07727274



**TABLA A1.3 RELACION DE DISTRIBUCION F CON UNA SIGNIFICANCIA DEL 99% PARA EXPERIMENTOS CON COMPOSTA VS. COMPOSTA + TEZONTLE CON FLUJOS DE AIRE DE 10 Y 70 L/MIN.**

A: Flujo de aire, l/min

B: Adición de agua al medio filtrante (hay o no hay)

C: Composición del medio filtrante (de 75% a 100% composta)

HUMEDAD			F0/F1%				
Altura	A	B	C	AB	AC	BC	ABC
0-20 cm.	1.54779716	0.09688196	1.59863682	0.03464178	0.49477149	0.02190575	0.01584562
20-40 cm.	0.22058125	0.01520594	0.87088128	0.00076103	0.02268445	0.0199829	0.00124994
40-60 cm.	0.49157694	0.031097	1.98433698	0.00023237	0.00181184	0.06898025	0.04458952
60-80 cm.	0.06696347	0.53377911	1.67589341	0.16600815	3.04E-08	0.02816466	0.02112738
80-100 cm.	0.19768407	1.57343006	273001003	0.36868049	0.00079616	0.12897249	0.00967012
DENSIDAD REAL			F0/F1%				
Altura	A	B	C	AB	AC	BC	ABC
0-20 cm.	0.73934018	0.06703241	0.07780618	0.07394407	0.01180927	0.00235965	0.6444226
20-40 cm.	0.27357561	0.04365323	0.11403328	0.06083172	0.01163224	0.01716413	0.45681095
40-60 cm.	0.1446258	0.67669449	0.22935183	0.5600979	0.04380088	0.27206096	0.44408301
60-80 cm.	0.23102828	1.34705137	0.47684163	0.14707545	0.22930996	0.43406992	0.33853165
80-100 cm.	0.00156414	0.30177813	0.1300059	0.0088394	0.07996738	0.19709353	0.07255676
DENSIDAD APARENTE			F0/F1%				
Altura	A	B	C	AB	AC	BC	ABC
0-20 cm.	0.00111391	0.0142628	0.31533625	0.48869895	0.25548333	0.52972341	0.5177921
20-40 cm.	0.05397568	0.1333141	0.74868977	0.23132181	0.02570242	1.26821762	2.14027145
40-60 cm.	0.13789434	0.06822422	0.32776155	0.00063381	0.8293413	0.19904276	0.29403007
60-80 cm.	0.12533334	0.00213321	0.34714441	0.14836461	0.74109857	0.02895291	0.92673544
80-100 cm.	0.12533334	0.00213321	0.34714441	0.14836461	0.74109857	0.02895291	0.92673544
POROSIDAD			F0/F1%				
Altura	A	B	C	AB	AC	BC	ABC
0-20 cm.	0.87933557	0.11347067	0.07828878	0.09424435	0.16704901	0.5805798	0.08968007
20-40 cm.	0.259041	0.18682148	0.20347218	0.01866627	0.02528375	0.8188922	0.00142135
40-60 cm.	0.00020873	0.7990725	3.40E-03	0.35687898	0.13957787	0.48536907	0.03158955
60-80 cm.	0.06259669	1.55026636	0.00092266	0.52144602	0.19032351	0.46100075	0.19860593
80-100 cm.	0.2995769	0.72034153	0.04321153	0.07237159	0.17251019	0.7495744	0.05432713
TAMANO EFECTIVO			F0/F1%				
Altura	A	B	C	AB	AC	BC	ABC
0-20 cm.	0.07794065	0.01687785	0.00477531	0.01045983	0.0093596	0.30257111	0.07488446
20-40 cm.	0.00350487	0.02625252	0.03044671	0.03379624	0.01189325	0.04489337	0.00816508
40-60 cm.	0.02147925	0.04151462	0.04991274	0.03865242	0.01188642	0.00140874	0.00646869
60-80 cm.	0.03176863	0.16520737	0.05965878	0.00039221	0.00074795	0.03244454	0.06058371
80-100 cm.	0.0024782	0.06606142	0.05746033	0.00211543	0.00221615	0.00164696	0.00164696

**TABLA A1.4 RELACIÓN DE DISTRIBUCIÓN F CON UNA SIGNIFICANCIA DEL 99% PARA EXPERIMENTOS CON COMPOSTA VS. COMPOSTA + LODO (75, 25%) CON FLUJOS DE AIRE DE 10 Y 40 L/MIN.**

A: Flujo de aire, l/min

B: Adición de agua al medio filtrante (hay o no hay)

C: Composición del medio filtrante (de 75% a 100% composta)

HUMEDAD			F0/F1%				
Altura	A	B	C	AB	AC	BC	ABC
0-20 cm.	0.6058	0.2631	0.6566	0.011	0.7276	0.0164	0.1341
20-40 cm.	0.1188	0.0809	0.1488	0.04771	0.1897	0.0943	0.052
40-60 cm.	5.57E-01	0.2288	0.3371	0.0265	0.219	0.3834	0.233
60-80 cm.	1.34E-01	1.3795	0.00041	0.299	0.01114	0.0194	0.0049
80-100 cm.	0.1282	1.8955	0.0393	0.05948	0.0067	0	0

DENSIDAD REAL			F0/F1%				
Altura	A	B	C	AB	AC	BC	ABC
0-20 cm.	0.503	0.0125	3.46	2.728	3.057	0.7961	1.1666
20-40 cm.	0.4168	0.0253	0.9075	2.678	0.2704	0.1248	0.90908
40-60 cm.	0.1425	0.0131	0.6645	0.5345	0.0623	0.0421	0.5989
60-80 cm.	0.3257	0.01735	0.9162	0.201	0.3801	0.2392	0.5565
80-100 cm.	0.0056	0.0377	0.1454	0.0628	0.2077	0.1016	0.0019

DENSIDAD APARENTE			F0/F1%				
Altura	A	B	C	AB	AC	BC	ABC
0-20 cm.	0.082	2.0517	6.161	11.3652	6.976	26.361	7.9944
20-40 cm.	0.0729	0.1642	0.2096	0.0605	1.97E-05	0.1525	0.2967
40-60 cm.	9.57E-01	0.4491	0.0368	0.0482	0.9561	0.907	0.3241
60-80 cm.	0.052	0.2191	2.57E-05	0.0518	0.8699	0.4057	0.0353
80-100 cm.	1.811	0.1002	0.0275	1.3325	0.1392	1.6543	1.4926

POROSIDAD			F0/F1%				
Altura	A	B	C	AB	AC	BC	ABC
0-20 cm.	0.0263	0.008	0.0046	0.1933	0.0042	0.0637	0.1291
20-40 cm.	0.0952	0.084	1.2748	0.5101	0.04044	0.2508	0.1911
40-60 cm.	0.0651	0.042	1.36E-01	0.0591	0.0973	0.6209	0.003
60-80 cm.	0.0109	0.0243	0.9424	0.0192	0.012	0.3297	0.000319
80-100 cm.	0.0065	0.1213	0.3193	0.0639	0.053	0.2372	0.038

TAMAÑO EFECTIVO			F0/F1%				
Altura	A	B	C	AB	AC	BC	ABC
0-20 cm.	0.0015	0.0138	0.0074	0.0593	0.000555	0.0756	0.0074
20-40 cm.	0.0462	0.1066	0.0609	0.1119	0.0124	0.0365	0.0076
40-60 cm.	0.0044	0.4579	0.3176	0.0034	0.8976	0.0811	0.0675
60-80 cm.	0.0023	2.959	0.0132	0.1849	0.0314	0.0935	0
80-100 cm.	0.0304	1.1835	0.0716	0.00054	0.0284	0.0021	0.021

**TABLA A1.5 RELACIÓN DE DISTRIBUCIÓN F CON UNA SIGNIFICANCIA DEL 99% PARA EXPERIMENTOS CON COMPOSTA VS. COMPOSTA + LODO (75, 25%) CON FLUJOS DE AIRE DE 40 Y 70 L/MIN.**

A: Flujo de aire, l/min

B: Adición de agua al medio filtrante (hay o no hay)

C: Composición del medio filtrante (de 75% a 100% composta)

HUMEDAD			F0/F1%				
Altura	A	B	C	AB	AC	BC	ABC
0-20 cm.	1.3434	0.3219	0.4251	0.4193	0.2368	0.01	1.02E-02
20-40 cm.	0.1906	0.1182	0.0719	0.0071	7.00E-04	0.7942	4.10E-05
40-60 cm.	0.0863	0.6717	0.0334	3.18E-05	0.0017	0.921	8.50E-05
60-80 cm.	0.0248	2.2541	0.0381	0.1628	0.3413	0.6622	0.1038
80-100 cm.	0.02304	3.9649	0.0745	0.107	0.0027	0.0018	0.1042

DENSIDAD REAL			F0/F1%				
Altura	A	B	C	AB	AC	BC	ABC
0-20 cm.	0.2959	1.2615	1.751	0.0676	0.6862	2.1026	0.0998
20-40 cm.	0.4044	0.0045	0.2444	0.0071	0.4527	0.0161	0.0416
40-60 cm.	0.03	0.0431	0.3985	0.4581	0.1969	0.103	0.000271
60-80 cm.	0.1512	0.000761	0.3109	0.2365	0.2018	5.98E-05	0.1194
80-100 cm.	0.03607	0.07737	0.1411	0.01093	0.09625	0.2883	0.1522

DENSIDAD APARENTE			F0/F1%				
Altura	A	B	C	AB	AC	BC	ABC
0-20 cm.	0.1037	0.0033	0.3527	0.0723	0.0099	4.711	1.068
20-40 cm.	0.0066	0.0899	0.00058	0.3679	0.0642	1.6029	0.0385
40-60 cm.	0.1336	0.2338	0.0137	0.1992	0.6549	0.3333	0.0252
60-80 cm.	0.1842	0.6144	0.1159	0.373	0.4789	0.0013	0.0406
80-100 cm.	0.071	0.2625	0.1069	0.004	0.1213	0.006	0.0307

POROSIDAD			F0/F1%				
Altura	A	B	C	AB	AC	BC	ABC
0-20 cm.	1.49E-01	0.841	0.001	0.00055	0.03839	2.4942	0.036
20-40 cm.	0.104	0.2218	0.1245	0.2712	0.0235	0.9304	0.00145
40-60 cm.	0.00548	0.7891	4.41E-01	0.1846	0.0445	0.1821	0.1897
60-80 cm.	0.0722	0.4982	0.2702	0.1689	0.116	0.006	0.2639
80-100 cm.	0.0853	0.5196	0.053	0.0833	0.1006	0.0023	0.2919

TAMANO EFECTIVO			F0/F1%				
Altura	A	B	C	AB	AC	BC	ABC
0-20 cm.	0.0341	0.2322	0.0169	0.0412	0.046	0.0544	0.002
20-40 cm.	0.00263	0.1847	0.0479	0.1105	6.57E-05	0.0042	0.0673
40-60 cm.	0.00553	0.7443	0.458	0.0345	0.5097	0.1274	0.4381
60-80 cm.	0.0027	0.8257	0.1029	0.0889	0.00072	0.0698	0.1198
80-100 cm.	0.0143	0.5253	0.1891	0.0588	0.0035	0.042	0.084

**TABLA A1.6 RELACIÓN DE DISTRIBUCIÓN F CON UNA SIGNIFICANCIA DEL 99% PARA EXPERIMENTOS CON COMPOSTA VS. COMPOSTA + LODO (75, 25%) CON FLUJOS DE AIRE DE 10 Y 70 L/MIN.**

A: Flujo de aire, l/min

B: Adición de agua al medio filtrante (hay o no hay)

C: Composición del medio filtrante (de 75% a 100% composta)

HUMEDAD			F0/F1%				
Altura	A	B	C	AB	AC	BC	ABC
0-20 cm.	2.9908	0.0361	0.04	0.0699	0.0124	0.0568	0.0007
20-40 cm.	0.267	0.0977	0.039	0.0615	0.0606	0.1121	0.0663
40-60 cm.	0.8393	0.2382	0.1739	0.0292	0.0923	0.3965	0.2425
60-80 cm.	0.2941	1.4234	0.0407	0.3294	6.00E-03	0.0296	0.0107
80-100 cm.	0.2793	1.6031	0.1458	0.5611	0.00058	0.006	0.0351

DENSIDAD REAL			F0/F1%				
Altura	A	B	C	AB	AC	BC	ABC
0-20 cm.	0.9541	0.0042	0.1245	0.6675	0.3406	0.314	0.8362
20-40 cm.	0.1746	0.0784	1.3723	2.2667	0.5495	0.2477	1.146
40-60 cm.	0.0884	0.048	0.5726	0.5834	0.066	0.004	0.3207
60-80 cm.	0.1674	0.1278	0.841	0.3999	0.3861	0.0329	0.1658
80-100 cm.	0.0121	0.0108	0.167	0.1088	0.2317	0.0509	0.0163

DENSIDAD APARENTE			F0/F1%				
Altura	A	B	C	AB	AC	BC	ABC
0-20 cm.	1.262	0.0068	0.622	0.69	0.6391	9.6483	17.909
20-40 cm.	0.0143	0.00076	0.0493	1.3171	0.3472	0.7782	1.3291
40-60 cm.	0.38	0.1763	0.0053	0.1312	1.8572	0.4976	0.19
60-80 cm.	0.2459	0.0281	0.0351	0.0037	1.171	0.1082	0.0098
80-100 cm.	0.0031	0.2939	0.0605	0.0026	0.2667	0.0021	0.0553

POROSIDAD			F0/F1%				
Altura	A	B	C	AB	AC	BC	ABC
0-20 cm.	0.1981	0.00028	0.00071	0.2849	0.0124	0.185	0.2935
20-40 cm.	0.2471	0.0345	1.0105	0.021	0.0018	0.1781	0.1386
40-60 cm.	3.19E-07	0.2072	4.90E-01	0.2332	0.1424	0.06595	0.0728
60-80 cm.	0.0157	0.1875	0.2312	0.1762	0.1183	0.0021	0.1434
80-100 cm.	0.0223	0.2326	0.1687	0.1607	0.0924	0.0015	0.0833

TAMANO EFECTIVO			F0/F1%				
Altura	A	B	C	AB	AC	BC	ABC
0-20 cm.	0.0536	0.1	0.0255	0.177	0.0449	0.0321	0.000521
20-40 cm.	0.00021	0.0029	0.121	0.004	0.0086	0.0006	0.135
40-60 cm.	0.000973	0.6359	0.0192	0.0325	0.0108	0.1084	0.002
60-80 cm.	0.00038	0.7166	0.0021	0.0412	0.0676	0.2358	0.0249
80-100 cm.	0.0609	0.824	0.000162	0.00084	0.000979	0.0142	0.004

**TABLA A1.7 RELACIÓN DE DISTRIBUCIÓN F CON UNA SIGNIFICANCIA DEL 99% PARA EXPERIMENTOS CON COMPOSTA VS. COMPOSTA + BAGAZO (75, 25%) CON FLUJOS DE AIRE DE 10 Y 40 L/MIN.**

A: Flujo de aire, l/min

B: Adición de agua al medio filtrante (hay o no hay)

C: Composición del medio filtrante (de 75% a 100% composta)

HUMEDAD				F0/F1%			
Altura	A	B	C	AB	AC	BC	ABC
0-20 cm.	0.4664	0.0434	0.0312	0.0257	0.0432	0.0049	0.0324
20-40 cm.	0.3514	0.0459	0.0136	0.0045	0.0469	0.0566	0.0060
40-60 cm.	0.9006	0.0761	0.0054	5.10E-06	0.09653	0.1782	0.1116
60-80 cm.	0.3642	0.8317	0.4869	0.1258	1.67E-02	0.0169	0.0157
80-100 cm.	0.3197	1.1469	0.2968	0.2308	0.000109	0.0279	0.2453

DENSIDAD REAL				F0/F1%			
Altura	A	B	C	AB	AC	BC	ABC
0-20 cm.	0.8325	0.15104	3.1892	1.2242	0.6234	0.0230	0.6118
20-40 cm.	0.2796	0.00306	3.8785	2.2897	0.5144	0.0318	1.5762
40-60 cm.	0.0011	5.63E-05	0.6277	0.5650	0.3011	0.0931	0.41906
60-80 cm.	0.0684	0.00272	1.2432	0.07548	0.7949	0.3034	0.7838
80-100 cm.	0.00601	0.000692	0.58719	0.01383	0.2050	0.00928	0.10353

DENSIDAD APARENTE				F0/F1%			
Altura	A	B	C	AB	AC	BC	ABC
0-20 cm.	0.0042	0.57007	0.78517	4.07141	3.3243	4.90344	8.7276
20-40 cm.	0.10877	0.02949	0.00562	0.11884	0.00033	0.02452	0.21700
40-60 cm.	0.6586	0.53872	0.07151	0.05591	2.05824	1.194070	0.44823
60-80 cm.	0.3409	0.16716	0.26494	0.00843	1.13917	0.33333	0.002723
80-100 cm.	1.06953	0.00711	0.58823	1.28306	0.33526	0.68143	1.203217

POROSIDAD				F0/F1%			
Altura	A	B	C	AB	AC	BC	ABC
0-20 cm.	0.12174	0.02857	0.72126	0.169563	0.02325	0.21611	0.11719
20-40 cm.	0.21898	0.06016	2.42882	0.307465	0.11466	0.27494	0.03531
40-60 cm.	0.14866	0.00442	8.05E-01	0.106913	0.00016	0.45171	0.017310
60-80 cm.	0.00561	4.36E-05	0.446423	0.023371	0.004877	0.168415	0.072735
80-100 cm.	0.12037	0.08219	0.410315	0.110978	0.00038	0.18719	0.155201

TAMANO EFECTIVO				F0/F1%			
Altura	A	B	C	AB	AC	BC	ABC
0-20 cm.	0.000143	0.084719	0.149581	0.1374996	156E-05	0.011589	0.001287
20-40 cm.	3.98E-06	0.03157	0.375746	0.0770279	0.011198	0.001758	0.021245
40-60 cm.	0.098626	0.419869	0.710249	0.2126450	0.305329	0.088691	0.164414
60-80 cm.	0.063156	0.976547	1.019093	0.1280194	0.0435621	0.024413	0.010450
80-100 cm.	0.001402	0.454381	0.5395611	0.0279154	0.0018671	0.127594	2.55E-34

**TABLA A1.8 RELACIÓN DE DISTRIBUCIÓN F CON UNA SIGNIFICANCIA DEL 99% PARA EXPERIMENTOS CON COMPOSTA VS. COMPOSTA + BAGAZO (75, 25%) CON FLUJOS DE AIRE DE 40 Y 70 L/MIN.**

A: Flujo de aire, l/min

B: Adición de agua al medio filtrante (hay o no hay)

C: Composición del medio filtrante (de 75% a 100% composta)

HUMEDAD			F0/F1%				
Altura	A	B	C	AB	AC	BC	ABC
0-20 cm.	0.2659	0.5815	0.0990	0.0151	0.0008	0.0491	0.1023
20-40 cm.	0.1406	0.0005	0.0615	0.0005	0.0005	0.2419	0.0032
40-60 cm.	0.0402	0.3170	0.2965	0.0191	0.0020	0.4891	0.0201
60-80 cm.	0.0596	1.0592	1.0997	0.2658	0.1987	0.1606	0.0218
80-100 cm.	0.1547	2.7355	0.6180	0.2812	0.0220	0.1065	0.0171
DENSIDAD REAL			F0/F1%				
Altura	A	B	C	AB	AC	BC	ABC
0-20 cm.	0.7021	5.8206	5.8212	0.4075	0.3964	0.7378	0.0067
20-40 cm.	0.8787	1.9897	7.5118	0.0006	0.7410	0.8454	0.5539
40-60 cm.	0.5289	0.0504	0.3704	0.0489	0.3810	0.0006	0.0057
60-80 cm.	0.2314	0.5812	1.1709	0.4108	0.0390	0.2283	1.0343
80-100 cm.	0.8746	0.1490	1.5836	0.0385	0.0117	0.1343	0.3898
DENSIDAD APARENTE			F0/F1%				
Altura	A	B	C	AB	AC	BC	ABC
0-20 cm.	0.0293	0.1058	0.7403	0.1475	0.0403	2.4097	0.5092
20-40 cm.	0.0472	0.1967	0.2063	0.1007	0.0123	1.3606	0.2206
40-60 cm.	0.4247	0.2288	0.1026	0.1715	0.2795	0.3278	0.0377
60-80 cm.	0.5127	0.7123	0.3616	0.1667	0.1754	0.0078	0.1711
80-100 cm.	0.1657	0.2784	0.1322	0.0116	0.0426	0.0037	0
POROSIDAD			F0/F1%				
Altura	A	B	C	AB	AC	BC	ABC
0-20 cm.	0.1975	0.3027	0.0846	0.0114	0.0581	0.6101	0.0271
20-40 cm.	0.0396	0.0333	0.6282	0.0597	0.0200	0.2867	0.0241
40-60 cm.	0.0018	0.8087	1.9766	0.0183	0.0965	0.0001	2.4673
60-80 cm.	0.3169	0.1894	2.1308	0.1039	0.8710	1.2236	3.7952
80-100 cm.	0.2578	0.0734	0.4629	0.1392	0.0680	0.3336	0.4522
TAMAÑO EFECTIVO			F0/F1%				
Altura	A	B	C	AB	AC	BC	ABC
0-20 cm.	0.0297	0.1717	0.2801	0.0487	0.0514	0.0896	0.0040
20-40 cm.	0.0033	0.2007	0.4139	0.0013	0.0146	0.0049	0.0016
40-60 cm.	0.0659	0.6572	0.8423	0.0483	0.1433	0.1606	0.0640
60-80 cm.	0.0038	0.2838	0.6098	0.1215	0.0003	0.0106	0.0825
80-100 cm.	0.0020	0.2537	0.5359	0.0750	0.0181	0.0042	0.0595

