

# MODELACIÓN A ESCALA DEL PROCESO DE COMPOSTAJE AEROBIO, EN PILA ESTÁTICA Y CON AIREACIÓN FORZADA DESARROLLO TEÓRICO E IMPLEMENTACIÓN DE LABORATORIO

## MODELING OF AEROBIC COMPOST PROCESS, STATIC PILE AND FORCED AIREATION

*Behrentz E<sup>1</sup>, Giraldo E<sup>2</sup>.*

### RESUMEN

Se ha construido un montaje en el laboratorio en el cual un reactor de 14 litros simula el comportamiento de una pila de lodos de proporciones reales con aireación forzada, sujeta al proceso de compostaje aerobio, para lodos provenientes de un tratamiento primario de las aguas residuales de la ciudad de Santa Fe de Bogotá. Los criterios de diseño del montaje se fundamentan en una revisión teórica de las condiciones termodinámicas que gobiernan el comportamiento de los microorganismos responsables de la descomposición por la ruta aerobia. Se define un número adimensional que determina las condiciones que deben mantenerse para asegurar la representatividad en el escalamiento. De acuerdo a este valor se opera el montaje en el laboratorio. Se realizó un montaje de un sistema automático para el control del proceso, de tal manera que reproduzca las condiciones de operación. Se obtuvo un extenso registro histórico de la variación de los parámetros más importantes que intervienen en el proceso. El seguimiento y control de la temperatura y los diferentes gradientes térmicos son el punto central del control.

**Palabras clave:** Compostaje. Escalamiento. Aerobio. Degradación. Control. Lodos. Modelación.

### INTRODUCCIÓN

El tratamiento biológico de los desechos sólidos provenientes de diversas actividades humanas, buscando obtener un producto estable y utilizable es una alternativa ampliamente reconocida para minimizar el problema que se genera en la disposición final de los residuos, uno de estos tratamientos es conocido como compostaje, definido por Haug (1993), como la descomposición y estabilización de sustratos orgánicos bajo condiciones en las cuales se desarrollan temperaturas termofílicas como resultado del calor biológicamente producido, con un producto final suficientemente estable, libre de patógenos y de semillas

como para su aplicación en la tierra con la ausencia de efectos ambientales adversos (Haug, 1993).

El trabajo de investigación a escala de laboratorio con sistemas de compostaje aerobio posee características complejas. Esto es debido a los fenómenos de escalamiento geométrico del proceso. A escala de laboratorio se tiene un valor grande para la razón existente entre el área superficial y el volumen reaccionante. Esto impide que se acumule el calor de reacción y por lo tanto no se pueden lograr las temperaturas del proceso que caracterizan este tipo de sistemas en condiciones reales de operación.

Anteriormente, se han realizado algunas aproximaciones al problema de la modelación del comportamiento de una pila de compost de proporciones reales. Las investigaciones de este tipo de sistemas, han estado preferencialmente enfocadas al estudio de la cinética de consumo de oxígeno. Es destacable la presencia de numerosos estudios por parte de Schulze (Haug, 1993), quien ha usado diferentes procedimientos experimentales, así como diversos tipos de fuentes de energía. Del mismo modo se han desarrollado múltiples modelos matemáticos para el estudio de la dinámica del proceso de compostaje, estos modelos de simulación integran los principios de cinética y termodinámica que gobiernan al proceso de compostaje (Haug, 1993). Hogan, Miller & Finstein (1988) desarrollaron un modelo físico para la modelación de proceso en el que se implemento un montaje en el laboratorio que evita la pérdida de calor por convección buscando una simulación del proceso real, compensando los efectos de la razón Área-Volumen desproporcionado que se presenta en la escala de laboratorio (Hogan et al, 1989). En este desarrollo, sin embargo, no se elabora un fundamento teórico al momento de justificar el diseño del

Centro de Investigaciones en Ingeniería Ambiental. Departamento Ingeniería Civil y Ambiental. Universidad de los Andes. Apartado Aéreo 4976. Santa Fe de Bogotá. Colombia.

<sup>1</sup> Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental.

<sup>2</sup> Centro de Investigaciones en Ingeniería Ambiental (CIIA).

sistema, por lo que no se sabe con precisión cual es la situación real que se desea simular. Del mismo modo, el montaje en sí, presenta una complejidad que puede considerarse innecesaria, lo que puede apreciarse en la metodología utilizada para el control de las variables.

Tradicionalmente la investigación en compostaje aerobio ha tenido un uso predominante de técnicas empíricas, lo que puede resultar en conclusiones inexactas, debido a la carencia de fundamentos al estimar el desarrollo del proceso. Es por esto que la investigación y modelación en escala de laboratorio se convierte en una herramienta esencial de diseño, para permitir optimizar los procesos de una forma controlada, antes de pasar a las escalas típicas de campo.

Este trabajo presenta un análisis teórico para la determinación de un factor adimensional de escalamiento de procesos de compostaje aerobio. Por otro lado se muestra como debe ser el diseño y la operación del sistema de compostaje de laboratorio, con base en los resultados teóricos obtenidos. Se presentan registros históricos extensos del comportamiento típico del sistema simulado: el interior de una pila en pleno desarrollo del proceso de compostaje de lodos primarios provenientes de un sistema de tratamiento de aguas residuales domésticas.

