

UNIVERSIDAD DEL BÍO-BÍO
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL

Profesor patrocinante: Ing. Pedro Cisterna O.

**“INCIDENCIA DEL TAMAÑO DE LA PARTÍCULA EN LA
BIODEGRADACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS (RSU), EN EL
TRATAMIENTO MECÁNICO BIOLÓGICO (TMB)”**

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

DANIELA ALEJANDRA FERNÁNDEZ GÁTICA

CONCEPCIÓN, NOVIEMBRE 2014

NOMENCLATURA

RSU: Residuos sólidos urbanos.

TMB: Tratamiento mecánico biológico.

UBB: Universidad del Bío-Bío.

SSV: Sólidos volátiles.

SSM: Sólidos minerales.

CONAMA: Comisión Nacional del medio Ambiente.

INDICE GENERAL

NOMENCLATURA.....	ii
INDICE DE FIGURAS	vi
INDICE DE TABLAS	vii
RESUMEN.....	1
ABSTRACT	2
CAPÍTULO I.....	INTRODUCCIÓN
.....	3
1.1 OBJETIVOS	4
1.1.1 OBJETIVO GENERAL	4
1.1.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS	4
CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO.....	5
2.1 Residuos sólidos urbanos.....	5
2.1.1 La problemática de los residuos sólidos Urbanos	5
a) Generación y Disposición de Residuos Sólidos Urbanos en Chile.....	5
b) Composición	6
c) Recolección.....	6
a)Contaminación atmosférica.....	7
b)Contaminación edáfica.....	7
c) Contaminación de las aguas superficiales o subterráneas.....	7
d) Pestilencias.....	8
e) Proliferación de plagas y aparición de focos infecciosos.....	8
f) Degradación del paisaje.....	8
2.1.4 Biodegradación de los residuos sólidos urbanos	8
2.2 TRATAMIENTO MECÁNICO BIOLÓGICO (TMB).....	9
2.2.1 Tratamiento Mecánico.....	10

a) Trituración.....	10
b) Homogeneización	10
2.2.2 Tratamiento Biológico.....	10
2.3 Degradación Aeróbica	10
2.4 Técnicas de tratamiento biológico aeróbico	11
a) Métodos Intensivos	11
b) Métodos extensivos.....	11
2.5 Pilas estáticas con aireación pasiva.....	11
2.6 Factores que afectan el proceso de degradación biológica.	12
a) Temperatura	12
b) Humedad.....	12
c) pH.....	13
d) Aireación.....	13
CAPÍTULO III METODOLOGÍA.....	15
3.1 Proceso de Construcción de Pilas	15
3.1.1 Localización terreno.....	15
3.1.2 Preparación terreno	15
3.1.3 Construcción pallets (tarimas) de madera	15
3.1.4Recoleccióny transporte de residuos	16
3.1.5 Parte mecánica del TMB: Trituración y homogeneización de los residuos.....	17
3.2 Montaje pilas de biodegradación aeróbica.....	17
3.2.1. Características geométricas de las pilas.	18
Tabla 2: Dimensiones pilas de RSU.	18
3.2.2 Protección pilas	18
Figura 3. Pilas 1 y 2 de RSU.	18
3.3 CONTROL DE VARIABLES DEL PROCESO.....	19
CAPÍTULO IV RESULTADOS Y ANÁLISIS.....	20
4.1 Resultados y Análisis.....	20
4.1.1 Variación de la temperatura de la pila 1 y 2.....	20
Figura 4. Variación temperatura interna pilas 1y 2 y temperatura Ambiente.	21
4.1.2 Variación de la humedad en las pilas 1 y 2.	21
Figura 5. Variación Humedad pila 1 y 2.	22

4.1.3 Variación de pH	22
Figura 6. Variación pH pila 1 y 2.	23
4.1.4 Variación porcentaje sólidos minerales y sólidos volátiles en pila 1 y 2.....	23
Figura 7. Variación SSM Y SSV, Pilas 1y 2.	24
4.1.5. Constante de Reacción (Kd).....	24
4.2 Porcentaje Nivel de biodegradación Pila 1 y 2	25
Tabla 3: Relación nivel de biodegradación con disminución de humedad	25
4.3 Pérdida de masa Pilas 1y 2.	26
4.4 Análisis de costos de la Gestión de los residuos sólidos Urbanos	27
CAPITULO V: CONCLUSIONES	28
ANEXO A. CONTROL DE VARIABLES DEL PROCESO	33
A.1 Humedad interna	33
A.1.1 Equipos utilizados para determinación de humedad	33
A.1.2 Procedimiento control de humedad.....	33
A.2 Temperatura	34
A.2.1 Equipo utilizado	34
A.2.2 Procedimiento control de temperatura:	34
A.3 pH.....	35
A.3.1 Equipos utilizados	35
A.3.2 Procedimiento control de pH.....	35
A.4 Sólidos Volátiles y Sólidos Minerales.	36
A.4.1 Equipos utilizados	36
A.4.2 Procedimiento utilizado control Sólidos Volátiles y Sólidos Minerales	36
A.5 Frecuencia en la medición de los Parámetros	37
Tabla A.5: Frecuencia de Monitoreo variables.	37
ANEXO B. REGISTRO CONTROL DE VARIABLES.....	38

INDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. Degradación aerobia con aireación pasiva.....	15
FIGURA 2. Tamiz de abertura.....	19
FIGURA 3. Pilas 1 y 2 de RSU.....	20
FIGURA 4. Variación Temperatura pilas 1 y 2.....	23
FIGURA 5. Variación Humedad Pilas 1 y 2.....	24
FIGURA 6 Variación ph pilas 1 y 2.....	25
FIGURA 7. Variación % SSM Y % SSV pilas 1 y 2.....	26
FIGURA 8. Constante de Reacción Pilas 1 y 2.....	27
FIGURA 9. Pérdida de masa pilas 1 y 2.....	28
FIGURA10. Esquema inicio y disposición final de RSU mediante TMB.....	29

INDICE DE TABLAS

TABLA 1. Tiempo de biodegradación de los RSU.....	10
TABLA 2. Dimensiones pilas RSU.....	20
TABLA 3. Relación nivel de biodegradación con disminución de humedad.....	27

INCIDENCIA DEL TAMAÑO DE LA PARTÍCULA EN LA BIODEGRADACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS (RSU), EN EL TRATAMIENTO MECÁNICO BIOLÓGICO (TMB).Daniela Fernández Gatica,

Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad del BíoBío,

danferna@alumnos.ubiobio.cl

Pedro Cisterna Osorio,

Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad del BíoBío,

pcisterna@ubiobio.cl

RESUMEN

El problema de manejo de los millones de toneladas anuales de residuos sólidos urbanos (RSU) que se generan a lo largo del país, plantea un conjunto de desafíos que no sólo abarcan aspectos técnicos sino también sociales, donde el objetivo es la reducción de las cantidades de residuos dispuestos finalmente en un relleno sanitario y el manejo eficiente de éste.

El presente informe refleja las principales actividades y resultados del estudio realizado en la provincia de Concepción entre septiembre y diciembre de 2013, con el fin de lograr el objetivo principal, que es evaluar la incidencia del tamaño de la partícula en la biodegradación de Residuos Sólidos Urbanos (RSU) en el tratamiento mecánico biológico (TMB).

Para lo anterior, se construyeron 2 pilas de RSU de iguales características, teniendo como única diferencia el tamaño de sus partículas, las cuales fueron monitoreadas durante 3 meses, controlando las variables de temperatura, pH, porcentaje de humedad y reducción de sólidos volátiles.

Los resultados obtenidos determinaron que el tamaño de la partícula tiene incidencia en la biodegradación de sólidos urbanos, donde a un menor tamaño de trituración se registrara mayor nivel de biodegradación.

