

UNIVERSIDAD DEL BÍO-BÍO
FACULTAD DE INGENIERIA
DEPARTAMENTO INGENIERIA CIVIL



**“Evaluación de los Efectos de la Pluviometría en
Pilas de Compostaje de Residuos Sólidos”**

Proyecto de Título presentado en conformidad a los requisitos para obtener el
Título de Ingeniero Civil

CARLOS AHUMADA MERCADO

Prof.Guía: PEDRO CISTERNA OSORIO

Concepción, Marzo de 2005

Este proyecto de título está dedicado especialmente a mi querida mamá, a mi abuela y a mis tíos Carmen, Sergio y Lucho.

Agradecimientos

Agradezco a la empresa Ewos Chile S.A. por todas las facilidades dadas para realizar esta tesis, especialmente a Gisela Messer y a don Jorge Lavanchy, además del personal de laboratorio de la planta de riles de la empresa.

También agradezco a la Sra. Beatriz Ruf encargada del Laboratorio de Absorción Atómica de la Facultad de Ciencias de la Universidad del Bío-Bío por la ayuda prestada.

INDICE GENERAL.

CAPITULO I	INTRODUCCION.	1
1.1	Justificación de la tesis.	3
1.2	Objetivos de la tesis.	4
1.3	Antecedentes generales.	5
1.3.1	Compostaje.	5
1.3.2	Generación de lodos en Ewos Chile S. A.	6
CAPITULO II	MARCO TEORICO.	9
2.1	Compostaje aeróbico.	9
2.1.1	Principios básicos	9
2.1.2	Reacción química del proceso de compostaje aeróbico.	12
2.1.3	Microbiología del proceso de compostaje.	14
2.1.4	Factores que afectan el proceso de compostaje.	16
2.1.4.1	Relación carbono-nitrógeno (C / N).	16
2.1.4.2	Temperatura.	17
2.1.4.3	Humedad.	19
2.1.4.4	Aireación.	21
2.1.4.5	PH.	22
2.1.4.6	Tamaño de las partículas a compostar.	24
2.1.5	Operación de un proceso de compostaje aeróbico.	25
2.1.5.1	Etapas operacionales del proceso de compostaje.	25
2.1.5.2	Parámetros de diseño y control del proceso.	26
2.1.6	Modelación matemática del proceso de compostaje.	27

2.1.6.1	Balance de sólidos volátiles biodegradables en el proceso de biodegradación.	29
2.2	Transferencia de calor en sólidos porosos.	32
2.2.1	Tasa de calentamiento de sólidos porosos.	33
CAPITULO III	METODOLOGIA DE LA INVESTIGACION.	36
3.1	Emplazamiento de la investigación.	37
3.2	Caracterización de los residuos sólidos a compostar.	38
3.2.1	Lodos.	38
3.2.2	Material estructurante.	40
3.3	Diseño de las pilas a compostar.	41
3.3.1	Cálculo de la humedad teórica de la mezcla.	41
3.3.2	Cálculo de la razón carbono-nitrógeno (C/N) de la mezcla	42
3.3.3	Proporción de cada material presente en las pilas de compostaje	43
3.3.4	Características geométricas de las pilas al inicio del proceso de compostaje.	44
3.4	Parámetros evaluados durante el proceso de compostaje.	46
3.4.1	Temperatura interna de la pila.	46
3.4.2	Humedad interna de las pilas.	48
3.4.3	Determinación de sólidos volátiles y sólidos minerales.	50
3.4.4	Medición de pH.	52
3.5	Procedimientos operacionales efectuados a las pilas de compostaje.	54
3.5.1	Volteo.	54
3.5.2	Incorporación de precipitación artificial.	55
3.6	Medición de parámetros.	57

CAPITULO IV	ANALISIS DE RESULTADOS.	58
4.1	Pila sometida a riego (Pila N° 1)	58
4.1.1	Variación de la temperatura interna de la pila.	58
4.1.1.1	Efecto de la incorporación de agua a la pila en su temperatura interna.	60
4.1.2	Variación de la humedad de la pila en proceso de compostaje.	62
4.1.3	Variación del PH de la pila.	63
4.1.4	Variación de sólidos volátiles en función del tiempo en la pila.	64
4.1.5	Variación de sólidos minerales en el tiempo en la pila.	65
4.2	Pila no sometida a riego (Pila N°2)	66
4.2.1	Variación de la temperatura interna de la pila.	66
4.2.1.1	Efecto de la humedad de la pila en su temperatura interna	67
4.2.2	Variación de sólidos volátiles en función del tiempo en la pila.	68
4.2.3	Variación de sólidos minerales en función del tiempo en la pila.	69
4.2.4	Variación del PH de la pila.	71
4.3	Comparación entre ambas experiencias.	71
4.3.1	Comparación de las temperaturas internas registradas en ambas pilas.	72
4.3.2	Comparación de la reducción de sólidos volátiles entre ambas pilas.	74
4.3.3	Comparación de la evolución de los sólidos minerales entre ambas pilas	76
4.3.4	Comparación de las constantes endógenas entre ambas pilas.	77
4.3.5	Comparación de los valores de pH de ambas pilas	79

CAPITULO V	CONCLUSIONES.	81
	REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.	82
	ANEXOS.	85
ANEXO 1	Datos de la pila sometida a riego (Pila N°1)	86
1.1	Registro de temperaturas.	86
1.2	Registro de datos para determinar el nivel de humedad y sequedad.	87
1.3	Registro de datos para determinar reducción de materia orgánica y valor de pH.	89
1.4	Registro de datos para determinar constante de reacción Kd.	90
ANEXO 2	Datos de la pila no sometida a riego (Pila N°2)	91
2.1	Registro de temperaturas.	91
2.2	Registro de datos para determinar el nivel de humedad y sequedad.	92
2.3	Registro de datos para determinar reducción de materia orgánica y valor de pH.	94
2.4	Registro de datos para determinar constante de reacción Kd.	95
ANEXO 3	Otros	
3.1	Carta solicitud de transporte de lodos	96
3.2	Autorización del Servicio de Salud de Concepción al transporte de lodos	97
3.3	Resumen del Proyecto de Título	98

CAPITULO I INTRODUCCION.

Debido al progreso y desarrollo de la humanidad, el aumento de residuos sólidos se ha ido incrementando, siendo en la actualidad una de las problemáticas importantes que debe considerar la sociedad.

Desde el punto de vista técnico los residuos sólidos corresponden a todo material proveniente de las actividades humanas, que se desecha o elimina por carecer de valor o utilidad. Sin embargo, dentro de los tipos de residuos sólidos que se pueden encontrar existe una gran variedad, estando aquellos que son ricos en materia orgánica y mineral, los cuales constituyen un interés particular debido al eventual valor agregado que se les puede incorporar conforme al tipo de tratamiento al cual éstos sean sometidos.

Los distintos tipos de tratamiento de residuos sólidos poseen múltiples variables que afectan su operación, por lo que el conocimiento de cada una de ellas es de vital importancia. En este sentido el compostaje tampoco está ajeno a lo citado anteriormente, ya que de todas las variables que afectan al proceso, una de las de mayor interés es el contenido de humedad que poseen los materiales, tanto al inicio como durante el desarrollo de éste, la que se ve influenciada fuertemente por el nivel de precipitaciones (pluviometría) al que está expuesto el sistema.

En este trabajo se presenta un estudio sobre el efecto de la pluviometría en pilas de compostaje de residuos sólidos, utilizando como material a compostar lodos generados en la Planta de Tratamiento de Riles de la empresa Ewos Chile S.A.

Se incorpora además el fundamento teórico del proceso de compostaje, la metodología empleada, análisis de resultados y las conclusiones correspondientes.

1.4 JUSTIFICACION DE LA TESIS.

Cualquier actividad, ya sea doméstica o productiva desarrollada por el hombre genera residuos. La empresa Ewos Chile S. A., la cual elabora alimentos extruídos para salmones, no está ajena a lo anterior y debido al proceso productivo que ella desarrolla, genera residuos industriales líquidos (RILES), los que de acuerdo a sus políticas medioambientales son tratados en su propia Planta de Tratamiento.

A raíz del tratamiento al que son sometidos estos riles, se generan lodos, los cuales son materiales orgánicos ricos en nutrientes, como nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K).

En la actualidad la empresa Ewos Chile S. A. acumula estos lodos en un contenedor especialmente adecuado para estos fines para luego disponerlos en algún vertedero que el Servicio de Salud autorice con los correspondientes costos que ello significa.

Es por esto que como una manera de brindar un correcto manejo a sus lodos se plantea como una posible alternativa técnica de solución un proceso de compostaje. En este proceso además es necesario estudiar el efecto de la pluviometría con el objetivo de optimizar su operación.

1.2 OBJETIVOS DE LA TESIS.

Los objetivos que plantea esta investigación son los siguientes:

- 1.- Evaluar los efectos de la pluviometría en pilas de compostaje de residuos sólidos.
- 2.- Estudiar el comportamiento térmico de dos pilas de compostaje bajo distintas condiciones de aislación de la lluvia.
- 3.- Determinar a partir del desarrollo experimental bajo qué condición de aislación resulta más recomendable efectuar un proceso de compostaje.
- 4.- Determinar la factibilidad técnica que Ewos Chile S. A. utilice el compostaje como medida de solución a sus lodos.

1.3 ANTECEDENTES GENERALES.

En este punto se mencionan los antecedentes generales de un proceso de compostaje así como el origen de los lodos en la planta Ewos Chile S.A., además se ilustra el diagrama del proceso de tratamiento de riles de esta empresa.

1.3.1 Compostaje.

El compostaje es una técnica aplicada desde hace muchos años especialmente en la agricultura, consistente en el apilamiento de residuos de la casa, excrementos de animales y restos de cosecha, para descomponerlos y transformarlos en un producto fácilmente manejable y aprovechable como mejorador de suelos.

El compostaje es un proceso controlado y acelerado de descomposición de la fracción orgánica de los residuos y que puede ser tanto aeróbico como anaeróbico, dando lugar a un producto estable llamado compost. El compost se compone de restos orgánicos, microorganismos, oxígeno y agua.

El compost es un abono excelente para la agricultura, aporta nutrientes al suelo, además de mejorar su estructura, reduce la erosión y ayuda en la retención de agua. Por ejemplo al mezclar el compost con suelos arcillosos éstos aumentan su porosidad y se transforman en suelos livianos; en cambio en suelos arenosos aumenta la capacidad de retención de agua.

Dentro de las variables de operación más importantes a controlar durante el desarrollo de un proceso de compostaje están la aireación, temperatura y humedad de la pila. Esta última es una de las variables más importantes, ya que se ve fuertemente influenciada por la condición climática de la zona donde se emplaza el proceso.

Los residuos a utilizar de preferencia en un proceso de compostaje son aquellos que poseen materia fácilmente digerible, tales como estiércol, desperdicios orgánicos, paja, hojas, basura municipal y lodos de plantas de aguas residuales.

Los lodos son cualquier sólido o semisólido de desecho, generado por una planta municipal, comercial o industrial de tratamiento de aguas residuales. Por tanto se tiene que la producción de lodos por parte de una instalación de depuración de aguas residuales es una consecuencia inherente al funcionamiento de la misma (Cisterna, 2004).

1.3.2 Generación de lodos en Ewos Chile S. A.

La empresa Ewos Chile S.A., elabora alimentos extruídos para salmones y truchas, los cuales se producen de la mezcla de varios insumos. El insumo que se encuentra en mayor proporción corresponde a la harina de pescado y le sigue en cantidad el aceite de pescado. Las dietas que se elaboran en la industria van a depender de la etapa de crecimiento en la que se encuentren los peces que van a ser alimentados, estas dietas son determinadas por el especialista de cada centro de cultivo. Independiente de la dieta que se prepare los ingredientes no van a

cambiar, sólo variará la proporción en la que se encontrará cada uno de los componentes.

Como consecuencia de este proceso productivo, la empresa Ewos Chile S.A. genera Residuos Industriales Líquidos (RILES), los que provienen del área de producción y se generan principalmente por el lavado de equipos.

El sistema de tratamiento de estos Riles está constituido por un tratamiento primario el cual incluye las etapas de equalización, separación sólido-líquido y separación de aceites y grasas, y un tratamiento secundario formado por las unidades de regulación de pH y el tratamiento biológico. Las otras etapas que forman parte del tratamiento son: espesador de lodos, filtración, control final y cloración del efluente.

Los sólidos producidos en el tratamiento inicial (separador sólido-líquido) y los sólidos que se producen en el tratamiento secundario (reactor biológico) se conducen a un espesador de lodos para homogeneizarlos y disminuir el porcentaje de humedad presente en éstos. Finalmente son conducidos al filtro prensa para eliminar el exceso de agua que aún contienen, de manera tal de disponerlos con una humedad lo más baja posible. Al cabo de estas etapas los lodos son enviados a un estanque en el cual se acumulan, desde donde son enviados a un lugar autorizado para su disposición final.

En la figura 1.1 se muestra un diagrama del proceso de tratamiento que grafica lo mencionado anteriormente.

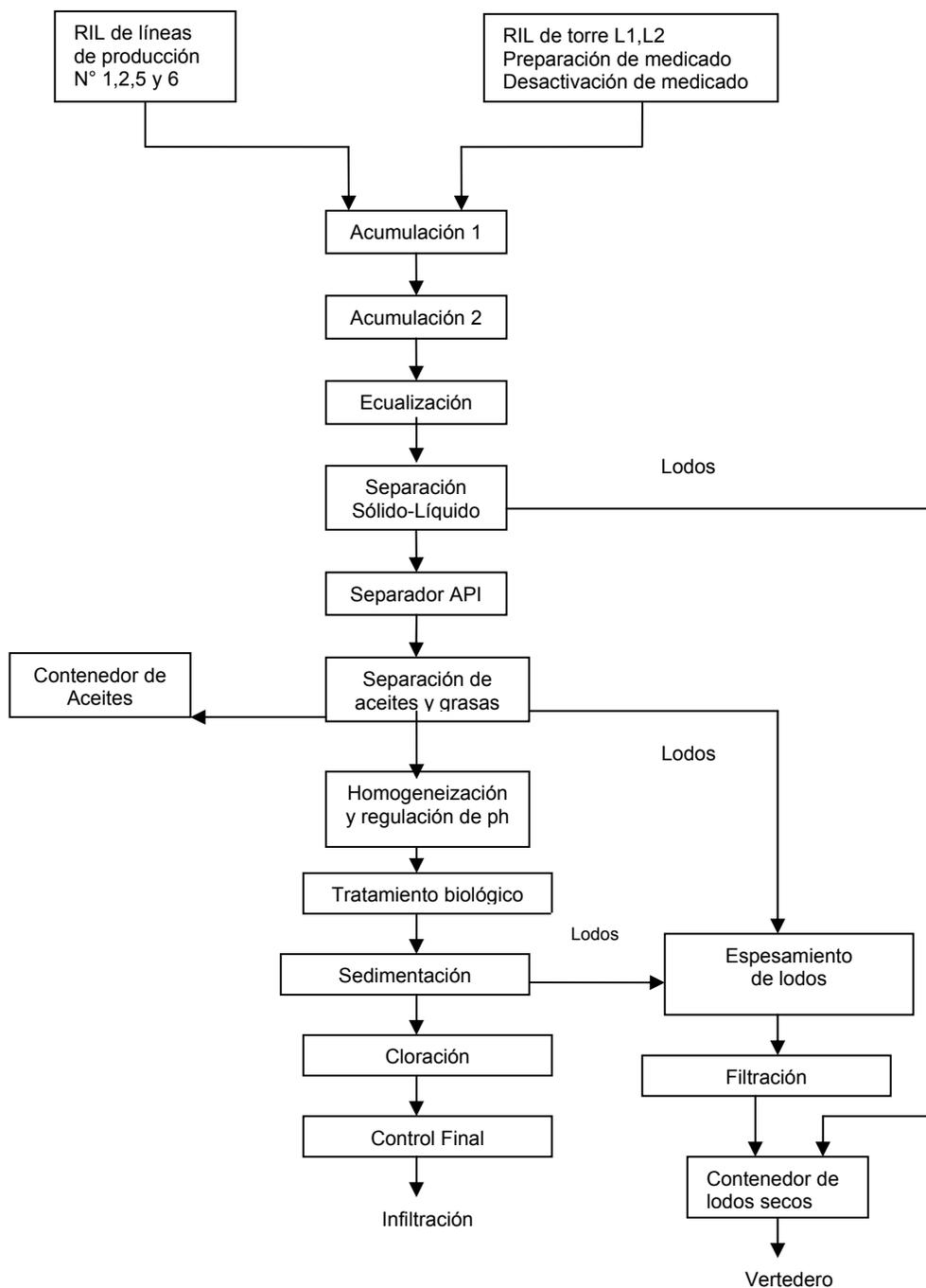


Figura 1.1: Diagrama del proceso de tratamiento de Riles de Ewos Chile S. A.

CAPITULO II MARCO TEORICO.

La materia orgánica presente en un residuo sólido no estabilizado puede originar problemas de olores y atraer vectores (moscas, mosquitos, y roedores) a los lugares de disposición. Los patógenos, bacterias, virus, protozoos y huevos de gusanos parásitos se concentran en los residuos y pueden propagar enfermedades en caso de que exista contacto con el hombre. Es por ello que desde el punto de vista sanitario resulta muy importante estabilizar la materia orgánica presente en éstos, existiendo para ello múltiples tecnologías disponibles, dentro de las cuales están: estabilización con cal, tratamiento térmico, digestión anaeróbica y aeróbica y compostaje.

2.1 Compostaje aeróbico.

2.1.1 Principios básicos.

El compostaje es un proceso mediante el cual la materia orgánica sufre una degradación biológica por microorganismos facultativos, en condiciones controladas, generando un producto estable llamado compost, CO₂ y agua. La temperatura interna que se genera durante el proceso destruye la gran mayoría de los organismos patógenos (Metcalf & Eddy, 1995).

Los principales organismos implicados en las transformaciones biológicas de residuos orgánicos son bacterias, hongos, levaduras y actinomicetos.