## ESCALAMIENTO

Para hacer posible el escalamiento, es necesario establecer un criterio para asegurar la representatividad del comportamiento al variar las dimensiones. Se propone un factor de escalamiento ( $B_G$ ), el cual será un valor adimensional que debe mantenerse tanto en la escala del modelo de laboratorio como en el prototipo. Para empezar con la justificación de este número, es importante mencionar primero los criterios de escalamiento que fueron tenidos en cuenta, en donde el objetivo general es la reproducción en escala de las condiciones reales de operación. Se consideran las principales variables que intervienen en el proceso de digestión aerobia: temperatura, humedad, concentración de oxígeno, eficiencia de la evacuación de los productos generados y tamaño de las partículas. Aunque a cierto nivel de análisis todas estas variables tienen importancia y podrían determinar diferencias en el comportamiento de los procesos bioquímicos entre el medio de laboratorio y el prototipo, se asumirá que las condiciones de humedad provistas por el montaje de laboratorio son iguales a las condiciones reales en el prototipo, de tal manera que no sean relevantes para el escalamiento. Estos dos supuestos se pueden realizar, ya que estas dos variables son relativamente fáciles de controlar sin importar la escala en la que se esté trabajando. Es fácil notar que el tamaño de las partículas al interior de una pila no depende de las dimensiones de ésta. Por otro lado se supone que la evacuación de los productos generados, así como la

concentración de oxígeno, son factores que no se ven afectados por la escala. Esta hipótesis de trabajo es válida en la medida en que se trata de un sistema con aireación forzada en donde los efectos sobre la convección natural, asociados al peso propio, se dejan a un lado al aumentar la potencia de la aireación. Vale la pena aclarar que en un sistema sin aireación forzada esto no es cierto.

Por último se tiene la temperatura. Esta variable es claramente la más afectada con la escala debido a que a escalas de laboratorio no se logra de manera natural las mismas temperaturas que se tienen en una pila a escala real. Esta condición está íntimamente ligada a la relación Área/Volumen ( $A/V$ ). Geométricamente es fácil notar que esta relación ( $A/V$ ), aumenta rápidamente al reducir las dimensiones de una figura, cualquiera sea su geometría. Como las dimensiones del campo son significativamente superiores a las del laboratorio es entonces físicamente imposible mantener esta relación. En la escala de laboratorio se presenta una alta tendencia a la disipación del calor producido por la actividad biológica, condición que no se nota en las pilas de dimensiones reales y que impide lograr las temperaturas reales del proceso prototipo en los reactores de laboratorio. Por esta razón se plantea la siguiente analogía :

$$\frac{A}{V} = \frac{T_d}{T_g} \quad (1)$$

Donde  $T_d$  es la tasa de disipación de calor (J/s) y  $T_g$  es la tasa de generación de calor (J/s)

Esta equivalencia es válida conceptualmente, ya que el área superficial es la región espacial por la cual se pierde el calor en un cuerpo cualquiera y por lo tanto la tasa de disipación es proporcional al área superficial. Del mismo modo el volumen es una medida de la tasa de generación ya que indica la cantidad de masa reaccionante, y dado que el metabolismo de los microorganismos actuantes en el proceso de biodegradación aerobia es de carácter exotérmico, el volumen es un indicador de la cantidad generada de calor.

De esta manera se define el factor ( $B_G$ ), así:

$$B_G = \frac{T_d}{T_g} \quad (2)$$

Este factor se considera como un número adimensional, el cual debe mantenerse entre el prototipo y el laboratorio para asegurar que la temperatura es similar en los dos sistemas. Se tiene entonces que al determinar este factor en campo, se pueden diseñar las cámaras a usar en el laboratorio, asegurando la representatividad de los resultados obtenidos.

Continuando con las definiciones se dice que la tasa de generación tiene la siguiente expresión :

$$T_g = \varphi WS \quad (3)$$

Donde :

$\varphi$  : Entalpía de la reacción de degradación (J/mgSVB)

K : Tasa Específica de Reacción (1/s)

V : Volumen reaccionante (L)

S : Concentración del sustrato (mgSVB/L)

Del mismo modo se dice que la tasa de disipación de calor es equivalente al flujo de calor conductivo a través de una superficie.(3)

$$T_d = q = -kF\Delta T$$

Donde :

q : Flujo de calor conductivo (J/s)

k : Conductividad térmica del material (J/s.cm.°C)

F : Factor Geométrico (de forma) (cm)

$\Delta T$  : Diferencia de Temperatura entre los puntos de interés (°C)

Es conveniente explicar el significado de esta expresión, donde el flujo de calor conductivo indica la energía por unidad de tiempo disipada en forma de calor a través de una superficie con geometría definida y de un material característico, esta disipación se nota en la generación de un gradiente de temperatura entre los puntos de interés.

Al considerar las expresiones (3) y (4), y reemplazando en (2), se obtiene que:

$$B_G = \frac{-KF\Delta T}{\varphi.kVS} \quad (5)$$

A partir de este resultado se determinan los valores que deben mantenerse para lograr un escalamiento apropiado y representativo, de esta manera:

$$B_G(\text{Prototipo}) = B_G(\text{Modelo}) \quad (6)$$

Por lo tanto :

$$\frac{K_p F_p \Delta T_p}{\varphi_p k_p V_p S_p} = \frac{K_m F_m \Delta T_m}{\varphi_m k_m V_m S_m} \quad (7)$$