**TABLA A1.9 RELACIÓN DE DISTRIBUCIÓN F CON UNA SIGNIFICANCIA DEL 99% PARA EXPERIMENTOS CON COMPOSTA VS. COMPOSTA + BAGAZO (75, 25%) CON FLUJOS DE AIRE DE 10 Y 70 L/MIN.**

A: Flujo de aire, l/min

B: Adición de agua al medio filtrante (hay o no hay)

C: Composición del medio filtrante (de 75% a 100% composta)

HUMEDAD				F0/F1%			
Altura	A	B	C	AB	AC	BC	ABC
0-20 cm.	1.3555	0.1108	0.0091	0.0114	0.0077	0.0014	0.0946
20-40 cm.	0.4446	0.0276	0.0040	0.0017	0.0005	0.0346	0.0025
40-60 cm.	1.0126	0.1796	0.0173	0.0159	0.0408	0.3181	0.1977
60-80 cm.	0.4236	1.0068	0.5445	0.2393	0.0454	0.0017	0.0021
80-100 cm.	0.4714	1.6105	0.4434	0.4564	0.0116	0.0006	0.0931

DENSIDAD REAL				F0/F1%			
Altura	A	B	C	AB	AC	BC	ABC
0-20 cm.	2.9038	0.6504	2.0436	2.6898	0.0743	0.0320	0.3061
20-40 cm.	0.3362	0.0496	4.0844	1.6771	0.5148	0.2173	2.5197
40-60 cm.	0.0205	0.0234	0.4558	0.3588	0.1886	0.2005	0.6189
60-80 cm.	0.1851	0.0337	0.8188	0.0010	0.4736	0.5904	1.1941
80-100 cm.	0.0098	0.0459	0.3519	0.1276	0.0770	0.1137	0.3159

DENSIDAD APARENTE				F0/F1%			
Altura	A	B	C	AB	AC	BC	ABC
0-20 cm.	0	0.0718	0.2720	0.4010	0.5720	0.8519	1.8550
20-40 cm.	0.0007	0.0047	0.0683	0.8600	0.2321	0.6647	1.7678
40-60 cm.	0.7751	0.2688	0.0234	0.1688	1.6151	0.6869	0.2087
60-80 cm.	0.7153	0.2074	0.1360	0.0110	0.9595	0.4117	0.0037
80-100 cm.	0.0456	0.2993	0.1674	0.0256	0.0513	0.0030	0.0008

POROSIDAD				F0/F1%			
Altura	A	B	C	AB	AC	BC	ABC
0-20 cm.	0.8604	0.0946	0.2825	0.3019	0.2167	0.4599	0.3092
20-40 cm.	0.1922	0.0415	1.4063	0.0002	0.0007	0.1789	0.0475
40-60 cm.	0.1096	0.0153	0.4479	0.1297	0.0247	0.0155	0.3783
60-80 cm.	0.1989	0.0659	0.2342	0.0080	0.0593	0.0972	1.1740
80-100 cm.	0.2479	0.1788	0.3187	0.0653	0.0132	0.0797	1.4096

TAMANO EFECTIVO				F0/F1%			
Altura	A	B	C	AB	AC	BC	ABC
0-20 cm.	0.0356	0.0922	0.3059	0.1352	0.0606	0.0332	0.0045
20-40 cm.	0.0054	0.0359	0.4328	0.1031	0.0011	0.0111	0.0202
40-60 cm.	0.0001	0.1593	0.1762	0.0229	0.0068	0.0043	0.0052
60-80 cm.	0.0124	0.1037	0.4834	0.0152	0.0167	0.0015	0.0565
80-100 cm.	0.0257	0.2709	0.2589	0.0124	0.0140	0.0726	0.0003

**ANEXO II**  
**GRAFICAS DE CAÍDA DE PRESIÓN**



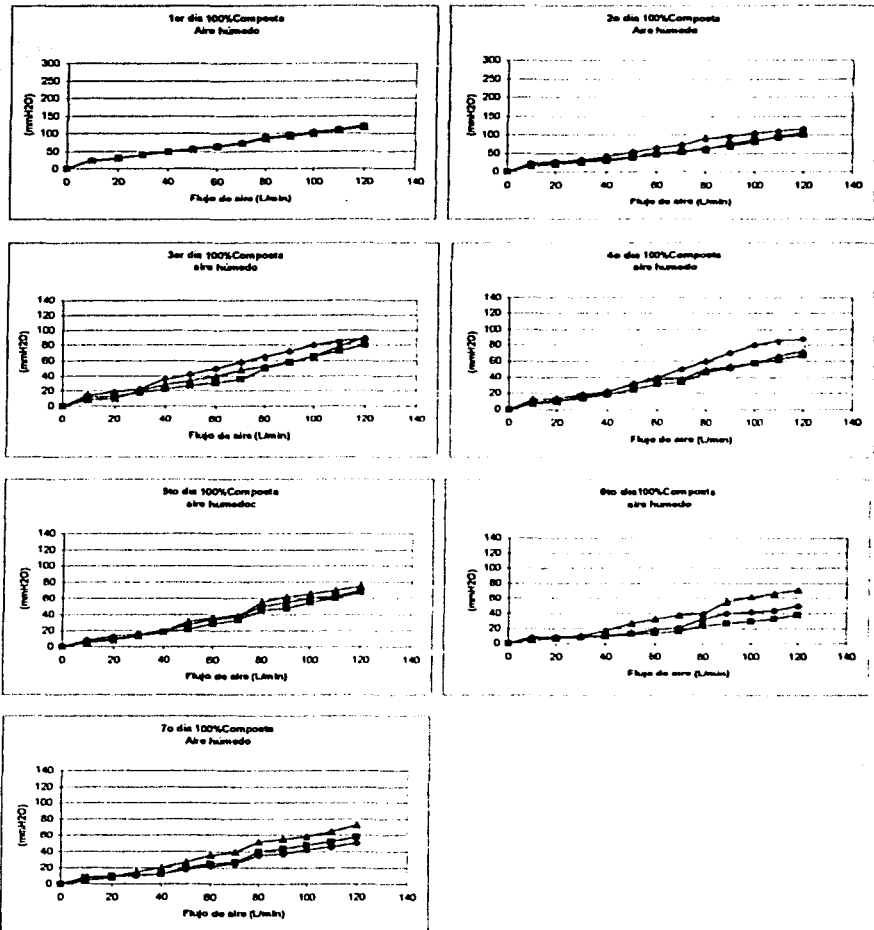


Figura A2.1 Evolución de los perfiles de caída de presión durante 7 días de operación utilizando 100% composta como medio filtrante sometido a aire 100% húmedo: ▲: 10 l aire/min; ■: 40 l aire/min; ◆: 70 l aire/min.

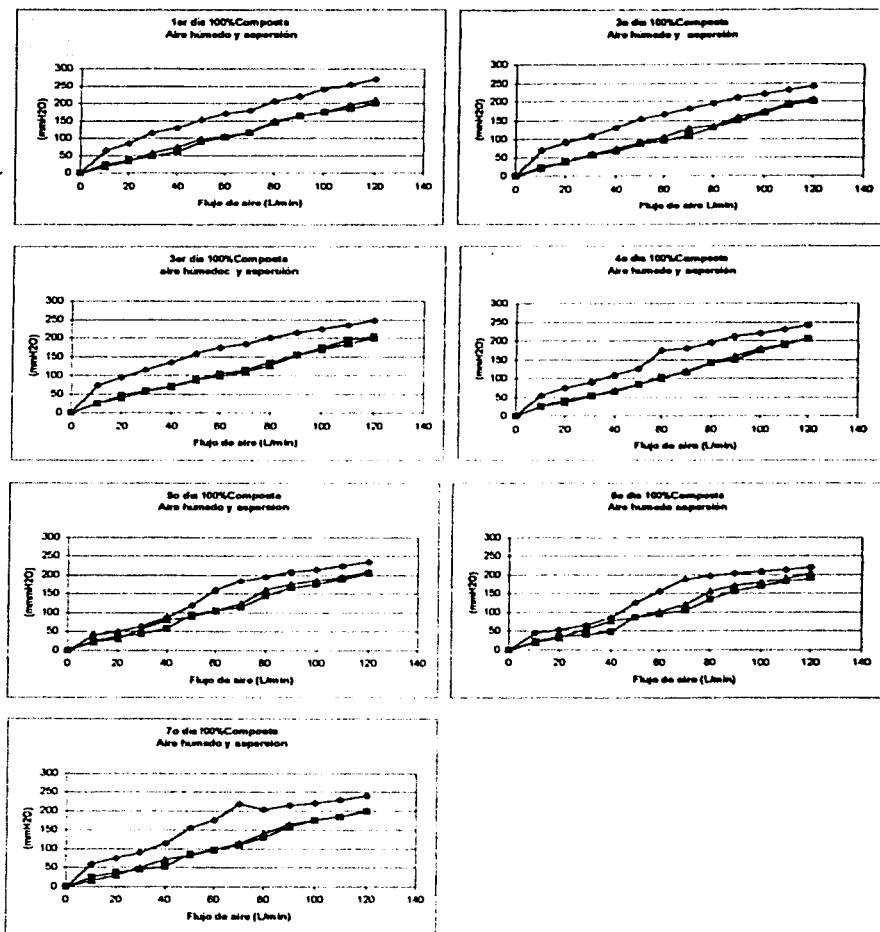


Figura A2.2 Evolución de los perfiles de caída de presión durante 7 días de operación utilizando 100% composta como medio filtrante sometido a aire 100% húmedo con adición de agua:  $\blacktriangle$ : 10 l aire/min;  $\blacksquare$ : 40 l aire/min;  $\blacklozenge$ : 70 l aire/min.

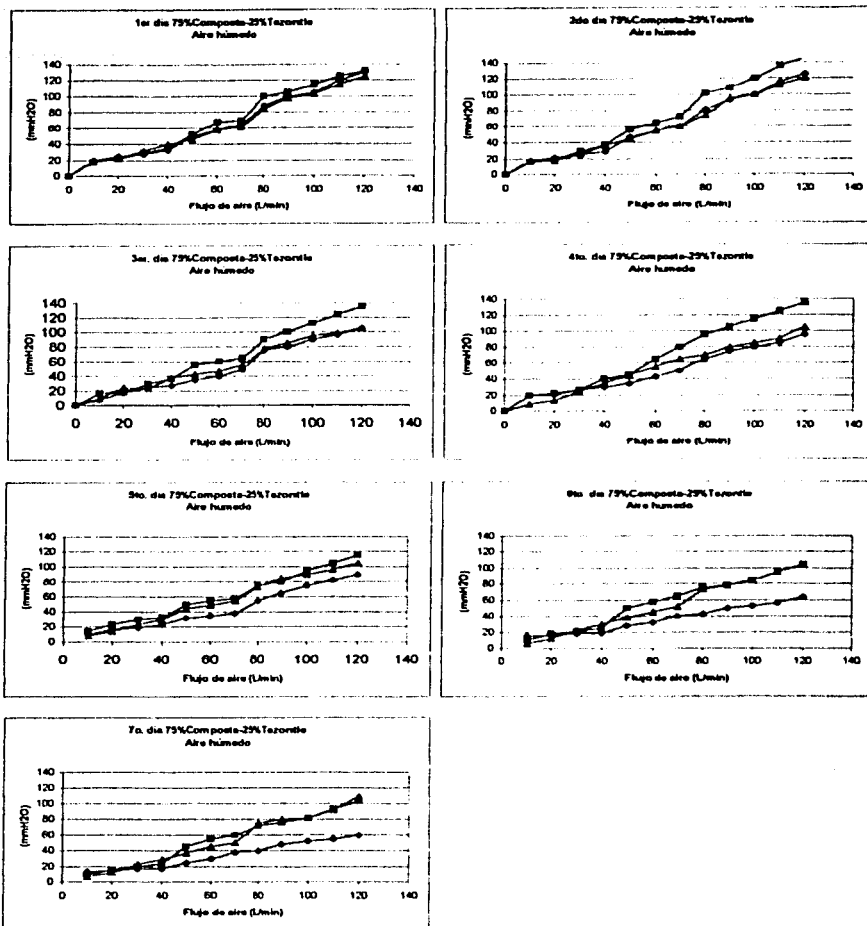


Figura A2.3. Evolución de los perfiles de caída de presión durante 7 días de operación utilizando 75% composta con 25% tezontle como medio filtrante sometido a aire 100% húmedo:  $\blacktriangle$ : 10 l aire/min;  $\blacksquare$ : 40 l aire/min;  $\blacklozenge$ : 70 l aire/min.

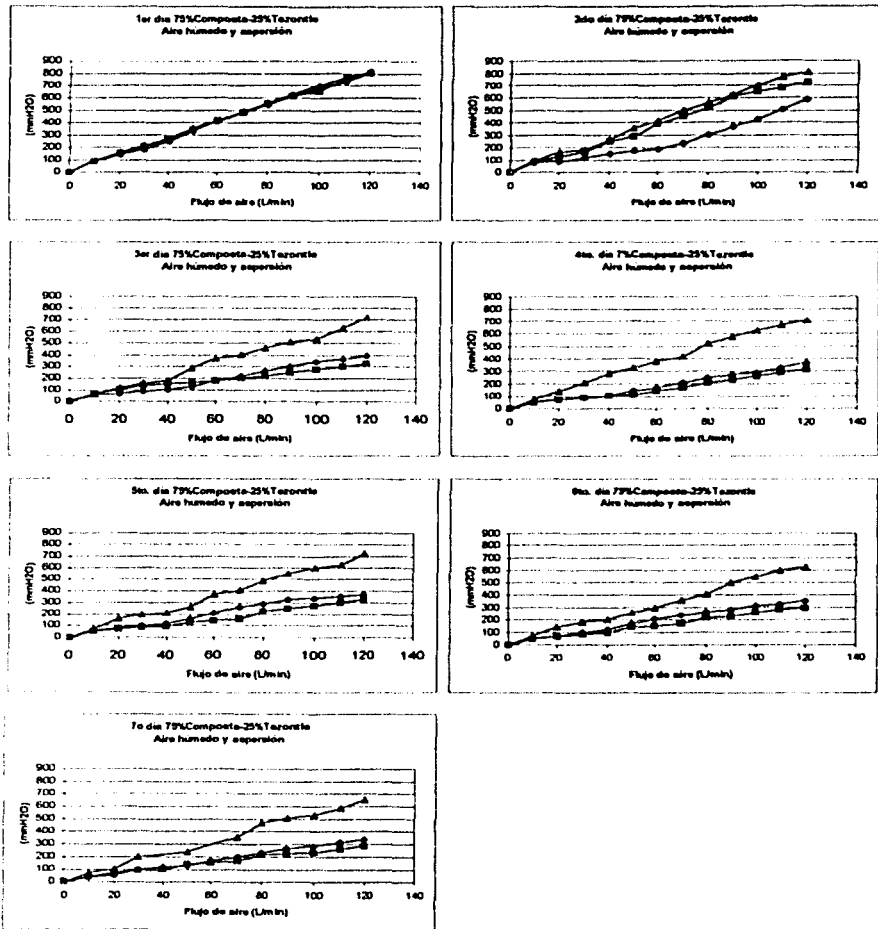


Figura A2.4 Evolución de los perfiles de caída de presión durante 7 días de operación utilizando 75% composta con 25% tezontle como medio filtrante sometido a aire 100% húmedo con adición de agua: ▲: 10 l aire/min; ■: 40 l aire/min; ◆: 70 l aire/min.

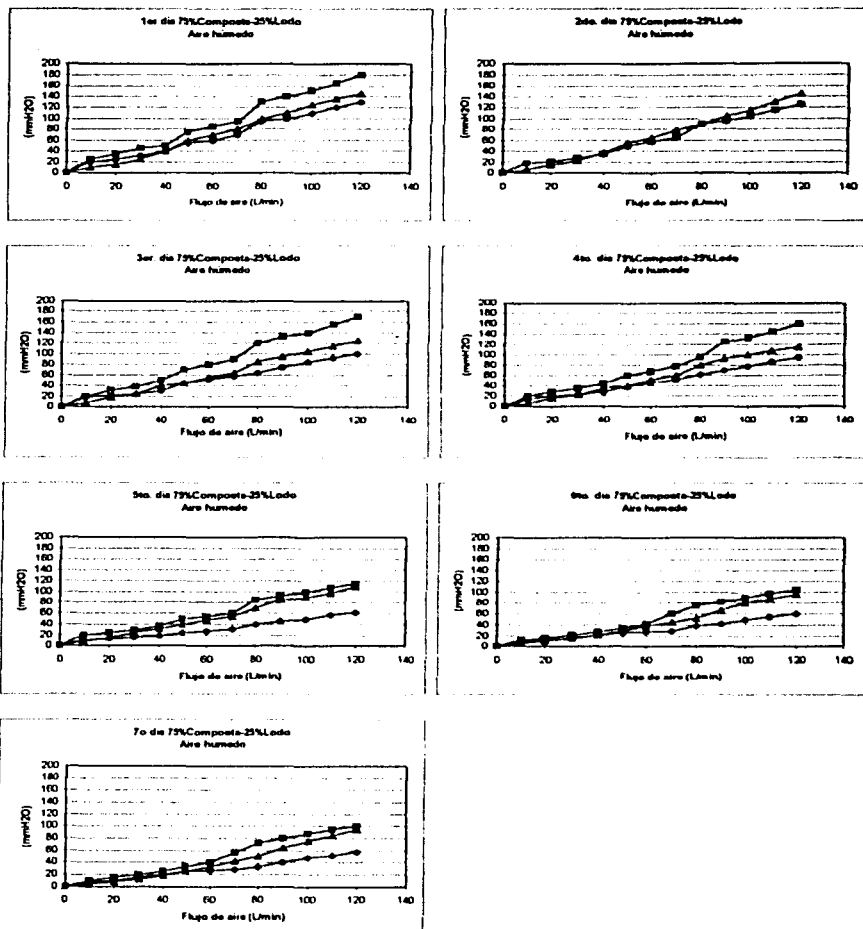


Figura A2.5 Evolución de los perfiles de caída de presión durante 7 días de operación utilizando 75% composta con 25% lodo como medio filtrante sometido a aire 100% húmedo: ▲: 10 l aire/min; ■: 40 l aire/min; ◆: 70 l aire/min.