Este proceso resulta ser económico y sencillo en tecnología. Es un proceso biológico para aprovechar toda clase de basura biodegradable: desechos de jardín o cocina, papeles, estiércoles de animales, etc., los cuales bajo el impacto de microorganismos son transformados en abono agrícola, el compost. Al asegurar las condiciones necesarias para la fermentación aeróbica de estas materias, especialmente temperatura, razón carbono-nitrógeno (C/N), aireación y humedad, es posible obtener un producto natural de alta calidad optimizado con la aplicación de la ingeniería (Cisterna, 2004).

Para llevar a cabo el compostaje se debe mezclar el residuo orgánico a tratar (basura, lodos, otros), con un material de soporte, que puede ser pasto, viruta, aserrín, poda de árboles, papel cartón, caucho, etc. (WEF, 1995).

La incorporación de un material de soporte resulta necesaria cuando los materiales a compostar presentan una relación carbono-nitrógeno (C/N) fuera del rango recomendado por la literatura (se recomienda entre 25:1-35:1) (Madrid F. y otros, 2001), y además cuando la porosidad de la mezcla es baja, de manera que el suministro de oxígeno a los microorganismos que se encuentran en el interior de la pila puede verse mermado, con lo cual disminuye la actividad microbiológica.

Son muchos y muy complejos los factores que intervienen en el proceso biológico del compostaje, estando a su vez influenciados por las condiciones ambientales, tipo de residuo a tratar y el tipo de técnica de compostaje empleada.

Otro aspecto que resulta importante destacar es la considerable cantidad de calor que se genera en la fermentación aeróbica de los residuos sólidos, resultando una reacción biológica exotérmica la cual contribuye a un aumento apreciable de la temperatura interna del proceso de biodegradación (Unda, 1998).

Cuando parte del calor producido queda atrapado en el mismo material en proceso de compostaje, se produce un efecto de retroalimentación de la generación de calor.

En la figura 2.1 se ilustra el proceso de compostaje.

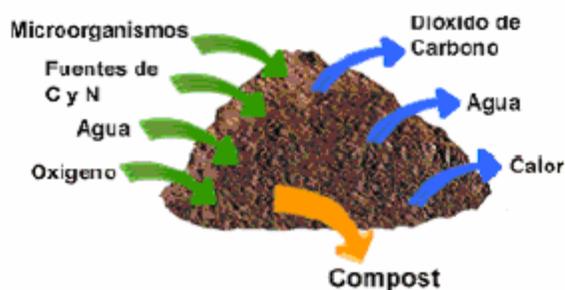
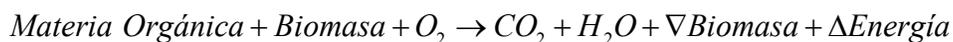


Figura 2.1: Representación del proceso de compostaje.

Un proceso de compostaje se caracteriza por el predominio de los metabolismos respiratorios aerobios y por la alternancia de etapas mesotérmicas (10-40°C) con etapas termogénicas (40-75°C), y con la participación de organismos mesófilos y termófilos respectivamente.

2.1.2 Reacción química del proceso de compostaje aeróbico.

El proceso de compostaje aeróbico se puede representar mediante la siguiente ecuación:



Cuando se da inicio al proceso de compostaje se produce un incremento de la temperatura interna de la pila producto de la actividad metabólica que están desarrollando los microorganismos encargados de la oxidación de la materia orgánica. Este incremento de temperatura se refleja en un aumento de energía, la que a medida que el proceso de biodegradación se acerca a su fin comienza a disminuir, debido al cese de la actividad microbiológica y además por la evaporación del agua contenida en la pila. La descomposición microbiana libera durante el proceso grandes cantidades de energía en forma de calor.

El aumento de la temperatura durante el proceso de compostaje se debe al catabolismo aerobio del material compostable por los microorganismos que forman su flora natural. Como consecuencia de este metabolismo aerobio se utilizan los carbohidratos, lípidos y proteínas del substrato como fuente de carbono y de energía por los microorganismos. Parte de esta energía la disipan los microorganismos como calor, necesario para elevar la temperatura ambiental de forma que éstos puedan funcionar metabólicamente de forma más eficiente.

Por consiguiente, para la generación de calor es necesario el metabolismo aerobio que permita convertir las moléculas más complejas en moléculas utilizables metabólicamente como unidades de energía (ATP), y esto sólo es posible mediante la cadena transportadora de electrones con el O_2 como aceptor final (cadena respiratoria).

En caso de no existir suficiente oxígeno para permitir el metabolismo aerobio, los microorganismos cambian su forma de producción de energía hacia procesos fermentativos mucho menos eficientes desde el punto de vista energético (menos producción de calor, procesos más lentos), que generan productos secundarios que, en ciertas ocasiones, pueden resultar indeseables (generación de metano, malos olores producidos por poliaminas, etc.), que no esterilizan el material (no sube la temperatura y no se produce la autoesterilización) por lo que sanitariamente el producto puede ser peligroso ya que no se logra una estabilización biológica total.

Por otro lado la generación de dióxido de carbono y vapor de agua son los causantes de la disminución de biomasa. Gran parte del carbono de los compuestos orgánicos son por lo general oxidados completamente a CO_2 , otra fracción de este elemento es asimilado en la síntesis de los materiales celulares.

La biodegradación es consecuencia de la actividad de los microorganismos que crecen y se reproducen en los materiales orgánicos en descomposición. La consecuencia final de estas actividades vitales es la transformación de los materiales orgánicos originales en otras formas químicas más simples.

2.1.3 Microbiología del proceso de compostaje.

Los microorganismos, utilizando el oxígeno en sus procesos metabólicos, obtienen de la materia orgánica los elementos esenciales que necesitan para su nutrición, desarrollo y reproducción.

El proceso de compostaje implica una compleja destrucción de la materia orgánica junto con la producción de ácido húmico para dar lugar a un producto final estable. Los microorganismos que participan en el proceso pertenecen a tres grandes categorías: bacterias, actinomicetos y hongos. Estas poblaciones microbianas son las responsables de la descomposición de proteínas, lípidos y grasas a temperaturas termofílicas, así como de gran parte de la energía calorífica producida. Los hongos y actinomicetos también están presentes, en poblaciones variables, durante las fases mesofílica y termofílica del compostaje, y parecen ser los responsables de la destrucción de la materia orgánica compleja y de la celulosa presente en el material de enmienda o soporte.

Durante el proceso de compostaje, se observan tres fases de actividad diferente con sus intervalos de temperatura asociados: mesofílica, termofílica y enfriamiento.

En la fase mesofílica inicial, la temperatura en la pila de compostaje aumenta desde la temperatura ambiente hasta aproximadamente los 40° C con la aparición de hongos y bacterias productoras de ácidos. Conforme aumenta la temperatura

de la masa compostada hasta alcanzar el intervalo termofílico de temperaturas (40 a 70° C), estos microorganismos dejan paso a las bacterias termofílicas, los actinomicetos, y los hongos termofílicos. Es en esta fase, en el intervalo termofílico de temperaturas, en la que se produce la máxima degradación y estabilización de la materia orgánica (Metcalf & Eddy, 1995).

La fase de enfriamiento se caracteriza por una reducción de la actividad microbiana y por la sustitución de los organismos termofílicos por organismos mesofílicos (bacterias y hongos). Durante esta última fase, se producirá una liberación adicional de agua por evaporación así como una estabilización del pH, y se completará la formación de ácido húmico.

Si el material de partida está muy compactado o con mucha humedad, no se puede producir un intercambio efectivo de oxígeno y se desarrollan procesos fermentativos de tipo anaeróbico que retrasan o impiden el aumento de temperatura.

2.1.4 Factores que afectan el proceso de compostaje.

Los factores que afectan el proceso de compostaje son: relación Carbono-Nitrógeno (C/N), temperatura interna de la pila, humedad, aireación, pH del material en proceso de biodegradación y tamaño de las partículas a compostar.

2.1.4.1 Relación carbono-nitrógeno (C / N).

La relación C/N expresa las unidades de carbono por unidades de nitrógeno que contiene un material. En la estabilización aeróbica los microorganismos utilizan el oxígeno, se alimentan de la materia orgánica y desarrollan el protoplasma de la célula con base en el nitrógeno, fósforo, parte del carbono y otros nutrientes (Unda, 1998).

La mayor parte del carbono es utilizado como fuente de energía por los microorganismos, y como consecuencia de las reacciones metabólicas, el carbono se desprende en forma de anhídrido carbónico. Debido a que el carbono sirve como fuente de energía y como un elemento del protoplasma de la célula, se requiere mayor cantidad de carbono que de nitrógeno. Si el exceso de carbono en relación con el nitrógeno de la materia orgánica que se va a descomponer es muy alto, la actividad biológica disminuye, y se requerirán varios ciclos de organismos para utilizar el carbono y con ello el período de compostaje aumentará. Cuando alguno de los microorganismos muere, el nitrógeno y el carbono almacenado en ellos queda disponible para otros microorganismos. Este nitrógeno de las células muertas se utiliza para formar materia de las nuevas células con desprendimiento

de carbono como CO_2 . El nitrógeno debido a la naturaleza proteica del protoplasma, es un elemento esencial en la reproducción celular.

Cuando la cantidad de carbono es menor que el requerido para convertir el nitrógeno disponible en proteínas, los organismos hacen uso de la totalidad del carbono y liberan el exceso de nitrógeno como amoníaco.

Una razón C/N balanceada, usualmente asegura que los otros nutrientes requeridos (fósforo, potasio, etc.) estarán presentes en adecuadas cantidades (Rynk y Willson, 1992).

En general, de acuerdo a la literatura disponible se recomienda dosificar los materiales a compostar de tal manera que la mezcla resultante posea una relación carbono-nitrógeno al inicio del proceso entre 25:1-35:1 (Madrid F. y otros, 2001).

2.1.4.2 Temperatura.

Tal como se ha mencionado, durante el proceso de fermentación aerobia de los residuos se genera calor, y debido a que los materiales a compostar tienen una propiedad aislante relativamente buena, la pila retiene dicho calor de la reacción biológica exotérmica y por consecuencia hay un aumento significativo de la temperatura.

La temperatura tiene efecto en el crecimiento y en la actividad metabólica de los microorganismos. Es un parámetro útil para medir el proceso de descomposición, ya que en la medida que se desarrolla el metabolismo de las bacterias y debido a

la generación de calor, el incremento de temperatura es un buen indicador de cómo está funcionando el proceso.

La tasa de descomposición de la pila se acelera cuando la temperatura está entre los 35 y 70° C.

En general dentro de las primeras 24 horas se alcanza una temperatura de 40°C, temperatura que representa el límite superior para los organismos mesofílicos. Luego debido a la actividad cinética desarrollada por los organismos se produce un incremento de temperatura dando paso a la fase termofílica (40-70°C). Los microorganismos iniciales mueren y dan paso a otros más resistentes (termofílicos). Debido a que son escasos los organismos termofílicos que actúan activamente en el proceso de descomposición a más de 70°C, se recomienda no sobrepasar esta temperatura por un periodo prolongado.

Las temperaturas altas son necesarias para la destrucción de organismos patógenos y semillas. La temperatura óptima para la digestión aeróbica varía de 50 a 70°C, siendo probablemente los 60°C la temperatura más satisfactoria (Unda, 1998).

Existen estudios realizados en Estados Unidos por TNRCC los cuales relacionan la razón carbono-nitrógeno con la máxima temperatura alcanzada en el interior de una pila en proceso de compostaje.

En la tabla 2.1 se muestra tal relación.

Relación Carbono-Nitrógeno	Máxima temperatura alcanzada por la pila de compost
30/1	68°C
40/1	60°C
60/1	40°C

Tabla 2.1: Relación C/N y temperatura máxima alcanzada en una pila de compost

(Fuente: Manual Compostaje (1999)).

La temperatura óptima para la disminución de sólidos volátiles (oxidación de la biomasa existente en las pilas), es entre 40° C a 50° C, y para la destrucción de patógenos entre 55° C y 60° C (Cisterna, 2004).

2.1.4.3 Humedad.

La humedad es uno de los factores más importantes en el proceso de biodegradación, ya que si ésta es muy baja, los microorganismos no se desarrollan, por no tener agua suficiente para su metabolismo, y si es excesivamente alta, desplaza el aire al llenar los intersticios dejados por los residuos, presentándose circunstancias propicias para el desarrollo de condiciones anaeróbicas.

Durante el proceso de compostaje, en especial en las primeras fases, se producen grandes pérdidas de agua debido especialmente a la gran cantidad de calor que se produce en el interior de la pila. Esto a raíz de la actividad biológica desarrollada por los microorganismos encargados de la biodegradación de la materia orgánica.

Existen diversas investigaciones, las cuales recomiendan intervalos óptimos de humedad para llevar a cabo el proceso de compostaje. La Universidad de California por ejemplo, ha concluido que el intervalo de humedad más favorable se sitúa entre 40 y 60% para obtener una condición aeróbica (Unda, 1998).

La humedad adecuada para cada etapa, depende de la naturaleza, compactación y textura de los materiales de la pila. Los materiales fibrosos y finos retienen mayor humedad y aumentan la superficie específica de contacto. Ahora si los residuos cuentan con abundante material granular, existirán dificultades para mantener condiciones aerobias con un contenido de humedad de 70%.

La humedad excesiva se puede reducir mediante el volteo de la pila, lo que permite una evaporación mayor. El mismo sistema da buenos resultados cuando es demasiado seco, y debe aumentarse la humedad por riego, ya que mejora la uniformidad en la masa.

La humedad de la mezcla debe estar en el rango de 50 a 70%, para asegurar una óptima biodegradación, ya que si el material se seca ésta se detiene y si es excesivamente húmedo se transforma en putrefacción anaeróbica incontrolada. Si la humedad es menor al 50% se debe agregar agua; en caso contrario hay que voltear en forma más frecuente o agregar material de soporte (Cisterna, 2004).

2.1.4.4 Aireación.

Los microorganismos aeróbicos necesitan oxígeno, al igual que agua y alimentos. La aireación remueve calor, vapor de agua y suministra oxígeno a los microorganismos.

En el caso que la aireación sea deficiente, el proceso de degradación cambia de aeróbico a anaeróbico generándose productos distintos y graves problemas de olor. La mayoría de los problemas de olores en los procesos de compostaje aeróbicos se deben fundamentalmente, a deficiencia en el volteo donde se pueden desarrollar condiciones anaeróbicas, bajo las cuales existe un predominio de ácidos orgánicos, muchos de los cuales presentan olores desagradables.

Cuando la cantidad de oxígeno suministrado a los microorganismos encargados de la oxidación de la materia orgánica es limitado, el proceso de compostaje es más lento. La mínima concentración de oxígeno requerida en el interior de las pilas de fermentación es de un 5% del volumen de poros (Rynk y Willson, 1992).

Para airear las pilas de residuos se puede hacer mediante diversas maneras. Existe el volteo manual el cual se realiza satisfactoriamente mediante el uso de horquetas en donde el material se desplaza a un lugar inmediatamente adyacente para nuevamente reconstruir la pila. También existen una serie de equipos mecánicos para cumplir tal finalidad. Los drenes basales destinados a eliminar la humedad no logran un buen rendimiento en cuanto a aireación se refiere, debido a

que la entrega de aire por el fondo es muy limitada, en especial para aquellos residuos muy triturados. Se han utilizado además chimeneas cilíndricas perforadas con el objeto de producir la aireación. Sin embargo, investigaciones de la Universidad de California no justifican el uso de este tipo de chimeneas por escasa eficiencia.

2.1.4.5 pH.

Este factor no tiene gran influencia en el proceso de compostaje ya que el rango de pH tolerado por las bacterias es en general relativamente amplio, existiendo grupos fisiológicos adaptados a valores extremos. No obstante un valor de pH cercano al valor neutro, nos asegura el desarrollo de la gran mayoría de los grupos fisiológicos. Valores de pH inferiores a 5.5 (ácidos) inhiben el crecimiento de estos grupos. Valores superiores a 8 (alcalinos) también inhiben su crecimiento, haciendo precipitar nutrientes esenciales para el medio. Durante el proceso de compostaje se produce una evolución natural del pH, que es necesaria para el proceso y que es acompañada por una sucesión de grupos fisiológicos.

Al inicio del proceso de descomposición aeróbica se generan ácidos los cuales hacen bajar el pH a valores cercanos a 5. Después de dos a cuatro días de iniciado el proceso aerobio, el pH normalmente sube alcanzando valores entre 8 y 9, para posteriormente estabilizarse entorno al pH neutro cuando finaliza la actividad biodegradadora.

El valor del pH tal como se ha mencionado hasta aquí varía en el tiempo. En la figura 2.2 se muestra la relación existente entre esta variable y la temperatura en una pila de compostaje.

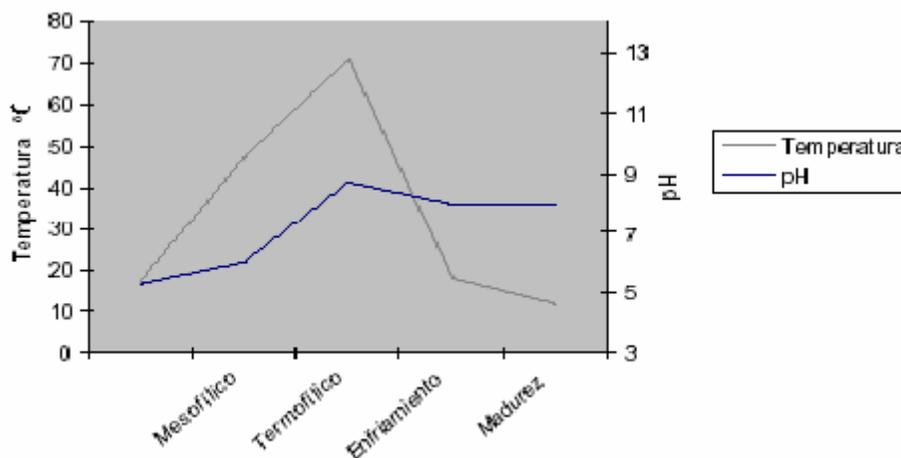


Figura 2.2: Variación de pH y temperatura en una pila de compostaje (Fuente: Gray y Biddlestone (1981)).