La ecuación (7) puede simplificarse si se considera que los valores de entalpía no son función de la escala geométrica. Del mismo modo se simplifica la expresión al cancelar la tasa de reacción y la concentración del sustrato, esto es debido a que al encontrarse a la misma temperatura, estas condiciones son iguales en el prototipo y en el laboratorio. Para el caso de la conductividad térmica se puede decir que este valor sería igual en los dos

sistemas, si en el laboratorio se tuviese el mismo tipo de aislamiento que en el prototipo; pero esto no es cierto, ya que para lograr el escalamiento es necesario rodear la materia reaccionante con un sistema de aislamiento térmico que hace que la conductividad térmica sea diferente. Finalmente se tiene que:

$$\frac{K_p F_p \Delta T_p}{V_p} = \frac{K_m F_m \Delta T_m}{V_m} \quad (8)$$

El análisis de la ecuación (8) da luces sobre la forma de lograr el escalamiento. Los valores del factor de forma y del volumen, cambian significativamente con el tamaño. Es necesario compensar en el laboratorio esta condición, lo que se podría lograr manipulando la conductividad térmica del material que rodea la mezcla reaccionante (k), y el gradiente de temperatura alrededor de la mezcla reaccionante, de tal forma que la igualdad planteada en la ecuación (6) se mantenga. Esto es exactamente lo que se hace con el sistema de compostaje de laboratorio, en donde se tiene la configuración ilustrada en la Figura 1. De aquí se puede observar, que se aumenta significativamente la resistencia térmica al colocar un contenedor de PVC y al controlar automáticamente el gradiente de temperatura ( $\Delta T$ ), entre las paredes del reactor utilizado. Es conveniente aclarar que el término denominado factor de forma no solo varía su magnitud sino también la expresión que lo determina, al variar la geometría de la figura de interés. Puede decirse que en general las pilas reales son grandes prismas, para los cuales se centrará el análisis en una de sus caras, de esta manera el caso real hace referencia a una superficie plana emanando calor, para esta configuración se tiene: (3)

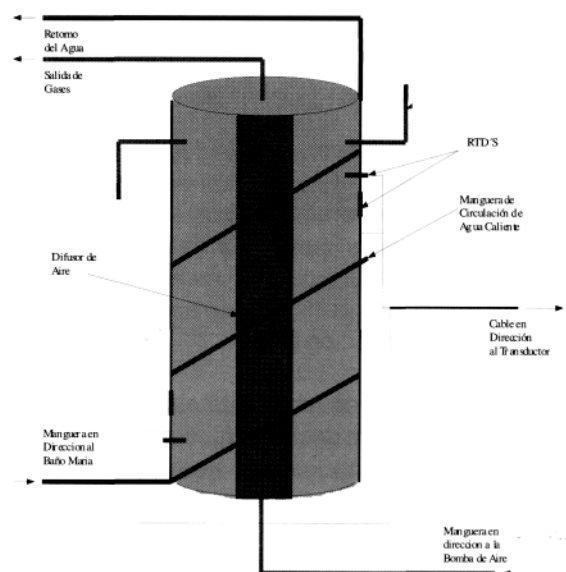


Figura 1. Representación esquemática de las cámaras utilizadas en el laboratorio con los accesorios necesarios

$$F = \frac{A}{L} \tag{9}$$

Donde:

A Área superficial de la placa a través de la cual se pierde calor

L Espesor de la placa.

Del mismo modo y para el caso del reactor utilizado en el laboratorio, el cual es una cámara cilíndrica, se tiene que (Holman, 1963)

$$F_L = \frac{2\pi \cdot H}{\ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right)} \tag{10}$$

Donde:

H: Altura del cilindro

r<sub>o</sub>: Radio externo de la superficie cilíndrica.

r<sub>i</sub>: Radio interno de la superficie cilíndrica

Behrentz (1997), presenta un análisis detallado de la determinación de la magnitud del factor B<sub>G</sub> para una pila de compost de proporciones reales para su futura modelación (4). Después de un análisis de la situación real y de la aplicación a la escala de laboratorio, puede encontrarse una relación entre el volumen y la geometría de la pila a modelar y el diferencial de temperatura que debe mantenerse en el compostador utilizado en el laboratorio. Después de aplicar este análisis para el caso de las geometrías aquí consideradas, la ecuación resultante es:

$$\Delta T_L = \frac{k_p F_p \Delta T_p V_r}{V} \tag{11}$$

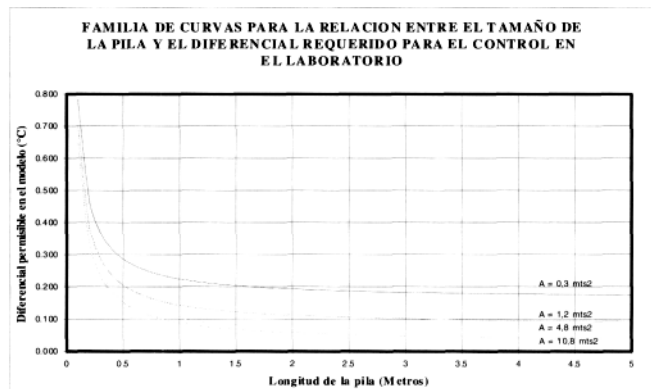
Gracias a que el montaje realizado hace posible un control preciso de la temperatura, es ésta la condición que se varía hasta alcanzar los valores determinados para cumplir con el requerimiento establecido por el factor de escalamiento(B<sub>G</sub>).

Como se puede ver, una vez establecidas las dimensiones de laboratorio (las cuales pueden seleccionarse con criterios de facilidad operativa), y con el conocimiento de las condiciones reales en campo (la realidad que se desea modelar), se puede llevar a cabo un escalamiento correcto, si se controlan las temperaturas de operación, considerando a la ecuación (11).

La figura 2. es una herramienta para estimar el diferencial permisible con el cual se debe operar el sistema de control en el laboratorio, basándose en la información de las dimensiones de la pila que se desea modelar. También se puede notar la tendencia asintótica del valor del diferencial a utilizar, a medida que el tamaño de la pila crece, lo que da luces acerca del tamaño crítico que debe utilizarse en la realidad. Si se considera que la región plana de la curva

corresponde a pilas de tamaño considerable que funcionan en la realidad, el punto crítico como aquí se ha definido es la región en la cual la curva cambia su tendencia homogénea.