Palabras clave: RSU, BIODEGRADACION, TMB

Número de palabras = 6.748 Palabras texto + 13 Figuras/Tablas*250 = 9.998.-

The effect of the size of the particles on Municipal Solid Waste (MSW) Biodegradation in a
Mechanical Biological treatment (MBT) system

Author: Daniela FernándezGatica,
Department of Civil and Environmental Engineering, University of BíoBío,
danferna@alumnos.ubiobio.cl

Teacher guide: Pedro Cisterna Osorio,
Department of Civil and Environmental Engineering, University of BíoBío,
pcisterna@ubiobio.cl

ABSTRACT

Nowadays in Chile, there is a serious problem concerning the management of millions of tons of Municipal Solid Waste generated annually. This problem is rooted in a group of challenges that are not only related to technical aspects but also with social issues, where the main aim is to efficiently manage and diminish the quantity of waste finally deposited in landfill sites.

The present article describes the main activities and results of a study carried out between September and December 2013 in Concepción, Chile. Two piles of MSW with the same characteristics were built in order to assess the effect of the size of the particles on MSW in a MBT system. The only difference between these two piles was the size of their particles. These particles were monitored for three months. During this period of time, variables such as temperature, pH, humidity percentage and the reduction of volatile solids were controlled.

The results of this study were very satisfactory. In fact, it was discovered that the particles size does affect the biodegradation process of Municipal Solid Waste: Particles that have been ground to a smaller size produce a higher level of biodegradation.

Key Words: MSW, BIODEGRADATION, MBT

CAPÍTULO I INTRODUCCIÓN

En los últimos años, nuestro país ha presentado un acelerado desarrollo urbano, el que ha implicado un aumento en los ingresos económicos y en los patrones de consumo de las personas, siendo éstos, los principales factores que explican el aumento en la generación de residuos sólidos urbanos (RSU).

Debido al aumento del volumen de residuos, las formas tradicionales de eliminación de residuos están perdiendo validez. A fin de prevenir peligros para la salud de la población y evitar la contaminación del medioambiente deben diseñarse, nuevas estrategias para la eliminación de residuos.

En Chile se está viviendo un proceso de transición tecnológica desde el “vertedero” a rellenos sanitarios, pretendiendo realizar un tratamiento efectivo de los lixiviados y reducir los impactos negativos del acopio de residuos (contaminación de napas subterráneas, generación de olores y proliferación de vectores, entre otros). La aplicación de un tratamiento previo, como el Tratamiento Mecánico Biológico (TMB), permitiría reducir considerablemente no sólo los impactos negativos al ambiente, sino también el volumen de materiales depositados en el relleno sanitario, lo que se traduce en la extensión de su vida útil.

En el presente proyecto, se analizan dos pilas de Residuos Sólidos Urbanos (RSU), las cuales tendrán como diferencia el tamaño de sus partículas, con el fin de obtener parámetros que permitan concluir acerca de la incidencia de la granulometría en la biodegradación de RSU bajo condiciones aeróbicas.

Si bien existen estudios realizados sobre el TMB, éstos se enfocan en parámetros tales como: Tipo de aireación, clima, entre otros, sin considerar la incidencia del tamaño de la partícula, por lo que el presente estudio busca complementar investigaciones anteriores y profundizar sobre el comportamiento de esta nueva tecnología.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 OBJETIVO GENERAL

- Evaluar la incidencia del tamaño de la partícula en la biodegradación de Residuos Sólidos Urbanos (RSU), en el Tratamiento Mecánico Biológico (TMB).

1.1.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Resumir el estado del arte respecto del Tratamiento Mecánico Biológico.
- Construir dos pilas de igual tamaño de residuos sólidos urbanos.
- Evaluar la biodegradación de las pilas, variando el tamaño de la partícula de una con respecto a la otra.
- Realizar un análisis comparativo de los resultados obtenidos en ambas pilas y determinar bajo que condición resulta más recomendable efectuar el Tratamiento Mecánico Biológico (TMB).

CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO

2.1 Residuos sólidos urbanos

Los residuos sólidos urbanos, son todos aquellos elementos, objetos o sustancias generados como consecuencia del consumo o el desarrollo de actividades humanas y cuyo destino sea el desecho o abandono, sea su origen residencial, urbano, comercial, asistencial, entre otros.

Los residuos más comúnmente llamado basura son, son todos aquellos materiales provenientes de actividades humanas y que el ser humano desecha diariamente.

2.1.1 La problemática de los residuos sólidos Urbanos

Los residuos sólidos Urbanos representan un problema complejo, el cual integra conceptos ambientales, económicos, institucionales y sociales (CONAMA, 1999).

La gestión de los residuos sólidos urbanos comprende un amplio número de organismos públicos sectoriales, no existiendo una institución formal con responsabilidades y competencias específicas sobre el conjunto del manejo de los residuos sólidos (CONAMA, 2004).

Para comprender de mejor manera la problemática que implica la gestión de los residuos sólidos urbanos en Chile, se describen los siguientes términos:

a) Generación y Disposición de Residuos Sólidos Urbanos en Chile

La generación de residuos sólidos Urbanos, ha experimentado un aumento sostenido en los últimos 30 años. La generación de residuos por habitante a pasado desde 0,60 Kg/Hab-día en el año 1977 a un 1,1 Kg/Hab-día en el año 2002 (CONAMA, 2004).

La condición socioeconómica y los patrones de consumo urbano influyen directamente en la generación de residuos, siendo los sectores con más altos ingresos, los generadores del mayor volumen per cápita de residuos.

La información sobre la generación y el manejo de residuos en Chile es limitada. En años anteriores se han ejecutado varios estudios sobre la generación de los residuos, la tasa de generación, origen, características, y su destino, que en la mayoría de los casos es la disposición final.

Entre 2009 y 2010 se realizó el estudio “Levantamiento, análisis, generación y publicación de información nacional sobre residuos sólidos de Chile” (CONAMA/UdeC, 2010), el cual presenta

resultados en base de revisión de estudios anteriores y encuestas a municipalidades, empresas generadoras y destinatarios de residuos. Los resultados del estudio presentan las siguientes estimaciones para el año 2009: una generación de 16,9 millones de toneladas de residuos, de las cuales 6,5 millones de toneladas corresponden a residuos municipales y 10,4 millones de toneladas a residuos industriales. Respecto de su destino, el estudio estima una valorización del 10% del total de los residuos generados. Así mismo, respecto de los residuos sólidos municipales depositados, se estima que un 60% se depositó en rellenos sanitarios, que corresponden a las instalaciones que cumplen la reglamentación vigente, 20% en vertederos, correspondientes a instalaciones que cumplen la legislación del año 1980, y 20% en basurales, instalaciones que no cumplen ninguna reglamentación, estas últimas instalaciones se encuentran en zonas rurales y municipios con una cantidad limitada de habitantes. Es importante anotar que desde el año 2006 no hay mayor avance en el mejoramiento de la disposición final en rellenos sanitarios.

b) Composición

Los cambios en los patrones de consumo, asociados al aumento del ingreso, han implicado un importante cambio en la composición de los residuos sólidos urbanos. Estudios realizados en la muestra muestran una disminución porcentual en la generación de materia orgánica entre los años 1977 y 2000, siendo del orden de un 31,31% (Costa, 2001). Las cantidades de otros residuos tales como: papeles y cartones, metales, vidrios y otros, han aumentado en casi un 50%, con excepción del plástico, el cual presenta un incremento de más de un 500% (Durán, 1997). El excesivo aumento de plásticos en la composición de residuos se explicaría por la preferencia en el consumo de productos envasados (Fundación Terram, 2004).

c) Recolección

La recolección de residuos sólidos urbanos en Chile se realiza de dos maneras: formal e informal. La recolección formal es efectuada por una empresa especializada dependiente de la gestión municipal, mediante camiones compactadores. Presenta una cobertura elevada en comparación a otros países de la región, e incluso superiores a las de otros países de mayor ingreso por habitante. En el año 2004, un 99,9% de la población urbana disponía de un servicio regular de recolección domiciliar, observándose que en un 95,4% de los servicios la frecuencia de recolección era de, a lo menos, tres veces por semana (CONAMA, 2004).