En los primeros días de compostaje, el pH cae entorno a 5 o menos, debido a la presencia de ácidos orgánicos simples, por otra parte la temperatura sube debido a la producción de organismos mesófilos. Después de aproximadamente 3 días, la temperatura llega a la etapa termofílica y el pH comienza a subir hasta aproximadamente a un valor entre 7.5 a 9 para el resto del proceso aeróbico. El valor del pH llega a un valor de aproximadamente 7 cuando el compost está maduro.

2.1.4.6 Tamaño de las partículas a compostar.

El tamaño de las partículas que conforman los residuos a compostar tiene una influencia directa en la porosidad de la mezcla. La porosidad es una medida de los espacios dentro de la masa en proceso de compostaje y determina la resistencia al flujo de aire.

Un tamaño de partículas reducido, incrementa la velocidad de las reacciones bioquímicas durante el proceso de compostaje aeróbico. Sin embargo si ese tamaño de partículas resulta ser extremadamente pequeño dificultará la penetración de aire al interior de la pila, ya que reducirá la porosidad con lo cual se debe incorporar algún material estructurante. Es por ello que se recomiendan tamaños de partículas adecuados para un proceso de compostaje aeróbico en un rango que oscila entre 2 y 5 mm (Unda, 1998).

El tamaño de partícula del material que se fermenta está controlado en parte por los requisitos del producto final y por consideraciones económicas (Tchobanoglous, 1998).

2.1.5 Operación de un proceso de compostaje aeróbico.

2.1.5.1 Etapas operacionales del proceso de compostaje.

a) Mezclado: los lodos se mezclan con un material de soporte, el cual aumenta la porosidad y permite la aireación de la mezcla; además, aporta nutrientes para la actividad microbiana y disminuye el contenido de humedad.

b) Compostaje: proceso biológico aerobio que degrada materia orgánica, generando dióxido de carbono, vapor de agua y calor. La temperatura de la mezcla puede exceder los 70°C, pero su rango óptimo es entre 50° y 60°C; luego decrece gradualmente por la disminución de nutrientes y actividad microbiana. Para controlar la temperatura, mantener la humedad o tasa de secado y el suministro de oxígeno, la pila debe ser periódicamente sometida a volteo. El pH se mantiene dentro del rango 5-8 unidades. Se entiende como término de la etapa de compostaje cuando la temperatura interna de la pila iguala a la temperatura ambiente, lo que generalmente ocurre después de 20 a 30 días.

c) Curado o maduración: conversión del componente biodegradable a una sustancia similar al humus. El pH de un compost maduro está en el rango 6-8. Otro indicador de compost maduro es la relación C/N, cuyo valor es entre 10:1 y 15:1. El tiempo de maduración o curado es de aproximadamente 30 días o más.

2.1.5.2 Parámetros de diseño y control del proceso.

Los parámetros de diseño a considerar son los siguientes (Metcalf & Eddy, 1998):

a) Razón Carbono-Nitrógeno: los microorganismos usan carbono y nitrógeno en proporciones fijas para sintetizar su biomasa. La razón ideal de carbono y nitrógeno (C/N) es del orden de 25: 1 a 35: 1. Si la relación es menor, el exceso de nitrógeno se transforma en amonio, produciéndose pérdida de su valor nutritivo y generación de mal olor. Si la razón es mayor, la materia orgánica se degrada más lentamente.

b) Aireación y Temperatura: la aireación remueve calor, vapor de agua y suministra oxígeno a los microorganismos. La temperatura interna de la pila puede exceder los 70°C, lo cual es perjudicial para los microorganismos que actúan en el proceso. La temperatura óptima para la destrucción de sólidos volátiles es 40° a 50°C., y para la destrucción de patógenos mayor a 55°C.

c) Control de la Humedad: la humedad de la mezcla debe estar en el rango de 50%-65%. Si la humedad es menor al 50% se debe agregar agua; en caso contrario, hay que voltear o agregar material de soporte.

2.1.6 Modelación matemática del proceso de compostaje.

Durante el proceso de compostaje, la pérdida de materia orgánica puede alcanzar alrededor de un 30% medido como materia seca total. La gran mayoría de esta reducción corresponde a materia orgánica volátil, la cual se expresa como sólidos volátiles (SV) los que se incineran a 550° C durante una cierta cantidad de tiempo para su determinación. Dentro de la materia orgánica volátil existe un pequeño porcentaje que corresponde a materia orgánica no biodegradable (SV_{nobio}).

Así la fracción de material sólido total (ST) de la pila en fermentación está formada por sólidos minerales (SM) y sólidos volátiles (SV). Matemáticamente los sólidos totales (ST) presentes en la pila se representan mediante la siguiente ecuación:

$$ST = SM + SV$$

$$ST = SM + SV_{\text{bio}} + SV_{\text{nobio}} \dots\dots\dots(2.1)$$

Donde:

ST: sólidos totales presentes en la pila en proceso de compostaje.

SM: sólidos minerales presentes en la pila en proceso de compostaje.

SV_{bio} : sólidos volátiles biodegradables en la pila en proceso de compostaje.

$SV_{\text{no bio}}$: sólidos volátiles no biodegradables en la pila en proceso de compostaje.

Por otro lado, a diferencia de lo que sucede con la materia orgánica volátil, la fracción mineral existente en la pila en proceso de fermentación, presenta un incremento relativo en su contenido a raíz de la biodegradación que está teniendo la fracción orgánica volátil. Lo anterior se deduce de la ecuación (2.1) y su evolución se observa en la figura 2.3.

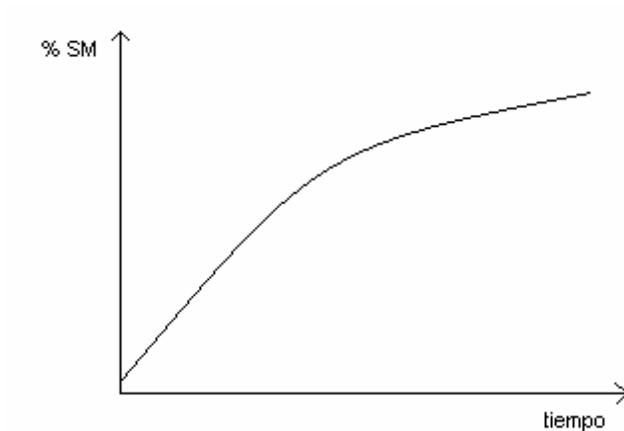


Figura 2.3: Variación de los sólidos minerales en el tiempo.

2.1.6.1 Balance de sólidos volátiles biodegradables en el proceso de biodegradación.

El proceso de biodegradación que se desarrolla en la pila de compostaje se modela de idéntica forma a lo que sucede en un digestor discontinuo. En este tipo de sistemas, se carga el digestor una sola vez con materia orgánica.

Si se hace la analogía con el proceso de compostaje este instante corresponde a la etapa en la cual se construye la pila a compostar. Luego comienza el proceso de biodegradación de la fracción orgánica, la que es llevada a cabo por las distintas colonias de microorganismos presentes a lo largo del proceso, logrando así una disminución de ella después de un cierto tiempo.

En la figura 2.4 se muestra el modelo de digestión discontinua que describe aproximadamente el fenómeno antes citado.

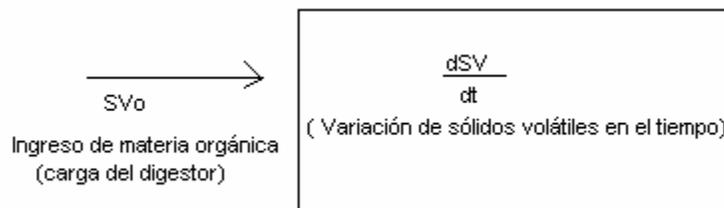


Figura 2.4: Modelo de digestión discontinua que describe el proceso de compostaje.

En un reactor discontinuo, no existe un ingreso continuo de sólidos volátiles, si no que es de una sola vez, por lo que se produce una reducción de ellos durante un cierto tiempo.

Lo anterior se expresa mediante la siguiente ecuación diferencial:

$$\frac{dSV_{digestor}}{dt} = -K_d * SV \dots\dots\dots (2.2)$$

Donde:

$\frac{dSV_{digestor}}{dt}$: variación de sólidos volátiles biodegradables por unidad de tiempo.

K_d : constante de reacción.

SV: sólidos volátiles biodegradables remanentes en el tiempo t en el interior del reactor.

El término K_d de la ecuación diferencial de primer orden representa la tasa de reducción de materia orgánica en el interior del digestor.

En un proceso de compostaje la temperatura no es constante, por tanto K_d es un valor aproximado.

Integrando la ecuación (2.2) entre los límites $SV=SV_0$ y $SV=SV$, y entre $t=0$ y $t=t$ se tiene:

$$\int_{SV=SV_0}^{SV=SV} \frac{dSV}{SV} = -K_d \int_{t=0}^{t=t} dt \dots\dots\dots (2.3)$$

$$\ln \left(\frac{SV}{SV_0} \right) = -K_d * t$$

Finalmente se tiene la ecuación que rige a un digestor discontinuo:

$$SV = SV_0 * e^{-K_d * t} \dots\dots\dots (2.4)$$

2.2 Transferencia de calor en sólidos porosos.

Durante el proceso de compostaje debido al metabolismo de los organismos encargados de la biodegradación de la materia orgánica se genera calor. Termodinámicamente este fenómeno implica un aumento de la energía del sistema y tal como se mencionó en el punto 2.1.2 a medida que el proceso de biodegradación comienza a finalizar, la energía generada comienza a disminuir debido al cese de la actividad microbiana.

El calor representa una forma de energía que se conoce como energía en tránsito. Los mecanismos de transferencia de calor son por radiación, convección y conducción.

En el caso del proceso de compostaje el cual físicamente constituye un medio poroso, el flujo de calor ocurre por conducción. En este mecanismo la transferencia de calor se produce a escala atómica como un intercambio de energía cinética entre las moléculas, donde las moléculas menos energéticas ganan energía al chocar con las más energéticas (Smith y otros, 1996).

2.2.1 Tasa de calentamiento de sólidos porosos.

Para determinar la tasa de calentamiento **H** de un medio poroso, el cual se aproxima correctamente a los lodos a compostar, se utilizará el modelo representado en la figura 2.5.

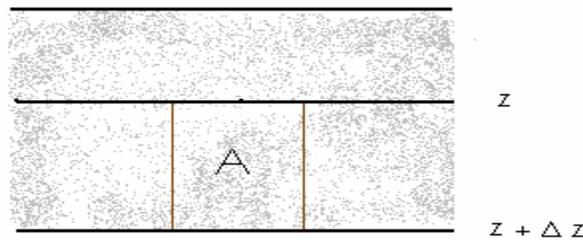


Figura 2.5: Perfil de un medio poroso para determinar su tasa de calentamiento.

Para un determinado nivel **Z** del medio en estudio, el flujo de calor **H (z)** de acuerdo a la ley de conducción del calor es proporcional al gradiente de temperatura **dT/dz**:

$$H = -k * A * \frac{dT}{dz} \dots\dots (2.5)$$

Luego si se expresa el calentamiento por unidad de área **G= H/A** se tiene:

$$G (z) = -k(z) * \frac{\partial T}{\partial z} \dots\dots(2.6)$$

Donde:

k (z): conductividad térmica (Campbell, 1985).

En el nivel $z + \Delta z$ se tiene:

$$G(z + \Delta z) = -k(z + \Delta z) * \frac{\partial T}{\partial z} \dots\dots (2.7)$$

Luego la variación de G en el nivel será:

$$\Delta G = G(z + \Delta z) - G(z) = \frac{\partial G(z)}{\partial z} \Delta(z)$$

$$\Delta G = \frac{\partial}{\partial z} \left(-k(z) \frac{\partial T}{\partial z} \right) \Delta(z) \dots\dots(2.8)$$

La energía que gana el nivel es usada en modificar su temperatura. Esto matemáticamente se expresa como:

$$\Delta G = - C \frac{\partial T}{\partial t} \Delta z \dots\dots (2.9)$$

Donde:

C: capacidad calórica.

$\frac{\partial T}{\partial t}$: variación de temperatura en el tiempo.

La capacidad calórica representa la habilidad que posee un suelo para retener calor (Sellers, 1965) y está dada por:

$$C = 0,46*m + 0,6*o + w$$

Donde:

m: fracción volumétrica mineral del suelo.

o: fracción volumétrica orgánica del suelo.

w: fracción volumétrica de agua en el suelo.

Si se compara la ecuación (2.8) con la ecuación (2.9) se tiene:

$$-C \frac{\partial T}{\partial t} \Delta z = -\frac{\partial}{\partial z} \left(k(z) \frac{\partial T}{\partial z} \right) \Delta z \dots\dots\dots (2.10)$$

Para un estrato homogéneo, lo cual se aproxima correctamente a la masa de residuos en el interior de la pila en proceso de compostaje, $k(z)$ será constante por lo que finalmente se llega a:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{k}{C} \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \dots\dots\dots(2.11)$$

De esta última expresión se deduce que la velocidad con que varía la temperatura del sólido poroso depende del perfil térmico de éste.

CAPITULO III METODOLOGIA DE LA INVESTIGACION.

La investigación que se llevó a cabo tuvo como objetivo principal el evaluar el efecto de la pluviometría en pilas de compostaje de residuos sólidos.

Para llevar a cabo este estudio se construyeron dos pilas de residuos sólidos mezcladas con un material de soporte. El residuo sólido utilizado como substrato fue lodo generado en la planta de tratamiento de riles de la empresa Ewos Chile S.A., mientras que el material estructurante o de soporte que se utilizó para ambas pilas fue aserrín de pino insigne, el cual se obtuvo de un aserradero de la zona.

A una de las pilas que se construyó, y que se denominó pila N°1 o pila sometida a riego, se le incorporó determinadas cantidades de agua durante tres periodos continuos. Cada periodo fue de aproximadamente diez días, en los cuales se sometió a esta pila a un volumen diario de agua equivalente a precipitaciones de 25, 50 y 75 mm/día respectivamente. En la figura 3.1 se observa un hietograma de precipitaciones que muestra lo citado anteriormente.

La pila N°2 (pila no sometida a riego) en cambio fue cubierta con un techo de polietileno de manera de impedir las eventuales precipitaciones naturales que pudieran ocurrir durante la investigación.

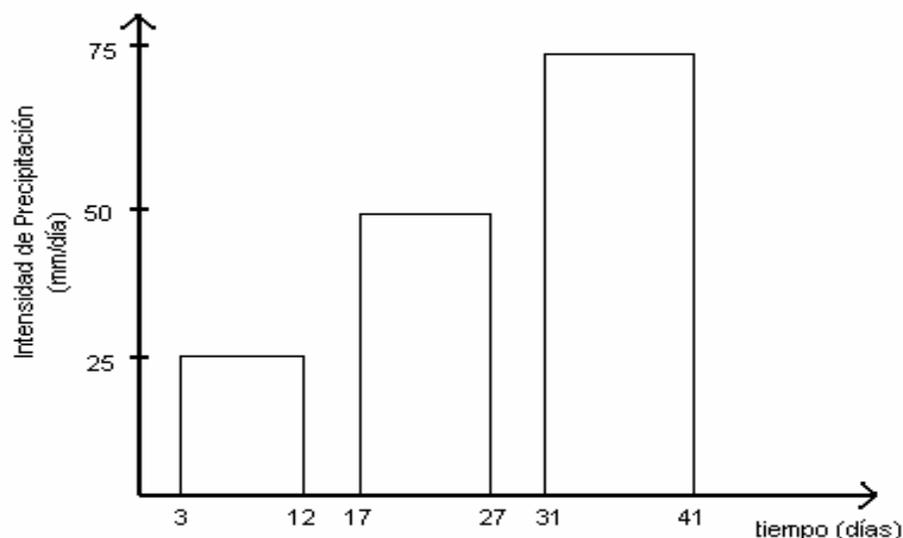


Figura 3.1: Hietograma de precipitaciones.

3.1 Emplazamiento de la investigación.

La experimentación se llevó a cabo en el interior de las dependencias de la Universidad del Bío-Bío. Hasta este lugar fueron trasladados desde las instalaciones de la empresa Ewos Chile S.A. ubicada en el sector de Parque Escuadrón, camino Concepción-Coronel, los lodos utilizados como sustrato. El transporte se realizó en un vehículo especialmente destinado para estos fines con previa autorización sanitaria emitida por el Servicio de Salud de Concepción.

Previo a la construcción de las pilas de compostaje, al terreno donde éstas fueron ubicadas se le realizó un escarpe de manera de eliminar los materiales no deseados y así efectuar un trabajo más limpio. Además sobre el terreno se colocó un polietileno con el fin de impedir la percolación a las napas subterráneas de los lixiviados potencialmente generados como producto de la biodegradación de la materia orgánica y por las precipitaciones. En la figura 3.2 se observa una imagen

del lugar de experimentación con las pilas ya construidas después de 25 días de haber iniciado el proceso de compostaje.



Figura 3.2: Lugar de experimentación.

3.4 Caracterización de los residuos sólidos a compostar.

3.2.1 Lodos.

La materia orgánica utilizada como sustrato en el proceso de compostaje aeróbico fue lodo, el que se obtuvo a la salida del filtro banda presente en la planta de tratamiento de riles de la empresa Ewos Chile S.A.

Debido a la similitud que presentan estos lodos en cuanto a las características físico-químicas con lodos generados en algunas plantas de tratamiento de aguas servidas de Essbío, se optó por utilizar la caracterización de estos últimos como patrón de referencia en cuanto a los contenidos de carbono y nitrógeno para los lodos generados en Ewos Chile S.A.. La caracterización utilizada correspondió a lodos generados en la planta de tratamiento de aguas servidas de la ciudad de

Chillán, ya que el nivel de industrialización que presenta esta ciudad es bastante bajo lo cual eventualmente asegura que los lodos generados en dicha planta presenten cantidades muy bajas de elementos de traza, al igual que los lodos de Ewos Chile S.A.