De esta forma se puede ver que el tamaño mínimo a utilizar en campo para lograr condiciones análogas a las grandes aplicaciones, es de alrededor de 0,5 metros cúbicos de volumen, si se considera un área transversal de 0,3 m<sup>2</sup> y una longitud de pila de 1,5 m<sup>2</sup>. Vale la pena recordar la importancia que tiene el gradiente de temperatura en el correcto escalamiento de la pila. En el proceso de compostaje existen dos formas principales de disipación de calor. Una por conducción y otra por convección. Si en el laboratorio no se simula adecuadamente el proceso conductivo, al tener un gradiente mayor, entonces la demanda de enfriamiento en la pila asociada al suministro de aire se disminuye. Esto a su vez disminuye el arrastre de agua evaporada y por lo tanto el secado de los lodos en sí, produciendo un compost mas húmedo. Finalmente se puede añadir que esta representación considera la influencia del factor de forma mencionado en la ecuación (11), al establecer relaciones con la sección transversal.



**Figura 2. Diagrama para la determinación de temperatura permisible a utilizar en las cámaras de laboratorio para la modelación de una pila de sección y longitud determinada (Se supone una geometría triangular para el área transversal)**

El procedimiento hasta aquí realizado puede generalizarse para cualquier tipo de geometría de la cámara, así como para cualquier distribución de las dimensiones, basta con determinar el valor del factor B<sub>G</sub> para la pila que se desea modelar, y de acuerdo a las características de la cámara, y siguiendo el algoritmo propuesto, puede determinarse el valor del diferencial de temperatura que se debe mantener para alcanzar resultados representativos. Ahora surge la pregunta de cómo se mantiene el diferencial de temperatura en el valor establecido, lo que se realiza mediante la implementación de un sistema automático de control, el cual se describe a continuación.

## MATERIALES Y MÉTODOS

**Reactor:** Este es el principal elemento de todo el montaje, ya que en su interior es en donde se presentan todas las reacciones bioquímicas típicas de un proceso de degradación aerobia. El material de construcción del reactor es PVC comercial. La cámara que compone al reactor es completamente sellada y es atravesada por un elemento difusor de oxígeno, posee un orificio en la parte inferior por donde penetra el aire de ventilación y otro en la parte superior por donde se evacúan los gases generados, asimismo dos orificios adicionales se encuentran a 15 centímetros de la tapa superior, estos agujeros dan salida a dos mangueras por donde se pueden realizar muéstreos de gases al recircular el aire interior. Este monitoreo se llevó a cabo con un analizador infrarrojo de gases GEOTECHNICAL INSTRUMENTS. En el reactor se encuentran dispuestos cuatro elementos para medir temperatura (RTD'S), dos internos y dos externos, en la parte superior e inferior del cilindro. Una manguera recorre toda la longitud del reactor dejando una huella de 5 mm sobre la superficie exterior del cilindro, dicho elemento es para la circulación de agua caliente (por la parte externa), para lograr un control de la temperatura exterior del reactor. Finalmente una espuma de fibra de vidrio se encuentra rodeando a todo el reactor, esto para alcanzar un mayor grado de aislamiento en el sistema. En la figura 1 se ilustra un esquema del reactor con todos los implementos necesarios.

En este punto es conveniente explicar que el criterio para la selección de las dimensiones de las cámaras de laboratorio (las cuales determinan los valores del factor geométrico y del volumen reaccionante), fue exclusivamente el de alcanzar una facilidad operativa.

**RTD'S:** Estos elementos colocados estratégicamente para lograr medidas representativas de la temperatura, generan una resistencia proporcional a la temperatura registrada, esta señal es transportada al transductor para su futuro procesamiento.

**Manguera de agua:** La manguera utilizada pertenece a la referencia «superflex», este elemento es de media pulgada de diámetro y de un calibre de 0.26 centímetros, tiene una longitud de 2 metros a lo largo de toda la recirculación.

**Manguera de aire:** Se utilizó manguera de presión transparente de 1/8 de pulgada, para todo el sistema de circulación de aire; en la entrada al difusor, en la salida de gases y en las tomas adecuadas para tomar muestras de gases.

**Transductor y tarjeta de adquisición de datos:** Como ya se mencionó anteriormente, para el control adecuado del proceso se requiere de un sistema automático, este sistema posee ciertos elementos digitales de registro y control de

entradas y salidas. El transductor se utiliza para recibir las señales de los RTD's y para accionar las salidas de corriente hacia las bombas de aire y de agua. Este elemento es marca "National Instrument" y se reconoce como el modelo SC-2042-RTD, el cual tiene la capacidad de manejar 8 entradas y 2 salidas análogas, este elemento convierte la señal de resistencia proveniente de los RTD's y la dirige a la tarjeta de adquisición de datos de referencia AT-MIO-16E-10 también de la marca "National Instrument", en donde es transformada en señal digital que puede ser interpretada por el computador, gracias al software "LabView", distribuido por la misma empresa

**Computador:** Se utilizó un Compaq Presario 633 con procesador 486 DX2 a una velocidad de 66 Mhz, con una capacidad del disco duro de 200 MB y 8 MB en RAM.

**Bomba de aire:** Aireador RENA 301 R.

**Bomba de agua:** Bomba "Little Giant", serie 2E-38N.

**Caja eléctrica:** Para aportar seguridad en todo el sistema de cables que entran y salen del transductor, así como para guardar cierta estética en el montaje, se empleo una caja eléctrica en la cual se incluyeron todas las conexiones necesarias para el funcionamiento del sistema.

**Baño maría:** Esta herramienta permite un control muy preciso de la temperatura del agua para circulación, se usó el modelo 183 de la marca "Precisión", en donde se mantiene el agua a una temperatura de 70 C.

Se instalaron dos relevos de estado sólido, para amplificar la capacidad de la señal de salida del computador de máximo 5 voltios hasta valores acordes a los requeridos para operar las bombas de aire y agua, uno para cada salida.