La recolección informal contempla aproximadamente un 20% del total de residuos sólidos urbanos generados, no presentado un mecanismo de transporte definido (Vasconi, 2004).

2.1 2 Problemas provocados por los RSU

Las características propias de los residuos sólidos urbanos hacen que estas causen una serie de problemas, que pueden revestir mayor o menor gravedad dependiendo de la situación, cuando no son tratados de la forma adecuada. A continuación se exponen los efectos más comunes que provocan los RSU:

a)Contaminación atmosférica

la fermentación en ausencia de aire de la materia orgánica genera metano (gas de efecto invernadero veinte veces más potente que el dióxido de carbono), siendo este gas el que constituye la mitad las emisiones gaseosas producidas en los vertederos y el principal responsable de los incendios y explosiones que se producen en estos lugares.

b)Contaminación edáfica

Las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo se ven profundamente alteradas cuando sobre éste se depositan residuos no biodegradables. Consecuencia directa de una contaminación edáfica moderada es la desaparición de la flora y la fauna de la región afectada, la alteración de los ciclos biogeoquímicos y la pérdida de nutrientes esenciales para la existencia de vida animal o vegetal.

Cuando los residuos urbanos se acumulan de forma incontrolada, se corre el peligro de que aparezcan una serie de plagas, como pueden ser los roedores.

c) Contaminación de las aguas superficiales o subterráneas

Los lixiviados, que son los líquidos producidos cuando el agua se mueve por un medio poroso, arrastran las sustancias tóxicas que se generan en los vertederos. Los ejemplos más representativos de estos productos nocivos son el cloruro de vinilo, el cloruro de metilo, el tetracloruro de carbono y los clorobencenos (por su alta toxicidad destaca el hexaclorobenceno), siendo todos ellos sustancias persistentes y bioacumulativas en todos los eslabones de la cadena trófica.

En los lixiviados también se encuentran presentes metales pesados que tienen un alto índice de toxicidad, y que por lo tanto son perjudiciales para la salud.

d) Pestilencias

La descomposición de la materia orgánica que se encuentra formando parte de los residuos sólidos urbanos provoca una serie de malos olores, que se pueden ver acentuados cuando hay viento.

e) Proliferación de plagas y aparición de focos infecciosos

Al acumularse de forma incontrolada los residuos sólidos urbanos se favorece la proliferación de plagas de roedores, insectos o aves carroñeras, entre otros seres vivos, que pueden ser posibles portadores de enfermedades.

f) Degradación del paisaje

La acumulación de residuos en lugares no apropiados o adecuados a menudo conlleva un impacto paisajístico negativo (además de accidentes y otros incidentes), puesto que se produce un importante deterioro visual.

2.1.4 Biodegradación de los residuos sólidos urbanos

La biodegradación es la disolución química de los materiales por bacterias u otros medios biológicos. El Material orgánico se puede degradar aeróbicamente a través de oxígeno, o anaeróbicamente, sin oxígeno.

En la naturaleza, los materiales son biodegradables a diferentes ritmos. Para poder trabajar con eficacia, la mayoría de los microorganismos que ayudan a la biodegradación tienen necesidad de luz, agua y oxígeno. La tabla1, muestra la cantidad de tiempo en que un residuo dependiendo de su material, pueden tardar biodegradarse.

Tabla.1. Tiempo de Biodegradación de los residuos.

Residuo	Tiempo
Hortalizas	5 días
Papel	3 semanas a 3 meses
Algodón	6 meses
Bolsas de plástico	500 años
Cartón	5 años
Lana	1-5 años
Cuero	24 años
Nylon	30 años
Aluminio	100 años
Vidrio	1.000.000 años

Fuente: www.ecologiahoy.com

2.2 TRATAMIENTO MECÁNICO BIOLÓGICO (TMB)

El TMB, es un sistema de tratamiento que conjuga metodologías operacionales mecánicas y biológicas, con el fin de estabilizar la materia orgánica presente en los residuos, previo a su disposición final.

Producto de este tratamiento se logran diversos y positivos resultados entre los que se encuentran minimizar el potencial de contaminación atmosférico, producto del biogás, así como evitar la contaminación del subsuelo por lixiviados generados a partir de la descomposición anaerobia de la materia orgánica de los residuos. Esto significa que al finalizar el proceso de TMB, sólo queda un sustrato ambientalmente “inactivo”, que no requiere de complejos y costosos sistemas de disposición final, control y monitoreo ambiental.

EL sistema de TMB también permite una notable reducción del volumen de residuos (degradación de la materia orgánica), lo que implica una menor necesidad de suelos para efectuar la disposición final del sustrato estabilizado, el cual puede alcanzar altos índices de compactación, es decir, una mayor cantidad de material en un mismo espacio de terreno.

De esta manera a través del TMB se logra minimizar el impacto ambiental y los costos de la disposición de los residuos, reduciendo ésta a su mínima expresión, consagrando con ello el concepto de “invertir en valorización y tratamiento para reducir el gasto en disposición final”.

2.2.1 Tratamiento Mecánico

El tratamiento mecánico tiene la función de preparar los residuos para el tratamiento biológico, en esta etapa se realiza la trituración y homogeneización de los residuos.

a) Trituración

Los residuos son triturados con el fin de acelerar los procesos biológicos y que de esta manera sea más efectivo el tratamiento. Se busca reducir el tamaño del residuo con el fin de que la biodegradación sea más acelerada.

b) Homogeneización

En esta fase ocurre la mezcla de los residuos, la cual ocurre mediante movimientos que permitan mezclar los diferentes tipos de residuos existentes, para que la mezcla resulte homogeneizada completamente, se recomienda mezclar durante un largo periodo de tiempo, para asegurar que el proceso se realizó correctamente.

2.2.2 Tratamiento Biológico

Esta etapa puede ser trabajada de forma de dos procesos: aerobio y anaeróbico. A continuación solo se describe el proceso de degradación aeróbica, la utilizada en el proyecto.

2.3 Degradación Aeróbica

Luego de finalizar el tratamiento mecánico, y el montaje de las pilas este completo, comienza el proceso de degradación biológica aerobia, mecanismo mediante el cual la actividad microbiológica estabiliza la materia orgánica minimizando la generación de gas metano, contrario a lo que ocurre en una celda de vertedero o relleno sanitario, en cual la anoxia del proceso (ausencia de oxígeno) genera como resultado metano, gas indeseable y uno de los principales responsables del calentamiento global.

2.4 Técnicas de tratamiento biológico aeróbico

Las técnicas de tratamiento biológico son definidas por las condiciones climáticas del sector a emplazar la planta, los objetivos que se proponen desde el punto de vista de la gestión de residuos sólidos y las condiciones financieras dispuestas. De acuerdo a lo antes mencionado existen plantas de TMB en las que se aplican métodos extensivos y métodos intensivos.

a) Métodos Intensivos

Son de mayores costos, pero permiten reducir notablemente el tiempo de duración de la biodegradación aeróbica y el área específica requerida. Los sistemas cerrados (naves, contenedores), permiten captar emisiones de gas, olores y polvo.

Además, se puede controlar y optimizar la biodegradación aeróbica mediante la aireación activa, humedecimiento y mezclado del material, de forma que la fase principal de degradación resulte sensiblemente más rápida y el material orgánico pueda ser biodegradado en su totalidad.

b) Métodos extensivos

Es el caso de procedimientos con una bajo nivel de automatización y escasa tecnificación de los procesos e infraestructura. En este caso los residuos son acumulados en forma de pilas. Los materiales se amontonan sobre el suelo o pavimento, sin comprimirlos en exceso siendo muy importante la forma y medida de la pila. Los tipos de pilas a tratar son: Pilas estáticas con aireación pasiva, Pilas con volteo.