A esta similitud, también se debe agregar que la gran mayoría de las plantas de tratamiento de aguas servidas de Essbío operan bajo un régimen de aireación extendida, al igual que la planta de tratamiento de riles de la empresa Ewos Chile S.A. Finalmente se debe mencionar que todas las aguas residuales provenientes de los procesos productivos y de los servicios sanitarios de la empresa Ewos Chile S.A. son conducidas a la planta de tratamiento de riles de la empresa para ser tratadas, lo que hace aún más evidente que el lodo generado en tales instalaciones sea asimilable a los lodos generados en las plantas de tratamientos de aguas servidas de Essbío.

En la tabla 3.1 se presenta la caracterización química y el contenido de humedad de los lodos previo al inicio del proceso de compostaje.

Materia Orgánica	Humedad (%)	Carbono (% Peso Seco)	Nitrógeno (% Peso Seco)	Razón C/N
Lodos	82	31,6	1,93	16,38

Tabla 3.1: Caracterización química de los lodos utilizados en el proceso de compostaje.

El porcentaje de humedad de la materia orgánica se determinó en el laboratorio de la planta de tratamiento de riles de la empresa Ewos Chile S.A.

Debido a que la materia orgánica a compostar presenta una baja relación carbono-nitrógeno y una porosidad también pequeña, se procedió a mezclar los lodos con un material estructurante.

3.2.2 Material estructurante.

El material de soporte que se utilizó en ambas pilas fue aserrín de pino insigne, el cual fue obtenido de un aserradero. El tamaño de este material se escogió pensando en que éste lograra algún grado de biodegradación durante lo que dura el proceso de compostaje pese al elevado porcentaje de lignina y celulosa que posee.

En la tabla 3.2 se presenta la caracterización de este material.

Material	Humedad (%)	Carbono (% Peso Seco)	Nitrógeno (% Peso Seco)	Razón C/N
Aserrín	12,71	48,1	1,2	40,08

Tabla 3.2: Caracterización química del material de soporte.

El porcentaje de humedad del material de soporte fue obtenido en el laboratorio de química de la Universidad del Bío-Bío.

En lo que respecta a los porcentajes de carbono y nitrógeno éstos se obtuvieron de literatura (Tchobanoglous, 1998). En la figura 3.3 se observa el material de soporte utilizado.



Figura 3.3: Material de soporte utilizado en el proceso de compostaje.

3.3 Diseño de las pilas a compostar.

El proceso de compostaje que se realizó consistió en pilas de compostaje en base a volteo. En cada una de las pilas se mezcló el residuo sólido (lodos) con el material de soporte antes mencionado.

La proporción de cada material fue determinada utilizando las expresiones matemáticas recomendadas por Cornell University (2004) y tratando de satisfacer los requerimientos iniciales de humedad y relación carbono-nitrógeno (C/N) sugeridas por la literatura (Tchobanoglous, 1998).

3.3.1 Cálculo de la humedad teórica de la mezcla.

Para el cálculo de la humedad teórica se utilizó la siguiente ecuación:

$$G = \frac{\sum_{i=1}^n M_i * H_i}{\sum_{i=1}^n M_i} \dots\dots\dots (3.1)$$

Donde:

G: porcentaje de humedad de la mezcla.

M_i : masa húmeda del material i presente en la mezcla.

H_i : porcentaje de humedad del material i presente en la mezcla.

3.3.2 Cálculo de la razón carbono-nitrógeno (C/N) de la mezcla:

Para el cálculo de la razón carbono-nitrógeno se utilizó la siguiente ecuación:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n M_i * C_i * (100 - H_i)}{\sum_{i=1}^n M_i * N_i * (100 - H_i)} \dots\dots\dots (3.2)$$

Donde:

R: razón carbono-nitrógeno de la mezcla.

M_i : masa húmeda del material i presente en la mezcla.

H_i : porcentaje de humedad del material i presente en la mezcla.

C_i : porcentaje de carbono del material i presente en la mezcla.

N_i : porcentaje de nitrógeno del material i presente en la mezcla.

Resulta importante destacar que para usar las ecuaciones 3.1 y 3.2 se deben probar valores de cantidades de masa de cada material a mezclar, de forma que se cumplan los parámetros de humedad y razón carbono-nitrógeno en cada pila de acuerdo a lo preestablecido por el operador (Cornell University, 2004).

3.3.3 Proporción de cada material presente en las pilas de compostaje.

Para aplicar las ecuaciones 3.1 y 3.2 se definió tanto una humedad teórica como una relación carbono-nitrógeno sugerida por literatura para iniciar el proceso. En la tabla 3.3 se muestran dichos valores.

<i>Humedad Teórica (%) (Cisterna, 2004)</i>	<i>Relación carbono-nitrógeno (C/N) (Madrid F. y otros, 2001)</i>
70	25

Tabla 3.3: Humedad teórica y relación C/N predefinida.

Los valores señalados en la tabla 3.3 se utilizaron para determinar la masa de lodos y de aserrín de ambas pilas de compostaje. De esta manera ambas pilas quedaron dosificadas con las mismas cantidades de cada material.

A continuación se presenta sólo el cálculo para encontrar la masa de aserrín (M_2) a incorporar en cada pila, a partir de las ecuaciones 3.1 y 3.2, ya que la masa total de lodos trasladada desde Ewos Chile S.A. hasta la U. del Bío-Bío para la investigación fue aproximadamente de 640 Kg.

$$70 = \frac{M_1 * 82 + M_2 * 12,71}{(M_1 + M_2)}$$

$$25 = \frac{M_1 * 31,6 * (100 - 82) + M_2 * 48,1 * (100 - 12,71)}{(M_1 * 1,93 * (100 - 82) + M_2 * 1,2 * (100 - 12,71))}$$

Finalmente la masa de lodos y aserrín que satisfacen ambas expresiones son:

$$M_1 = \text{masa de lodos} = 320 \text{ (Kg)}$$

$$M_2 = \text{masa de aserrín} = 60 \text{ (Kg)}$$

En la tabla 3.4 se resumen las características de ambas pilas al momento de dar inicio al proceso de compostaje.

Material	Masa (Kg.)	Proporción (%)
Lodos	320	84,3
Aserrín	60	15,7
Masa Total (Kg)	380	100
Humedad de la Mezcla (%)	70	
Relación C/N de la Mezcla	25	

Tabla 3.4: Principales características de las dos pilas a compostar.

3.3.4 Características geométricas de las pilas al inicio del proceso de compostaje.

Luego de haber determinado las cantidades de cada material a compostar, se procedió a construir las pilas. Para ello se mezclaron ambos materiales (lodo y aserrín) de manera de obtener una mezcla homogénea. La sección transversal de la pila se trató que fuese lo más triangular posible. En la tabla 3.5 se presentan las dimensiones de ambas pilas.

Característica Geométrica	Dimensión (m)
Base	1,00
Altura	0,55
Longitud	1,80

Tabla 3.5: Dimensiones de las pilas a compostar.

A continuación en las figuras 3.4 y 3.5 se muestran las pilas 1 y 2 ya construidas de manera de visualizar sus geometrías.



Figura 3.4: Pila sometida a riego (Pila N°1).



Figura 3.5: Pila no sometida a riego (Pila N°2).

3.4 Parámetros evaluados durante el proceso de compostaje.

Los parámetros evaluados a las pilas de compostaje durante la investigación fueron: temperatura, humedad, sólidos volátiles y minerales y pH.

3.4.1 Temperatura interna de la pila.

Durante un proceso de compostaje el control de la temperatura interna de la pila resulta de vital importancia, ya que ésta constituye una variable de indagación muy certera del nivel de actividad biodegradadora llevada a cabo por los microorganismos.

La temperatura de las pilas se midió en tres puntos: uno de ellos fue en el centro de la pila, en un punto ubicado aproximadamente en la mitad de su altura; los otros dos puntos escogidos para su medición fueron a una profundidad entre 15 y 20 cms.

En la figura 3.6 se ilustra un esquema que muestra la sección transversal de la pila con la ubicación de los puntos en los cuales se efectuaron las mediciones de temperatura.

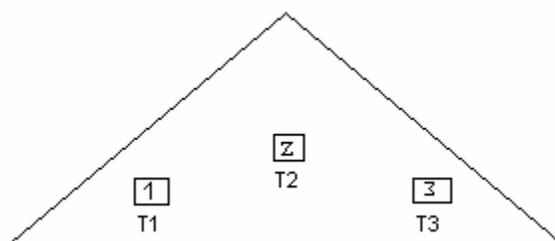


Figura 3.6: Posiciones donde se midió la temperatura interna de las pilas de compostaje.

Donde:

T1, T2, T3: temperaturas internas de las pilas en los puntos 1, 2 y 3 respectivamente.

El instrumento utilizado para medir la temperatura interna de las pilas en proceso de compostaje fue un termómetro digital, el cual se introducía hasta las posiciones antes descritas tras lo cual se esperaba un par de minutos hasta que se estabilizara el valor que éste registraba. En la figura 3.7 se muestra el procedimiento de medición.

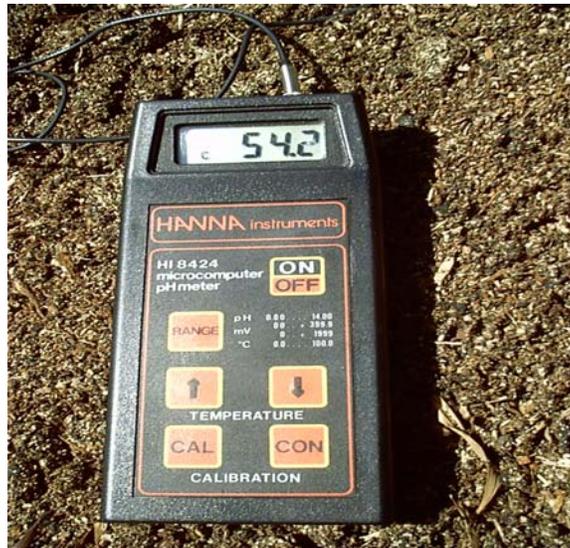


Figura 3.7: Termómetro digital registrando un valor de temperatura interna.

3.4.2 Humedad interna de las pilas.

Para determinar la humedad de la mezcla en proceso de compostaje, el análisis que se emplea se basa en la evaporación del agua contenida en la muestra tomada en terreno, debido al sometimiento de ella a una temperatura de 105° C durante una cierta cantidad de tiempo. La diferencia porcentual entre el peso de la muestra húmeda y el peso de la muestra seca constituye el porcentaje de humedad de la mezcla.

Los equipos que se utilizaron para medir esta variable fueron:

- Horno de secado
- Balanza analítica
- Crisol o vaso de precipitado
- Pinzas
- Desecador
- Espátula

El procedimiento que se llevó a cabo fue el siguiente:

- Se secó el crisol o vaso de precipitado en el horno a 105° C durante 10 minutos, luego se sacaba con las pinzas y se colocaba en el desecador durante 15 minutos para posteriormente pesarlo en la balanza de precisión.
- Se extrajo una muestra del material que se está compostando de diferentes lugares de la pila, se mezclaron y separaron en cuatro partes iguales. Se selecciona una de las partes y se pesa un gramo de ella en el crisol.
- Registrar la masa del crisol con la muestra húmeda.

- Colocar el crisol con dicha muestra en el horno de secado a 105° C durante 60 minutos.
- Se extrae la muestra seca del horno y dejarla en el desecador durante 15 minutos.
- Pesarse el crisol con la muestra seca.
- Calcular la sequedad y humedad de la muestra.

Para obtener el porcentaje de sequedad de la muestra se utiliza la siguiente expresión:

$$\% \text{ Sequedad} = \left[\frac{M_{c+ms} - M_c}{M_{c+mh} - M_c} \right] * 100 \dots\dots\dots(3.3)$$

Donde:

M_{c+ms} : masa del crisol con la muestra seca.

M_{c+mh} : masa del crisol con muestra húmeda.

M_c : masa del crisol.

Luego el porcentaje de humedad se determina con:

$$\% \text{ Humedad} = (100 - \% \text{ Sequedad}) \dots\dots\dots(3.4)$$

En la figura 3.8 se observa la balanza utilizada registrando la masa del crisol.



Figura 3.8: Balanza de precisión utilizada

3.4.3 Determinación de sólidos volátiles y sólidos minerales.

Para determinar la reducción de materia orgánica (SV) a raíz del proceso de biodegradación, se procedió a calcinar una muestra seca a una temperatura de 550° C durante seis horas. El peso perdido se consideró como sólidos volátiles mientras que el peso restante, cenizas, corresponde a los sólidos minerales.

Los instrumentos utilizados fueron:

- Crisol
- Mufla
- Desecador
- Pinzas
- Balanza de precisión

El procedimiento realizado fue el siguiente:

- Se midió en la balanza la masa del crisol con la muestra seca registrando su valor.
- Se coloca el crisol con la muestra seca en la mufla durante seis horas.
- Se extrae la muestra ya calcinada y se coloca en el desecador durante 30 minutos.
- Se mide la masa del crisol con la muestra calcinada.

Para obtener el porcentaje de sólidos volátiles y sólidos minerales se aplican las expresiones siguientes:

$$\% \text{ Sólidos Volátiles} = \left[\frac{M_{c+ms} - M_{c+mc}}{M_{c+ms} - M_c} \right] * 100 \dots\dots\dots (3.5)$$

Donde:

M_{c+ms} : masa del crisol más masa de la muestra seca.

M_{c+mc} : masa del crisol más masa de cenizas.

M_c : masa del crisol.

$$\% \text{ Sólidos Minerales} = (100 - \% \text{ Sólidos Volátiles}) \dots\dots\dots (3.6)$$

En la figura 3.9 se observa la mufla utilizada.



Figura 3.8: Mufla utilizada para calcinar la muestra a ensayar.

3.4.4 Medición de pH.

El pH al igual que las variables antes destacadas también fue utilizado para ir evaluando la efectividad del proceso de biodegradación. Los equipos que se utilizaron fueron los siguientes:

- pHmetro
- Embudo cónico
- Vaso de precipitado
- Balanza de precisión
- Papel filtro
- Matraz de Erlenmeyer
- Espátula

El procedimiento para medir el pH fue el que se describe a continuación:

- Se extrajo una muestra representativa de la pila de compostaje de 10 g y se le añadió 50 ml de agua destilada.
- Se agitó durante unos minutos en el matraz para luego vaciar la mezcla al embudo cónico en el cual se encuentra el papel filtro.
- Una vez que la muestra ha sido filtrada se introduce el phmetro en la solución resultante y se registra el valor de pH.

En la figura 3.10 se observa una medición de pH.



Figura 3.10. Medición de pH.

3.5 Procedimientos operacionales efectuados a las pilas de compostaje.

Los procedimientos operacionales efectuados a ambas pilas, fue el volteo del material que se encontraba en proceso de biodegradación de su materia orgánica. En cambio la incorporación de precipitación artificial sólo fue realizada a la pila sometida a riego (Pila N°1).

3.5.1 Volteo.

El volteo del material suministra oxígeno a los microorganismos encargados de la biodegradación de la materia orgánica, haciendo que el proceso sea aeróbico. Permite mezclar zonas de alta biodegradación con zonas que se encuentran en un proceso fermentativo más lento (homogeniza la masa a compostar).

El volteo de las pilas fue realizado con pala tal como se aprecia en la figura 3.11.



Figura 3.11: Volteo de la pila.

De la figura 3.11 se observa que el material volteado era desplazado a un lugar inmediatamente adyacente a la posición que tenía previa al volteo. Después de esto, se procedía nuevamente reconstruir la pila con la misma geometría original.

3.5.2 Incorporación de precipitación artificial.

La incorporación de agua a la pila sometida a riego de manera de evaluar el efecto de la pluviometría en un proceso de compostaje se efectuó manualmente mediante un sistema de aspersión.

Los materiales utilizados fueron los siguientes:

- Aforo
- Manguera
- Cronómetro
- Aspersor

El procedimiento para efectuar esta operación fue el siguiente:

- Se instaló a la llave la manguera con el aspersor en el extremo de salida del agua.
- Luego se procedió a llenar con agua el aforo registrando el tiempo de llenado de éste. Esta acción se realizó tres veces luego de la cual se determinó un tiempo promedio de llenado.
- A partir de lo anterior se calculó el caudal de agua saliente a través del aspersor con la siguiente ecuación:

$$Q_{llave} = \frac{V_{aforo}}{t_{prom}} \dots\dots\dots (3.7)$$

Donde:

V_{aforo} : volumen del aforo (m^3)

t_{prom} : tiempo promedio de llenado del aforo (s)

- Después se calculó el caudal diario de agua a incorporar a la pila para las distintas intensidades de precipitación con la ecuación:

$$Q = i * A \dots\dots\dots(3.8)$$

Donde:

i : intensidad de precipitación (m/día).

A : área en planta de la pila de compostaje (m^2).

- Luego se determinó el volumen diario de agua a incorporar a la pila con la ecuación:

$$V_{diario} = Q * 1(día) \dots\dots\dots(3.9)$$

Donde:

Q = caudal diario de agua a incorporar a la pila ($m^3/día$)

- Finalmente a partir de la información antes calculada se determinó el tiempo que debía estar abierta la llave (ecuación 3.10) de manera de suministrar el volumen de agua dado por la ecuación 3.9.

$$t = \frac{V_{diario}}{Q_{llave}} \dots\dots\dots (3.10)$$

Donde:

V_{diario} : volumen diario de agua a incorporar a la pila (m^3)

Q_{llave} : caudal entregado por la llave de agua (m^3/s)

En la figura 3.12 se observa el proceso de incorporación de agua a la pila.



Figura 3.12: Incorporación de agua a la pila.

3.6 Medición de parámetros.

La frecuencia de medición de los parámetros evaluados y de ejecución de los procedimientos operacionales a lo largo del proceso de compostaje se detallan en la tabla 3.6.