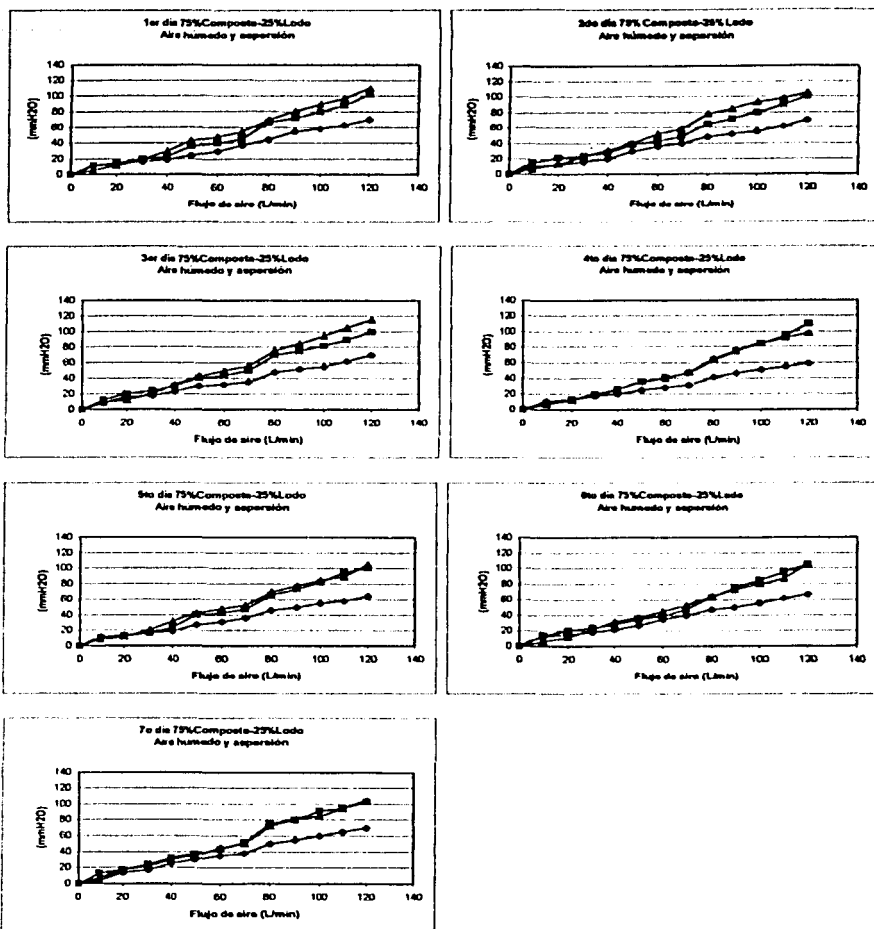


Figura A2.6 Evolución de los perfiles de caída de presión durante 7 días de operación utilizando 75% composta con 25% lodo como medio filtrante sometido a aire 100% húmedo con adición de agua: ▲: 10 l aire/min; ■: 40 l aire/min; ◆: 70 l aire/min.

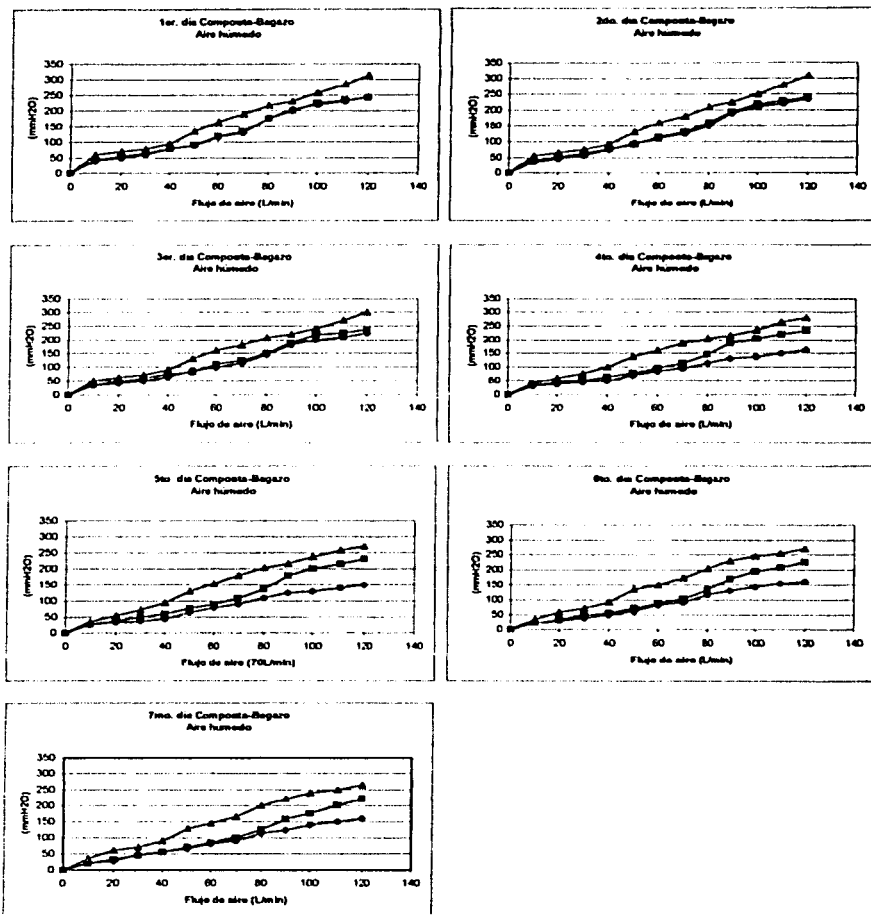


Figura A2.7 Evolución de los perfiles de caída de presión durante 7 días de operación utilizando 75% composta con 25% bagazo de caña como medio filtrante sometido a aire 100% húmedo: ▲: 10 l aire/min; ■: 40 l aire/min; ◆: 70 l aire/min.

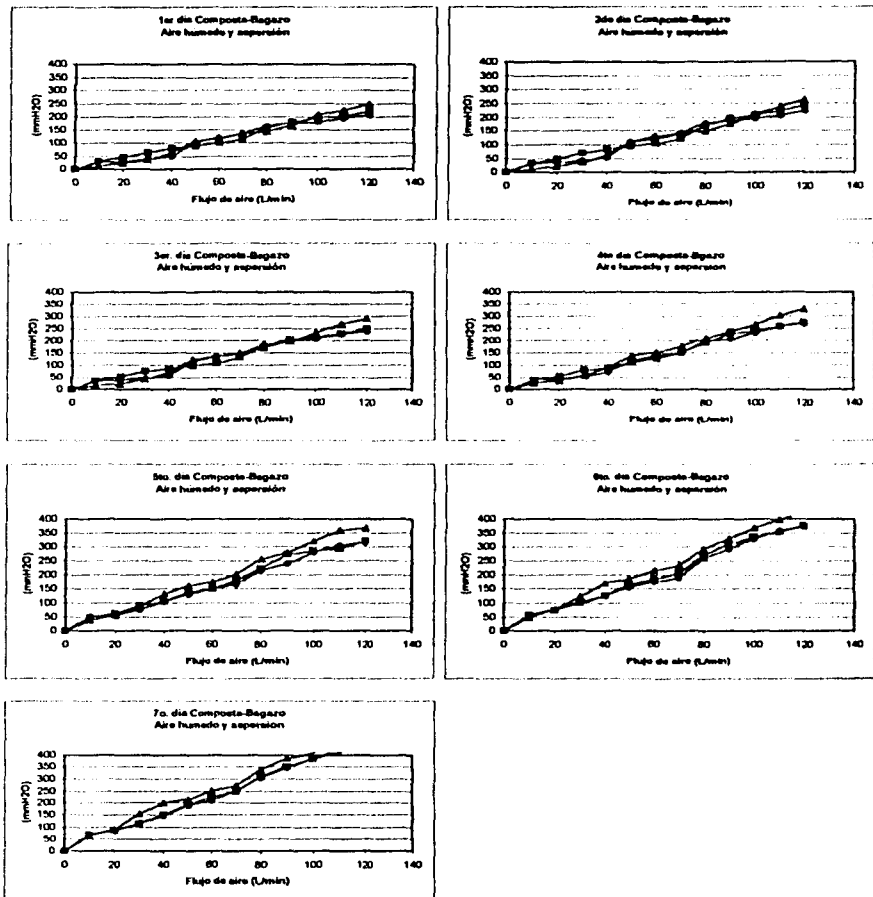


Figura A2.8 Evolución de los perfiles de caída de presión durante 7 días de operación utilizando 75% composta con 25% bagazo de caña como medio filtrante sometido a aire 100% húmedo con adición de agua: ▲: 10 l aire/min; ■: 40 l aire/min; ◆: 70 l aire/min.



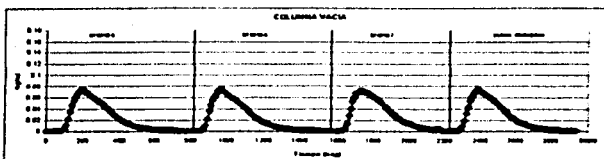
---

**ANEXO III**  
**CURVAS DE ISTRIBUCIÓN DE TIEMPOS DE RESIDENCIA**

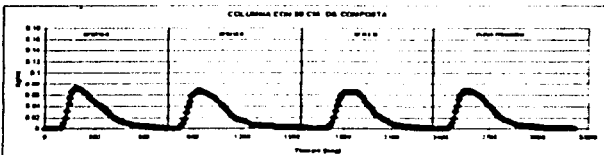
En este Anexo se presentan las curvas de distribución de tiempos de residencia obtenidas en cada experimento así como la curva promedio correspondiente.

Para el análisis de la curva de distribución de tiempo de residencia se utilizó una hoja de cálculo en Excel que calcula el tiempo de retención promedio del gas, la variancia, la fracción de volumen muerto y la desviación estándar de los datos, así como el ajuste del modelo de dispersión axial y el modelo de tanques completamente mezclados puestos en serie.

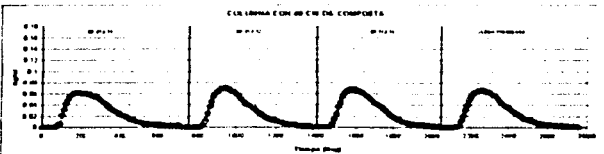
1) Columna vacía



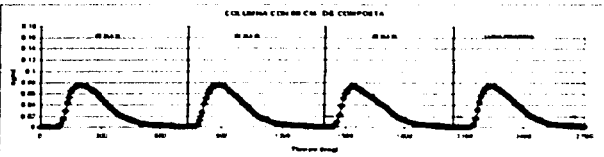
2) Columna empacada con 20 cm. de composta



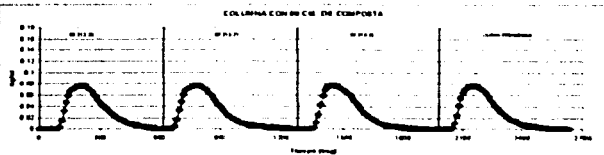
3) Columna empacada con 40 cm. de composta



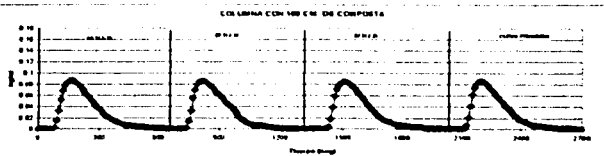
4) Columna empacada con 60 cm. de composta



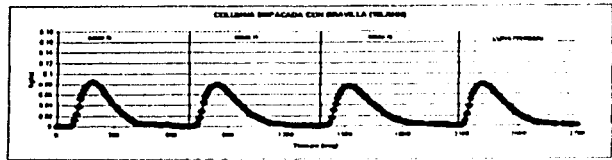
5) Columna empacada con 80 cm. de composta



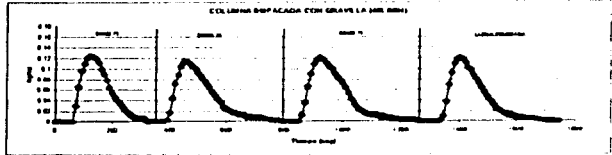
6) Columna empacada con 100 cm. de composta



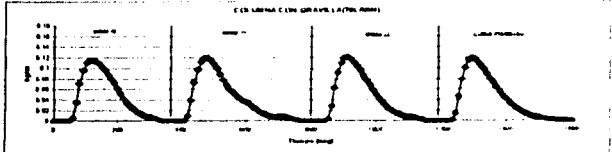
7) Columna empacada con gravilla (10L/min)



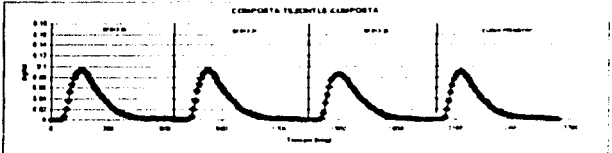
8) Columna empacada con gravilla (40L/min)



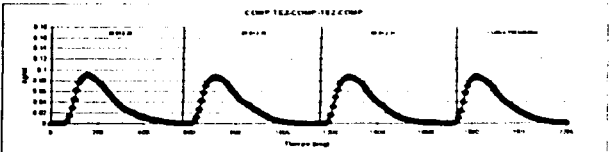
9) Columna empacada con gravilla (70L/min)



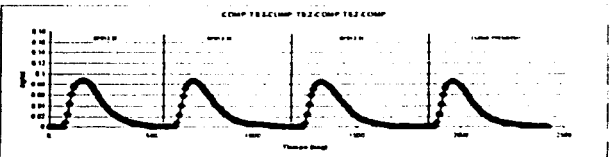
10) Composta-Tezontle-Composta (10L/min)



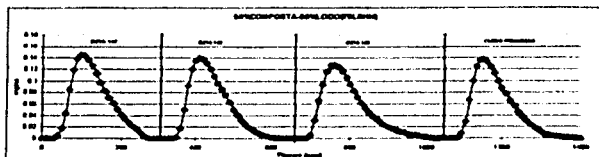
11) Composta-Tezontle-Composta-Tezontle-Composta (10L/min)



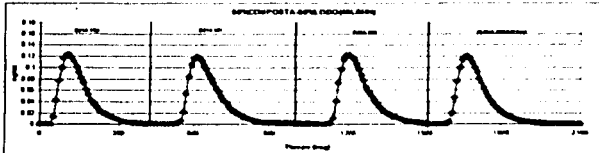
12) Composta-Tezontle-Composta-Tezontle-Composta-Tezontle-Composta (10L/min)



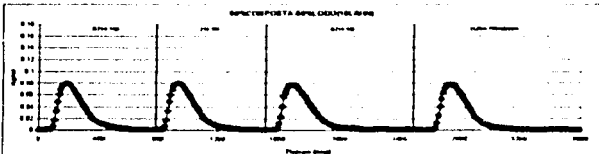
13) 50%Composta-50%Lodo  
Filtro sometido con 70L/min



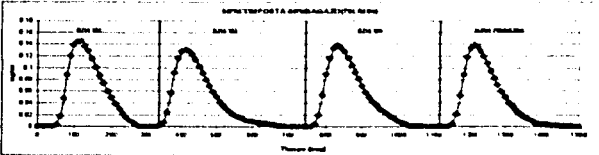
14) 50%Composta-50%Lodo  
Filtro sometido con 40L/min



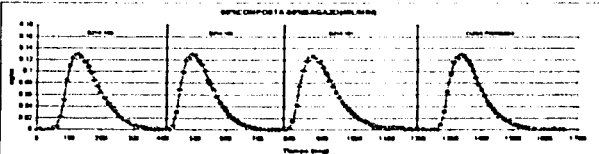
15) 50%Composta-50%Lodo  
Filtro sometido con 10L/min



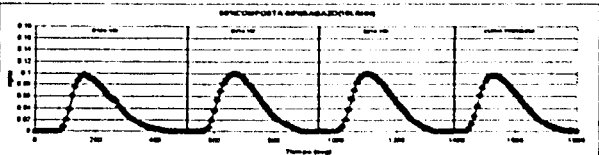
16) 50%Composta-  
50%Bagazo  
Filtro sometido con 70L/min



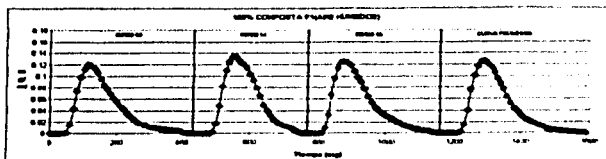
17) 50%Composta-  
25%Bagazo  
Filtro sometido con 40L/min



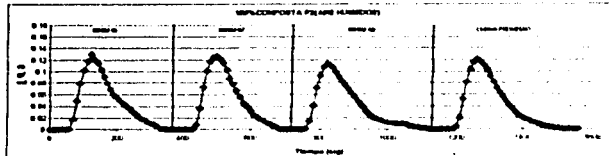
18) 50%Composta-  
50%Bagazo  
Filtro sometido con 10L/min



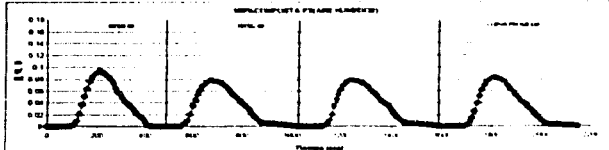
19) 100% Composta  
Filtro sometido con aire  
húmedo  
70L/min



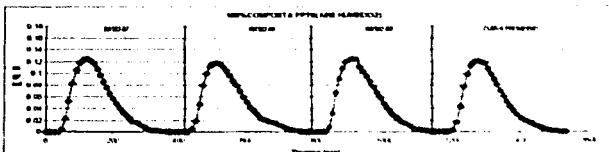
20) 100% Composta  
Filtro sometido con aire  
húmedo  
40L/min



21) 100% Composta  
Filtro sometido con aire  
húmedo  
10L/min



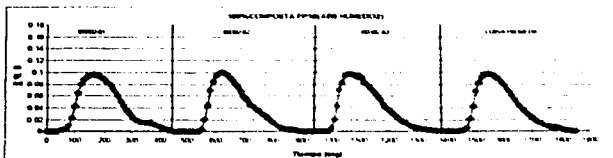
22) 100% Composta  
Filtro sometido con aire  
húmedo  
Filtro Patrón (70L/min)



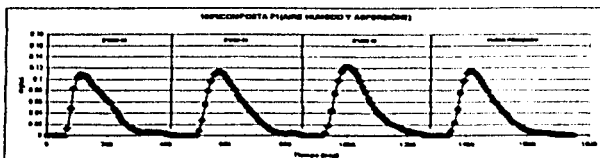
25) 100% Composta  
Filtro sometido con aire  
húmedo  
Filtro Patrón (40L/min)



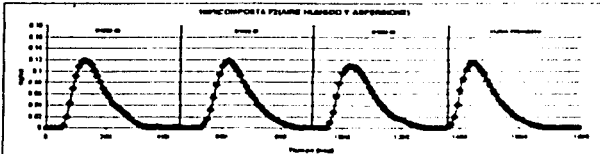
24) 100% Composta  
Filtro sometido con aire  
húmedo  
Filtro Patrón (10L/min)



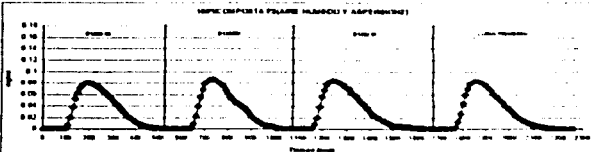
25) 100%Composta  
Filtro sometido con aire  
húmedo y aspersión  
70L/min



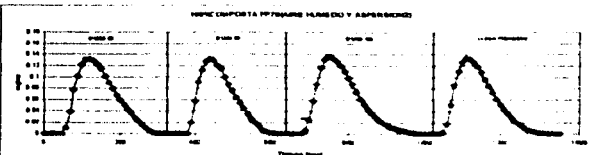
26) 100%Composta  
Filtro sometido con aire  
húmedo y aspersión  
40L/min



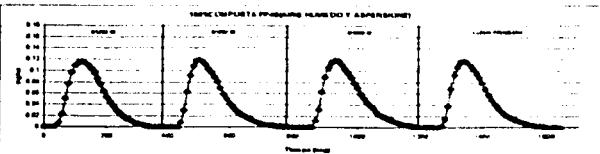
27) 100%Composta  
Filtro sometido con aire  
húmedo y aspersión  
10L/min



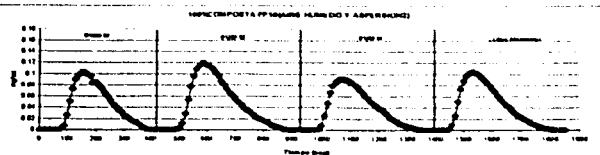
28) 100%Composta  
Filtro sometido con aire  
húmedo y aspersión  
Filtro Patrón (70L/min)



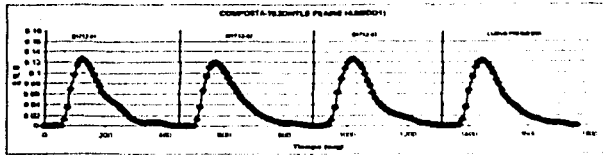
29) 100%Composta  
Filtro sometido con aire  
húmedo y aspersión  
Filtro Patrón (40L/min)



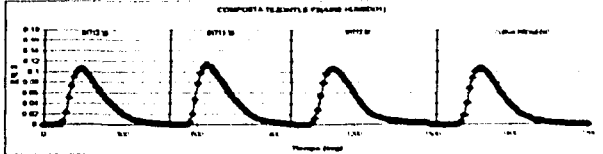
30) 100%Composta  
Filtro sometido con aire  
húmedo y aspersión  
Filtro Patrón (10L/min)



31) 75%Composta-  
25%Tezontle  
Filtro sometido con aire  
húmedo  
(70L/min)



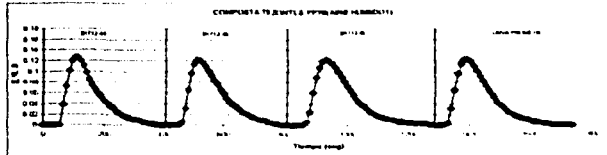
32) 75%Composta-  
25%Tezontle  
Filtro sometido con aire  
húmedo  
(40L/min)