A continuación solo se describirá en qué consisten las pilas estáticas con aireación pasiva, debido a que este tipo de tratamiento se utilizó durante el proyecto.

2.5 Pilas estáticas con aireación pasiva

Se considera que este sistema es muy apropiado realizando un análisis de coste/eficacia de dicho sistema comparado con otros como aireación forzada o pilas de volteo. Para favorecer la ventilación natural de la pila, se emplean estructuras que permiten un mejor flujo de la masa de aire desde la parte inferior hacia la zona superior de la pila. Las pilas son ventiladas por convección natural. El aire caliente que sube desde el centro de la pila crea un vacío parcial que aspira el aire de los lados.

2.6 Factores que afectan el proceso de degradación biológica.

La degradación biológica dependerá de todos aquellos factores que puedan limitar el crecimiento microbiano, los cuales son responsables de las transformaciones y velocidades del proceso.

Dentro de los factores que intervienen en cualquier proceso de tipo biológico, los más importantes son la temperatura, la humedad, el pH, la aireación.

a) Temperatura

En la biodegradación aeróbica se libera energía en forma de calor y la temperatura asciende paralelamente a la actividad de los microorganismos. De ello resulta una evolución típica de la temperatura durante el proceso. A su vez, el rendimiento de los microorganismos durante la degradación depende de la temperatura, alcanzando un máximo en la fase de biodegradación intensiva, de aproximadamente 70 °C.

La medición periódica de la temperatura permite reconocer desviaciones de la evolución óptima y tomar medidas para mejorar las condiciones en las que tiene lugar la biodegradación aeróbica (p. ej. aireación, humedecimiento, traspaleo del material).

b) Humedad

Cuando este parámetro es escaso, la actividad de los microorganismos disminuye. La humedad y la aireación están íntimamente relacionadas, pues el aire de los intersticios es desplazado por el agua, pudiendo alterar el estado de agregación y estructura del material de partida. Resulta muy difícil establecer una humedad óptima, ya que en este factor, al igual que en los considerados antes, influye el tamaño y estado físico de las partículas, así como el sistema empleado en la realización del compostaje. La humedad debe de ser alta durante la etapa de descomposición, en la que prevalecen las bacterias. Si esta humedad desciende por debajo del 35-40%, la actividad microbiana desciende, pudiendo llegar hasta la inhibición. En la etapa de estabilización, el contenido en humedad requerido es menor, puesto que lo que prevalecen son actinomicetos y hongos. Por encima del 60%, el agua desplaza al aire de los espacios libres existentes y las condiciones se hacen anaerobias, produciéndose la emisión de malos olores y disminuyendo la velocidad del proceso. Se cree que una humedad óptima oscila entre el 50-60%, dependiendo del material empleado. En la práctica, el exceso de humedad puede ser reducido con la aireación por volteos. De acuerdo con Golueke (1975), una humedad menor del 40% reduce la actividad de los

microorganismos, principalmente de las bacterias, y si es menor del 30% se convierte en un factor limitante para la descomposición; por debajo del 12% cesa, prácticamente, toda la actividad biológica, siendo el proceso extremadamente lento.

c) pH

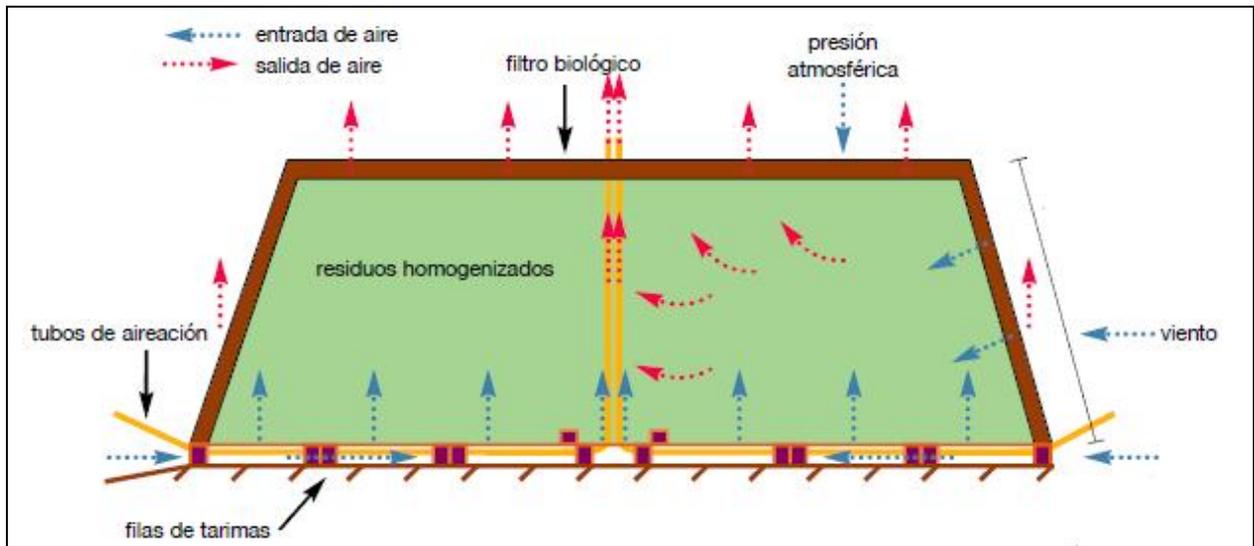
En los primeros momentos del proceso, el pH inicial puede sufrir un descenso, debido a que los microorganismos actúan sobre la materia orgánica más lábil, produciéndose una liberación de ácidos orgánicos. Posteriormente tiene lugar una subida del pH como consecuencia de un aumento en la concentración del ión amonio. Cuando se estabiliza el material, los valores de pH suelen situarse entre 7 y 8.

d) Aireación

Para conseguir que las diferentes etapas del TMB se desarrollen en condiciones aerobias, los microorganismos existentes deben tener oxígeno suficiente, ya que de no ser así son sustituidos por los anaerobios con el consiguiente retardo del proceso de compostaje y producción de H₂S en el medio; además, los procesos de reducción anaerobios se desarrollan mediante rutas metabólicas y con poblaciones microbianas diferentes a los aerobios. Por tanto, es necesaria la aireación de las pilas, pero siempre dentro de unos límites, ya que un exceso de ventilación podría provocar el enfriamiento de la masa con la consiguiente reducción de la actividad metabólica de los microorganismos. El consumo de oxígeno está relacionado con la temperatura, la humedad, los materiales de partida y el tamaño de los mismos. El dióxido de carbono se incrementa gradualmente, mientras que el oxígeno decae. La suma de los dos suele estar entorno al 20% del total de la masa, siendo mayoritario el oxígeno (15-20%). Cuando el oxígeno baja de estos niveles, los microorganismos anaerobios comienzan a sustituir a algunos aerobios.

El oxígeno no sólo es necesario para la respiración de los microorganismos y el metabolismo aerobio. El consumo de oxígeno es directamente proporcional a la actividad microbiana y por tanto existe una relación directa entre éste y la temperatura. En el rango de 28-55°C se alcanza el máximo de actividad microbiana y el mayor consumo de oxígeno.

Figura 1: Degradación aeróbica con aireación pasiva



Fuente: GTZ, División 44 – Medio ambiente e infraestructura, 2003.