Parámetro	Etapas de Compostaje	Etapas de Maduración
Temperatura	Diaria	Diaria
pH	Cada tres días	Cada tres días
Volteo	Cada tres días	Cada cinco días
Humedad	Diaria	Diaria
Sol. Vol. y minerales	Cada tres días	Cada tres días

Tabla 3.6: Frecuencia de medición de las variables a medir.

CAPITULO IV ANALISIS DE RESULTADOS.

En este capítulo se analizan y discuten los resultados obtenidos luego de cincuenta y cuatro días de mediciones efectuadas al proceso de compostaje en estudio para ambas experiencias.

4.1 Pila Sometida a Riego (Pila N°1).

Se debe recordar que esta pila estuvo sometida a 3 intensidades distintas de precipitación a lo largo de la investigación. A continuación se analizan cada una de las variables medidas durante el proceso de compostaje.

4.1.1 Variación de la temperatura interna de la pila.

Al observar la figura 4.1 se aprecia que al cabo de 24 horas de haber creado la pila, ésta alcanzó una temperatura de 41°C, lo cual nos indica que el proceso de biodegradación se encuentra en la etapa mesofílica. En este sentido es posible inferir que los tipos de microorganismos que se encuentran en el interior de la pila en proceso de compostaje y que están realizando la biodegradación de la materia orgánica durante esta etapa son preferentemente bacterias y hongos mesofílicos.

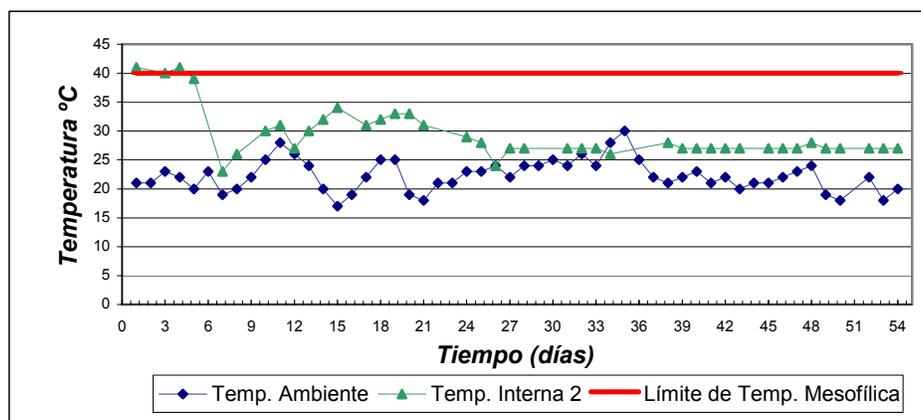


Figura 4.1: Variación de la temperatura interna 2 de la pila sometida a riego.

Se puede observar además, a partir de la figura 4.1, que durante toda la duración de la investigación la pila se encontró térmicamente en la etapa antes mencionada.

El volteo si bien se realizó en forma periódica, sólo en el séptimo día del proceso de compostaje es posible notar su efecto a través de una caída significativa de la temperatura interna de la pila, coincidiendo con el menor valor de ella registrado a lo largo de todo el proceso de biodegradación. Sin embargo en los días inmediatamente siguientes se produce un alza en la temperatura interna de la pila debido a un aumento de la actividad microbiana como consecuencia del suministro de oxígeno que proporcionó tal operación.

Otro aspecto a destacar y que tiene que ver con el tema sanitario del material compostado, radica en el hecho de que en ningún momento se desarrollaron temperaturas por sobre lo 55°C en el interior de la pila, temperatura considerada como necesaria para la destrucción de patógenos presentes en la pila a compostar (Cisterna, 2004).

4.1.1.1 Efecto de la incorporación de agua a la pila en su temperatura interna.

El efecto de la incorporación de agua a la pila en su temperatura interna queda claramente evidente en la figura 4.2.

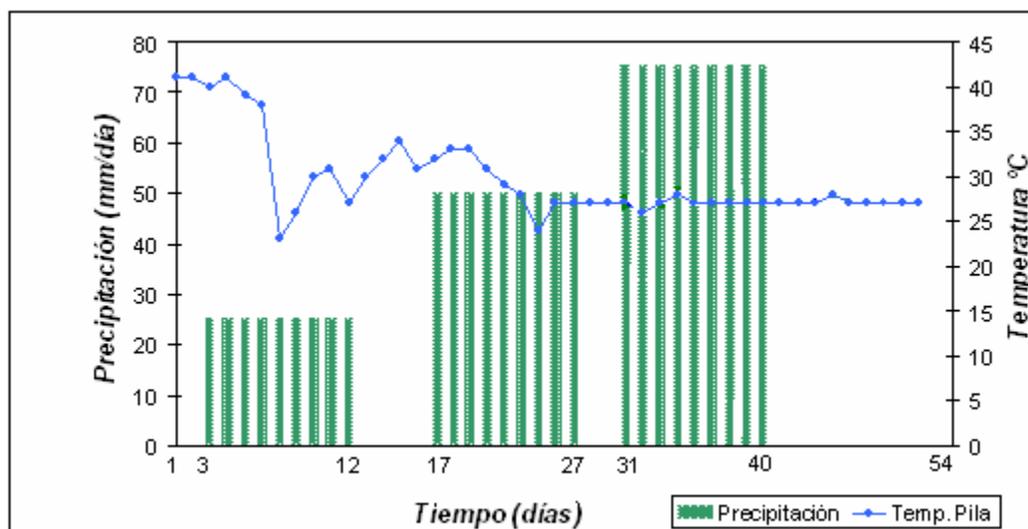


Figura 4.2: Efecto de la precipitación incorporada a la pila en su temperatura interna.

A partir del tercer día de experimentación se incorpora diariamente agua a la pila en una cantidad equivalente a una intensidad de precipitación de 25 mm/día durante 10 días. Se aprecia un descenso durante este periodo de la temperatura interna de la pila con respecto a los valores que había alcanzado en los días anteriores a tal incorporación, con lo cual se ha producido una disminución de la actividad metabólica que estaban desarrollando los microorganismos presentes en el interior de la pila encargados de la biodegradación de la materia orgánica.

Entre los días 12 y 17 se suspende la incorporación de agua a la pila resultando muy visible el efecto que esto ocasiona en la temperatura interna del sistema. Esta presenta un incremento progresivo durante este corto periodo de tiempo alcanzando una temperatura de 35 °C. Durante el día 16 existe un pequeño descenso de su valor como consecuencia del volteo de la pila.

A partir del día 17 se reanuda la incorporación de agua pero ahora con una intensidad de precipitación de 50 mm/día. Si bien la temperatura continúa subiendo, esta condición sólo se mantiene hasta alrededor del día 20 luego del cual comienza a decrecer situándose en torno a los 27°C.

Nuevamente después de 10 días de precipitaciones se suspende la incorporación de agua a la pila. Sin embargo, contrario a lo que había sucedido anteriormente, ahora la pila no aumenta su temperatura interna debiéndose esto a que el aire, elemento vital en el desarrollo de los microorganismos, ha sido desplazado de los intersticios que genera el material en fermentación dentro del sistema, estando ahora ocupados por el agua.

El tercer periodo de incorporación de agua, ahora con una intensidad de precipitación de 75 mm/día confirma lo mencionado en el párrafo anterior ya que la temperatura no presenta mayores cambios, incluso se mantiene dentro del mismo valor (27°C) incluso después de alrededor de 14 días de haber finalizado el último periodo de incorporación de agua.

No se descarta que el exceso de agua haya provocado arrastre de nutrientes y por ende una baja de la actividad microbiológica.

4.1.2 Variación de la humedad de la pila en proceso de compostaje.

Al momento del inicio del proceso de compostaje la pila se encontraba con una humedad de 82%. Durante los primeros 3 días se produjo un descenso de su valor el cual coincide con temperaturas ambientales un tanto elevadas. Con la incorporación de las distintas cantidades de agua a la pila el valor de humedad que ésta presentó a lo largo de todo el proceso fue en general sobre 70% alcanzando un valor promedio de 73%.

Se observa que en los periodos en que se suspendía la incorporación de agua a la pila, la humedad presentó leves descensos, mientras que la temperatura interna de la pila se ve incrementada. Caso contrario, a mayores valores de humedad se aprecian disminuciones en la temperatura interna de la pila. Esto queda en evidencia especialmente entre los días 3 y 18 tal como se observa en la figura 4.3.

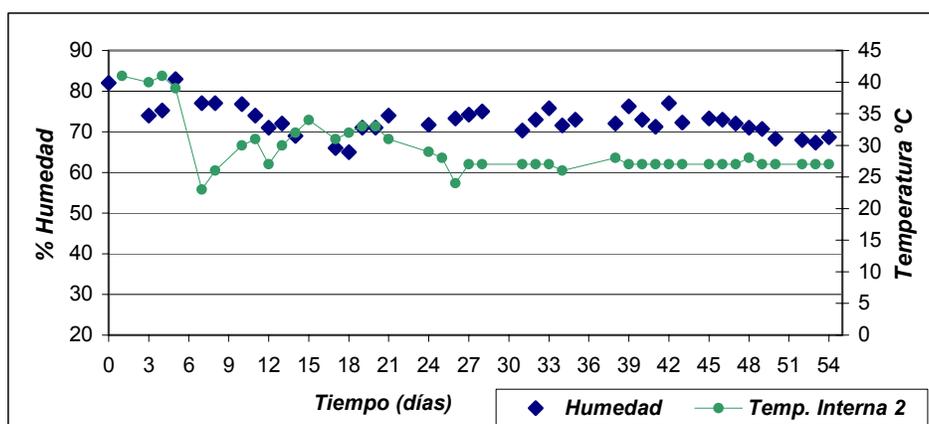


Figura 4.3: Variación de la humedad de la pila.

4.1.3 Variación del pH de la pila.

El valor del pH inicial de la pila fue de 5,8, valor que se incrementó al tercer día alcanzando un valor de 6,1, siendo éste el máximo registrado dentro de todo el proceso, el cual coincide con el periodo donde se registraron las máximas temperaturas internas de la pila. Luego a medida que el proceso de compostaje transcurre, el pH de la pila comienza a disminuir en forma significativa debido a la presencia de ácidos orgánicos simples hasta situarse al final del proceso en 4,6.

En general la evolución del valor del pH registrado durante todo el proceso no es la típica para un proceso de compostaje, a excepción de lo ocurrido durante los primeros 3 días. Esto deja de manifiesto el efecto que tuvo la incorporación de agua en la pila la cual fue causante de que no se registraran temperaturas dentro del rango termofílico, inhibiera el desarrollo de una actividad microbiana fuerte y con ello una disminución del pH.

En la figura 4.4 se puede observar la evolución que tuvo el ph de la pila en proceso de compostaje.

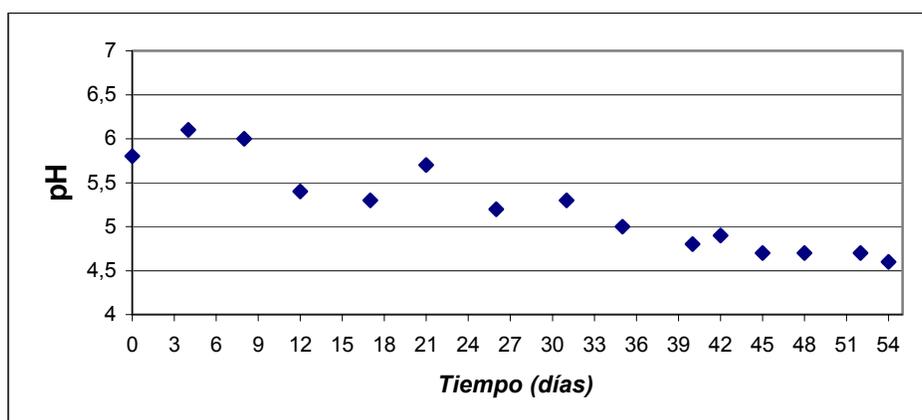


Figura 4.4: Variación del pH de la pila durante el proceso de compostaje.

4.1.4 Variación de sólidos volátiles en función del tiempo en la pila.

La variación de materia orgánica en una pila de compostaje es medida como la variación de sólidos volátiles presentes en ésta. Al inicio del proceso el contenido de materia orgánica en el interior de la pila en fermentación era de un 83,3% mientras que el valor registrado el día 54 es de un 71%, lo cual constata una reducción del volumen inicial de la masa a compostar.

Esta reducción se asocia con las reacciones de biodegradación aeróbica que generan dióxido de carbono y agua.

En la figura 4.5 se observa la variación de sólidos volátiles en el tiempo.

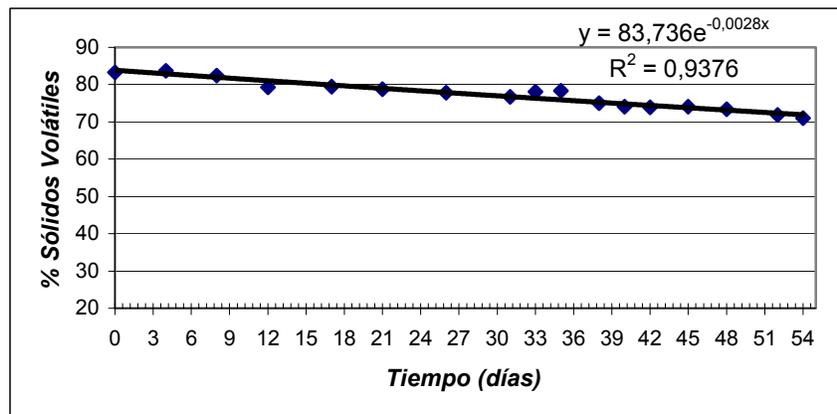


Figura 4.5: Variación de sólidos volátiles en el tiempo.

4.1.5 Variación de sólidos minerales en el tiempo en la pila.

Al inicio del proceso de biodegradación el porcentaje de contenido mineral presente en la pila era de un 17%. En cambio, a raíz de la reducción de la materia orgánica, al final de la investigación el porcentaje de materia mineral es de un 29%.

En la figura 4.6 se observa la curva que muestra la variación del contenido mineral que presentó la pila.

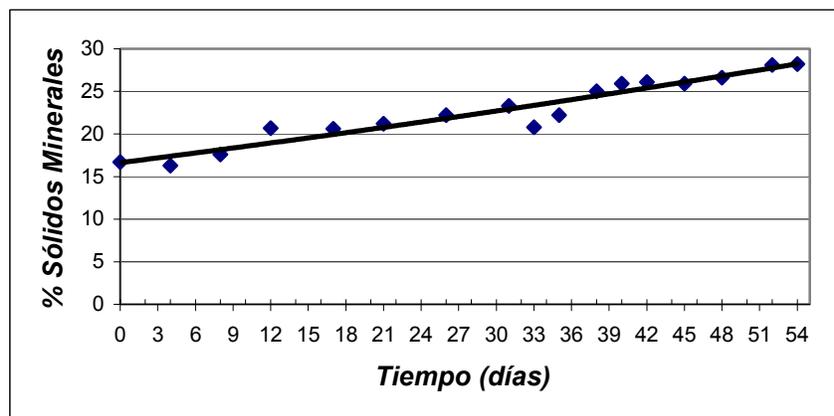


Figura 4.6: Variación de sólidos minerales en el tiempo.

4.2 Pila no sometida a riego (Pila N°2).

4.2.1 Variación de la temperatura interna de la pila.

En la figura 4.7 se puede observar el comportamiento que tuvo la temperatura interna de la pila 2. En ella se observa que al día siguiente de haber construido la pila su temperatura alcanzó los 44°C con lo cual hubo un paso muy rápido desde una etapa mesofílica a la etapa termofílica en tan sólo 24 horas. Esta condición permanece hasta el sexto día de la investigación. El día 7 se observa una caída drástica de su temperatura interna a causa de un volteo efectuado al material en fermentación. Luego de haber efectuado esta operación es posible dimensionar la importancia del suministro de oxígeno hacia los microorganismos que se encuentran en el interior de la pila en proceso de compostaje, efecto que se ve reflejado claramente en la temperatura interna que alcanzó la pila en los días siguientes a esta operación en la cual se registraron las temperaturas más altas de toda la investigación, donde la máxima temperatura interna fue de 66°C registrada el día 12.

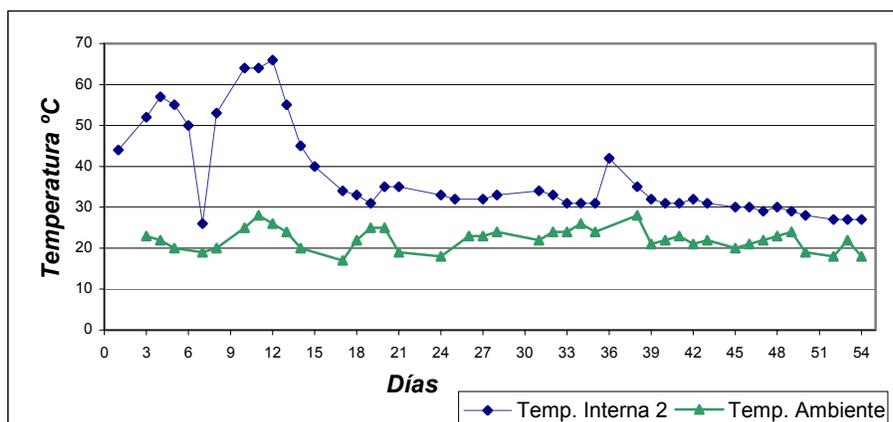


Figura 4.7: Variación de la temperatura interna de la pila.

Se observa además que existió un predominio importante de organismos termofílicos durante los primeros 15 días del proceso de biodegradación de la materia orgánica para luego dar paso a la presencia de organismos mesofílicos hasta el término de la investigación. A contar del día 15 en adelante la temperatura interna de la pila fluctúa entre los 30°C y 40°C.