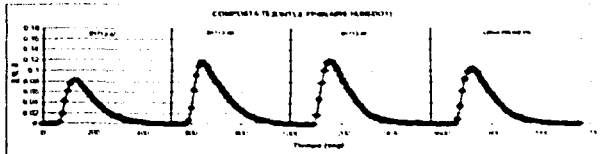
33) 75%Composta-  
25%Tezontle  
Filtro sometido con aire  
húmedo  
(10L/min)



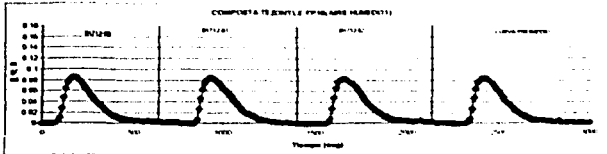
34) 75%Composta-  
25%Tezontle  
Filtro sometido con aire  
húmedo  
Filtro Patrón (70L/min)



35) 75%Composta-  
25%Tezontle  
Filtro sometido con aire  
húmedo  
Filtro Patrón (40L/min)

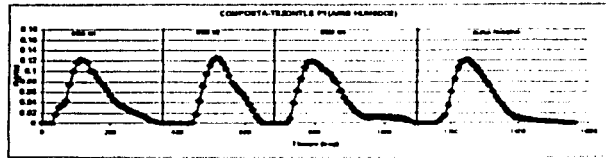


36) 75%Composta-  
25%Tezontle  
Filtro sometido con aire  
húmedo  
Filtro Patrón (10L/min)

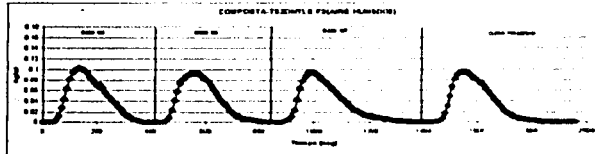




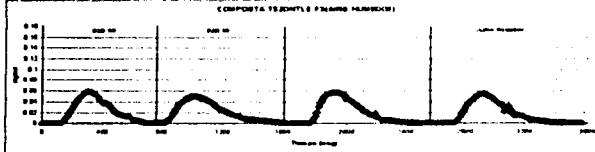
37) 75%Composta-  
25%Tezontle  
Filtro sometido con aire  
húmedo (replica)  
(70L/min)



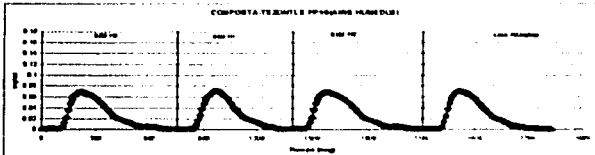
38) 75%Composta-  
25%Tezontle  
Filtro sometido con aire  
húmedo (replica)  
(40L/min)



39) 75%Composta-  
25%Tezontle  
Filtro sometido con aire  
húmedo (replica)  
(10L/min)



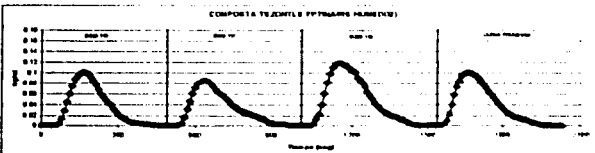
40) 75%Composta-  
25%Tezontle  
Filtro sometido con aire  
húmedo (replica)  
Filtro Patrón (70L/min)



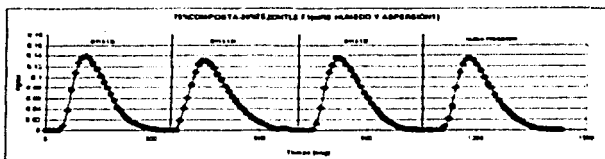
41) 75%Composta-  
25%Tezontle  
Filtro sometido con aire  
húmedo (replica)  
Filtro Patrón (40L/min)



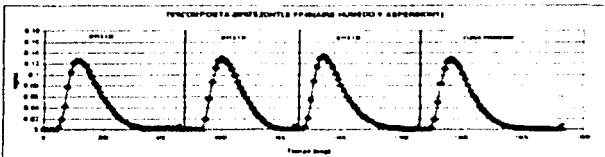
42) 75%Composta-  
25%Tezontle  
Filtro sometido con aire  
húmedo (replica)  
Filtro Patrón (10L/min)



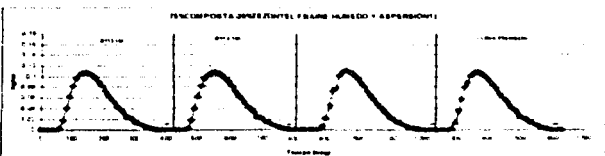
43) 75%Composta-  
25%Tezontle  
Filtro sometido con aire  
húmedo y aspersión  
(70L/min)



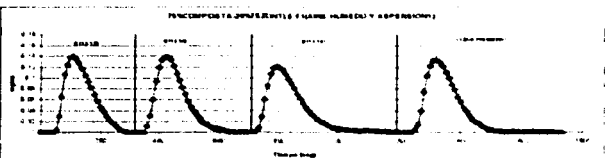
44) 75%Composta-  
25%Tezontle  
Filtro sometido con aire  
húmedo y aspersión  
(40L/min)



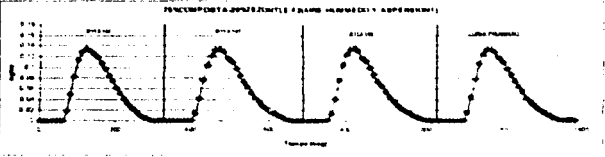
45) 75%Composta-  
25%Tezontle  
Filtro sometido con aire  
húmedo y aspersión  
(10L/min)



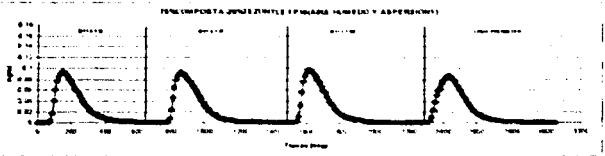
46) 75%Composta-  
25%Tezontle  
Filtro sometido con aire  
húmedo y aspersión  
Filtro Patrón (70L/min)



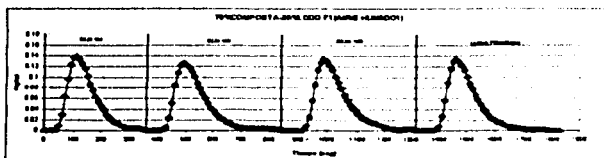
47) 75%Composta-  
25%Tezontle  
Filtro sometido con aire  
húmedo y aspersión  
Filtro Patrón (40L/min)



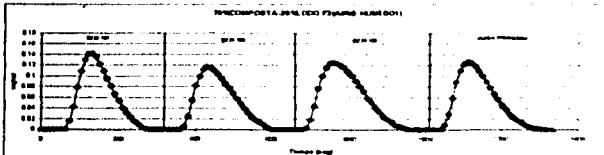
48) 75%Composta-  
25%Tezontle  
Filtro sometido con aire  
húmedo y aspersión  
Filtro Patrón (10L/min)



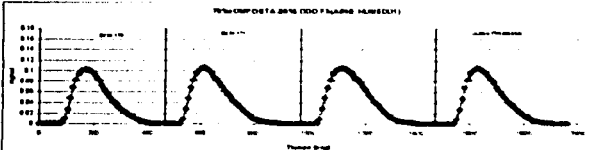
49) 75%Composta-25%Lodo  
Filtro sometido con aire  
húmedo  
(70L/min)



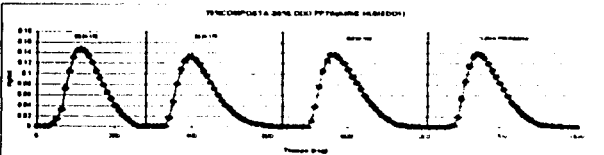
50) 75%Composta-25%Lodo  
Filtro sometido con aire  
húmedo  
(40L/min)



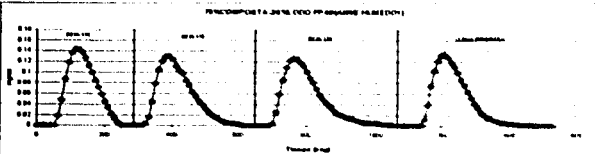
51) 75%Composta-25%Lodo  
Filtro sometido con aire  
húmedo  
(10L/min)



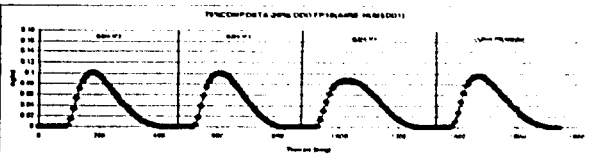
52) 75%Composta-25%Lodo  
Filtro sometido con aire  
húmedo  
Filtro Patrón (70L/min)



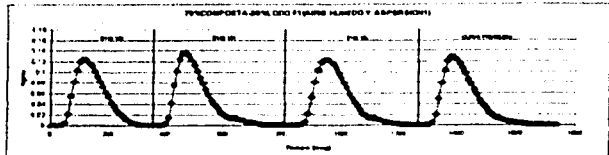
53) 75%Composta-25%Lodo  
Filtro sometido con aire  
húmedo  
Filtro Patrón (40L/min)



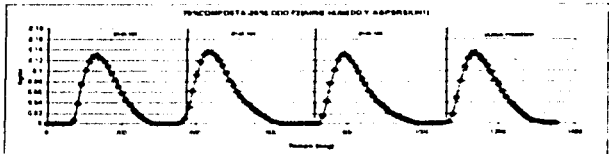
54) 75%Composta-25%Lodo  
Filtro sometido con aire  
húmedo  
Filtro Patrón (10L/min)



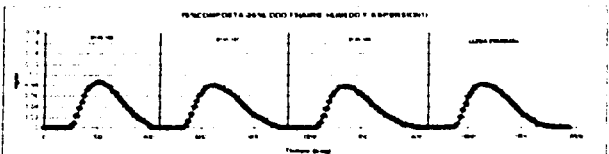
55) 75%Composta-25%Lodo  
Filtro sometido con aire  
húmedo y aspersión  
(70L/min)



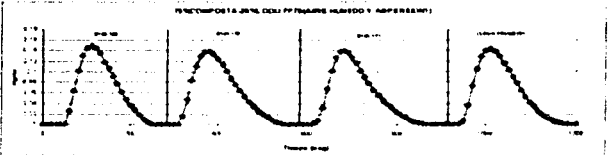
56) 75%Composta-25%Lodo  
Filtro sometido con aire  
húmedo y aspersión  
(40L/min)



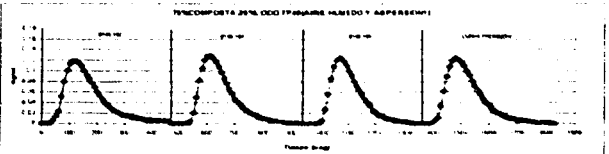
57) 75%Composta-25%Lodo  
Filtro sometido con aire  
húmedo y aspersión  
(10L/min)



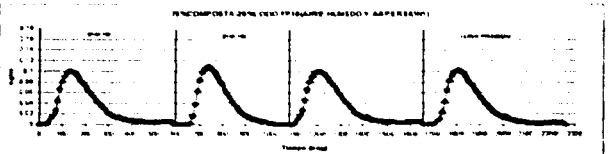
58) 75%Composta-25%Lodo  
Filtro sometido con aire  
húmedo y aspersión  
Filtro Patrón (70L/min)



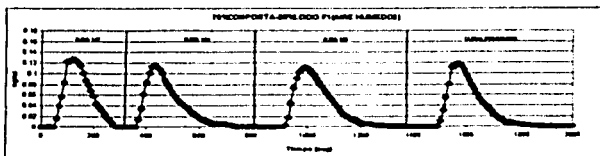
59) 75%Composta-25%Lodo  
Filtro sometido con aire  
húmedo y aspersión  
Filtro Patrón (40L/min)



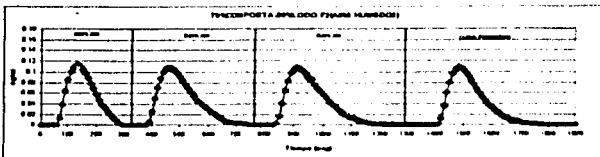
60) 75%Composta-25%Lodo  
Filtro sometido con aire  
húmedo y aspersión  
Filtro Patrón (10L/min)



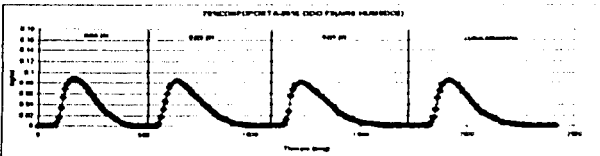
61) 75%Composta-25%Lodo  
Filtro sometido con aire  
húmedo (replica)  
(70L/min)



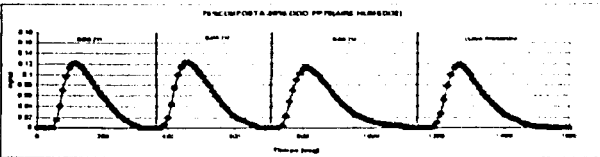
62) 75%Composta-25%lodo  
Filtro sometido con aire  
húmedo (replica)  
(40L/min)



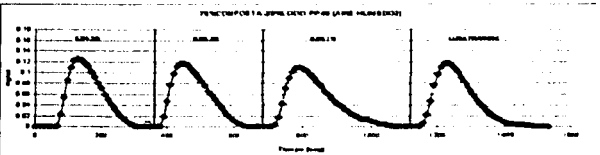
63) 75%Composta-25%Lodo  
Filtro sometido con aire  
húmedo (replica)  
(10L/min)



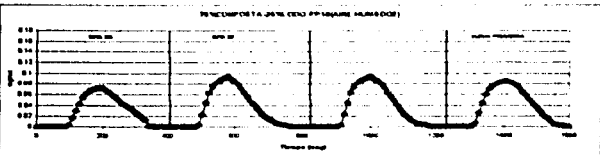
64) 75%Composta-25%Lodo  
Filtro sometido con aire  
húmedo (replica)  
Filtro Patrón (70L/min)



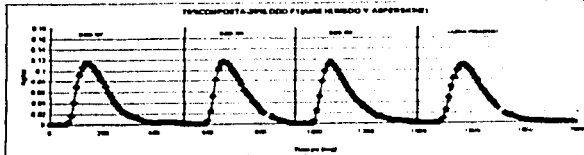
65) 75%Composta-25%Lodo  
Filtro sometido con aire  
húmedo (replica)  
Filtro Patrón (40L/min)



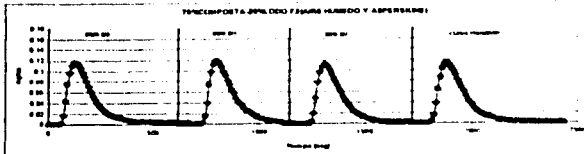
66) 75%Composta-25%Lodo  
Filtro sometido con aire  
húmedo (replica)  
Filtro Patrón (10L/min)



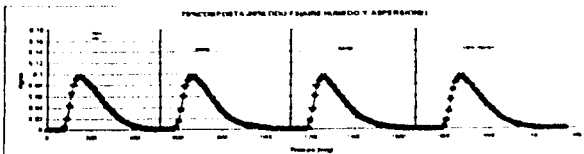
67) 75%Composta-25%Lodo  
Filtro sometido con aire  
húmedo y aspersión (replica)  
(70L/min)



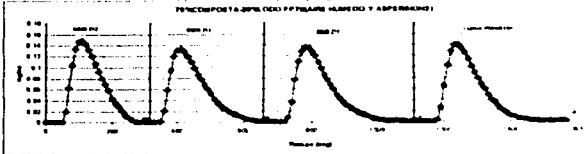
68) 75%Composta-25%Lodo  
Filtro sometido con aire  
húmedo y aspersión (replica)  
(40L/min)



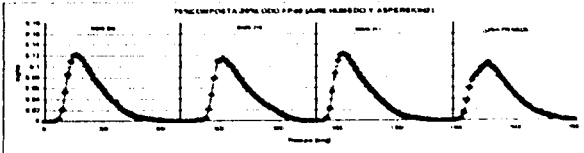
69) 75%Composta-25%Lodo  
Filtro sometido con aire  
húmedo y aspersión (replica)  
(10L/min)



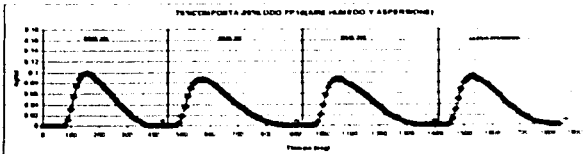
70) 75%Composta-25%Lodo  
Filtro sometido con aire  
húmedo y aspersión (replica)  
Filtro Patrón (70L/min)



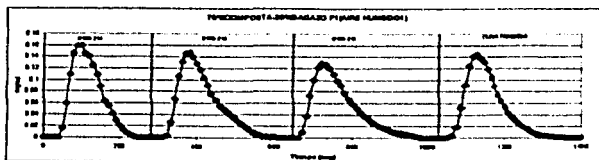
71) 75%Composta-25%Lodo  
Filtro sometido con aire  
húmedo y aspersión (replica)  
Filtro Patrón (40L/min)



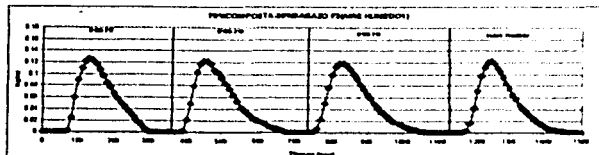
72) 75%Composta-25%Lodo  
Filtro sometido con aire  
húmedo y aspersión (replica)  
Filtro Patrón (10L/min)



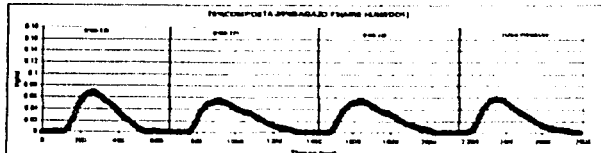
73) 75%Composta-  
25%Bagazo  
Filtro sometido con aire  
húmedo  
(70L/min)



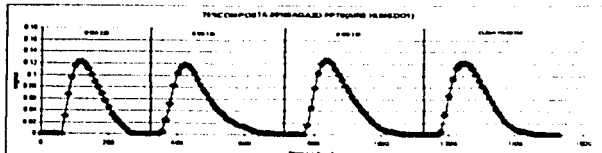
74) 75%Composta-  
25%Bagazo  
Filtro sometido con aire  
húmedo  
(40L/min)



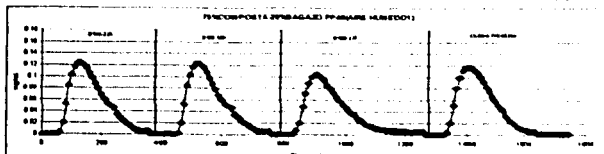
75) 75%Composta-  
25%Bagazo  
Filtro sometido con aire  
húmedo  
(10L/min)



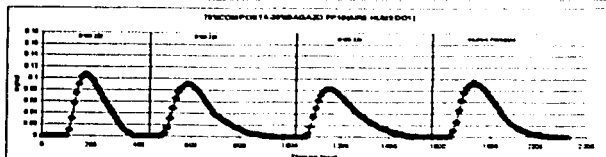
76) 75%Composta-  
25%Bagazo  
Filtro sometido con aire  
húmedo  
Filtro Patrón (70L/min)



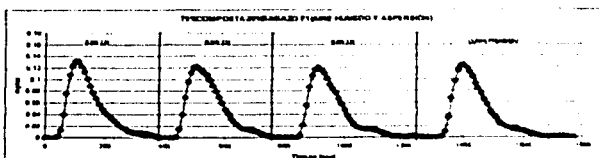
77) 75%Composta-  
25%Bagazo  
Filtro sometido con aire  
húmedo  
Filtro Patrón (40L/min)



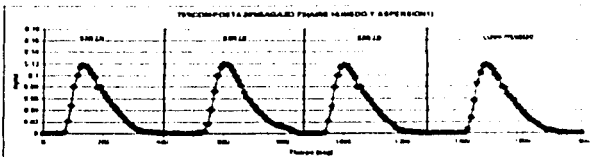
78) 75%Composta-  
25%Bagazo  
Filtro sometido con aire  
húmedo  
Filtro Patrón (10L/min)