2.7 Ventajas Tratamiento Mecánico Biológico

Las principales ventajas del TBM son:

- Reducción entre 80% y 95%, en la generación de emisiones gaseosas, principalmente metano.
- Reducción de 90% de la carga orgánica presente en los lixiviados.
- Efectivo control de residuos, olores y vectores.
- Reducción del potencial de asentamiento en el relleno sanitario.
- Reducción del 50% de la masa de residuos a disponer, lo que a su vez se traduce en menores costos de inversión y operación.
- Incremento de la densidad de compactación de residuos: 1,1-1,4 t/m³.
- Aumento de la vida útil del depósito (vertedero/relleno sanitario) de residuos.
- Reducción de costos y tiempo de post-cierre de un sitio de disposición final.

CAPÍTULO III METODOLOGÍA

La metodología utilizada para llevar a cabo el proyecto, se detalla a continuación:

3.1 Proceso de Construcción de Pilas

3.1.1 Localización terreno

Con el fin de elegir el terreno idóneo para realizar el estudio, se buscaron espacios que tuviera las siguientes características: que fuera un lugar seguro y alejado de lugares con mucho tránsito de personas y que estuviera emplazado dentro de la Universidad del Bío-Bío, para facilitar el traslado y medición de muestra a los laboratorios.

De acuerdo a lo anterior, se eligió como sector experimental, el sector trasero de la Universidad (sector container), el que está alejado de las aulas y cercano a los laboratorios utilizados, por lo que cumple con los requerimientos establecidos.

3.1.2 Preparación terreno

Para la preparación del terreno se realizó limpieza y nivelación del suelo. Posteriormente, con el fin de delimitar el espacio a trabajar, se realizó un cerco con techo de madera, forrado con malla galvanizada. Luego, se cubrió el espacio con nylon resistente para evitar que la lluvia u otras condiciones climáticas, pudiesen afectar los resultados del proyecto. Finalmente, se protegió el entorno con bloques de hormigón, dejando una puerta de acceso para ingresar a la toma de datos.

3.1.3 Construcción pallets (tarimas) de madera

Se construyeron dos tarimas de madera, con dimensiones de ancho 1, 8 m con largo de 2,2m, para la disposición de las pilas de RSU.

3.1.4 Recolección y transporte de residuos

La recolección de los residuos se realizó en viviendas cercanas al sector experimental y en algunos basureros que se encontraban dentro de la universidad. El traslado de éstos, fue en sacos y bolsas de basura plásticas.

3.1.5 Parte mecánica del TMB: Trituración y homogeneización de los residuos

Esta parte del proceso es fundamental, por ser la que incorpora los residuos al tratamiento.

Se rompieron las bolsas con residuos recolectados, triturándolos (con tijeras para cortar metal) y homogeneizándolos; Ambos procesos se llevaron a cabo de forma manual.

Al tener todo el residuo homogeneizado, se separa en dos lotes y uno de ellos se vuelve a triturar, para luego pasar por un tamiz de abertura 2,25 (cm²) (Ver Figura 2).

Figura 2. Tamiz de abertura 2,25 (cm²).



Fuente: Elaboración propia.

3.2 Montaje pilas de biodegradación aeróbica.

Previo al montaje de pilas, se coloca un plástico resistente en las tarimas de madera, con el fin de evitar que los residuos caigan a través de las aberturas. Luego, se montan las pilas procurando que éstas queden firmes. Posteriormente, se introducen ocho tubos (PVC) por pila (ver figura 3) los cuales permiten una inyección de aire, para generar la aireación pasiva en éstas. En el montaje, se consideró dejar el espacio necesario para poder realizar todas las labores requeridas durante la investigación.

3.2.1. Características geométricas de las pilas.

Ambas pilas se construyen con dimensiones muy similares, señaladas en la tabla 2.

Tabla 2: Dimensiones pilas de RSU.

PILA	Largo (m)	Ancho (m)	Alto (m)
1	1,07	0,74	0,52
2	1,05	0,71	0,5

Fuente: Elaboración propia

3.2.2 Protección pilas

Las pilas son cubiertas con una capa de material vegetal (pasto) de un grosor aproximado de 4cm denominado *biofiltro* (Figura 3) Está cubierta, tal como su nombre lo indica, es un filtro natural que ayuda a mitigar la dispersión de residuos, la presencia de olores y vectores sanitarios (propios de todos los procesos donde se manipulan residuos), logrando una operación limpia y controlada; además de ayudar a conservar la humedad y temperatura necesarias para el proceso biológico.

Figura 3. Pilas 1 y 2 de RSU.



Fuente: Elaboración propia

3.3 CONTROL DE VARIABLES DEL PROCESO.

Finalizada la construcción e instalación de pilas, comienza el proceso de degradación de los residuos. Durante los 3 meses de investigación, se controlaron los factores que permiten estudiar el comportamiento de degradación aeróbica de las pilas.

El control de estos factores es importante dentro de la investigación, porque permiten ir monitoreando y controlando el proceso, para obtener un término más eficaz de éste.

Las variables monitoreadas a lo largo de la investigación fueron: Humedad interna de las pilas, temperatura, pH, sólidos minerales y sólidos volátiles. Anexo A.

CAPÍTULO IV RESULTADOS Y ANÁLISIS

El siguiente capítulo, sintetiza y analiza todos los datos obtenidos durante los 3 meses de medición. El análisis se realizara a través de gráficas que permiten apreciar claramente la evolución de las variables medidas en ambas pilas de RSU.

4.1 Resultados y Análisis.

A continuación se presentan los resultados obtenidos durante el proceso de degradación aeróbica de las pilas 1 y 2.

4.1.1 Variación de la temperatura de la pila 1 y 2

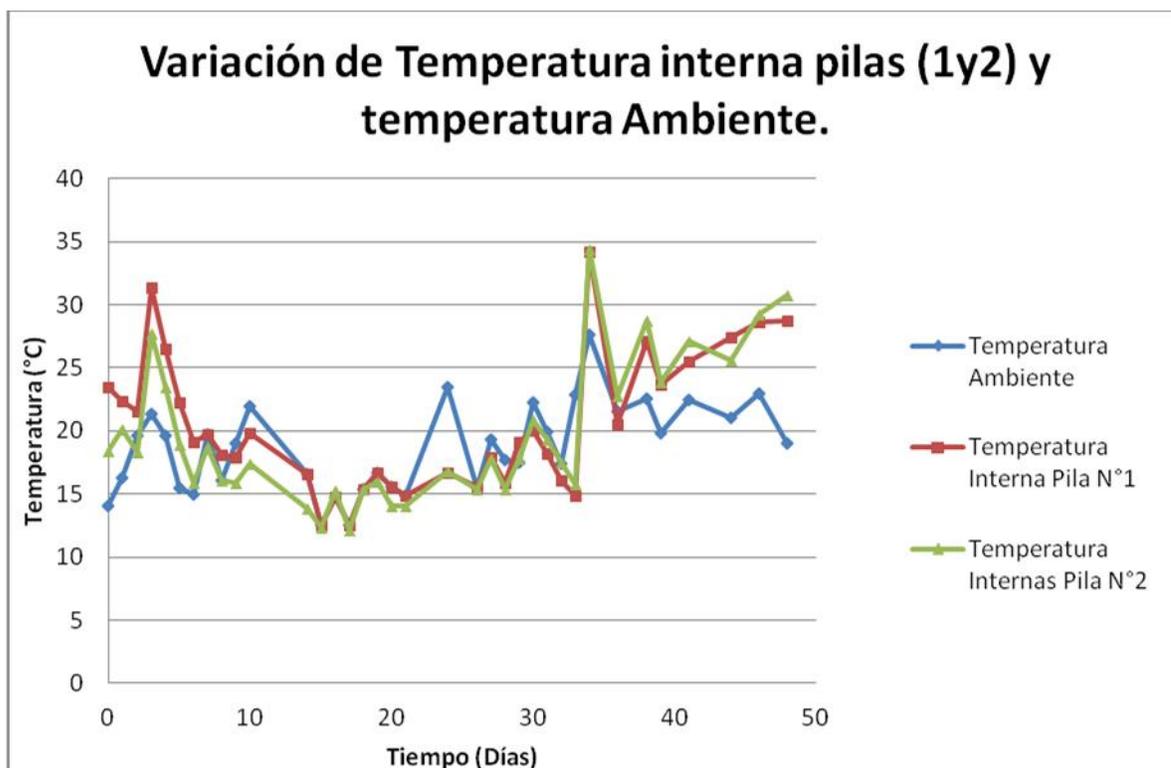
La figura 4, muestra la variación de la temperatura interna de las pilas 1 y 2 durante los tres meses de medición. Además se grafica la temperatura ambiente en el mismo período.