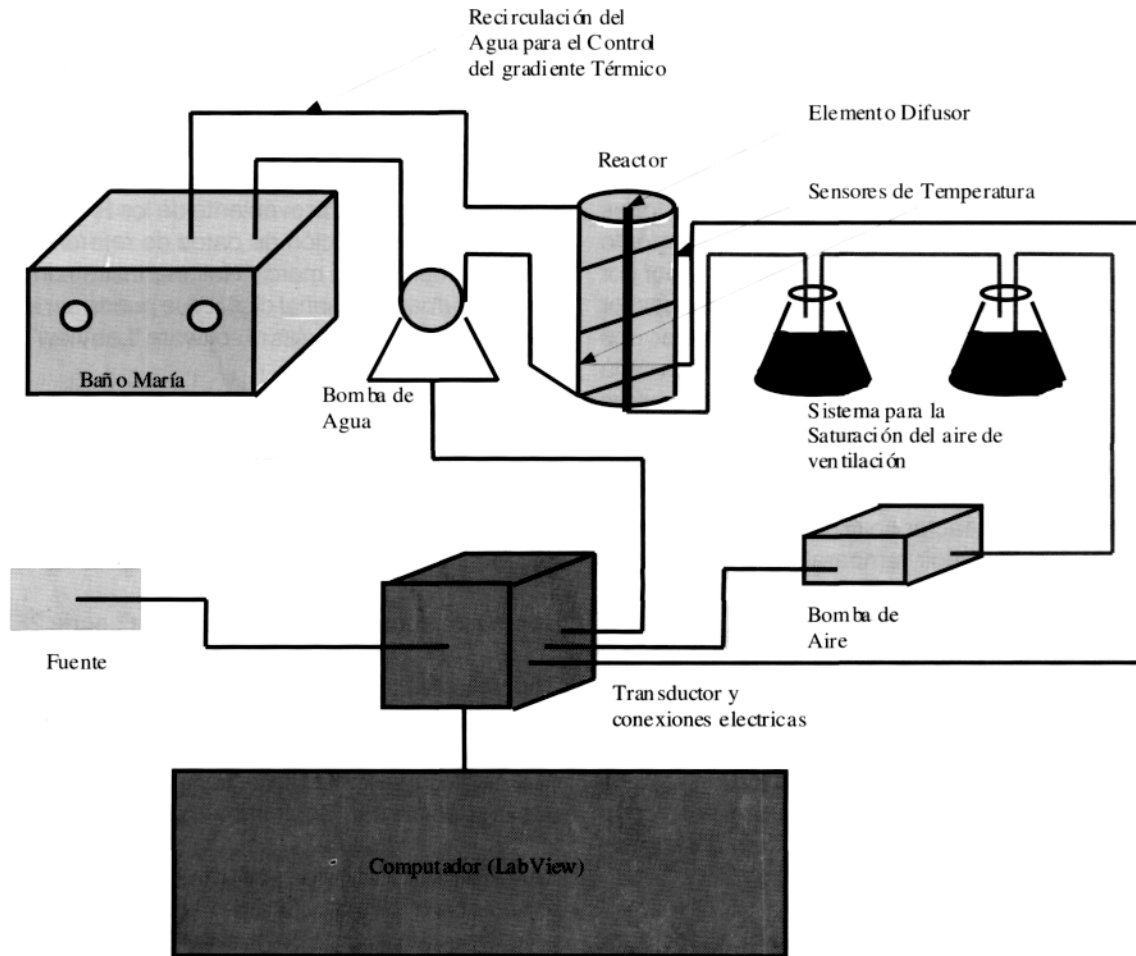
En la figura 3. Se presenta una representación esquemática de todos los elementos del montaje utilizado.

## SISTEMA AUTOMÁTICO DE CONTROL

El control de las variables mencionadas, se efectúa vía un sistema automático de control, el cual fue totalmente diseñado para el caso particular del estudio.

Una vez determinados los parámetros del modelo, se procede a estimar los necesarios para el control, los cuales van desde los tiempos de muestreo, registro y control, hasta los valores de temperatura que accionan las salidas.

El método de programación se basa en una serie de ciclos de operación, control y registro de valores, donde las condiciones de entrada y salida de estos ciclos se definen



**Figura 3. Esquema general del montaje utilizado en el laboratorio para simular el comportamiento de una pila en condiciones de operación**

por unidades de tiempo y controles de encendido y apagado que se le presentan al usuario en la pantalla.

Como ya se ha mencionado, el objetivo del control es lograr que se mantenga constante el valor del factor  $B_G$ , lo que se logrará manteniendo un diferencial de temperatura determinado, de acuerdo a las dimensiones de la pila que se desea modelar. Para el caso particular de los resultados mostrados en este estudio, se trabajó con un valor de 1,0 grados. El sistema de control mantendrá el valor del diferencial de temperatura en un rango de valores inferior a esta cantidad. Esto se logra mediante la adquisición de las temperaturas presentes en el reactor, tanto en su interior como en el área circundante, esta información pasa por el transductor, luego va a la tarjeta de adquisición de datos y se convierte en un dato de entrada para la rutina computacional escrita en «LabView» (programa especialmente diseñado para escribir rutinas de adquisición de datos, así como para llevar a cabo el control de diversos tipos de procesos.), este programa permite que a definidos intervalos de tiempo (tiempo de muestreo), se registre la

información, la cual es procesada en un algoritmo muy sencillo que elabora el cálculo del diferencial de temperatura y de la temperatura promedio interna. Una vez determinados estos valores y por medio de las condiciones programadas, se interactúa sobre las salidas del programa de la siguiente manera. Si el valor del diferencial de temperatura calculado es superior al establecido, se enciende la bomba de agua, esta circulación de fluido caliente genera un incremento en la temperatura externa, hasta que el diferencial calculado es nuevamente inferior al establecido. Debido a que el dato de entrada es una resistencia y no una temperatura (De esta manera trabajan los dispositivos RTD's), debe convertirse este registro en información útil para el programa, esto se hace mediante una transformación lineal, cuya expresión se encuentra al realizar una curva de calibración.