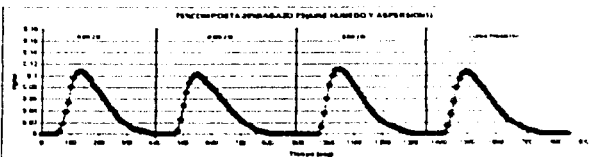
79 ) 75%Composta-  
25%Bagazo  
Filtro sometido con aire  
húmedo y aspersión  
(70L/min)



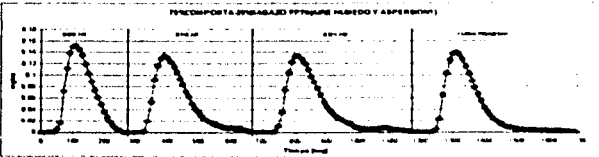
80) 75%Composta-  
25%Bagazo  
Filtro sometido con aire  
húmedo y aspersión  
(40L/min)



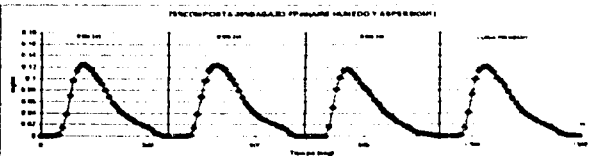
81) 75%Composta-  
25%Bagazo  
Filtro sometido con aire  
húmedo y aspersión  
(10L/min)



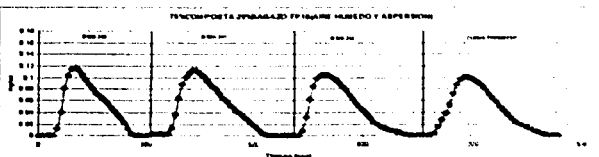
82) 75%Composta-  
25%Bagazo  
Filtro sometido con aire  
húmedo y aspersión  
Filtro Patrón (70L/min)



83) 75%Composta-  
25%Bagazo  
Filtro sometido con aire  
húmedo y aspersión  
Filtro Patrón (40L/min)

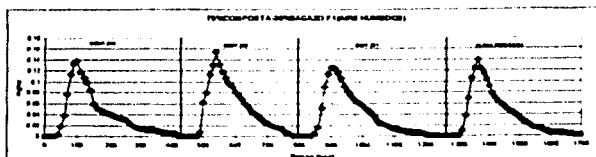


84) 75%Composta-  
25%Bagazo  
Filtro sometido con aire  
húmedo y aspersión  
Filtro Patrón (10L/min)

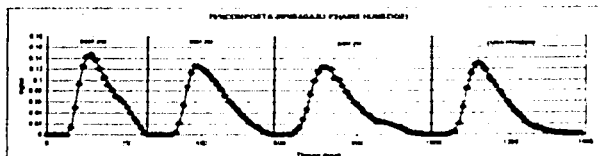




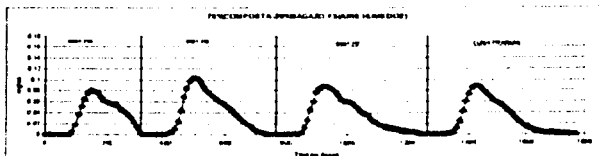
85) 75%Composta-  
25%Bagazo  
Filtro sometido con aire  
húmedo (replica)  
(70L/min)



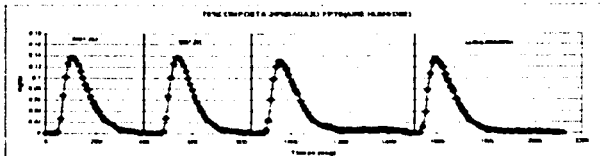
86) 75%Composta-  
25%Bagazo  
Filtro sometido con aire  
húmedo (replica)  
(40L/min)



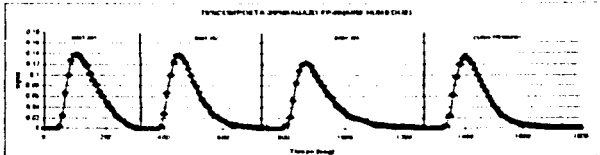
87) 75%Composta-  
25%Bagazo  
Filtro sometido con aire  
húmedo (replica)  
(10L/min)



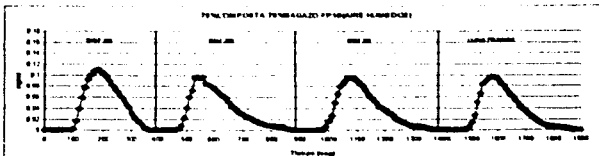
88) 75%Composta-  
25%Bagazo  
Filtro sometido con aire  
húmedo (replica)  
Filtro Patrón (70L/min)



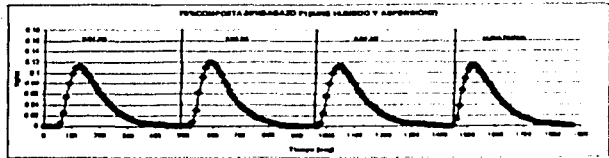
89) 75%Composta-  
25%Bagazo  
Filtro sometido con aire  
húmedo (replica)  
Filtro Patrón (40L/min)



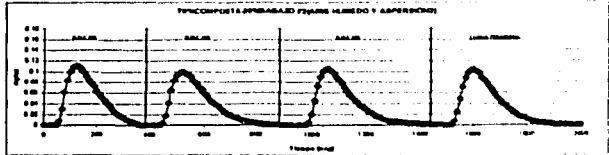
90) 75%Composta-  
25%Bagazo  
Filtro sometido con aire  
húmedo (replica)  
Filtro Patrón (10L/min)



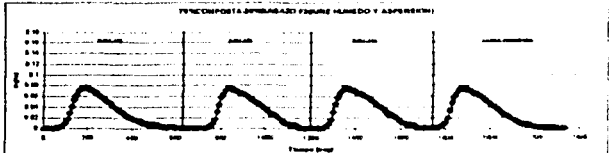
91) 75%Composta-  
25%Bagazo  
Filtro sometido con aire  
húmedo y aspersión (replica)  
(70L/min)



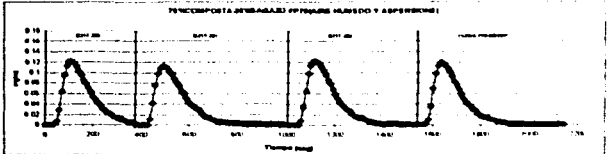
92) 75%Composta-  
25%Bagazo  
Filtro sometido con aire  
húmedo y aspersión (replica)  
(40L/min)



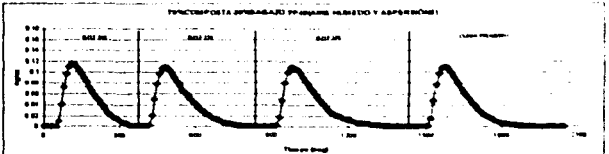
93) 75%Composta-  
25%Bagazo  
Filtro sometido con aire  
húmedo y aspersión (replica)  
(10L/min)



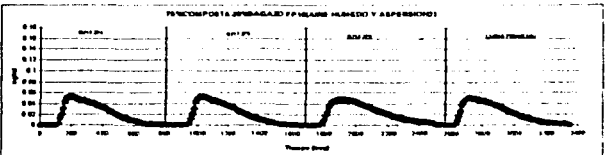
94) 75%Composta-  
25%Bagazo  
Filtro sometido con aire  
húmedo y aspersión (replica)  
Filtro Patrón (70L/min)



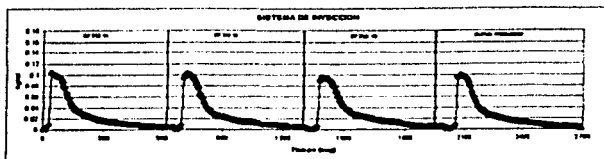
95) 75%Composta-  
25%Bagazo  
Filtro sometido con aire  
húmedo y aspersión (replica)  
Filtro Patrón (40L/min)



96) 75%Composta-  
25%Bagazo  
Filtro sometido con aire  
húmedo y aspersión (replica)  
Filtro Patrón (10L/min)



## 97) Sistema de inyección



**ANEXO IV**  
**TÉCNICAS DE LABORATORIO**

**ALCALINIDAD****Materiales:**

Vasos de pp. de 100 ml

Espátula

Balanza analítica

Pipetas de 25 ml

Bureta de 50 ml

Potenciómetro

Agua desionizada

H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 0.02 N

**Procedimiento:**

Pese 5 g de muestra en un matraz de 100 ml con una precisión de 0.01 g

Agregar 50 ml de agua desionizada y agitar vigorosamente durante 30 minutos o dejar reposar durante 24 horas.

Tome 25 ml de muestra y agregar H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 0.02 N hasta un pH de 4.3

Se toma el volumen de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 0.02 N gastado (Vg) y se realiza el siguiente calculo

$$\text{Alcalinidad (mg CaCO}_3\text{/L)} = 50000 * (0.02) * (Vg) / 25$$

## CARACTERIZACIÓN DEL MEDIO

### Tamaño efectivo y coeficiente (TE) y coeficiente de uniformidad (CU)

Uno de los primeros trabajos para desarrollar una metodología de caracterización de arenas fue el de Allen Hazen en 1892. Este autor estableció dos parámetros: el tamaño efectivo (TE) y el coeficiente de uniformidad (CU), mismos que se usan en la actualidad para describir básicamente el medio filtrante.

Se entiende por tamaño efectivo de partícula, el tamaño promedio del grano (medido como el claro en milímetros de tamiz que deja pasar el 10% en peso de las partículas y retiene el 90% restante), es decir el que corresponde cuando el 90% de las partículas son mayores a ese tamaño. El coeficiente de uniformidad (CU) es la relación entre el tamaño de tamiz que deja pasar el 60% de la muestra dividido entre el solo deja pasar el 10% más fino que él. Así para su determinación se requiere el análisis denominado curva granulométrica y que emplea una serie de tamices (Tabla A-1) por las cuales se pasa una cantidad conocida de empaque.

Numero de serie	Apertura (mm)
100	0.140
70	0.210
50	0.297
40	0.420
30	0.595
20	0.841
16	1.190
12	1.680
8	2.380
6	3.360
4	4.760
¼	6.360
3/8	9.510
½	12.70
¾	19.00
1	25.40

Tabla A4.1 Serie Americana de tamices

La determinación de la curva granulométrica es un análisis que se emplea no-solo en tratamiento de agua sino, en general, para caracterizar cualquier material en general como se requiere en mecánica de suelos, la industria de la construcción etc.

**Materiales:**

Juego de tamices estandarizados de tamaño consecutivo (Tabla A-1)

Agitador mecánico (Ro-tap)

Espátula

Cápsulas de aluminio

Balanza analítica

**Procedimiento:**

1. Colocar la muestra (se recomienda de 100 a 1000 gramos) en un juego de tamices estandarizados de tamaño consecutivo dispuestos en orden decreciente de apertura y efectuar un cribado intenso durante 5 minutos como mínimo en agitador mecánico (Ro—tap)
2. Se pesa la muestra retenida en cada malla y se calcula el porcentaje que representa del total de la muestra.
3. Se suman los porcentos anteriores de forma acumulativa para cada tamaño con el objeto de obtener el porcentaje retenido acumulado en cada malla, es decir, la fracción que es mayor que el tamaño de la apertura correspondiente y que por tanto no pasa a los tamices menores.
4. Se calcula la fracción del material que es mayor que el tamaño de la criba correspondiente, restándole al 100% cada uno de los valores anteriores.
5. Sé gráfica en papel semilogaritmico la apertura en mm contra el porcentaje que pasa acumulado y se obtiene la curva granulométrica.

6. El tamaño efectivo (TE) se obtiene leyendo el valor de la apertura para el 10% y representa el tamaño de la décima parte del material que pasa la criba y que determina la eficiencia de filtración.
7. El valor de coeficiente de uniformidad (CU) se calcula dividiendo los tamaños correspondientes al 60% y 10% de dicha curva.

## COMPACTACIÓN

Es una medida directa en el experimento, la cual determina el % de compactación del medio.

**Materiales:**

Regla graduada

**Procedimiento:**

Se mide con una regla graduada la cantidad que se compacto en medio (X) y se pasa a %

**Calculo:**

$$\% \text{ de compactación} = (X * 100\%) / 100 \text{ cm}$$

Donde X = cantidad de compactación en centímetros.

## DENSIDAD REAL

**Materiales:**

Matraz aforado de 500ml



Espátula

Cápsulas de porcelana

Piseta

Balanza analítica

Procedimiento:

1. Se pesa una cantidad de muestra ( $p_a$ )
2. Se pesa un matraz aforado ( $p_m$ )
3. La muestra se introduce en el matraz, se afora con agua destilada y se vuelve a pesar ( $p_f$ )
4. La densidad real se calcula de la siguiente manera:

Peso del agua =  $p_f - p_m - p_a$

Volumen del agua = Peso del agua / densidad del agua

Volumen de la muestra ( $v_m$ ) = Volumen aforado ( $v_a$ ) - Volumen del agua

Densidad real =  $p_a / v_m$

## DENSIDAD APARENTE

Materiales:

Probeta graduada de 500 ml

Espátula

Cápsulas de porcelana

Procedimiento:

1. Se pesa una cantidad de muestra ( $p_a$ )

2. La muestra se introduce a una probeta graduada, se agita y se deja la muestra asentar en su forma natural, si es necesario, se dan pequeños golpes en el fondo para que la muestra asiente.
3. Se mide el volumen que ocupa la muestra en la probeta (vm)
4. La densidad aparente se calcula de la siguiente forma:

Densidad aparente = peso de la muestra (pa) / Volumen que ocupa la muestra (vm)

## IIUMEDAD

La determinación de contenido de agua está entre los métodos más usados en el análisis de suelos. El contenido de agua de suelo afecta tanto el comportamiento y uso de suelo que prácticamente cada tipo del estudio del suelo requiere una medida del contenido de agua.

Tradicionalmente el contenido de agua ha sido expresado como la relación de la masa del agua en la muestra y la masa de la muestra después de haberse secado a una temperatura constante de 105 °C. Alternativamente, el volumen de agua presente en un volumen de unidad de suelo puede usarse como una medida de contenido de agua. Así el contenido de agua tan comúnmente usado en el estudio de suelo es una relación de las dimensiones de dos masas o de dos volúmenes.

### Método gravimétrico

Este método involucra pesar una muestra humedad y secarla en un horno a 105 °C, calculando la masa perdida como un porcentaje de la masa del suelo seco. El método aparentemente es ideal para obtener resultados absolutos. De hecho, no es tan ideal por varias razones. El agua es retenida por los componentes del suelo hasta que alcanza un estado seco cuando se mantuvo a 105 °C. Las muestras de suelo continúan disminuyendo su masa lentamente cuando se mantuvo por varios días a 105 °C. Muchas muestras de suelos contienen materiales orgánicos, algunos de los cuales son volátiles a 105 °C, por lo que la disminución en la masa puede ser debido a la volatilización de componentes. Además,

existe el problema de control de temperatura. Los hornos que usan la mayoría de los laboratorios pueden mantener la temperatura en un intervalo de 100-110 °C por lo que la temperatura real del muestreo no es medida.

A pesar de estas imperfecciones, el método es usualmente conveniente para obtener una estimación del contenido de agua en suelos.

### Materiales y equipo

Cápsulas de porcelana

Espátula

Balanza analítica

Desecador, que contenga desecante activo

Estufa (100-110 °C)

### Procedimiento:

1. Obtener una muestra del suelo a estudiar. Es importante que la muestra no sea expuesta al medio ambiente para prevenir evaporación de agua, se recomienda tenerlas guardadas en recipientes impermeables durante su transportación al laboratorio.
2. Pese la muestra humedad en una balanza analítica con una precisión de 0.01 g
3. Ponga las cápsulas que contienen la muestra de suelo húmedo en el horno a temperatura prefijada de 105 °C.
4. Seque la muestra hasta la pérdida total de agua. Comúnmente, para muestras flojas con un espesor de unos cuantos centímetros, entre 24 y 48 horas es un tiempo adecuado para el secado. Es importante establecer el periodo requerido de secado para un conjunto de muestras. Esto puede hacerse controlando el valor de cambio de pesado de unas muestras representativas.
5. Quite las muestras del horno, reemplace las muestras al desecador.

6. después de haberse enfriado las muestras a la temperatura ambiente, pese las muestras en una balanza analítica con una precisión de 0.01 g.
7. Calcule el contenido de agua como un porcentaje de la masa de suelo seco como se indica a continuación

$$\{(masa de muestra humedad - masa de muestra seca) / masa de muestra seca\} * 100$$

## pH

### Materiales:

Vasos de pp. De 100 ml

Espátula

Balanza analítica

Pipeta de 25 ml

Bureta de 50 ml

Potenciómetro

Agua desionizada

### Procedimiento:

Pese 5 g de muestra en un matraz de 100 ml. Con una precisión de 0.01 g

Agregar 50 ml de agua desionizada y agitar vigorosamente durante 30 minutos o dejar reposar durante 24 horas.

Mida el pH con el potenciómetro directamente

Registre el pH medido

## POROSIDAD

Es una medida indirecta del medio, se calcula a partir de la densidad real y de la densidad aparente

Calculo:

$$\% \text{ Porosidad} = \{ (\text{Densidad real} - \text{Densidad aparente}) / (\text{Densidad real}) \} \cdot 100$$

## TEMPERATURA

Se mide directamente en el experimento con un termómetro de mercurio. Se toma la temperatura y se registra.

## MATERIA ORGÁNICA E INORGÁNICA

El contenido de cenizas en suelos orgánicos es un componente importante de la matriz de suelo que refleja el grado de enriquecimiento mineral. Comúnmente, cuando aumenta considerablemente el material orgánico, el contenido de nutrientes disponibles también aumenta. El aumento en el contenido de cenizas en los suelos puede ser debido a varios factores, tal como la mineralización de materia orgánica, la aplicación de fertilizantes minerales, introducción de elementos inorgánicos por agua de riego, influjo de elementos minerales durante inundaciones y su deposición desde el polvo atmosférico

Hay básicamente dos procedimientos para la determinación del contenido de cenizas (fracción inorgánica) de suelos, el método de cenizas secas y el método de cenizas mojadas. El método de cenizas secas ha sido empleado ampliamente para (1) determinar el contenido de cenizas de suelos orgánicos, (2) estimar el contenido orgánico de materia en suelos y (3) el análisis de capas orgánicas en estudios ecológicos.

El método de cenizas secas involucra la remoción de materia orgánica por la combustión de la muestra a una temperatura media (370 a 600 °C) en donde la temperatura se regula por un horno. Si es necesario, las muestras se secan con anterioridad a cenizas. La sustancia que permanece después de la ignición es la ceniza e incluye impurezas minerales tal como arenas. Los recipientes sugeridos para este método son porcelanas, el cuarzo y platos de platino.

**Materiales:**

Horno, 550 °C

Cápsulas de porcelana, de 30 ml

Desecador con desecante activo

Balanza analítica

Espátula

Horno eléctrico, regulado a temperatura constante de 105 °C

**Procedimiento:**

1. Pese 2.0 gramos de muestra en una cápsula de porcelana de 30 ml.
2. Determine la masa de la cápsula de porcelana, deberá estar a peso constante (24 horas en una estufa a 105 °C)
3. Lleve gradualmente la temperatura del horno a 375 °C y manténgalo por una hora, posteriormente ponga la muestra y regule la temperatura del horno a 550 °C.
4. Mantenga las muestras en el horno en un tiempo de 16-20 horas
5. Quite las cápsulas del horno y páselas a un desecador con desecante activo
6. Pese las cápsulas con una precisión de 0.1 g en una balanza analítica
7. Determine el contenido de materia orgánica e inorgánica de la siguiente manera:

$$\% \text{ Materia inorgánica} = 100 * (a - c) / (b - c)$$

Donde a = peso final de la muestra; b = peso inicial de la muestra; c = peso de la cápsula de porcelana

$$\% \text{ Materia Orgánica} = 100 - \% \text{ contenido mineral (materia inorgánica)}$$

**ANEXO V**  
**ARTÍCULOS PUBLICADOS**

CONGRESO NACIONAL 2000

Ciencia y Conciencia  
Compromiso Nacional con el Medio Ambiente

XII CONGRESO NACIONAL 2000



XII CONGRESO NACIONAL 2000  
Ciencia y Conciencia  
Compromiso Nacional con el Medio Ambiente



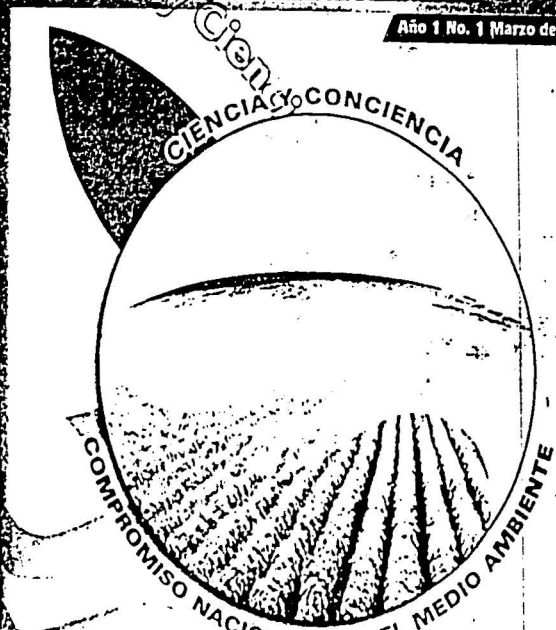
Año 1 No. 1 Marzo del 2000



M  
E  
M  
O  
R  
I  
A



TOMO II



FEMISCA

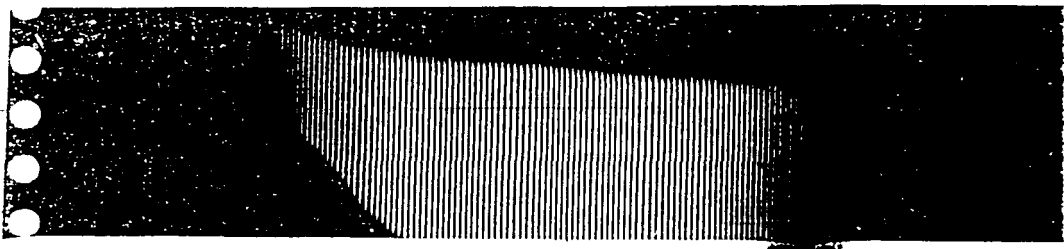
Marzo 21 al 24 del 2000 Morelia, Mich.