Se puede observar en el gráfico, que durante el día n° 34 de medición, se registraron las temperaturas más altas de todo el proceso, alcanzando los 34, 2 °C en la pila 1; 34,2 °C en la pila 2, La temperatura ambiente de ese día también fue la más alta de todo el proceso, llegando a 27,6 °C.

Se puede observar, que la temperatura ambiente afecta las temperaturas internas de las pilas, ya que en general siguen la misma tendencia.

Se aprecian dos periodos en los que existe una gran diferencia de valor entre las temperaturas internas de las pilas y la temperatura ambiente: El primer periodo es entre los días 4 y 5 de medición, lo que se puede explicar por la descomposición aeróbica elevada que se genera en la primera semana de actividad, generando una mayor temperatura interna en las pilas. El segundo periodo desde el día 34 de medición en adelante, lo que se debe a la poca cantidad de residuos existentes en la pila, provocando que el plástico existente en la tarima se calentara por su exposición al sol, provocando un alza de temperatura interna de la pila.

Figura 4. Variación temperatura interna pilas 1 y 2 y temperatura Ambiente.



Fuente: Elaboración propia

4.1.2 Variación de la humedad en las pilas 1 y 2.

En la figura 5, se muestra la variación de la humedad en la pilas 1 y 2 a través del tiempo. También se grafican las temperaturas internas de cada pila, para facilitar el análisis de la incidencia de la temperatura en los porcentajes de humedad obtenidos.

Se puede observar que la humedad en la pila 1 fue muy variable. También se observa que la pérdida de humedad de la pila de RSU fue alta, ya que la diferencia entre el valor inicial y el final (Humedad) fue de 40,95 %.

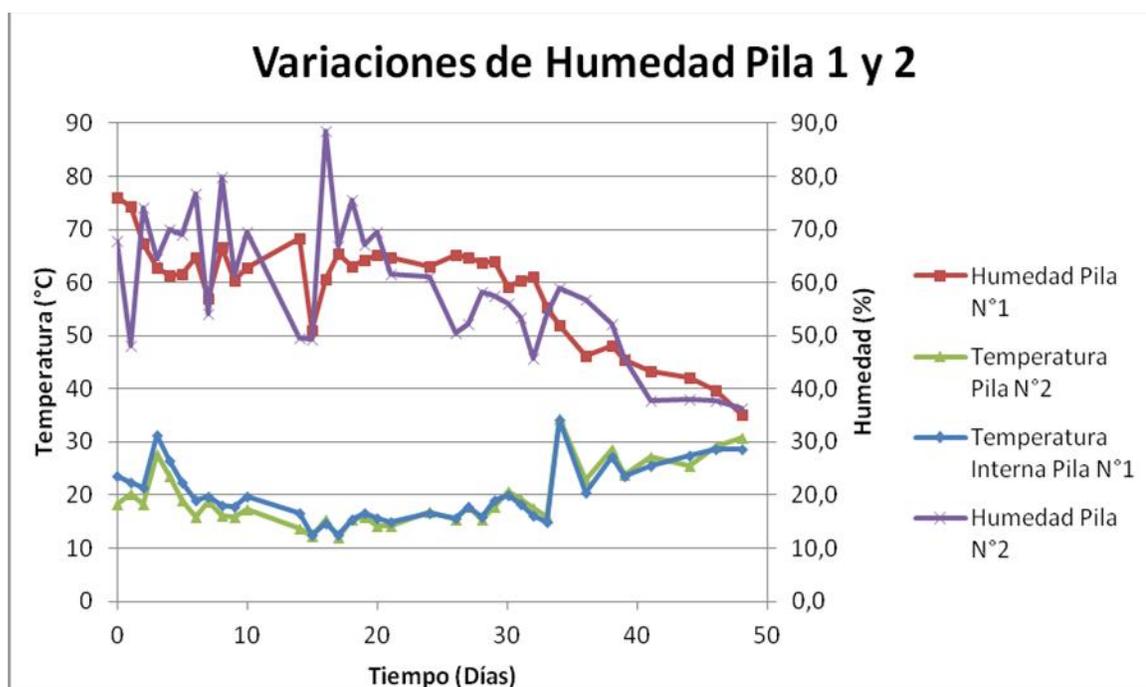
La pila 2 la humedad también tuvo un comportamiento muy variable. En este caso, la diferencia de humedad entre el valor inicial y final de la pila (Humedad) fue de 31,34%, por lo tanto, la pérdida de humedad también es considerable, pero menor que en la pila 1.

Además se puede observar, que durante los primeros 40 días de medición, la humedad en la pila 1 se mantuvo dentro del rango óptimo 40-60%, y en el día n°40 de medición él porcentaje de

humedad comenzó a descender, lo que se explica a las altos registro de temperatura ambiente de esos días.

En la pila 2 se observa, que durante el periodo de medición, la humedad no se mantuvo siempre dentro del rango óptimo (40-60%), pero al igual que en la pila 1, en el día n°40 de medición se puede observar la reducción del porcentaje de humedad, lo que se explica debido al aumento de la temperatura ambiente.

Figura 5. Variación Humedad pila 1 y 2.



Fuente: Elaboración propia

4.1.3 Variación de pH

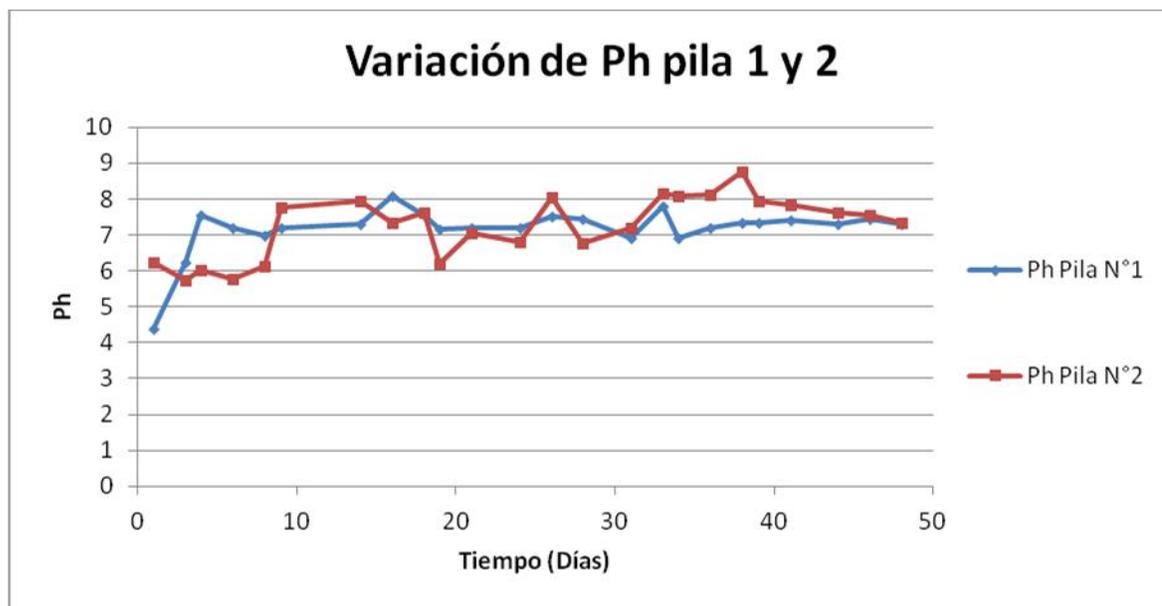
La figura 6 muestra la variación del pH en las pilas 1 y 2 durante todos los días que duró el proceso de monitoreo.