4.2.1.1 Efecto de la humedad de la pila en su temperatura interna.

Un análisis interesante que resulta realizar es visualizar el efecto que genera la humedad de la pila en su temperatura interna. Esto queda ostensiblemente de manifiesto en la figura 4.8 en la cual es posible observar que para una humedad piso de alrededor de 60% se alcanzaron las máximas temperaturas.

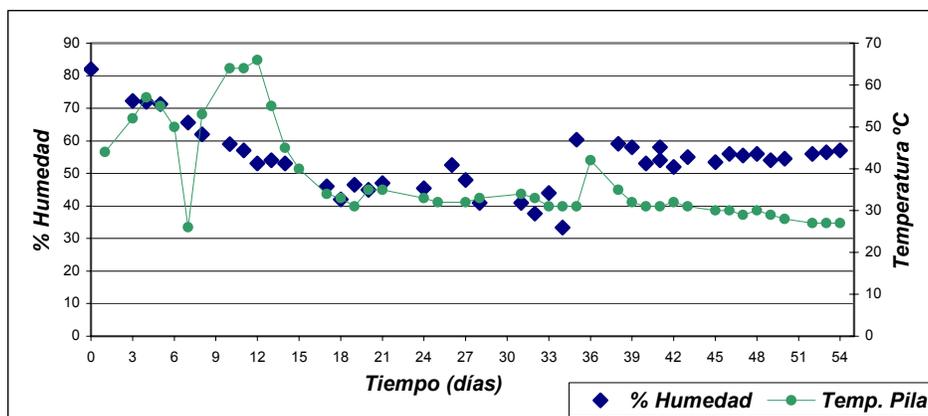


Figura 4.8: Efecto de la humedad de la pila en su temperatura interna.

Por otro lado se observa que a medida que la humedad de la pila disminuye la temperatura también presenta el mismo comportamiento. Esto se aprecia claramente entre los días 12 y 33 de la investigación. Esta aseveración es válida

para un periodo comprendido entre aproximadamente los primeros 30 días de iniciado el proceso de compostaje, periodo en el cual se alcanza la mayor actividad microbiológica. Esto se corrobora en la figura 4.8 especialmente para el periodo comprendido entre los días 37 y 54 en el cual si bien existe una humedad relativamente óptima la temperatura interna de la pila sigue presentando un descenso, dando una señal de indagación clara de que el proceso de biodegradación de la materia orgánica presente en la pila eventualmente estaría llegando a su fin y por ende un cese de la actividad microbiana, situación que se verificó con la medición de sólidos volátiles tal como se observa en la figura 4.9.

La humedad mínima registrada en la pila en todo el proceso de biodegradación fue de 33%, valor medido el día 34. Al día siguiente de haber registrado este valor, se efectuó un riego a la pila de manera de subir su humedad hasta un 60% con lo cual se observa un incremento de la temperatura, lo cual nos indica que aún queda una fracción de materia orgánica por biodegradar.

4.2.2 Variación de sólidos volátiles en función del tiempo en la pila.

De la figura 4.9 se observa una clara reducción de materia orgánica durante el proceso de compostaje, medida como una reducción de sólidos volátiles, lo cual verifica la efectividad del proceso de biodegradación.

Al inicio del proceso de compostaje el porcentaje de sólidos volátiles era de un 83,3%, mientras que al final de él la fracción de materia orgánica presente en la pila es de un 64%. Esta reducción se debe principalmente a las reacciones de

biodegradación aeróbica que son las causantes de generar dióxido de carbono y agua, como consecuencia de la oxidación de la materia orgánica.

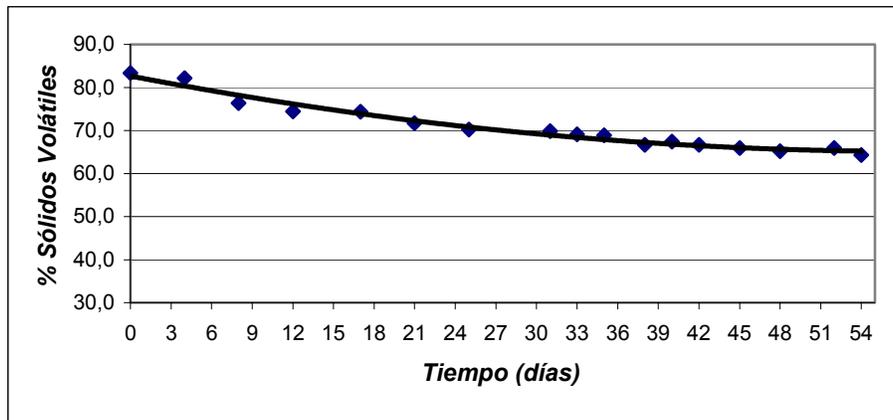


Figura 4.9: Variación de sólidos volátiles en el tiempo.

A partir del día 45 en adelante la reducción en el porcentaje de sólidos volátiles comienza a ser cada vez menor con lo cual se puede inferir que el proceso de biodegradación está por concluir.

4.2.3 Variación de sólidos minerales en función del tiempo en la pila.

Debido a la reducción de materia orgánica se puede observar en la figura 4.10 un aumento en el porcentaje de sólidos minerales presentes en la pila. Al inicio del proceso de compostaje los sólidos minerales eran de un 16% mientras que al día 54 de la investigación este valor aumenta a un 36%.

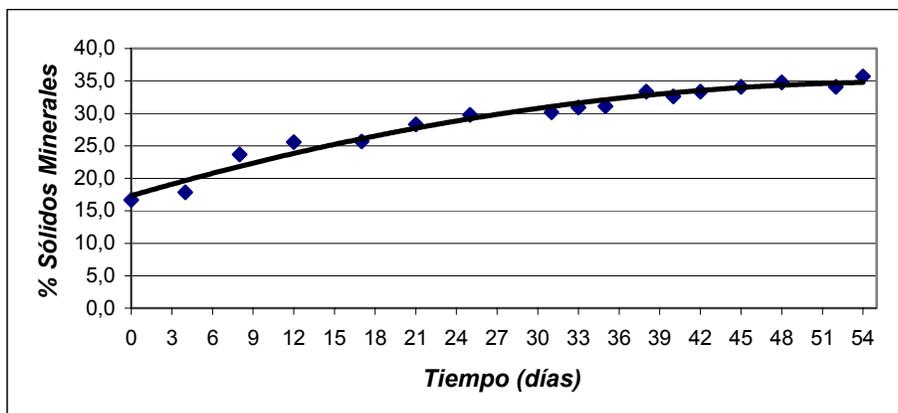


Figura 4.10: Variación de sólidos minerales en el tiempo.

Resulta importante recordar que la cantidad de sólidos minerales permanecen fijos durante todo el proceso de biodegradación. La tendencia que muestra la curva en la figura 4.10 se debe exclusivamente a la reducción en los sólidos totales como causa de biodegradación de la materia orgánica (SV). Esto queda de manifiesto en las ecuaciones 4.1 y 4.2.

$$ST = SM + SV \dots\dots\dots (4.1)$$

$$\% SM = \frac{SM}{ST} \dots\dots\dots (4.2)$$

El porcentaje de sólidos minerales (ecuación 4.2) aumenta durante el proceso de compostaje, esto se debe a la disminución de los sólidos totales (ecuación 4.1) como causa de la reducción de los sólidos volátiles (SV).

4.2.4 Variación del pH de la pila.

El valor inicial del pH fue de 5,8. Sin embargo con el transcurso de la investigación este valor inicial presentó un aumento alcanzando un valor máximo de 7,7. Este valor máximo coincide con el periodo donde se registraron las más altas temperaturas internas de la pila lo cual está asociado con el aumento de la actividad biológica. El valor final de pH medido el día 54 fue de 6,9, valor muy cercano a la neutralidad.

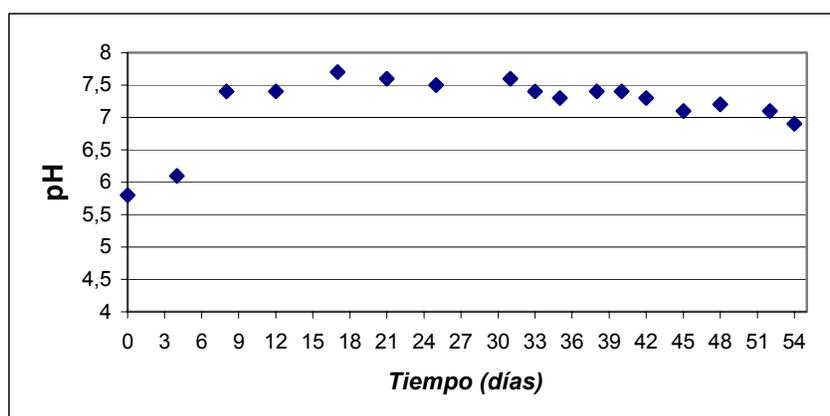


Figura 4.11: Variación del pH de la pila.

4.3 Comparación entre ambas experiencias.

En los siguientes puntos se comparan las principales variables medidas en ambas pilas, de manera de visualizar el efecto de la pluviometría en dichas variables.

4.3.1 Comparación de las temperaturas internas registradas en ambas pilas.

De la figura 4.12 se observa notoriamente el efecto que provocó en la temperatura interna de la pila 1 la incorporación de agua. Esta pila, durante el periodo de la investigación nunca alcanzó térmicamente la etapa termofílica. De hecho su máxima temperatura interna registrada fue de 41°C, al cabo de 24 horas de haber sido construida. Esto se explica necesariamente por el hecho que el agua ocupó un porcentaje importante de los poros que poseía la pila en proceso de compostaje y con ello desplazó el aire originalmente presente en éstos, provocando que la actividad microbiana desarrollada por los organismos encargados de biodegradar la materia orgánica presentes en la pila fuese más lenta.

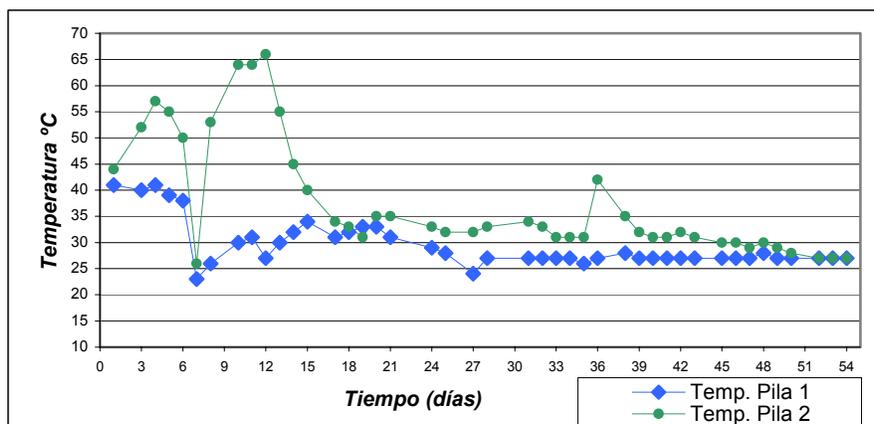


Figura 4.12: Temperaturas internas de ambas pilas.

Una situación muy distinta ocurrió con la temperatura interna de la pila 2, en la cual efectivamente se desarrollaron organismos termofílicos. La máxima temperatura interna que registró esta pila fue de 66°C el día 12 mientras que la pila sometida a riego este mismo día registraba una temperatura interna de 27°C.

Una característica importante que refleja los distintos grados de biodegradación que presentaron ambas pilas, y por ende las distintas temperaturas que ellas desarrollaron fue que, al momento de realizar los volteos del material en fermentación, en la pila no sometida a riego (Pila N°2) era posible observar claramente una emanación importante de gases con olores desagradables propios de una digestión anaeróbica, situación que no se percibió en ningún momento en la pila sometida a riego (Pila N°1). Este fenómeno se dio durante los primeros 18 días del proceso de compostaje. También hubo una presencia importante de vectores como moscas y mosquitos en la pila N°2, hecho que tampoco se constató en la pila N°1.

Tal como se mencionó en el punto 3.5.1, se realizaron mediciones de temperatura interna en tres puntos de las pilas. A partir de estas mediciones efectuadas en los puntos 1 y 3 (figura 3.6), se puede realizar el siguiente perfil térmico, válido para ambas pilas.

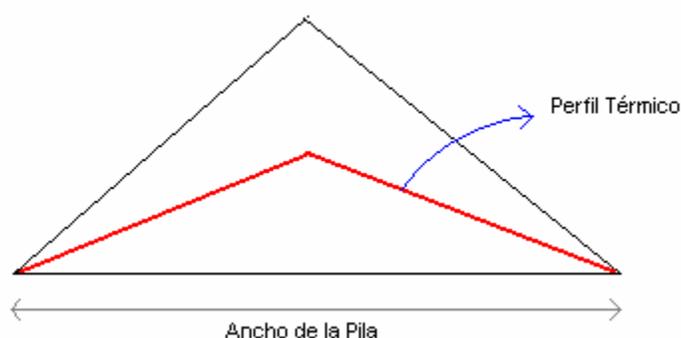


Figura 4.13: Sección transversal de una pila de compostaje con su perfil térmico.

De la figura 4.13 es posible afirmar que la propiedad aislante de los residuos que se están compostando conduce a un gradiente de temperaturas muy pronunciado en las primeras capas superficiales de la pila. Este perfil resulta válido para el periodo en que la pila está en activa descomposición de la materia orgánica, vale decir durante alrededor de los primeros 30 días. Otro aspecto a destacar es el hecho que las máximas temperaturas internas de la pila se registran en el centro de ella. En las zonas más cercanas al exterior, las temperaturas internas disminuyen al verse afectadas por las condiciones de contorno del sistema.

4.3.2 Comparación de la reducción de sólidos volátiles entre ambas pilas.

De la figura 4.14 se observa que la reducción de sólidos volátiles para ambas pilas fue diferente. En el caso de la pila 1 a la cual se le incorporó distintas cantidades de agua, presentó un 71% de sólidos volátiles luego de 54 días de experimentación, en cambio la pila 2 presentó un porcentaje de sólidos volátiles de 64% a la misma fecha.

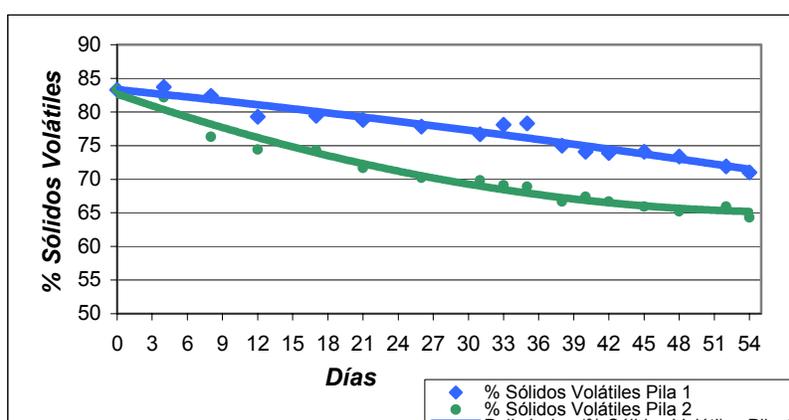


Figura 4.14: Variación de sólidos volátiles en ambas pilas.

Esta diferencia en los porcentajes finales de materia orgánica presente en las pilas se debe en gran medida a la incorporación de agua a la pila 1, lo cual hizo que su velocidad de biodegradación fuese más lenta, ya que los microorganismos encargados de la biodegradación de la materia orgánica presente en las pilas requieren de oxígeno para su metabolismo, además de nutrientes, el cual en el caso de la pila 1 existió en menor cantidad al ser desplazado por el agua a medida que ésta se incorporaba.

Si bien en un proceso de compostaje se desea idealmente que el total de materia orgánica sea biodegradada esto en la práctica no es posible ya que existe un pequeño porcentaje de esta materia que no es biodegradable. Además por otro lado, de aquella fracción que efectivamente es biodegradable también se da que en la realidad persiste una mínima fracción de ella, la cual al final del proceso va a conformar un remanente. Esto se visualiza en la figura 4.15.

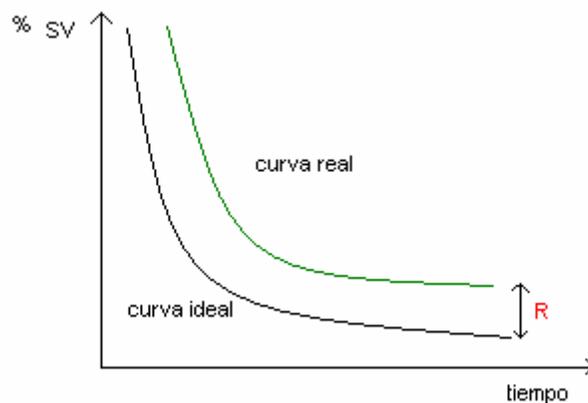


Figura 4.15: Curva ideal de biodegradación versus curva real.

R: remanente.

La magnitud que pueda tener este valor de R al final del proceso de biodegradación, se puede ver fuertemente afectado por el manejo operacional que se le dé al proceso de compostaje. En ese sentido, un manejo operacional correcto, que incluya un volteo sistemático del material a biodegradar, una humedad adecuada que posibilite una efectiva biodegradación de la materia orgánica son factores que indudablemente permiten controlar esta fracción remanente de materia orgánica. Un claro ejemplo de esta situación es lo que sucedió en la pila 2, en la que después de 34 días de haber iniciado el proceso de compostaje la pila registraba un 33% de humedad. Al día siguiente se le incorpora agua hasta subir su humedad a un 60% con lo que su temperatura interna presenta un incremento (Figura 4.8), con lo cual se constata que aún existía materia orgánica en la pila por biodegradar. En caso de no haber efectuado este manejo operacional lo más probable que su efecto se hubiese hecho notar en el valor de sólidos volátiles registrado el día 54.