#### OPERACIÓN COMO PILA AIREADA

El sistema se desarrolló para simular una pila aireada. Por esta razón se instaló un control de temperatura máxima a 55 grados centígrados, utilizando aire para su

funcionamiento. Es apropiado recordar que en los sistemas de pilas aireadas se asume que el suministro de aire para control de temperatura cubre con exceso el requisito de aire para las reacciones internas (Finstein et al, 1987). De esta manera se desarrolló un sistema de control con el siguiente principio: Si el valor de la temperatura promedio calculada es superior al establecido, se enciende la bomba de aire, con lo que se genera un flujo de aire frío a través del difusor que se encuentra en el interior de la cámara generando una disminución de la temperatura interna, esta ventilación se mantiene hasta que el valor calculado es nuevamente inferior al establecido.

Esto no es válido para las primeras horas de trabajo, ya que al no darse suficiente actividad biológica la temperatura no sube, no se enciende la bomba de aire y no se oxigena la cámara, resultando en la rápida conversión a un ambiente anaerobio. Por estas razones es necesaria la implementación de un ciclo adicional durante el arranque del reactor, con el que se suplen los requerimientos de oxígeno de los microorganismos presentes mediante la programación de frecuencias de aireación.

Por medio del control se logran entonces los tres objetivos primarios:

1. Mantenimiento del factor de escalamiento  $B_G$
2. Cumplimiento de la demanda de oxígeno por parte de los microorganismos
3. Regulación de las condiciones de temperatura óptima.

### ENSAYOS EN EL LABORATORIO

Se realizaron ensayos de laboratorio con lodos primarios de aguas residuales domésticas de la ciudad de Santa Fe de Bogotá, del colector de la cuenca sanitaria del río Juan Amarillo. En los Informes Mensuales (Dama, Universidad de los Andes, CHA, 1998) se presentan en detalle las características y funcionamiento del sedimentador primario, así como las características del lodo.

Es conveniente aclarar que todos los resultados obtenidos, así como las conclusiones, están ligados al sustrato utilizado en los ensayos; lodos primarios de aguas residuales domésticas.

### Composición del gas:

Para elaborar el ensayo de composición del gas se utilizó un muestreador portátil infrarrojo de gases, marca Geotechnical Instruments en el cual se recircula la muestra gracias a una bomba al interior del aparato y durante 60 segundos, tiempo suficiente para que el sensor infrarrojo determine las composiciones volumétricas ( $CO_2$ ,  $CH_4$  y  $O_2$ ) del gas que pasa. A partir de este procedimiento se puede determinar la demanda de oxígeno y la producción de  $CO_2$ . Se conecta el sensor a las mangueras diseñadas

para este fin y se cancela el suministro de aire, se elabora un registro de la composición del gas cada 15 minutos y de esta manera se relaciona el tiempo transcurrido con la disminución en la concentración del oxígeno al tiempo que aumenta la concentración de  $CO_2$ .

### RESULTADOS

A continuación se presentan de manera gráfica los resultados obtenidos en las mediciones que se consideraron mas importantes para estudiar el comportamiento del proceso. También se nota como a partir de esta información puede afirmarse que el montaje es confiable.

En la Figura 4 se ilustra el comportamiento de la temperatura promedio interna a lo largo del desarrollo del proceso de compostaje, en donde se notan claramente las fases típicas en este tipo de digestiones: Inicialmente una fase de acoplamiento, que tarda aproximadamente cuatro días y en la que las reacciones no alcanzan a manifestarse en un incremento de la temperatura. La tasa de crecimiento de los microorganismos seguramente será la mas alta. A continuación se inicia la fase exotérmica y la temperatura sube hasta alcanzar el valor máximo permitido por el programa de control ( $55^\circ C$ ), en esta situación permanece casi 48 horas, se podría llamar a esta etapa la fase de activación. A continuación se presenta la fase de compostaje real la cual se prolonga por mas de 30 días y en la que la remoción de materia orgánica y humedad es suficiente para alcanzar la estabilización de los lodos que conforman al alimento, de igual manera es en esta etapa se presenta una total remoción de patógenos debido a las altas temperaturas. Es sabido que prácticamente la totalidad de estos microorganismos no resisten este rango térmico menos aun por un período de tiempo tan prolongado (Tchobanoglous, 1993). Después de esta etapa el proceso entra en decaimiento y el perfil de temperatura disminuye hasta alcanzar nuevamente la temperatura ambiente, esta reducción de temperatura es gradual y se presenta de manera mas lenta que la fase de activación ya que tarda aproximadamente 80 horas.