FEDERACION MEXICANA DE INGENIERIA SANITARIA Y CIENCIAS AMBIENTALES, A. C.  
SECCION MEXICANA AIDIS



Carretera México-Toluca  
Km. 97.2 Col. Narvins  
C.P. 04500 México D.F.  
Tel: 52-55-27-21-85-78-54-42  
Fax: femisca@femisca.com  
55-27-21-85-78-54-42 y 55-27-21-85





### EVALUACIÓN FISCOQUÍMICA DE CUATRO MEDIOS FILTRANTES PARA SISTEMA DE TRATAMIENTO BIOLÓGICOS DE GASES BASADOS EN BIOFILTRACIÓN

Juan Manuel Morgan-Sagastumo, Saulo Amaya Aguilar, Sergio Revah Moiseev\* y Adalberto Noyola Robles

Coordinación de Bioprocesos Ambientales, Instituto de Ingeniería, UNAM, Apdo Postal 70-477, 04510, Ciudad de México, México D.F., México FAX (5) 616-7164 E-mail [prms@ccia.azccscc.unam.mx](mailto:prms@ccia.azccscc.unam.mx) Departamento de Procesos Industriales de la Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa Tel 7244648, Fax 7244900, [smvsh@xanum.unam.mx](mailto:smvsh@xanum.unam.mx)

#### RESUMEN

Se presenta la evaluación fisicoquímica de cuatro medios filtrantes para sistemas de tratamiento biológico de gases basados en biofiltros. Para conformar los medios filtrantes se utilizó como base así como la combinación de ésta con bagazo de caña, tezontle y lodo biológico extralido de los sistemas de lodos activados. A los medios filtrantes se les evaluó la capacidad de retención de humedad y caída de presión en el medio para mencionar los aspectos generales más importantes en función de la composición de los medios filtrantes, del flujo de gas aplicado a las columnas de biofiltración y de la temperatura de operación. Con base en los resultados obtenidos, en términos generales, se recomienda a la composta como medio filtrante en los biofiltros pues al compararlo con los otros medios filtrantes evaluados las mejores características de retención de humedad y baja caída de presión, aspectos fundamentales en la operación de las unidades de biofiltración de gases.

#### INTRODUCCIÓN

Uno de los procesos biotecnológicos más importantes aplicado para el tratamiento de malos olores es la biofiltración. Este sistema se basa en la interacción del gas con un medio orgánico cuya actividad de degradación proviene de los microorganismos que viven y se desarrollan en él. La suma de ambos se denomina medio biológico filtrante, constituyente esencial del biofiltro. Este sistema fue propuesto desde 1920 para tratar malos olores en plantas de tratamiento de aguas residuales (Van Groenestyn y Hesselink, 1993) sin embargo una propuesta más formal fue hecha por Pruess en 1940 según afirman Utkin *et al.*, (1992)

El principal componente del biofiltro es el medio biológico filtrante donde los contaminantes orgánicos, indeseables en el aire, en primera instancia, son absorbidos y adsorbidos para posteriormente ser degradados posteriormente por microorganismos.

Dos aspectos generales importantes que determinan la operación de un biofiltro para el tratamiento de gases se refieren a la calidad del medio filtrante y a las condiciones de flujo de gas prevalentes dentro de la unidad de biofiltración. Por calidad de medio se entiende el tipo de microorganismos que viven en el medio, su tasa de crecimiento, la superficie ofrecida por el medio filtrante, el soporte de la biomasa, la disponibilidad de macro y micronutrientes en el medio filtrante, la humedad, pH, alcalinidad, temperatura, etc.

Por otro lado, el concepto "condiciones de flujo" se refiere al grado de distribución del gas en las condiciones de mezclado existentes dentro del biofiltro. La interdependencia de los aspectos determina, en términos generales, su operación, además de la carga de sustancia orgánica. Considerando esto, el presente trabajo se enfoca al estudio de los efectos de la composición del medio filtrante (variación de tipo de agentes abutantes con composta) sobre factores como la caída de presión, contenido de humedad, densidad real y aparente del medio, su poro, tamaño efectivo de partícula en función de tres cargas superficiales de aire y en función de la temperatura del biofiltro. Aunado a esto se hacen estudios de secado de distintos medios filtrantes en función de la temperatura del aire y de su humedad.

procedo para la determinación de

determinó la isoterma de secado osciló entre 18 y 25 °C (en e los sometidos cada uno de e 100% de humedad). El tiempo de los medios filtrantes utilizados fue. La muestra con lodo de purga de un El bagazo de caña fue molido lodo utilizado para mezclarse c de tratamiento de aguas re: para alcanzar una humedad del l oposita. En la Figura 1 se mues erimental. Las celdas se empac 607 L del medio. La humedad

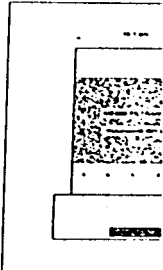


Fig. 1 Disposición experimental p.

Para la determinación de l la adición de agua sobre la lidad, el tamaño efectivo y ca

la composición de medio de una combinación de 75% de composta y 25% de bagazo de caña triturada en 10, 40 y 70 l/min. Con la adición de agua en la p los se efectuaron por dupl rante cada 20 cm hasta 1 efectivo, pH, alcalinidad, con en las columnas empac

### MÉTODO EXPERIMENTAL

## DISEÑO DE FILTRANTES PARA SISTEMAS BASADOS EN BIOFILTRACIÓN

J. Sergio Revah Moisés

Alcaldía Municipal, Depto. de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, México, D.F. Tel: 7244648, Fax: 7244648

Los filtros para sistemas de biofiltración se diseñan considerando la naturaleza y el tipo de gas aplicado a los filtros, en los resultados obtenidos durante la operación de los filtros en los biofiltros, las características de los medios filtrantes en la operación de los biofiltros.

N

El medio filtrante para el tratamiento de gases debe tener una interacción del gas con los microorganismos que viven en el medio filtrante, constituyente esencial en plantas de tratamiento de gases, una propuesta más formal.

El medio filtrante biológico donde los gases se adsorben y adsorben para

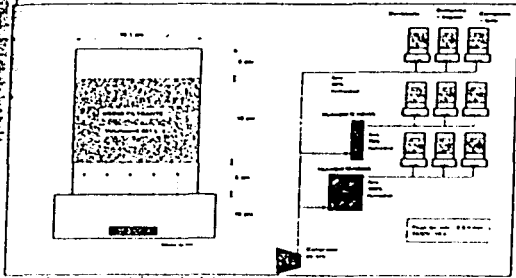
la operación de un biofiltro para biofiltración, considerando el tipo de microorganismos que se ofrecen por el medio filtrante y los nutrientes en el medio filtrante.

El grado de distribución de los gases con las partículas, y la interdependencia de los gases de la carga de sustancia orgánica, de los efectos de la composición (composta) sobre factores como el pH, la aparente del medio, su conductividad, y en función de los distintos medios filtrantes en los biofiltros.

### La determinación de Isotermas de secado

La isoterma de secado a una temperatura de 35 y 5°C y a una temperatura ambiente de 18 y 25 °C (en este caso no se considera una isoterma) de tres medios filtrantes se realizó cada uno de ellos a un flujo de aire de 2.5 l/min con distinta humedad (30, 75 y 100% humedad). El tiempo de contacto en cama vacía fue de 19.2 segundos.

Los medios filtrantes utilizados fueron: composta, composta con bagazo de caña (50/50 % v/v) y bagazo de caña. Todo de purga de un sistema de lodos activados completamente mezclados (50/50 % v/v) de caña fue molido y triturado hasta obtener partículas o fibras de 2 a 3 mm de largo. El medio para mezclarse con composta fue extraído del sistema de lodos activados de la planta de aguas residuales de Ciudad Universitaria de la UNAM. El lodo fue secado hasta una humedad del 60% el cual fue mezclado en una proporción 50-50% v/v con la composta. La Figura 1 se muestra un esquema de las celdas utilizadas así como su disposición. Las celdas se empacaron con 10 cm de medio filtrante lo que representa un volumen de medio. La humedad relativa del medio se determinó por diferencia de peso

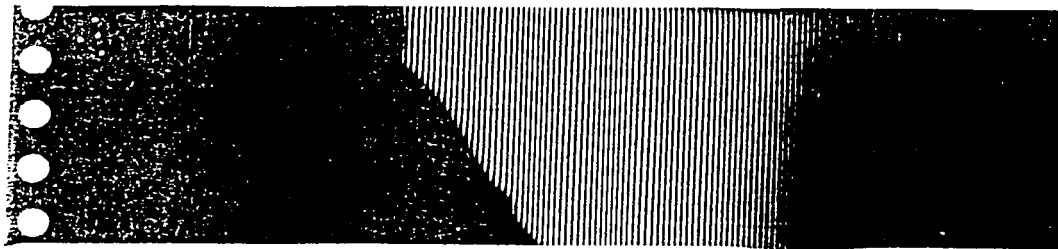


Disposición experimental para la determinación de las isotermas de secado de medio filtrante

Para la determinación de los efectos de la composición del medio filtrante, el flujo de agua sobre la humedad del medio filtrante, la densidad real y aparente, la humedad, el tamaño efectivo y caída de presión.

La composición de medio filtrante, es decir se utilizó un medio constituido por 100% composta, una combinación de 75% composta con 25% tezontle como agente abultante, una combinación de 75% composta con 25% de lodo biológico y una combinación de 75% composta con 25% de bagazo de caña triturada.

Las columnas empacadas con los medios filtrantes se sometieron a tres flujos de aire 100% húmedo con velocidades de 10, 40 y 70 l/min. A su vez, se efectuaron experimentos con aire húmedo y aire seco. El flujo de agua se efectuó por duplicado. En cada uno de los experimentos, al cabo de 7 días de operación permanente, se evaluaron los siguientes aspectos en función de la altura del medio filtrante: cada 20 cm hasta 1 m: humedad, densidad real, densidad aparente, porosidad, conductividad, pH, alcalinidad, compactación y temperatura. Por otro lado, se determinó la caída de presión en las columnas empacadas con medio filtrante mediante manómetros diferenciales de agua.



agua. Diariamente, por un tiempo de 20 minutos, las columnas con medio filtrante fueron sometidas a distintos flujos de aire (de 0 a 120 l/min cada 20 l/min). Para cumplir con el objetivo planteado se construyó la planta piloto mostrada en la Figura 2, constituida por los siguientes elementos: Dos torres para humidificación de aire, tres columnas de biofiltración, una columna testigo y Rotámetros. Ambas torres de humidificación fueron construidas utilizando un tubo de PVC de 6" (0.1515 m) de diámetro con una altura de 1.2 m. Las torres fueron inundadas y con una altura de empaque de 90 cm. El empaque utilizado es de tipo Rashing obtenido de tubos de PVC de 1/2". Las columnas de biofiltración fueron construidas con tubos de PVC de 6" de diámetro con una altura de 1.2 m. Estas columnas se empacaron con los medios filtrantes a evaluar con una altura de 1 m.

Tabla 1 Condiciones experimentales utilizadas en las columnas con distintos medios filtrantes

Experimento	Composición de medio filtrante	Flujo de aire 100% húmedo (l/min)	Adición de agua al medio filtrante
1	Composta 100%	10	Sin
2	Composta 100%	40	Sin
3	Composta 100%	70	Sin
4	Composta 100%	10	Con
5	Composta 100%	40	Con
6	Composta 100%	70	Con
7	Composta 75% + zeonite 25%	10	Sin
8	Composta 75% + zeonite 25%	40	Sin
9	Composta 75% + zeonite 25%	70	Sin
10	Composta 75% + zeonite 25%	10	Con
11	Composta 75% + zeonite 25%	40	Con
12	Composta 75% + zeonite 25%	70	Con
13	Composta 75% + lodo 25%	10	Sin
14	Composta 75% + lodo 25%	40	Sin
15	Composta 75% + lodo 25%	70	Sin
16	Composta 75% + lodo 25%	10	Con
17	Composta 75% + lodo 25%	40	Con
18	Composta 75% + lodo 25%	70	Con
19	Composta 75% + bagazo 25%	10	Sin
20	Composta 75% + bagazo 25%	40	Sin
21	Composta 75% + bagazo 25%	70	Sin
22	Composta 75% + bagazo 25%	10	Con
23	Composta 75% + bagazo 25%	40	Con
24	Composta 75% + bagazo 25%	70	Con

Para el caso donde se agregó agua directamente al medio filtrante se añadió 30, 115 y 200 l de agua al día para los flujos de aire de 10, 40 y 70 l/min, respectivamente.

**RESULTADOS**

**Efectos de la humedad en la granulometría de la composta.**

El tamaño efectivo es el tamaño promedio de la partícula medido como el claro en milímetros de tamiz que deja pasar el 10% en peso de las partículas y que retiene el 90% restante. El índice de 0.24 a 1.7 mm correspondiente a composta seca y húmeda, respectivamente, refleja el incremento del tamaño de partícula debido a la cohesión de partículas finas provocada por el contenido de agua en el medio. La Figura 3 muestra una distribución extensa de las partículas de composta seca en un intervalo de apertura de malla más amplio que la mostrada por la composta húmeda.

Por otro lado, el coeficiente de uniformidad es la relación entre el tamaño del tamiz que deja pasar el 60% de la muestra dividido entre el que sólo deja pasar el 10%. Esta medida es un tipo de

la curva granulométrica que da a entender que al incrementarse el tamaño de las partículas en consecuencia con el efecto del agua en el medio, la uniformidad es más baja cuando hay más partículas en función de la apertura de malla.

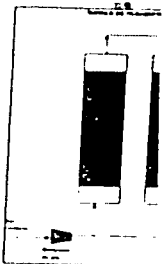


Figura 2 Diagrama de flujo del sistema de biofiltración del medio filtrante, el flujo real y aparente, la porosidad, etc.

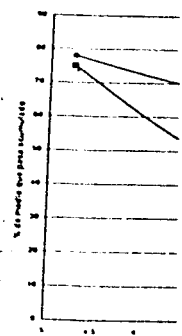


Figura 3 Curvas granulométricas de composta seca y húmeda.



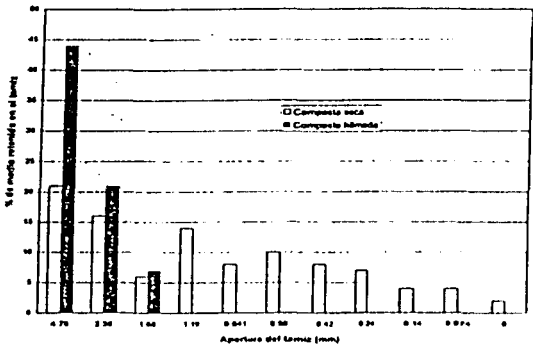
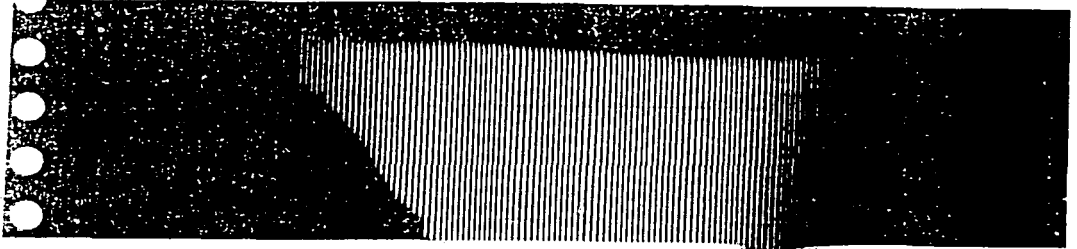


Figura 4 Curvas de distribución de partícula de la composta húmeda y seca utilizada como medio.

Determinación de las isotermas de secado de tres medios filtrantes distintos.

En las figuras 5, 6 y 7 se muestran las curvas de equilibrio aire-agua de los medios filtrantes sustituidos por composta, composta con lodo y composta con bagazo de caña a 35 °C y 5 °C. Del análisis de estas figuras es posible concluir, en términos generales, que la composta sola tiene las mejores características en cuanto a la retención de la humedad. Para el caso de una temperatura de 5 °C es superada por el medio combinado composta-lodo que en términos hipotéticos podría afirmarse que al agregar materia orgánica al medio cuando existen temperaturas bajas, se favorece la retención de la humedad. El bagazo de caña no favoreció la retención de la humedad en función de las temperaturas utilizadas en estos experimentos lo que hace suponer que el hecho de agregar agentes abultantes celulósicos a la composta provocan la disminución de la capacidad de retención de agua por parte del medio así conformado. Por otro lado, también es posible observar que a mayor temperatura es mayor el secado de los medios, lo cual es de esperarse.

Efectos de la composición del medio filtrante, el flujo de aire y la adición de agua sobre la humedad del medio filtrante, la densidad real y aparente, la porosidad y el tamaño efectivo de las partículas.

El análisis de resultados se llevó a cabo por medio de un diseño factorial de experimentos (análisis de Variancia) con el objeto de cuantificar la significancia de la influencia de la composición del medio, del flujo de aire y de la adición de agua al medio filtrante sobre la distribución de la humedad en el medio filtrante, su densidad real y aparente, porosidad y el tamaño efectivo de las partículas del medio filtrante.

Al analizar los resultados de significancia de los experimentos es posible concluir lo siguiente:

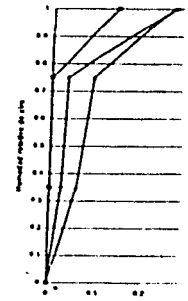


Figura 5 Curvas de equilibrio aire-agua de los medios filtrantes a 35 °C.

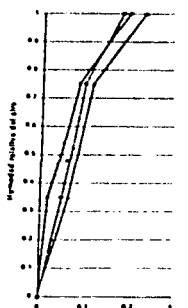


Figura 6 Curvas de equilibrio aire-agua de los medios filtrantes a 5 °C.