En ambas pilas se obtuvo el pH más bajo al inicio del proceso, ya que los residuos frescos tienen un pH moderadamente ácido y también debido a la liberación de ácidos orgánicos propios de la acción de los microorganismos sobre la materia orgánica arrojando valores de 4,4 en pila 1 y en 6,2 en pila 2. Luego se produce un alza brusca en los valores medidos, este incremento indica que ya comenzó el proceso aerobio, lo que produce una progresiva alcalización del medio, debido a la pérdida de ácidos orgánicos y a la generación del ion amonio este aumento en el valor de pH, lo

cual se refleja para la pila 1 el día 4 con un valor de 7,28 y para la pila 2 el día 8 con un valor de 7,76, estas alzas observadas tienen directa relación con las temperaturas in ternas de cada pila.

Al final del proceso se puede observar una estabilización de los valores medidos cercanos al valor de pH neutro (7) en ambas pilas.

Figura 6. Variación pH pila 1 y 2.



Fuente: Elaboración propia

4.1.4 Variación porcentaje sólidos minerales y sólidos volátiles en pila 1 y 2

La figura 7, muestra la variación del porcentaje de sólidos minerales y sólidos volátiles presentes en las pilas 1 y 2, durante todos los días que duró el proceso de monitoreo.

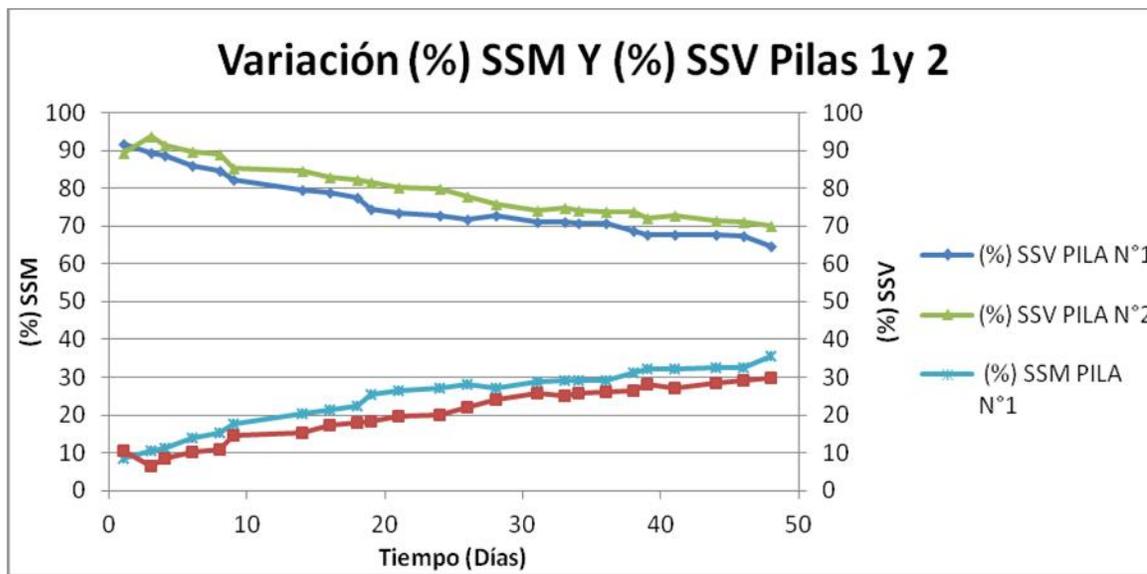
Al analizar la curva de los sólidos volátiles, se aprecia una clara reducción de ésta a través del tiempo, lo que indica que existió biodegradación en ambas pilas. En paralelo, se puede observar que a medida que se van reduciendo los sólidos volátiles, la fracción mineral va aumentando, esto se debe principalmente a que el contenido de la materia orgánica (sólidos volátiles), disminuyó con el tiempo debido a las reacciones aerobias que generaron desprendimiento de dióxido de carbono y agua.

Los resultados obtenidos, dan muestra de que durante los primeros días de medición es cuando se registra el descenso más brusco de los sólidos volátiles presentes en las muestras, debido a que las sustancias fácilmente degradables, son rápidamente consumidas, quedando solamente los compuestos más resistentes.

Así como también al final de la investigación se ve que el porcentaje empieza a mantenerse, esto se debe a que el proceso de biodegradación está por finalizar.

Al comparar las curvas de %SSV de las pilas, se aprecia que el porcentaje de reducción de material orgánico (%SSV) es mayor en la pila 1 (partícula de menor tamaño).

Figura 7. Variación SSM Y SSV, Pilas 1y 2.



Fuente: Elaboración propia

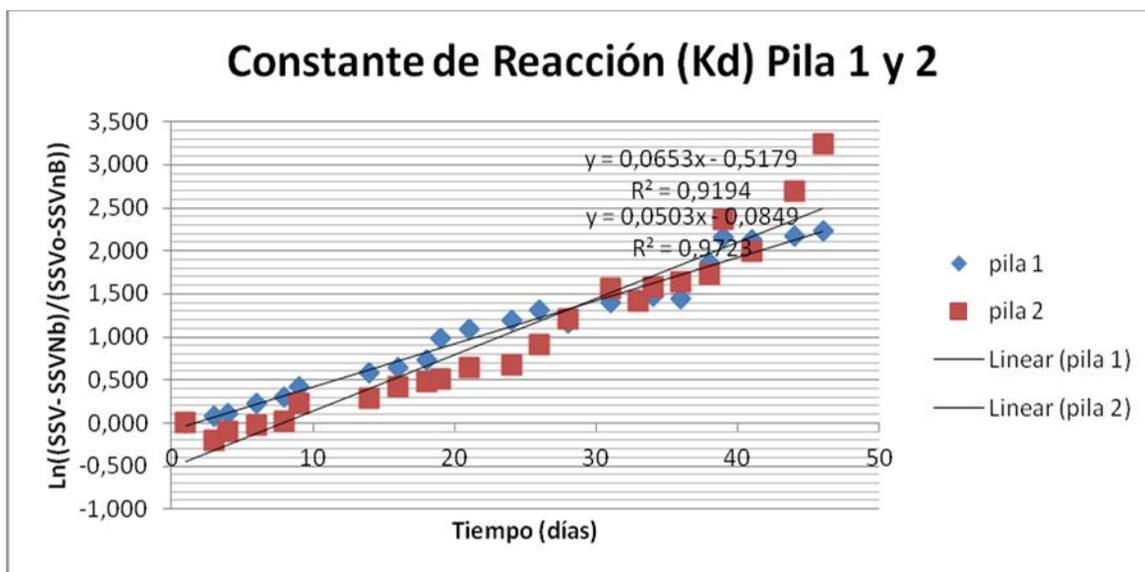
4.1.5. Constante de Reacción (Kd)

La figura 8, muestra la constante de reacción en las pilas 1 y 2.

Al analizar la pendiente de la línea de tendencia de cada pila, la cual representa la tasa de reducción de la materia orgánica en el interior de la cada pila, se puede observar que la pila 1 tiene un mayor valor de la constante de $0,065 \text{ días}^{-1}$ y en el caso de la pila 2 valor es de $0,05 \text{ días}^{-1}$.

Lo que significa que este parámetro nuevamente nos indica que la reducción de materia orgánica al interior de la pila 1 fue mayor que en la pila 2.