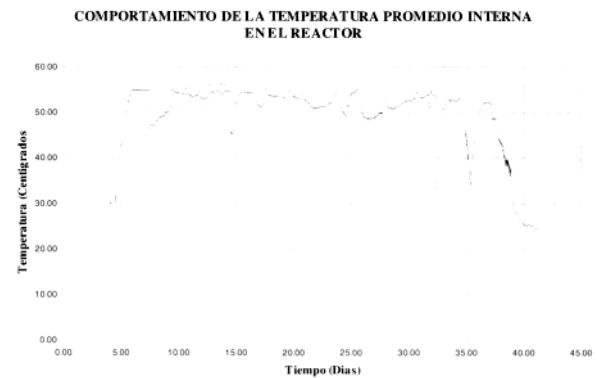
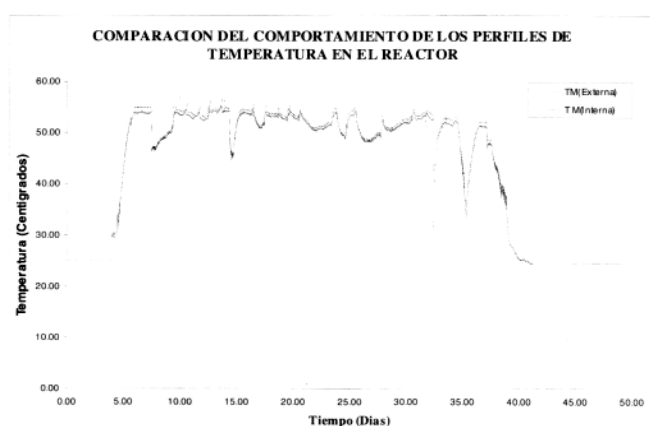


Figura 4. Desarrollo de la temperatura al interior del reactor que simula una pila de compostaje de lodos

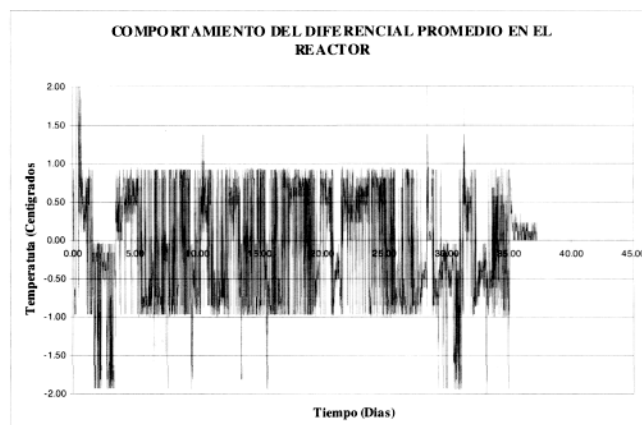
Finalmente se encuentra la fase de maduración. Esta etapa puede ser tan prolongada como el compostaje activo en sí, pero para efectos de presentación sólo se reportaron los primeros 45 días del proceso, aunque en realidad el montaje se mantuvo por más de 60 días, donde a partir del día 38 no se encontró ningún incremento en la temperatura. Las variaciones internas en la temperatura que se presentan a lo largo de todo el desarrollo del proceso en general se encuentran por encima de la precisión de los instrumentos utilizados y son debidas a la variabilidad misma del proceso y a los efectos sobre el sistema de la metodología de muestreo de gases, tal y como se analizará más adelante. Es válido anotar que las oscilaciones encontradas en este procedimiento son relativamente pequeñas si se compara con las reportadas en estudios anteriores. (Epstein, 1997), lo que puede ser debido al preciso control que se tiene sobre el proceso. Adicionalmente se pueden notar algunas caídas en el perfil de la temperatura, las cuales pueden ser debidas a la variabilidad de la disponibilidad en el material biodegradable. Inicialmente la temperatura refleja actividad biológica por consumo de material rápidamente biodegradable y a continuación se presenta una transición, para finalmente iniciarse el consumo de otro tipo de material con una tasa de reacción inferior.

En la figura 5 se encuentra una comparación de las variaciones de la temperatura en el interior y en el exterior del reactor utilizado en el montaje. De esta representación se puede notar que el comportamiento es el esperado, ya que la temperatura interna es en todo el intervalo de tiempo superior a la externa. Esto significa que el proceso de degradación se está presentando de manera natural y que la circulación de agua caliente por el exterior del reactor no está influyendo en el desarrollo de la temperatura de operación. La acción de la bomba de circulación de agua caliente se limita entonces al mantenimiento del valor establecido para el diferencial de temperatura tal y como es el objetivo.



**Figura 5. Comparación de las temperaturas promedio internas y externas de la cámara laboratorio.**

En la figura 6 se muestra el registro obtenido para el diferencial de temperatura observado a lo largo del proceso, donde se nota el funcionamiento apropiado del sistema de control, las oscilaciones más notorias pueden asociarse con el fenómeno de desacople de la fase rápida y lentamente biodegradables, tal como se comentó previamente al analizar el desarrollo de la temperatura al interior de la cámara de compostaje.



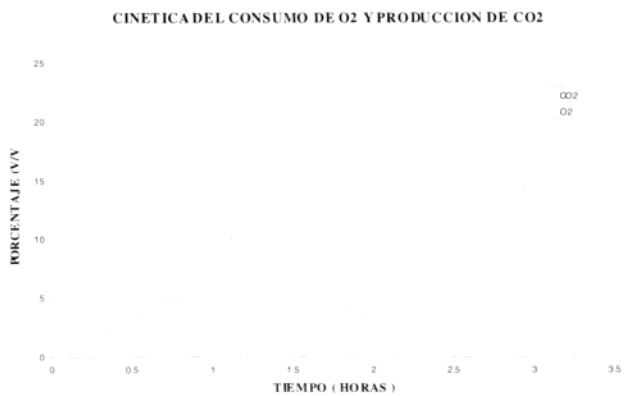
**Figura 6. Desarrollo del diferencial de temperatura promedio en diferentes zorras del reactor**

Finalmente, se obtienen registros de la demanda de oxígeno y de la generación de CO<sub>2</sub>. En la figura 7. se encuentra una representación de los resultados típicos para este tipo de ensayos, en donde se aprecian las variaciones en el tiempo del consumo de oxígeno y de la generación de gas carbónico. Las pendientes de las gráficas se pueden considerar como una medida de la magnitud de la actividad biológica en el sistema. La razón de las pendientes denominada coeficiente respiratorio (CR), es una relación estequiométrica que permite inferir sobre el tipo de materia orgánica que se degrada (Epstein, 1997).