4.3.3 Comparación de la evolución de los sólidos minerales entre ambas pilas.

En ambas pilas se constata un aumento de los sólidos minerales a medida que transcurren los procesos de biodegradación. Sin embargo este aumento en el contenido de material mineral resulta ser mayor en la pila no sometida a riego (Pila N°2) debido a que en esta pila hubo una reducción de sólidos volátiles también más grande en comparación a la pila N°1. Este fenómeno tal como se mencionó

anteriormente se debe a la incorporación de agua a la pila N°1 lo que ocasionó que su velocidad de biodegradación fuese más lenta para un mismo periodo de tiempo en comparación a la pila N°2.

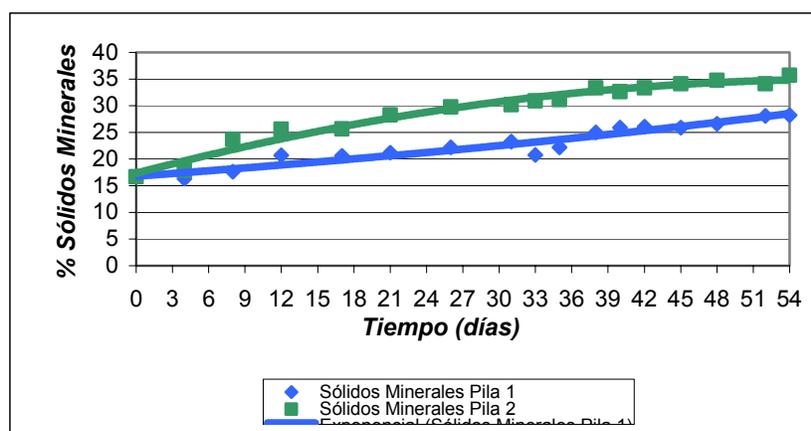


Figura 4.16: Variación de sólidos minerales en ambas pilas.

4.3.4 Comparación de las constantes endógenas entre ambas pilas.

Para determinar la constante endógena o de reacción (K_d) se procedió a linealizar las curvas mostradas en la figura 4.14.

La pendiente para cada línea de tendencia mostrada en la figura 4.17 corresponde a la constante de reacción.

En el caso de la pila sometida a riego (Pila N°1) el valor de K_d es 0.0421 día^{-1} en cambio para la pila N°2 el valor de K_d es de 0.0546 día^{-1} .

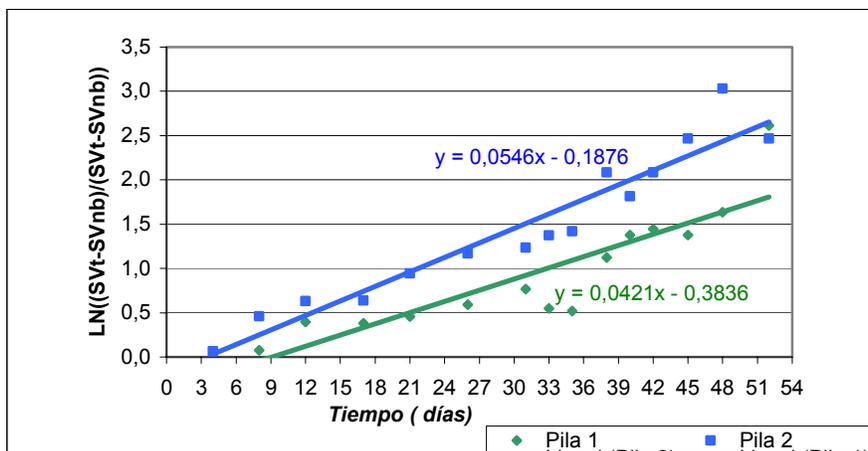


Figura 4.17: Determinación de las constantes endógenas para ambas pilas.

Esta diferencia en los valores de las constantes de reacción se explica por la influencia de la incorporación de agua a la pila N°1 lo cual hizo que sus temperaturas internas registradas fueran mucho menores en comparación a la temperaturas internas desarrolladas por la pila N°2, obteniéndose de esta manera un menor valor de Kd para la pila N°1. Esto deja en evidencia de manera clara un efecto de tipo termodinámico.

Es importante señalar que si bien la temperatura interna de las pilas es variable durante el proceso de biodegradación de su materia orgánica, para el desarrollo de la linealización de la curva se consideró una **temperatura interna media**, de manera de hacer una aproximación a la cinética de un digestor aeróbico, en el cual la constante endógena se encuentra asociada a una temperatura constante.

4.3.5 Comparación de los valores de pH de ambas pilas.

En la figura 4.18 se observa la evolución que presentó el pH en ambas pilas. En el caso de la pila no sometida a riego (Pila N°2) los valores de pH medidos son los normales para un proceso de compostaje, en el cual durante aproximadamente los primeros 5 días se registran valores de pH levemente ácidos. A medida que el proceso de biodegradación de la materia orgánica se hace más intenso, el cual coincide con el periodo donde se registraron las máximas temperaturas internas de la pila, el pH aumenta alcanzando un valor de 7,7. Al final del proceso se observa una estabilización de su valor entorno al valor neutro, lo cual corrobora lo descrito por la literatura (Tchobanoglous, 1998).

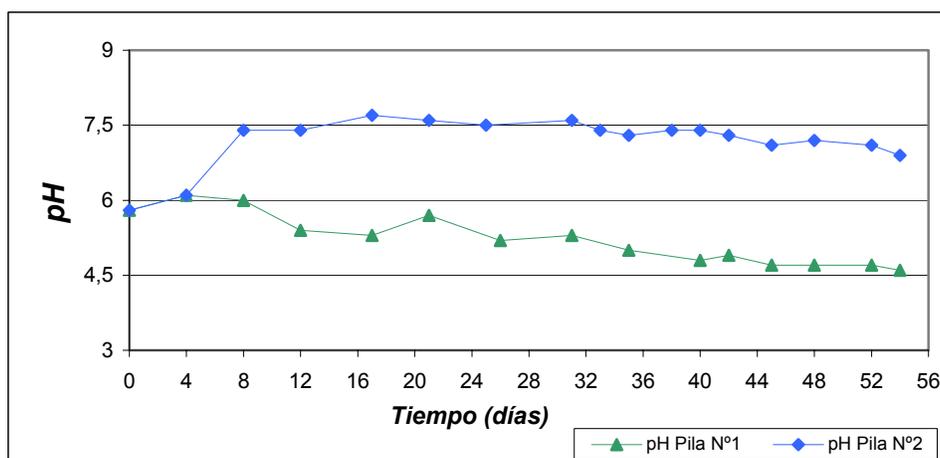


Figura 4.18: Comparación de los valores de pH de ambas pilas.

Una situación muy distinta ocurrió con los valores de pH registrados en la pila sometida a riego (Pila N°1). Al momento de iniciar el proceso de compostaje el valor de pH para esta pila fue de 5,8, alcanzando un valor máximo de tan solo 6,1

al cuarto día de operación. A partir de entonces se observa una caída gradual en su valor como efecto de la incorporación de agua a la pila. Esto se explica por 2 razones: la primera es debido a la formación de ácidos de cadena corta, los cuales están asociados a un proceso de digestión anaeróbica, a raíz de que el agua incorporada desplazó al oxígeno presente en los intersticios del material que se encontraba en proceso de biodegradación y la segunda razón, se debe a que el dióxido de carbono generado precisamente por efecto de la biodegradación de la materia orgánica es fácilmente soluble en agua pudiendo reaccionar con ella para formar ácido carbónico, bajando el pH. Esta última reacción se representa en la ecuación 4.3.



CAPITULO V CONCLUSIONES.

- El exceso de agua en una pila de compostaje ocasiona una disminución de la temperatura y de la actividad microbiológica por carecer de oxígeno, ya que se produce un desplazamiento del aire que está presente en los poros.
- El exceso de agua reduce el pH debido a que se producen fermentaciones anaeróbicas.
- En materiales a compostar que presentan una baja porosidad (lodos) se recomienda no dejar de voltear las pilas por un periodo mayor a 5 días además de evitar estratificaciones térmicas en la pila de compostaje. Para esto último se recomienda efectuar un volteo a nivel local de la pila en aquellas zonas que presentan diferencias de temperaturas significativas.
- Una pila sometida a periodos continuos de precipitación presenta temperaturas internas que en general se encuentran en la etapa mesofílica, por ende se recomienda para un proceso de compostaje cubrir la pila con un techo de manera de regular el ingreso de agua.
- La incorporación de agua a la pila sometida a riego generó claramente un efecto de tipo termodinámico sobre la constante de reacción K_d , esto produce que la velocidad de degradación de la materia orgánica presente en ella sea más lenta.
- Ewos Chile S.A. puede utilizar el compostaje como una alternativa de solución a sus lodos de manera de aprovechar un recurso rico en materia orgánica.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.

- ❖ Campbell G., “Soil physics with Transport Models for Soil-Plant Systems”. Elsevier Science Publishing Company, New York, USA, 1985.

- ❖ Castillo G., Alcota C., MENA M., “Acondicionamiento de Biosólidos por medio de Compostaje”, XIV Congreso de Ingeniería Sanitaria y Ambiental AIDIS, 2001.

- ❖ Centro de Estudios EULA Chile. “Apuntes sobre Compostaje”. Sitio Web: www.eula.cl

- ❖ Cisterna, Pedro. “Gestión de Residuos Sólidos”. Apunte de clase, 2004.

- ❖ Cornell State University. “The Science and Engineering of Composting”, USA 2004. Sitio Web: <http://compost.css.cornell.edu>

- ❖ Gray K., Biddlestone A., “Review of Composting Part I”. Process Biochemistry. 1971.

- ❖ INTEC-CHILE, “Manual de Compostaje”, Corporación de Investigación Tecnológica de Chile, Santiago, Chile, 1999.

- ❖ Labbé Pedro. “Acondicionamiento de Residuos Sólidos Mediante Compostaje”, Proyecto de Título de Ingeniería Civil, Universidad del Bío-Bío. 2003.
- ❖ Madrid F., Lopez R., Cabrera F., “Caracterización de los compost de residuos sólidos urbanos de la planta de Villarasa (Huelva)”, Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC), Murcia, España 2001.
- ❖ Metcalf & Eddy. “Ingeniería de Aguas Residuales, tratamiento, vertido y reutilización”, vol I y II, Editorial McGraw-Hill, 1995.
- ❖ Misle A, Enrique y Norero Sch, Aldo. “Comportamiento térmico de suelos bajo cubiertas plásticas”. Agric. Tec., ene 2002, vol. 62, p. 133-142. IN 0365-2807.
- ❖ Rynk Robert, Willson George. “On – Farm Composting Handbook”. Northeast Regional Agricultural Engineering Service. 1992.
- ❖ Sellers,W.D. “Physical Climatology”. The University of Chicago Press, Chicago, USA. 1965.
- ❖ Smith J., Van Ness H., Aboot M.”Introducción a la Termodinámica en Ingeniería Química”. Editorial McGraw-Hill, 1996.

- ❖ Tchobanoglous George. “Gestión Integral de Residuos Sólidos”, vol I y II, Editorial McGraw-Hill, 1998.

- ❖ Unda Opazo, Francisco.”Ingeniería Sanitaria Aplicada a Saneamiento y Salud Pública”, Editorial Limusa, 1998.

ANEXOS.

ANEXO 1 Datos de la pila 1.

1.1 Registro de temperaturas.

Día N°	Fecha	T1 °C	T2 °C	T3 °C	Temp. Ambiental °C
0	Vi 21 Ene	-	-	-	19
1	Sa 22 Ene	39	41	30	21
2	Do 23 Ene	-	-	-	21
3	Lu 24 ene	32	40	33	23
4	Ma 25 ene	31	41	31	22
5	Mi 26 ene	30	39	29	20
6	Ju 27 ene	36	38	35	23
7	Vi 28 ene	24	23	24	19
8	Sa 29 ene	25	26	26	20
9	Do30 ene	-	-	-	22
10	Lu 31 ene	27	30	27	25
11	Ma 01 Feb	27	31	27	28
12	Mi 02 feb	30	27	27	26
13	Ju 03 feb	28	30	28	24
14	Vi 04 feb	27	32	28	20
15	Sa 05 feb	30	34	31	17
16	Do 06 feb	-	-	-	19
17	Lu 07 feb	28	31	27	22
18	Ma 08 feb	29	32	29	25
19	Mi 09 feb	29	33	29	25
20	Ju 10 feb	31	33	30	19
21	Vi 11 feb	27	31	27	18
22	Sa 12 feb	-	-	-	21
23	Do 13 feb	-	-	-	21
24	Lu 14 feb	26	29	26	23
25	Ma 15 feb	26	28	26	23
26	Mi 16 feb	26	24	26	24
27	Ju 17 feb	26	27	25	22
28	Vi 18 feb	26	27	25	24
29	Sa 19 feb	-	-	-	24
30	Do 20 feb	-	-	-	25
31	Lu 21 feb	26	27	25	24
32	Ma 22 feb	26	27	26	26
33	Mi 23 feb	25	27	25	24
34	Ju 24 feb	25	26	25	28
35	Vi 25 feb	25	26	25	30
36	Sa 26 feb	25	27	25	25
37	Do 27 feb	-	-	-	22
38	Lu 28 feb	27	28	27	21
39	Ma 01 mar	26	27	25	22
40	Mi 02 mar	26	27	25	23

Día N°	Fecha	T1 °C	T2 °C	T3 °C	Temp. Ambiental °C
41	Ju 03 mar	26	27	26	21
42	Vi 04 mar	25	27	25	22
43	Sa 05 mar	26	27	25	20
44	Do 06 mar	-	-	-	21
45	Lu 07 mar	26	27	26	21
46	Ma 08 mar	26	27	26	22
47	Mi 09 mar	27	27	27	23
48	Ju 10 mar	27	28	27	24
49	Vi 11 mar	26	27	26	19
50	Sa 12 mar	26	27	26	18
51	Do 13 mar	-	-	-	-
52	Lu 14 mar	27	27	26	22
53	Ma 15 mar	26	27	26	18
54	Mi 16 mar	26	27	27	20

1.2 Registro de datos para determinar el nivel de humedad y sequedad.

Día N°	Peso Vaso Precipitado (g)	Peso Muestra Húmeda (g)	Peso Muestra Seca (g)	Sequedad %	Humedad %
0	29,33	30,33	29,51	18,0	82,0
1	-	-	-	-	-
2	-	-	-	-	-
3	27,8	28,8	28,06	26,0	74,0
4	27,82	28,83	28,07	24,8	75,2
5	29,4	30,4	29,57	17,0	83,0
6	-	-	-	-	-
7	27,8	28,8	28,03	23,0	77,0
8	27,8	28,8	28,03	23,0	77,0
9	-	-	-	-	-
10	27,84	28,83	28,07	23,2	76,8
11	19,44	20,44	19,7	26,0	74,0
12	19,45	20,45	19,74	29,0	71,0
13	19,44	20,44	19,72	28,0	72,0
14	19,44	20,44	19,75	31,0	69,0
15	-	-	-	-	-
16	-	-	-	-	-
17	19,44	20,44	19,78	34,0	66,0
18	35,77	36,77	36,12	35,0	65,0
19	19,44	20,44	19,73	29,0	71,0
20	19,44	20,44	19,73	29,0	71,0
21	19,44	20,44	19,7	26,0	74,0

Día N°	Peso Vaso Precipitado (g)	Peso Muestra Húmeda (g)	Peso Muestra Seca (g)	Sequedad %	Humedad %
22	-	-	-	-	-
23	-	-	-	-	-
24	19,44	20,43	19,72	28,3	71,7
25	-	-	-	-	-
26	17,36	18,37	17,63	26,7	73,3
27	17,37	18,38	17,63	25,7	74,3
28	17,32	18,32	17,57	25,0	75,0
29	-	-	-	-	-
30	-	-	-	-	-
31	19,44	20,45	19,74	29,7	70,3
32	19,44	20,44	19,71	27,0	73,0
33	19,44	20,43	19,68	24,2	75,8
34	19,44	20,46	19,73	28,4	71,6
35	19,44	20,44	19,71	27,0	73,0
36	-	-	-	-	-
37	-	-	-	-	-
38	19,44	20,44	19,72	28,0	72,0
39	34,74	35,75	34,98	23,8	76,2
40	19,44	20,44	19,71	27,0	73,0
41	34,95	35,96	35,24	28,7	71,3
42	19,44	20,44	19,67	23,0	77,0
43	19,44	20,45	19,72	27,7	72,3
44	-	-	-	-	-
45	19,44	20,45	19,71	26,7	73,3
46	19,44	20,44	19,71	27	73,0
47	19,44	20,44	19,72	28	72,0
48	19,44	20,44	19,73	29	71,0
49	19,44	20,43	19,73	29,3	70,7
50	19,44	20,45	19,76	31,7	68,3
51	-	-	-	-	-
52	19,44	20,44	19,76	32	68,0
53	19,44	20,45	19,77	32,7	67,3
54	19,44	20,43	19,75	31,3	68,7

1.3 Registro de datos para determinar reducción de materia orgánica y valor de pH.

Día N°	pH	Peso Crisol (g)	Peso Crisol c/Muestra Húmeda (g)	Peso Crisol C/ Cenizas (g)	SSV %	SSM %
0	5,8	35,76	36,76	35,79	83,3	16,7
1		-	-	-	-	-
2		-	-	-	-	-
3		-	-	-	-	-
4	6,1	35,75	36,74	35,79	83,7	16,3
5		-	-	-	-	-
6		-	-	-	-	-
7		-	-	-	-	-
8	6	35,77	36,76	35,81	82,4	17,6
9		-	-	-	-	-
10		-	-	-	-	-
11		-	-	-	-	-
12	5,4	35,77	36,77	35,83	79,3	20,7
13		-	-	-	-	-
14		-	-	-	-	-
15		-	-	-	-	-
16		-	-	-	-	-
17	5,3	19,44	20,44	19,51	79,4	20,6
18		-	-	-	-	-
19		-	-	-	-	-
20		-	-	-	-	-
21	5,7	35,78	36,78	35,835	78,8	21,2
22		-	-	-	-	-
23		-	-	-	-	-
24		-	-	-	-	-
25		-	-	-	-	-
26	5,2	17,36	18,37	17,42	77,8	22,2
27		-	-	-	-	-
28		-	-	-	-	-
29		-	-	-	-	-
30		-	-	-	-	-
31	5,1	19,44	20,45	19,51	76,7	23,3
32		-	-	-	-	-
33		19,44	20,43	19,492	78,3	21,7
34		-	-	-	-	-
35	5	19,44	20,44	19,5	77,8	22,2
36		-	-	-	-	-
37		-	-	-	-	-
38		19,44	20,44	19,51	75,0	25,0

Día N°	pH	Peso Crisol (g)	Peso Crisol c/Muestra Húmeda (g)	Peso Crisol C/ Cenizas (g)	SSV %	SSM %
39		-	-	-	-	-
40	4,8	19,44	20,44	19,5	77,8	22,2
41		-	-	-	-	-
42	4,9	19,44	20,44	19,5	73,9	26,1
43		-	-	-	-	-
44		-	-	-	-	-
45	4,7	19,44	20,45	19,51	74,1	25,9
46			-	-	-	-
47			-	-	-	-
48	4,7	19,44	20,44	19,517	73,4	26,6
49			-	-	-	-
50			-	-	-	-
51			-	-	-	-
52	4,7	19,44	20,44	19,53	71,9	28,1
53			-	-	-	-
54	4,6	19,44	20,43	19,53	71,0	29,0

1.4 Registro de datos para determinar constante de reacción Kd.

Dias	%SV	%SM	%SVrest	%SVno bio	%SV bio	LN ((SVt-SVnb)/(Svo-SVnb))
0	83,3	16,7	83,3	71	12,3	0,00
4	83,7	16,3	83,7	71	12,7	-0,03
8	82,4	17,6	82,4	71	11,4	0,08
12	79,3	20,7	79,3	71	8,3	0,39
17	79,4	20,6	79,4	71	8,4	0,38
21	78,8	21,2	78,8	71	7,8	0,46
26	77,8	22,2	77,8	71	6,8	0,59
31	76,7	23,3	76,7	71	5,7	0,77
33	78,1	20,8	78,1	71	7,1	0,55
35	78,3	22,2	78,3	71	7,3	0,52
38	75	25	75	71	4,0	1,12
40	74,1	25,9	74,1	71	3,1	1,38
42	73,9	26,1	73,9	71	2,9	1,44
45	74,1	25,9	74,1	71	3,1	1,38
48	73,4	26,6	73,4	71	2,4	1,63
52	71,9	28,1	71,9	71	0,9	2,61
54	71	28,2	71	71	0	

ANEXO 2 Datos de la pila 2.