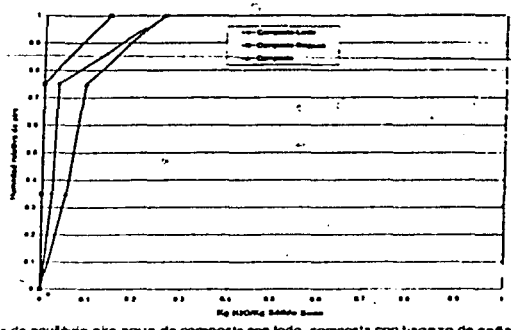
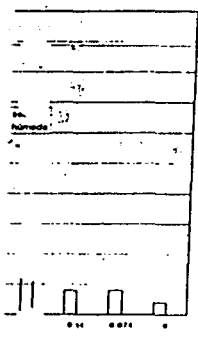


Figura 5 Curvas de equilibrio aire-agua de composta con lodo, composta con bagazo de caña y composta sola

húmeda y seca utilizada como medio

s filtrantes distintos.

de aire-agua de los medios filtrantes con bagazo de caña a

g tales, que la composta sola. Para el caso de una temperatura que en términos hipotéticos existen temperaturas bajas, se favorece la disminución de la humedad en el medio, lo que hace suponer que el hecho de la disminución de la capacidad de

en su naturaleza es mayor el secado

e y la adición de agua a la porosidad y el tamaño efectivo

factorial de experimentación. La influencia de la composición del medio filtrante sobre la distribución de la porosidad y el tamaño efectivo

e. Es posible concluir lo siguiente:

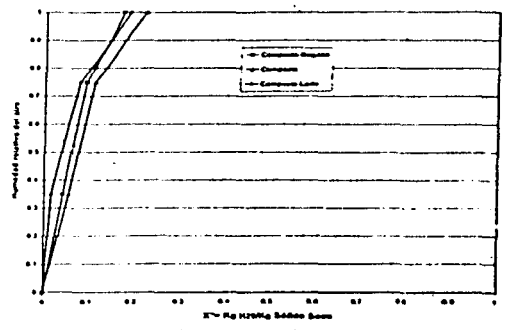
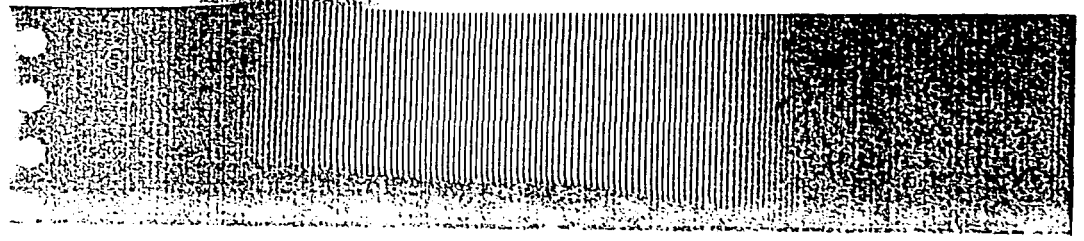


Figura 6 Curvas de equilibrio aire-agua de composta con lodo, composta con bagazo de caña y composta sola a temperatura ambiente que oscila entre 16 y 25°C.



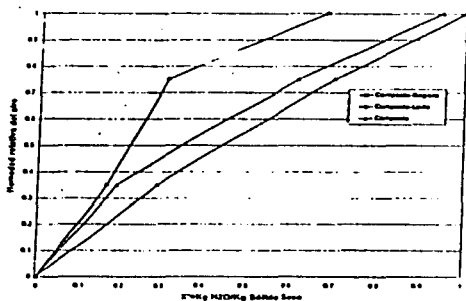
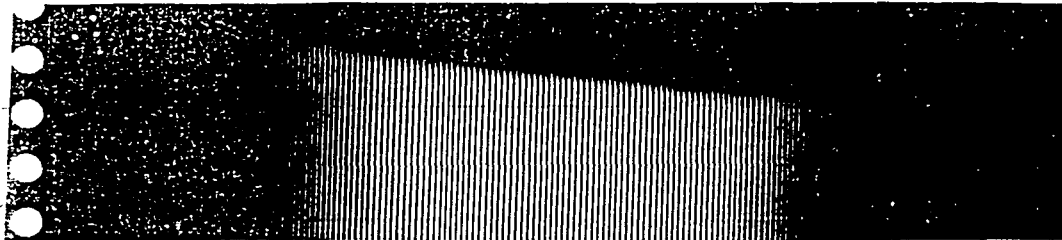


Figura 7 Curvas de equilibrio aire-agua de composta con lodo, composta con bagazo de caña y composta sola a 5 °C.

**Con respecto a la humedad.** Al existir una variación en la composición del medio filtrante de 100% composta-25% lezonille a 100% composta para un flujo de aire entre 10 y 40 l/min hay un incremento significativo en la afectación de este cambio de composición con respecto a la retención de la humedad por parte del medio filtrante obteniéndose una mayor retención de la humedad del medio con 100% composta, de tal forma que en las secciones superiores de la columna se retiene más agua que en las inferiores. Una causa probable de la distribución desigual de humedad en la columna se debe a que el aire no entra a la columna de biofiltración con un 100% de humedad del medio, como las primeras capas de composta que entran en contacto con este aire se secan humedeciendo a la vez el aire que como consecuencia llega saturado con agua a la parte superior de la columna.

La adición directa de agua en la parte superior de la columna afectó significativamente la humedad del medio pero solamente en los últimos 20 cm de la parte superior de la columna. A un flujo de aire de 70 l/min, el factor de humedad se ve afectado significativamente por la variación en la composición del medio aunque en menor significancia que a flujos menores de aire (10 y 40 l/min de aire). A un flujo mayor de aire, con una humedad relativa menor al 100%, el efecto de secado del medio es más intenso, efecto que produce la homogeneización del medio filtrante desde el punto de vista del tamaño de partícula.

Las variaciones entre los medios composta vs composta-lodo y composta vs composta-bagazo, afectan significativamente el contenido de humedad en las columnas a diferencia de lo observado en los medios composta vs composta-lezonille para un flujo de aire de 10 l/min. Sin embargo, la comparación de composta vs composta-lezonille, \*composta vs composta-lodo y composta vs composta-bagazo para flujos de aire entre 10 y 70 l/min, es una constante de variación significativa de la humedad en los primeros 20 cm debido al cambio de flujo de aire.

El efecto de la adición de agua al medio filtrante con respecto al contenido de humedad sobre los estratos superiores de la columna es significativo independientemente del flujo de aire y composición del medio filtrante.

**Con respecto a la densidad real del medio filtrante.** En este aspecto es posible observar un incremento de los valores de densidad de un medio con 100% composta a uno con 75% composta con 25% de bagazo de caña. En el análisis de variancia efectuado (no mostrado en el texto) se observa que los cambios significativos en densidad real del medio se llevan a cabo al cambiar

el filtrante de composta a composta con bagazo de caña en etapas de 20 cm de la columna.

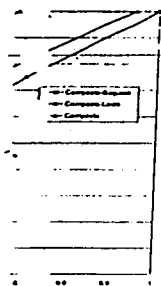
**Con respecto a la compactación.** La columna está sometida a un flujo continuo de filtrante que en las primeras etapas se es de esperarse el fenómeno de compactación de bagazo de caña a la columna es una de las funciones de la composta con lodo y composta corrientemente. La adición de agua al medio favorece la compactación del medio.

**Con respecto a los otros factores.** Los resultados son significativos en sus valores en función de los

estudios de la caída de presión en función del flujo de aire aplicado y del tiempo de operación.

Con respecto, de las figuras 8 y 9.

En la comparación entre medios filtrantes se observa, en términos generales, que las condiciones de experimentación de la columna y para el caso de las columnas de biofiltración de presión. Este hecho se ve favorecido por la acción del aire en flujos mayores, la formación de canales. Estos canales ofrecen menor resistencia al adionar agua al medio, se favorece la adición de agua. Para el caso de la biofiltración en los perfiles de caída de presión de la columna en donde se observan mayores caídas de presión. La adición de agua a las columnas de composta que incrementa la humedad en el medio se favorece la caída de presión que a bajos flujos de aire. En la figura 9 se observa que los medios filtrantes en segundo lugar, presentan una caída de presión en los medios con 100% de biofiltración, el medio filtrante que menor



Compostas con bagazo de caña y compostas...

... del medio filtrante de 75%... entre 10 y 40 l/min hay un... con respecto a la retención... mayor retención de la humedad en un... valores de la columna se retiene... desigual de humedad en la... con un 100% de humedad de tal... contacto con este aire se secan... con agua a la parte superior...

afectó significativamente la humedad... de la columna... significativamente por la variación... flujos menores de aire (10 a 40... al 100%, el efecto de... del medio filtrante desde...

y compostas vs compostas-bagazo no... a diferencia de lo observado en... de 10 l/min. Sin embargo, la... compostas lodo y compostas vs... constante de variación significativa...

a... de humedad sobre los... mente del flujo de aire y composición...

... respecto es posible observar un... compostas a uno con 75% compostas... (no mostrado en el texto) se... llevan a cabo al cambiar de...

medio filtrante de composta a composta con bagazo de caña únicamente y ello transcurre en las dos primeras etapas de 20 cm de la columna.

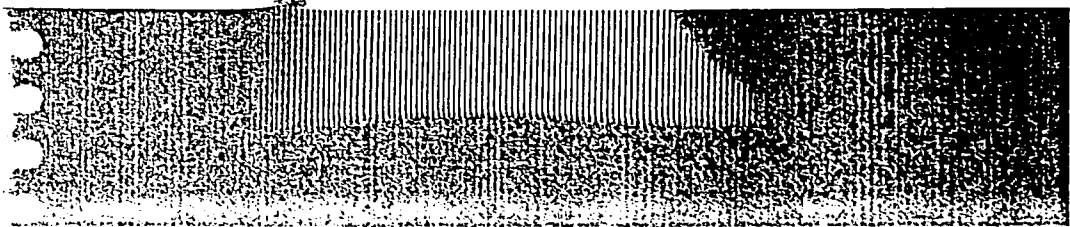
Con respecto a la compactación del medio filtrante. Al cabo de 7 días de operación, donde la columna está sometida a un flujo constante de aire y a la adición de agua y en el caso particular del medio filtrante que en las primeras etapas de la columna se somete al peso del resto del medio filtrante, es de esperarse el fenómeno de compactación e incremento de la densidad en esa zona. La adición de bagazo de caña a la composta amortiguó el fenómeno de compactación (de 11 al 3%) lo cual es una de las funciones de los agentes abultantes. Para el caso de los medios filtrantes compostas con lodo y composta con tezontle se observaron compactaciones máximas del 9 y 5%, respectivamente. La adición de agentes abultantes como el bagazo de caña y el tezontle disminuyen el fenómeno de compactación del medio filtrante.

Con respecto a los otros factores. Con respecto a los demás factores analizados no hay cambios significativos en sus valores en función de la composición del medio, del flujo de aire o adición de agua.

Estudios de la caída de presión en el lecho filtrante en función de su composición, del flujo de aire aplicado y del tiempo de operación.

A este respecto, de las figuras 8 y 9 es posible obtener las siguientes conclusiones

Una comparación entre medios filtrantes y la adición o no de agua la proporciona la Figura 8. De ella se desprende, en términos generales, que la caída de presión en los medios filtrantes, bajo las condiciones de experimentación de este trabajo, disminuye en función del tiempo de operación de la columna y para el caso de las columnas sometidas al mayor flujo se observa un decremento en las caídas de presión. Este hecho se explica por la formación de canales dentro del medio filtrante producidos por la acción del aire en movimiento a través del medio a lo largo del tiempo de tal forma que a flujos mayores, la formación de canales se lleva a cabo con mayor velocidad que a un flujo menor. Estos canales ofrecen menor resistencia al flujo de aire que el medio filtrante en sí. Por otro lado, al adicionar agua al medio, se observa un incremento en la caída de presión con respecto a la no adición de agua. Para el caso particular del medio composta-tezontle se produce una diferenciación en los perfiles de caída de presión/flujo de aire conforme transcurren los días de operación de la columna en donde la columna que es sometida al menor flujo de aire presenta las mayores caídas de presión. La adición de agua al medio filtrante produce un aglutinamiento de las partículas de composta que incrementa la caída de presión. Es de suponer que al haber un agente abultante en el medio se favorecen las canalizaciones de aire a altos flujos lo que conlleva una menor caída de presión que a bajos flujos, además de generar zonas muertas en el medio filtrante. De la Figura 9 se observa que los medios filtrantes composta-bagazo en primer término y composta-tezontle en segundo lugar, presentan las mayores caídas de presión y que al adicionar agua al medio filtrante se invierten los lugares de estos medios filtrantes además de que se incrementan las caídas de presión en los medios con respecto a la no adición de agua al medio filtrante. En términos generales, el medio filtrante que menor caída de presión presenta es la composta al 100%.





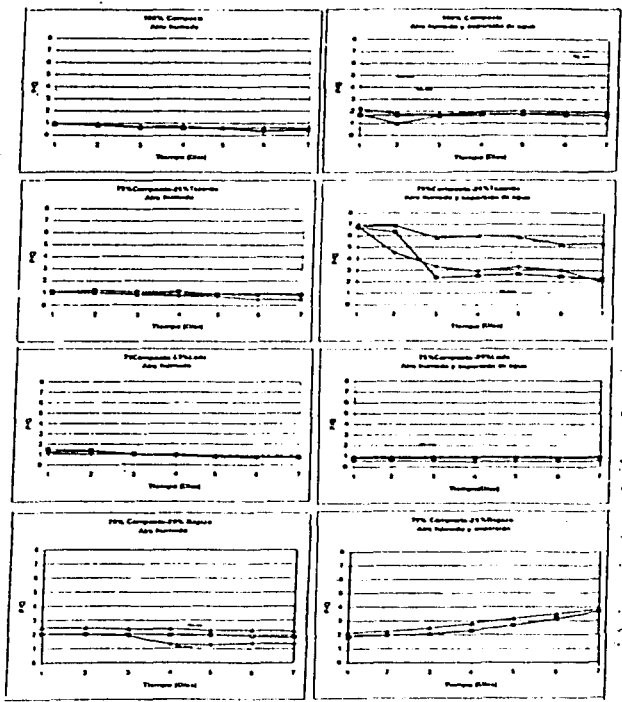
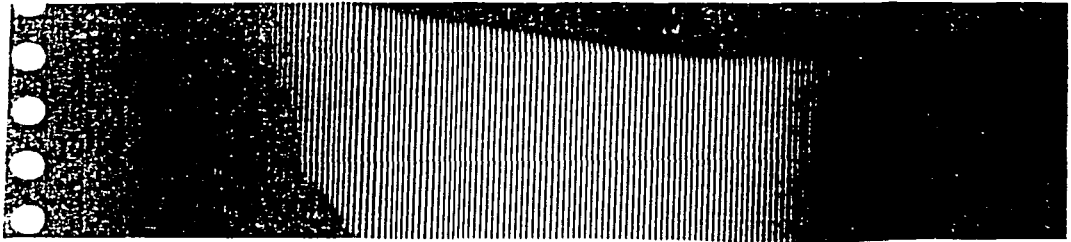


Figura 8 Evolución de la relación caída de presión-flujo de aire (P/Q) en distintos medios filtrantes durante 7 días de operación en función del flujo de aire suministrado a cada columna (▲, 10, ■, 40 y ♦, 70 l/areh/mn) sometido a aire 100% húmedo y aire 100% húmedo con adición de agua al medio

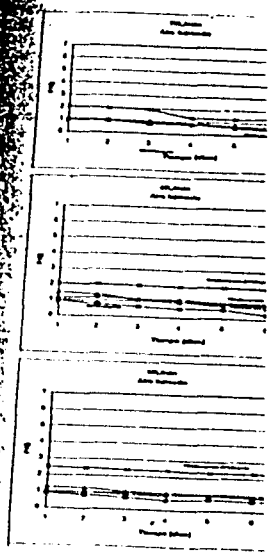


Figura 9 Evolución de la relación caída de presión-flujo de aire suministrado a cada columna (▲, 10, ■, 40 y ♦, 70 l/areh/mn) sometido a aire 100% húmedo y aire 100% húm

El hecho de agregar agua al medio fil  
refleja en el incremento en el tamaño  
coeficiente de uniformidad del medio.  
A mayor temperatura del aire influente  
del medio filtrante  
El medio filtrante constituido por 100%  
la retención de humedad en un intervalo  
El hecho de combinar la composta cc  
poroso (tezonite) produce un medio filtr  
en el medio filtrante

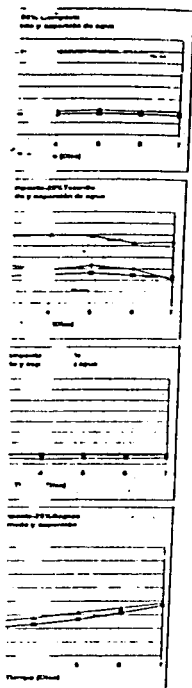


Figura 9 Evolución de la relación caída de presión-flujo de aire (P/Q) durante 7 días de operación en función del flujo de aire suministrado a cada columna (10, 40 y 70 l/are/min) en distintos medios filtrantes (■ 100% composta, ♦ 75% composta-25% tezontle, ▲ 75% composta-25% lodo, \* 75% composta-25% bagazo sometido a aire 100% húmedo y aire 100% húmedo con adición de agua al medio)

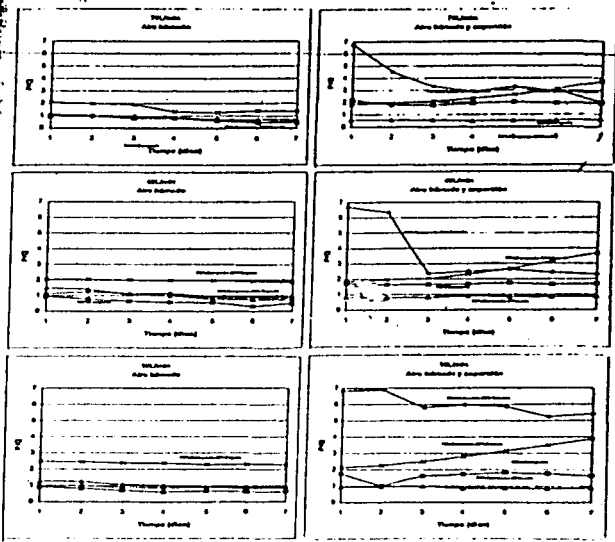


Figura 9 Evolución de la relación caída de presión-flujo de aire (P/Q) durante 7 días de operación en función del flujo de aire suministrado a cada columna (10, 40 y 70 l/are/min) en distintos medios filtrantes (■ 100% composta, ♦ 75% composta-25% tezontle, ▲ 75% composta-25% lodo, \* 75% composta-25% bagazo sometido a aire 100% húmedo y aire 100% húmedo con adición de agua al medio)

CONCLUSIONES

- El hecho de agregar agua al medio filtrante produce la cohesión de partículas finas lo que se refleja en el incremento en el tamaño efectivo de partícula así como en la disminución del coeficiente de uniformidad del medio.
- A mayor temperatura del aire influente a la columna se produce una mayor velocidad de secado del medio filtrante.
- El medio filtrante constituido por 100% composta posee las mejores características en cuanto a la retención de humedad en un intervalo de temperatura de aire comprendido entre 5 y 35°C.
- El hecho de combinar la composta con un agente abultante celulósico (bagazo de caña) o poroso (tezontle) produce un medio filtrante con bajas características para la retención del agua en el medio filtrante.

- La adición directa de agua al medio filtrante en la parte superior de la columna de biofiltración afecta significativamente la humedad del medio pero únicamente en los 20 cm superior de la columna, independientemente del medio filtrante utilizado.
- La adición a la composta de bagazo de caña como agente abultante disminuye o amortigua la compactación del medio filtrante.
- No existen cambios significativos con relación a la densidad aparente, porosidad, tamaño efectivo, pH, alcalinidad y temperatura de los medios filtrantes basados en un 100% composta, 75% composta-25% bagazo de caña, 75% composta-25% tezontle y 75% composta-25% todo al adicionarse agua o no directamente al medio filtrante o al variar el flujo de aire.
- Al cabo de 7 días de operación de las columnas de biofiltración e independientemente del medio filtrante utilizado, se evidencia un perfil de caída de presión donde la columna sometida a un flujo constante de aire (10 l/min) presenta la caída de presión más fuerte mientras que, y en sentido contrario, la columna sometida a altos flujos de aire (70 l/min) presenta la menor caída de presión. Esto debido a que un flujo alto de aire a través de la columna, durante 7 días de operación continua, produce canalizaciones dentro de la columna.
- El medio filtrante que menor caída de presión presentó es la composta. Los medios filtrantes basados en agentes abultantes como el tezontle y el bagazo de caña incrementan la caída de presión.

#### AGRADECIMIENTOS

Se agradece al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT proyecto 27776-B1) y a la Dirección General de Asuntos del Personal Académico de la UNAM (DGAPA) el apoyo económico otorgado para la realización de este proyecto.

#### REFERENCIAS

- Uilkin J.B., Yakimov M.M., Kozlyak E.I and Rogozhin J.S. (1992) "Biological air purification" *BioCycle*, October, pp. 613-620
- Van Groenestijn J.W. and Hesselink P.G.M. (1993) "Biotechniques for air pollution control" *Biodegradation* 4, pp. 283-301

#### BIODEGRADACIÓN MEDIANTE UN PROCESO

Artículo

Instituto de Ingeniería, I  
Ap. Postal 7071  
México

Los colorantes azo son de alta estabilidad a la luz y de los casos es necesario alcanzar su mineralización biofiltrando, uno anaerobio y otro aerobio (BA) para los resultados mostraron que el reactor anaerobio. Cuando de 48 mg/l, fue necesario decoloración en 72 horas biodegradadas en el BA acoplado requirió de 96 horas 75 %, necesitándose 72 horas AD79.