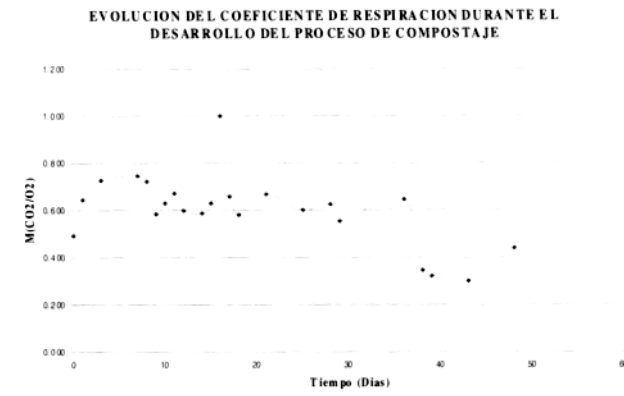
En la figura 8 se expresan las variaciones para la constante de consumo de oxígeno a lo largo del proceso de compostaje. Se aprecian claramente dos tendencias. En los primeros días (aproximadamente 9), se nota un incremento para el valor de la constante de reacción para posteriormente entrar en una fase de decaimiento. El decaimiento tiende a alcanzar el valor de cero para los últimos días del proceso, en los cuales la demanda final corresponde a la etapa de maduración, muy inferior a los valores que se presentan durante la fase activa. Vale la pena mencionar que después del día 37 se cambia la temperatura del rango termófilico al mesófilico.

Otro indicador claro de las reacciones gobernantes en las principales etapas del compostaje aerobio se encuentra en la figura 9. En esta representación se ilustra el cambio del CR en el tiempo. Es claro que durante los primeros 40 días el CR se mantiene relativamente uniforme (0,6), lo



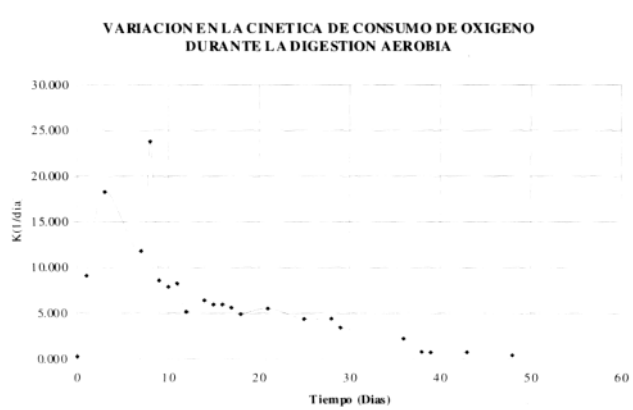


**Figura 8. Esquema típico de los resultados obtenidos para el ensayo de consumo de oxígeno y generación de gas carbónico al interior del reactor**



**Figura 9. Comportamiento de la razón entre las pendientes encontradas para los registros de consumo de oxígeno y producción de gas carbónico**

que indica que la estequiometría del sistema es similar durante las fases de iniciación, activación y compostaje pero diferente en la maduración. Estos valores hacen referencia al estado de oxidación de la materia orgánica que esta siendo degradada. Donde se conocen valores típicos para la oxidación de algunas sustancias (Epstein, 1997) como el almidón ( $CR=1,0$ ), proteínas ( $CR=0,81$ ), y grasas ( $CR=0,71$ ). Hacia el final del proceso en la fase de decaimiento se incrementa esta razón hasta alcanzar un valor cercano a la mitad del antes registrado ( $0,3$ ), para luego establecerse en ese punto y continuar con esta tendencia hasta los momentos finales del proceso. Es posible que esto se deba al fenómeno de nitrificación, típico en la fase de maduración de los sistemas aerobios (Epstein, 1997). A pesar de presentarse un consumo mínimo de oxígeno esta tendencia es muy superior a la de generación de  $CO_2$ , lo que indica un cambio notable en el comportamiento de los microorganismos al interior del proceso.



**Figura 8. Variación de los valores de la constante cinética para el consumo de oxígeno a lo largo del proceso de compostaje**

## CONCLUSIONES

Se presentó un análisis teórico que fue utilizado exitosamente para el desarrollo de un equipo compostador a escala de laboratorio. Se propone el uso del factor adimensional  $B_C$  como herramienta para el escalamiento de sistemas de compostaje aerobio. Se comprobó en el laboratorio la validez del parámetro determinado mediante un análisis teórico. Se realizaron ensayos exitosos a escala de laboratorio para el compostaje de lodos primarios de aguas residuales domésticas de la ciudad de Santa Fe de Bogotá. Se encontraron valores para la cuantificación del estado de descomposición de la materia orgánica.

## AGRADECIMIENTOS

Se agradece de manera especial a Colciencias, institución que hizo posible la elaboración de este proyecto, del mismo modo se agradece al Departamento Administrativo del Medio Ambiente, a la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá y a Mauricio Duque por toda la asesoría prestada en el diseño del sistema de control.

## BIBLIOGRAFÍA

- Haug. Toger T, The practical handbook of compost engineering. 1993
- Hogan. J. A, Miller F. C. Finstein : S, Physical modeling of the composting ecosystem. 1989.
- Holman J. P, Heat transfer. Fourth edition. 1963
- Behrentz E. Segunda fase de tratamiento aerobio de lodos de desechos solidos. 1997.
- Finstein, M S. Miller F. C, Hogan J. A, Strom P. F. Analysis of EPA guidance on sludge composting. Part IV. Facility design and control. 1987
- Tcobanoglous G. Integrated waste management. 1993
- Epstein E. The science of composting. 1997.
- Dama - Universidad de los Andes. Informes mensuales del proyecto de evaluación del potencial agronómico de los lodos residuales de la planta "El salitre" primera etapa, - CHA. 1998.