2.4 Registro de temperaturas.

Día N°	Fecha	T1 °C	T2 °C	T3 °C	Temp. Ambiental °C
0	Vi 21 Ene	-	-	-	19
1	Sa 22 Ene	31	44	33	21
2	Do 23 Ene	-	-	-	21
3	Lu 24 ene	40	52	43	23
4	Ma 25 ene	41	57	43	22
5	Mi 26 ene	44	55	43	20
6	Ju 27 ene	42	50	43	23
7	Vi 28 ene	28	26	28	19
8	Sa 29 ene	38	53	40	20
9	Do30 ene	-	-	-	22
10	Lu 31 ene	47	64	47	25
11	Ma 01 Feb	46	64	56	28
12	Mi 02 feb	50	66	56	26
13	Ju 03 feb	42	55	44	24
14	Vi 04 feb	35	45	38	20
15	Sa 05 feb	33	40	34	17
16	Do 06 feb	-	-	-	19
17	Lu 07 feb	32	34	32	22
18	Ma 08 feb	30	33	31	25
19	Mi 09 feb	30	31	30	25
20	Ju 10 feb	30	35	31	19
21	Vi 11 feb	32	35	30	18
22	Sa 12 feb	-	-	-	21
23	Do 13 feb	-	-	-	21
24	Lu 14 feb	30	33	33	23
25	Ma 15 feb	31	32	32	23
26	Mi 16 feb	-	-	-	24
27	Ju 17 feb	29	32	29	22
28	Vi 18 feb	32	33	32	24
29	Sa 19 feb	-	-	-	24
30	Do 20 feb	-	-	-	25
31	Lu 21 feb	33	34	33	24
32	Ma 22 feb	33	33	33	26
33	Mi 23 feb	30	31	30	24
34	Ju 24 feb	30	31	30	28
35	Vi 25 feb	31	31	30	30
36	Sa 26 feb	38	42	37	25
37	Do 27 feb	-	-	-	22
38	Lu 28 feb	30	35	30	21
39	Ma 01 mar	30	32	31	22
40	Mi 02 mar	31	31	30	23

Día N°	Fecha	T1 °C	T2 °C	T3 °C	Temp. Ambiental °C
41	Ju 03 mar	30	31	30	21
42	Vi 04 mar	30	32	30	22
43	Sa 05 mar	30	31	29	20
44	Do 06 mar	-	-	-	21
45	Lu 07 mar	28	30	29	21
46	Ma 08 mar	29	30	28	22
47	Mi 09 mar	29	29	28	23
48	Ju 10 mar	29	30	29	24
49	Vi 11 mar	28	29	27	19
50	Sa 12 mar	28	28	27	18
51	Do 13 mar	-	-	-	-
52	Lu 14 mar	26	27	26	22
53	Ma 15 mar	26	27	25	18
54	Mi 16 mar	25	27	25	20

2.5 Registro de datos para determinar el nivel de humedad y sequedad.

Día N°	Peso Vaso Precipitado (g)	Peso Muestra Húmeda (g)	Peso Muestra Seca (g)	Sequedad %	Humedad %
0	29,33	30,33	29,51	18,0	82,0
1	-	-	-	-	-
2	-	-	-	-	-
3	29,33	30,34	29,61	27,7	72,3
4	29,34	30,34	29,62	28,0	72,0
5	27,84	28,85	28,13	28,7	71,3
6	-	-	-	-	-
7	29,34	30,33	29,68	34,3	65,7
8	29,33	30,33	29,71	38,0	62,0
9	-	-	-	-	-
10	29,34	30,34	29,75	41,0	59,0
11	-	-	-	-	-
12	17,37	18,37	17,8	43,0	57,0
13	17,37	18,37	17,84	47,0	53,0
14	17,37	18,37	17,83	46,0	54,0
15	17,37	18,37	17,84	47,0	53,0
16	-	-	-	-	-
17	17,37	18,37	17,91	54,0	46,0
18	34,73	35,73	35,31	58,0	42,0
19	17,36	18,37	17,9	53,5	46,5
20	17,36	18,36	17,91	55,0	45,0
21	17,36	18,36	17,89	53,0	47,0
22	-	-	-	-	-

Día N°	Peso Vaso Precipitado (g)	Peso Muestra Húmeda (g)	Peso Muestra Seca (g)	Sequedad %	Humedad %
23	-	-	-	-	-
24	17,36	18,35	17,9	54,5	45,5
25	34,37	35,36	34,84	47,5	52,5
26	34,37	35,37	34,89	52,0	48,0
27	34,37	35,37	34,96	59,0	41,0
28	17,37	18,37	17,96	59,0	41,0
29	-	-	-	-	-
30	-	-	-	-	-
31	17,32	18,33	17,95	62,4	37,6
32	17,32	18,32	17,88	56,0	44,0
33	17,32	18,34	18	66,7	33,3
34	17,32	18,35	17,98	64,1	35,9
35	34,74	35,75	35,14	39,6	60,4
36	-	-	-	-	-
37	-	-	-	-	-
38	17,32	18,32	17,74	42,0	58,0
39	34,38	35,38	34,85	47,0	53,0
40	17,32	18,32	17,78	46,0	54,0
41	34,73	35,73	35,21	48,0	52,0
42	17,32	18,32	17,77	45,0	55,0
43	17,32	18,33	17,79	46,5	53,5
44	-	-	-	-	-
45	17,32	18,32	17,76	44,0	56,0
46	17,32	18,33	17,77	44,6	55,4
47	17,32	18,32	17,76	44,0	56,0
48	17,32	18,32	17,78	46,0	54,0
49	17,32	18,31	17,77	45,5	54,5
50	17,32	18,32	17,76	44,0	56,0
51	-	-	-	-	-
52	17,32	18,33	17,76	43,6	56,4
53	17,32	18,32	17,75	43,0	57,0
54	17,32	18,32	17,74	42,0	58,0

2.6 Registro de datos para determinar reducción de materia orgánica y valor de pH.

Día N°	pH	Peso Crisol (g)	Peso Crisol c/Muestra Húmeda (g)	Peso Crisol C/ Cenizas (g)	SSV %	SSM %
0	5,8	35,76	36,76	35,79	83,3	16,7
1		-	-	-	-	-
2		-	-	-	-	-
3		-	-	-	-	-
4	6,1	34,75	35,75	34,8	82,1	17,9
5		-	-	-	-	-
6		-	-	-	-	-
7		-	-	-	-	-
8	7,4	34,73	35,73	34,82	76,3	23,7
9		-	-	-	-	-
10		-	-	-	-	-
11		-	-	-	-	-
12	7,4	34,73	35,73	34,84	74,4	25,6
13		-	-	-	-	-
14		-	-	-	-	-
15		-	-	-	-	-
16		-	-	-	-	-
17	7,7	17,36	18,37	17,5	74,3	25,7
18		-	-	-	-	-
19		-	-	-	-	-
20		-	-	-	-	-
21	7,6	34,73	35,73	34,88	71,7	28,3
22		-	-	-	-	-
23		-	-	-	-	-
24		-	-	-	-	-
25	7,5	34,37	35,36	34,51	70,2	29,8
26		-	-	-	-	-
27		-	-	-	-	-
28		-	-	-	-	-
29		-	-	-	-	-
30		-	-	-	-	-
31	7,6	17,32	18,33	17,51	69,8	30,2
32		-	-	-	-	-
33	7,4	17,32	18,34	17,53	69,1	30,9
34		-	-	-	-	-
35	7,3	34,75	36,13	34,92	68,9	31,1
36		-	-	-	-	-
37		-	-	-	-	-
38	7,4	17,32	18,32	17,46	66,7	33,3

Día N°	pH	Peso Crisol (g)	Peso Crisol c/Muestra Húmeda (g)	Peso Crisol C/ Cenizas (g)	SSV %	SSM %
39		-	-	-	-	-
40	7,4	17,32	18,32	17,47	67,4	32,6
41		-	-	-	-	-
42	7,3	17,32	18,32	17,47	66,7	33,3
43		-	-	-	-	-
44		-	-	-	-	-
45	7,1	17,32	18,32	17,47	65,9	34,1
46		-	-	-	-	-
47		-	-	-	-	-
48	7,2	17,32	18,32	17,48	65,2	34,8
49		-	-	-	-	-
50		-	-	-	-	-
51		-	-	-	-	-
52	7,1	17,32	18,33	17,47	65,9	34,1
53		-	-	-	-	-
54	6,9	17,32	18,32	17,47	64,3	35,7

2.4 Registro de datos para determinar constante de reacción Kd.

Días	%SV	%SM	%SVrest	%SVno bio	%SV bio	LN ((SVt-SVnb)/(Svo-SVnb))
0	83,3	16,7	83,3	64,3	19	0
4	82,1	17,9	82,1	64,3	17,8	0,1
8	76,3	23,7	76,3	64,3	12,0	0,5
12	74,4	25,6	74,4	64,3	10,1	0,6
17	74,3	25,7	74,3	64,3	10,0	0,6
21	71,7	28,3	71,7	64,3	7,4	0,9
25	70,2	29,8	70,2	64,3	5,9	1,2
31	69,8	30,2	69,8	64,3	5,5	1,2
33	69,1	30,9	69,1	64,3	4,8	1,4
35	68,9	31,1	68,9	64,3	4,6	1,4
38	66,7	33,3	66,7	64,3	2,4	2,1
40	67,4	32,6	67,4	64,3	3,1	1,8
42	66,7	33,3	66,7	64,3	2,4	2,1
45	65,9	34,1	65,9	64,3	1,6	2,5
48	65,2	34,8	65,2	64,3	0,9	3,0
52	65,9	34,1	65,9	64,3	1,6	2,5
54	64,3	35,7	64,3	64,3	0,0	

ANEXO 3 Otros.

3.1 Carta solicitud de transporte de lodos.



Concepción, 10 de Noviembre de 2004

Señor
Antonio Poblete
Director del Servicio Salud de Concepción
Presente

Estimado señor Poblete:

Junto con saludarlo, solicito a Ud., autorización para efectuar un traslado de aproximadamente 800 Kg. de lodos desde las instalaciones de la empresa EWOS ubicada en la ruta 160 (Concepción – Coronel) sector de Parque Escuadrón en donde se generan, hasta las dependencias de la Universidad del Bío-Bío campus Concepción.

El traslado se realizará en vehículo institucional en compartimentos estancos. El material trasladado es imprescindible para el desarrollo en la investigación para la memoria de título denominada "Evaluación de los Efectos de la Pluviometría en Pilas de Compostaje de Residuos Sólidos", que se encuentra desarrollando el alumno señor Carlos Ahumada Mercado.

Cualquier consulta o duda, favor comunicarse al fono 731645 o al correo electrónico lsantana@ubiobio.cl.

Esperando que esta solicitud tenga una respuesta positiva, le saluda atentamente a Ud.,

Luis Santana Oyarzo
Director
Depto. Ingeniería Civil

Sede Concepción

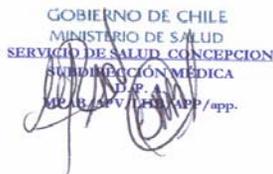
Avda. Collao N° 1202 - Casilla 5-C Fonos: (56-41) 731200 Fono/Fax: (56 - 41) 731040 - VIII Región - Chile

Sede Chillán

Avda. Andrés Bello s/n Casilla 447 - Fonos/Fax: (56-42) 203000 - VIII Región - Chile

E-mail: ubb@ubiobio.cl

3.2 Autorización del Servicio de Salud de Concepción al transporte de lodos.



CERTIFICADO N° 2C7/ 23.DIC.2004 **0666**

En virtud de las solicitudes presentadas por D. Luis Santana Oyarzo, Director, Depto. Ingeniería Civil y D. Peter Backhouse Erazo, Decano Facultad de Ingeniería, con fechas 11.11.2004 y 14.12.2004; lo dispuesto en el D.F.L. N° 725/67 "Código Sanitario"; y en virtud de las atribuciones que me confiere el Art. 20° letra j) del D.L. 2.763 y Decreto Supremo N° 42 del 09.02.86 sobre Reglamento Orgánico de los Servicios de Salud y D.S. 165/2004 ambos del Ministerio de Salud y Resolución 520/96 de la Contraloría General de la República, se certifica lo siguiente:

1. Que el proyecto presentado ante este Servicio de Salud para efectuar el traslado y disposición final de 800 Kg. de lodos desde las instalaciones de la empresa EWOS, Chile S.A., ubicada en la ruta 160 (Concepción-Coronel), sector Parque Industrial Escuadrón hasta las dependencias de la Universidad del Bío Bío campus Concepción, reúne las condiciones básicas mínimas para su ejecución.
2. La Universidad deberá dar total cumplimiento a este proyecto, en lo concerniente a las características técnicas de este como también las medidas de mitigación que se deberán contemplar para evitar la proliferación de vectores de interés sanitario y/o olores molestos hacia la comunidad.
3. La autorización será válida, mientras dure la memoria de título denominada "Evaluación de los efectos de la Pluviometría en Pilas de Compostaje de Residuos Sólidos", del alumno Carlos Ahumada Mercado.
4. Cualquier modificación al proyecto presentado, deberá ser informado a este Servicio de Salud para su aprobación si así correspondiera.
5. El incumplimiento a lo estipulado anteriormente, será sancionado de acuerdo a lo indicado en el Libro X del Código Sanitario e invalidará esta certificación.



DR. SERGIO OPAZO SANTANDER
DIRECTOR
SERVICIO DE SALUD CONCEPCION

Unidad de Saneamiento
Cert. Int. 117 del 21.12.2004
DISTRIBUCIÓN:
- La indicada
- Archivo Saneamiento (2)
- Secretaria D.P.A.
- Oficina de Partes (2)
- Id.: 30200 y 32440
- Comprobante de pago N° Exento

3.3 UNIVERSIDAD DEL BIOBIO – FACULTAD DE INGENIERÍA RESUMEN DE PROYECTO DE TÍTULO

Escuela de Ingeniería Civil			
Título		Evaluación de los Efectos de la Pluviometría en Pilas de Compostaje de Residuos Sólidos	
Nombre Memorista		Carlos Eduardo Ahumada Mercado	
Modalidad	Investigación	Profesor Patrocinante	
Concepto		Pedro Cisterna Osorio	
Calificación			
Fecha	Marzo de 2005	Ingeniero Supervisor	Institución
Comisión (Nombre y Firma)			
Alvaro Suazo Sch.	Verónica Lazcano	Pedro Cisterna O.	
Resumen			
<p>Los objetivos centrales de este proyecto de título fueron evaluar los efectos de la pluviometría en pilas de compostaje de residuos sólidos y estudiar la factibilidad técnica de que la empresa Ewos Chile S.A. utilice el compostaje como medida de solución a sus lodos. Para ello se construyeron dos pilas de compostaje en base a volteo, utilizando como substrato lodos generados en la planta de riles de la empresa antes citada. A una de las pilas se le incorporó agua durante la investigación mientras que la otra fue cubierta con un techo de polietileno de manera de impedir el ingreso de precipitaciones. Los parámetros evaluados durante la investigación fueron: temperatura interna de las pilas, humedad, pH y sólidos volátiles y minerales. Como consecuencia de la medición de estas variables se pudo concluir que el exceso de agua en una pila de compostaje ocasiona una disminución de la actividad microbológica, un efecto termodinámico sobre la constante endógena Kd y una reducción importante del pH del material que se encuentra compostando debido a fermentaciones anaeróbicas. Por otro lado Ewos Chile S.A. puede técnicamente utilizar el compostaje como alternativa de solución a sus lodos.</p>			