Los colorantes azo son encontrados en la biosfera (Seshadri y Bishop, 1994). Se ha demostrado que la mayoría de las bacterias anaerobias y algas son degradadas por bacterias aerobias, nitrógeno, halófilas requiriéndose largos períodos de biodegradación (Pasti-Gri

2000  
ANAIS  
V.1

VI OFICINA e SEMINÁRIO  
LATINO-AMERICANO de DIGESTÃO ANAERÓBIA

DESIGNADO

PROSAB  
L. 10.000/2000

ANAIS  
Volume I  
TRABALHOS COMPLETOS



VI OFICINA e SEMINÁRIO  
LATINO-AMERICANO de  
DIGESTÃO ANAERÓBIA

Recife 2000 - 5 a 9 de novembro  
Recife Palace Lucsim Hotel - Praia de Boa Viagem  
Pernambuco - Brasil

VI Latin American Workshop and  
Seminar on Anaerobic Digestion

VI Latin American Workshop and  
Seminar on Anaerobic Digestion

Realização e Organização:  
UFPE, USP, UFMG, UFRN, UFPB,  
UFES, UFRGS, UFSC, PUC-PR

187  
ants as inhibitory factors in anaerobic  
Conference, Berlin, pp. 552-558.  
ic degradation of lactic and acetic

C. Press, Inc.; Boca Raton, Florida;  
19th edn, American Public Health  
education, Washington DC, USA.  
macrobiotic-phased solids digester system.

### TRACER STUDIES AND PRESSURE DROP IN BIOFILTERS FOR CONTROL OF ODORS IN ANAEROBIC SYSTEMS

Juan M. Norgan-Sagastume\*, Saulo Amaya\*, Sergio Revah\*\* and Adelberto Noyola\*

\*Department of Environmental Bioprocesses, Engineering Institute, National Autonomous University of Mexico, Apartado Postal 70 412, 04510, Ciudad Universitaria, Coyoacan, Mexico, D.F., Mexico. FAX (5) 616-21-64 jnorga@puma1.unam.mx

\*\*Processes and Hydraulics Department of the Metropolitan Autonomous University - Iztapalapa, Tel. 7264648, Fax. 7264900, e-mail: srevah@saturn.unam.mx

#### ABSTRACT

This is a study on the pressure drop and gas distribution in four filter media for biological gas treatment systems based on biofilters. To conform the filter media sole component was used as well as a combination of sole component with cane bagasse, *Myrmica* (name given to volcanic scoria very common in Mexico) and biological sludge extracted from an activated sludge system. It was observed that pressure drop increases by using these bulking agents and adding water to the filter media. Pressure drop was reduced with operating some of the columns due to the effect of channels forming in the filtering bed. The bulking agents used (sawdust and cane bagasse) favor formation of gas channels in the media, which is observed by the reduction in mixing and decrease in the normalized average retention time of gas in the filter bed. For one part, pressure drop in the bed depends on the amount of channels formed, and on the other hand, on evolution and changes in these channels throughout the operating time of the columns.

#### KEY WORDS

Biofilter; gas; odors; pressure drop; water.

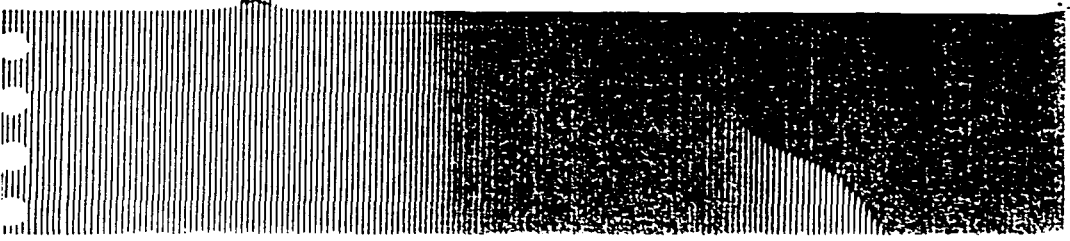
#### INTRODUCTION

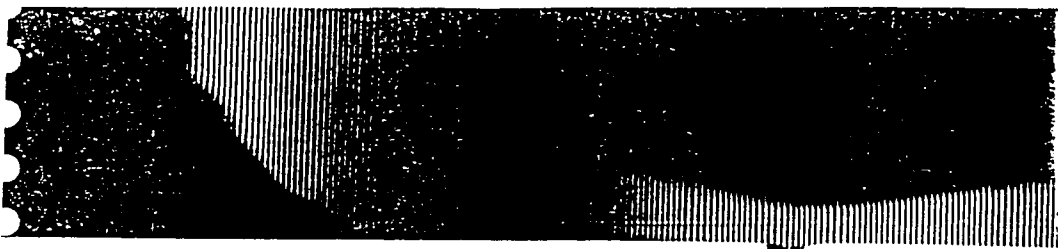
Biofiltration is one of the most important biotechnological processes applied to treat gas and control foul odors (Otengraf and Dilla, 1992). This system is based on the interaction of gas in an organic media where the degradation activity derives from microorganisms that live and develop in it. The sum of both is called biological filter media, the essential part of a biofilter. The main component of the biofilter is the moist biological filter media where undesirable compounds in the air or in a gas, are in first instance, adsorbed and absorbed for further degradation by microorganisms.

Three important general aspects that determine operation of a biofilter to treat gas refer to the quality of the filter media, prevailing conditions of gas flow inside the biofiltration unit and the substrate loading rate applied.

In a packed bed, pressure drop results from the loss of kinetic energy of gas and depends on characteristics of the fluid and characteristics of the packing. In this sense, pressure drop through a biofilter can be described as a function of the superficial load of gas ( $m^3$  of gas/ $m^2$ /h), of its density and viscosity, as also of particle size and distribution, porosity, moisture and void spaces in the filter media. In general terms, the curves, pressure drop vs. superficial load for a wide type of natural porous filter media, have a semi-parabolic profile with linear behavior at superficial low loads (Malamba *et al.*, 1994).

There is a close ratio between pressure drop and fluid-dynamic phenomena that appear inside the packed bed through the characteristics of the filter media and gas. Factors such as superficial gas load, density and





viscosity, as well as particle size and distribution, porosity, moisture and air spaces in the filter media determine both pressure drop as fluid-dynamic behavior of the gas, among others. The dead zones reduce the useful volume of the biofilter, and therefore, real retention time of the gas and operating efficiency decrease proportionally. Tracer studies must be performed to quantify the dead volume in a biofilter as well as mixing intensity of the fluid phase inside it. These are based on injection in the system and detection in the effluent based on time, of an inert substance that represents the diffusional behavior of the fluid to obtain the residence time distribution curve of gas (RTD). This work focuses on studying effects of the composition of the filter media (variation in type of bulking agents with compost) over pressure drop and gas distribution in the filter bed, the latter through the study with tracers.

### METHODS

#### Filter media

The influence of moisture on the granulometry of compost used in these experiments was determined, using compost with 65% relative humidity and dry compost with 0% relative humidity. On the other hand, composition of the filter media varied, that is, media 100% formed of compost, a combination of 75% compost and 25% *zeonite* as bulking agent (V/V), a combination of 75% compost with 25% biological sludge and a combination of 75% compost with 25% crushed cane bagasse were used. Columns packed with the filter media were submitted to three flows of 100% moist air consisting in 10, 40 and 70 l/min. In turn, experiments were performed with moist air and moist air with water added in the upper part of the columns. The experiments were performed in duplicate. The pressure drop in the columns, packed with media, was determined using differential water gauges as well as the degree of the gas distribution through a study with tracers (Figure 1). Additionally, for 20 minutes every day, the columns with filter media were submitted to different air flows (0 to 120 l/min every 20 l/min) in order to obtain graphs of pressure drop vs. flow and pressure drop vs. time of operation.

#### Pilot Plant

A pilot plant was built using the following elements: two towers for air moistening, three biofiltration columns, one witness column and rotameters. Both moistening towers were built using a PVC pipe of 6 inches (0.1515 m) of diameter with a height of 1.2 m. The towers were operated flooded, with a packing of a height of 90 cm. The packing used is of the Raschling type, obtained from PVC pipes of 1/4 inches. The biofiltration columns were built with PVC pipes of 4" diameter, with a height of 1.2 m. These columns were packed with filter media for a height of 1 m. In the case where water is added directly to the filter media, 30, 115 and 200 ml of water a day was added for air flow of 10, 40 and 70 l/min respectively.

#### Tracer studies

In addition to the tracer studies performed with the experiments described before, studies were performed in different configurations of columns described as follows: column without packing, 10 l/min of air, column packed every 30 cm with compost up to 1 m height, 10 l/min of air, column packed with 0.5" gravel and submitted to 10, 40 and 70 l/min air flow, column packed alternately with compost and *zeonite* in layers submitted to 10 l/min of air. Three experiments were performed for each column where an average RTD curve was determined, which was submitted to an analysis that considered calculation of gas retention time in empty bed, variation coefficient and adjustment of axial dispersion model and tanks in series model together with the calculation of the semi-empirical  $\alpha$  index (Morgan-Sagastume *et al.*, 1999). In the tracer studies, butane as tracer and a CO<sub>2</sub> detector with infrared light installed in a unit to analyze Total Organic Carbon (TOC) were used. The tracer had pulse-type injection through a semi-automatic system with a mercury manometer that controls injection pressure and consequently, the amount of gas and its injection speed. This assured homogenous and reproducible injection of gas. A device was installed in the higher part with a diaphragm air compressor inside that serves to obtain a sample of the effluent tracer and transport it to a CO<sub>2</sub> trap, based on KOH and then to the TOC.

A "Peaksimple" automatic data obtaining system was connected to the TOC, that reproduces the RTD curve

generated by the tracer on a screen.

### RESULTS AND DISCUSSION

#### Effects of humidity in granulometry

The effective size is the average size that permits 10% of weight of particle that corresponds to dry compost (0% reflects the increase in particle size by). On the other hand, uniformity coefficient sample to pass, divided between the granulometric curve that gives an idea of coefficient ratio is increased, it is so. Consequently, we confirm the above: uniformity coefficient is lower when particles based on the opening of the sie

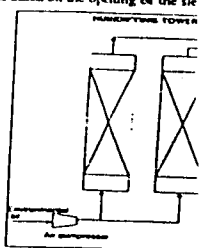


Figure 1 Experimental system flow diagram media, air flow and added

#### Pressure drop

Evolution in the ratio of drop of pressure based on air flow supplied to each column moist air adding water to the media is shown most air flow (or air flow) with a linear proportional ratio between these factors: ratio between pressure drop and gas super authors (Leson and Winer, 1991) determine clay, wood scrap and coconut fiber) and ob superficial load. However, at high superficial behavior, having obtained pressure drops of clay and for the coconut fiber and wood sen Yang (1991) when working with pieces of 0 compost.

According to Figure 3, in general terms, it is the experimental conditions of this work, de columns submitted to the maximum air flow

velocity, moisture and air spaces in the filter media, the gas, among others.

and therefore, real retention time of the gas must be performed to quantify the dead volume inside it. These are based on injection in the distance that represents the diffusional behavior (RTD).

of the filter media (variation in type of bed) in the filter bed, the later through the study.

used in these experiments was determined, % relative humidity.

that is, media 100% formed of compost and, a combination of 75% of compost with 25% crushed cane bagasse were free flows of 100% moist air consisting in 10% air and moist air with water added in the jacket. The pressure drop in the columns, as well as the degree of the gas distribution, was measured every day, the columns with filter media (70 l/min) in order to obtain graphics of pressure

towers for air moistening, three biofiltering towers were built using a PVC pipe towers were operated flooded, with a packing obtained from PVC pipes of 1/2 inches diameter, with a height of 1.2 m. These columns were water is added directly to the filter media, 1) and 70 l/min respectively.

its described before, studies were performed in column without packing, 10 l/min of air, column of air, column packed with 0.5" gravel and alternately with compost and sawdust in layers.

verage RTD curve was determined, which retention time in empty bed, variation coefficient included together with the calculation of the section.

frated" installed in a unit to analyze the section through a semi-automatic system with frequently, the amount of gas and its input. A device was installed in the higher part of the effluent tracer and transport a

to the TOC, that reproduces the RTD curve

generated by the tracer on a screen.

## RESULTS AND DISCUSSION

Effects of humidity in granulometry of a filter media (compost)

effective size is the average size of the particle, measured as the clear space in millimeters of the sieve that permits 10% of weight of particles to pass and retains the remaining 90%. The 0.24 to 1.7 mm increase corresponds to dry compost (0% relative humidity) and moist (65% of relative humidity) respectively. The increase in particle size by cohesion of fine particles caused by the water content in the media.

On the other hand, uniformity coefficient is the ratio between the size of the sieve that permits 60% of the sample to pass, divided between the one that only permits 10%. This reading is a type of slope in the granulometric curve that gives an idea of dispersion of particle sizes in the media, so that when the uniformity coefficient ratio is increased, it is possible to conclude that the particles are more uniform as to size. Consequently, we confirm the above conclusion on the effect of water in increasing particle size, as the uniformity coefficient is lower when there is moisture in the media. Figure 2 shows the distribution of particles based on the opening of the sieve.

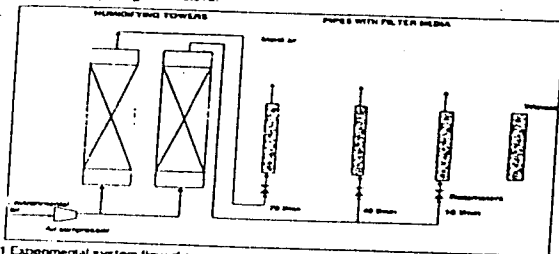


Figure 1. Experimental system flow diagram installed to determine effects caused by composition of filter media, air flow and addition of water on pressure drop and gas distribution.

### Pressure drop

Evolution in the ratio of drop of pressure-air flow (P/Q) in various filter media during 7 days of operation, based on air flow supplied to each column (10, 40 and 70 l air/min) submitted to 100% moist air and 100% moist air adding water to the media is shown in figure 3. The P/Q ratio is the slope of graph "pressure drop vs superficial load" (or air flow) with a linear trend (98% linear adjustment coefficient) and shows a directly proportional ratio between these factors within the applied superficial load interval (0 to 120 l air/min). The ratio between pressure drop and gas superficial load in different biofilter media has been studied by some authors (Leason and Winer, 1991) determined pressure drop in different filter media (compost with porous wood scrap and coconut fiber) and obtained a directly proportional ratio between pressure drop and gas superficial load. However, at high superficial loads (above 550 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>/h), they observed a deviation in linear behavior, having obtained pressure drops of 3000 and 300 Pa for 2.5 m columns packed with compost-porous wood and for the coconut fiber and wood scrap media, respectively. Similar results were obtained by Allen and Wang (1991) when working with pieces of the bark of trees and peat as filter media, and with various types of supports.

According to Figure 3, in general terms, it is possible to conclude that pressure drop in the filter media, under experimental conditions of this work, decreases as a function of operational time and also for the case of columns submitted to the maximum air flow (70 l/min), a pressure drop decrement, as a function of time, was

causes pressure drop, although it must be taken into account the operating time of the biofilter (7 days) and that the column packed with compost has a  $\phi$  index of 0.668, and that, in a column with a flow of 10 l/min flow, after 7 days the  $\phi$  index number is 0.600 and  $\phi$  index to 0.460,  $\phi$  index channels during time of operation. With this depends on the amount of channels formed in the filter media throughout the operating time of a biofilter can be operated for a certain period of time in the filter media until they are blocked, based on time. An aspect that was not taken into account in the case of homogenous media, the behavior of microorganisms.

produces channels inside the column. The filter media that showed a lower pressure drop is the compost and compost with sludge. Filter media based on bulking agents such as *setonite* and cane bagasse increase pressure drop under experimental conditions handled in this research work. A column packed with a filter media with fine particles makes the gas flowing through this media tend to have a mixed type of fluid dynamic behavior. The inverse phenomenon occurs when the filter media has a larger particle size, where the gas will tend to a plug flow fluid dynamic behavior. The fact of adding water to the filter media causes that the gas mixing inside the column to be less compared to dispersion of the gas in a media where water has not been added and in the media where the gas flow inside the column is increased, a greater mixing is obtained. The media formed by 100% compost produces a greater blend of the gas in the column, followed by the compost-sludge media, the compost-*setonite* media and the compost-bagasse media. Pressure drop in the bed, for one part depends on the amount of channels formed and on the other, on the evolution and change suffered by these channels through the operating time of the columns.

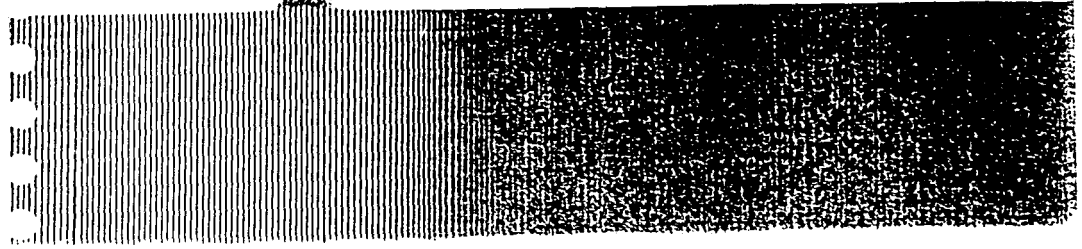
dependence time. Empty column vs columns

Time (min)	Number beds installed in series	$\phi$ Index	Air flow (l/min) applied
1	6	0.388	10
2	6	0.349	10
3	6	0.442	10
4	6	0.469	10
5	7	0.366	10
6	6	0.668	10
7	5	0.440	10
8	9	0.310	10
9	5	0.480	40
10	8	0.470	40
11	7	0.490	70
12	8	0.480	70
13	5	0.284	10

irrespective of the filter media used, one can see that at constant low air flow (10 l/min) presents a pressure drop, and at high air flows (70 l/min) presents a pressure drop during 7 days of continuous operation.

ACKNOWLEDGEMENTS

We thank the National Science and Technology Board (CONACYT project 27776-B) and the General Department of Matters of Academic Personnel of the National Autonomous University of Mexico (DGAPA) for the economic support granted for the development of this project.





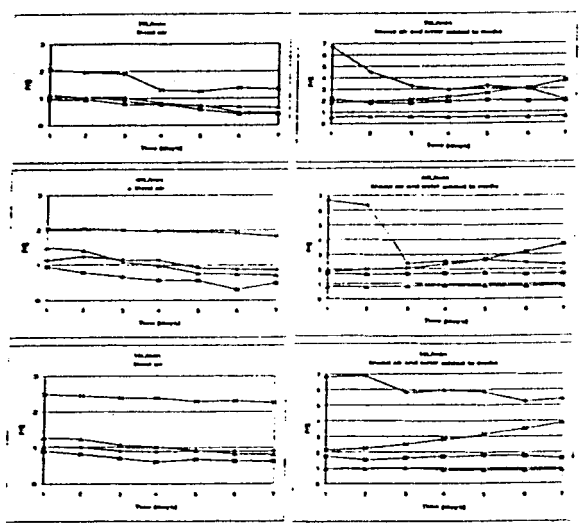


Figure 3 - Evolution of pressure drop-air flow (P/Q) during 7 days of operation based on air flow supplied each column (10, 40 and 70 l air/min) in different filter media (■ 100% compost, ♦ 75% compost-25% sludge, ▲ 75% compost-25% bagasse submitted to 100% moist air and 10% moist air with water added to the media).

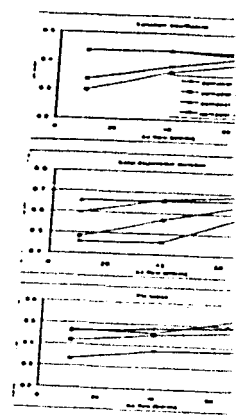


Figure 4 - Behavior of the variation coefficient media used based on flow of mo.

REFERENCES

Allen, E.R. and Yang Y. (1991) Biofiltration. *Management Association Annual Meeting*, Agra R. and Revah S. (1993) Influence of II. *Biotechnology and Bioengineering*, Vol. 2. DeLussac, M.A. and Cox, H.H. (1998) The treatment of Air and Waste management. California, June 14-18, paper 98 TA20H D. Leon, G. and Water A.W. (1991) Biofiltration. *Journal Air Waste Management Association*. Magamba, P.S., Drucoli R. H. and Buckle K. A. (1994) sludge. *Drying Technology* 12(4): 933-954. Marais M., Revah S. and Auri R. (1998) Study of the elimination of Toluene vapors. *Biotech Bioeng* 491. Sagatune J.M., Jimenez B. and Novola distribution (RTD) curves. *Journal of Environ and Exhibition*, Nashville, Tennessee, June 1992. S.P.P. and D.M.R. (1992) Review paper on pollution abatement and other control policies. E., Mou U. and Fisher K. (1993) *Exhibition*, Denver Colorado, June 13-18.