Figura 8. Constante de Reacción Pila 1 y 2



Fuente: Elaboración propia.

4.2 Porcentaje Nivel de biodegradación Pila 1 y 2

La tabla 3, entrega el nivel de biodegradación de cada pila y también la disminución de humedad de ellas, donde el nivel de biodegradación de la pila 1 es de 29;25%, mayor al nivel de biodegradación de la pila 2 de un 21,5%, las disminuciones de humedad entregan parámetros parecidos donde la disminución fue mayor en la pila 1 de un 40,95 y 31,34 en la pila 2, los parámetros antes mencionados tienen directa relación con el tamaño de la partícula, en donde un menor tamaño de partícula permite una mayor aireación, lo cual es imprescindible para el proceso aeróbico, favoreciendo la regulación de exceso de humedad por evaporación, manteniendo la temperatura adecuada, lo que permite la incrementación de la actividad microbológica, lo que finalmente se traduce en el aumento del nivel de biodegradación en la pila.

Tabla 3: Relación nivel de biodegradación con disminución de humedad

Nº pila	Humedad	% NB
1	40,95	29,25
2	31,34	21,50

Fuente: Elaboración propia.

4.3 Pérdida de masa Pilas 1 y 2.

En la figura 9, se aprecia las pilas al inicio y al fin del proceso de biodegradación, donde la pila 1 al inicio registra un valor de masa inicial de 37,8 kg y al finalizar el proceso su masa final es de 8,8 kg, donde su pérdida de masa es de 29 kg. En la pila 2 su registro de masa inicial fue de 37 kg y su masa final fue de 9,69 kg, perdiendo 27,31 kg.

Figura 9. Pérdida de masa Pilas 1 y 2.



Fuente: Elaboración propia.

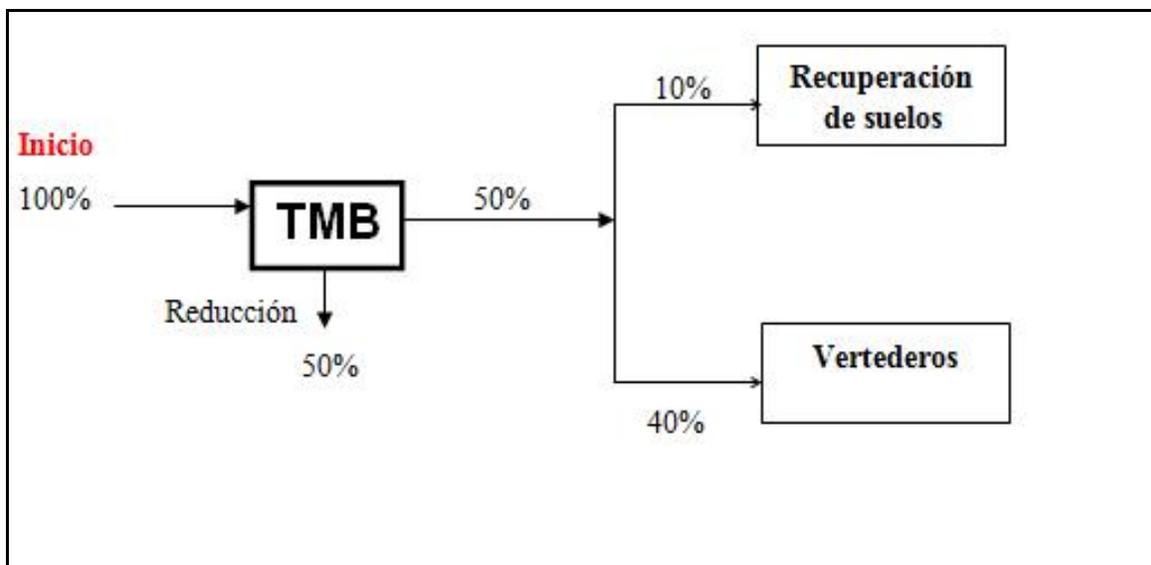
4.4 Análisis de costos de la Gestión de los residuos sólidos Urbanos

En la figura 10, se presenta el esquema de lo que sucede con los residuos sólidos mediante el TMB, desde su inicio hasta su disposición final, representando las etapas a través de porcentajes, para luego poder realizar un análisis que permite apreciar la disminución de costos en la disposición final de los RSU, tema importante a la hora de evaluar que tan conveniente es aplicar esta tecnología.

El esquema (figura 9), se resume así:

- Los costos de transporte a vertedero, disminuyen en un 60%.
- Los costos de disposición final de los residuos, disminuyen en un 60%.
- Aumento de la vida útil de los vertederos en un 60%.
- Disminución generación de lixiviados.
- Disminución Pasivos ambientales.
- Utilización y valorización de subproductos, en recuperación de suelos 10%.

Figura 10. Esquema inicio y disposición final de los RSU, mediante el TMB



Fuente: Elaboración propia.

CAPITULO V: CONCLUSIONES

Se puede concluir que se cumple el principal objetivo de esta tesis, se comprueba que el tamaño de la partícula si tiene incidencia en la biodegradación de RSU en el TMB, esto se demuestra al momento de comparar los niveles de biodegradación obtenidos en cada pila, donde en la pila 1 fue de 29,56% y en la pila 2 de 21,5, obteniéndose un mayor nivel de biodegradación en la pila 1.

En cuanto a la temperaturas internas de las pilas se concluye, que la pila 1 al inicio del proceso presentó mayor actividad microbiológica esto se ve reflejado en las altas temperaturas registradas, finalmente la cual también permite un mayor porcentaje de biodegradación, en cuanto a la temperatura ambiental se puede concluir que siempre los cambios que presentaba afectaba directamente la temperatura interna de las pilas, mostrando siempre la misma tendencia.

La pila 1 (partícula menor tamaño) presenta una mayor disminución de humedad al finalizar el proceso, debido a su alto nivel de biodegradación.

La pérdida de masa en la pila 1 fue mayor que en la pila 2, esto se relaciona con el nivel de biodegradación dentro de la pila 1 y lo que finalmente se debe al tamaño de la partícula al momento de triturar los RSU.

La constante de reducción (desaparición) de la materia orgánica fue mayor en la pila 1 con un valor de 0,065 días⁻¹ y en el caso de la pila 2 un valor es de 0,05 días⁻¹.

El análisis de costos realizado permite concluir que además de las ventajas ambientales que trae la implementación del TMB, también entrega beneficios económicos, como son el aumento en la vida útil de los vertederos en un 60%, lo cual reduce todos los costos asociados a la disposición final, como es el transporte de los RSU.

Bibliografía

- GUTIERREZ Ceballos, Pía “*Evaluación de la biodegradación de los residuos sólidos urbanos, mediante el tratamiento mecánico biológico bajo la temporada de primavera*”. Proyecto de título (Ingeniería civil). Concepción, Chile. Universidad del BíoBío, Depto de ingeniería civil, 2011.
- ROCHA lagos, Marianela “*Evaluación de la biodegradación de los residuos sólidos urbanos en un tratamiento mecánico biológico*”. Proyecto de título (Ingeniería civil). Concepción, Chile. Universidad del BíoBío, Depto de Ingeniería civil, 2010.
- RIQUELME Muñoz, Manuel G. “*Optimización de la aireación pasiva en pilas de compostaje de biosólidos*”. Proyecto de título (Ingeniería civil). Concepción, Chile. Universidad del BíoBío, Depto de Ingeniería civil, 2009.
- AHUMADA Mercado, Carlos. “*Evaluación de los efectos de la pluviometría en las pilas de compostaje*”. Proyecto de título (Ingeniería civil). Concepción, Chile. Universidad del Bío Bío, Depto de Ingeniería civil, 2005.
- LABBÉ Carrasco, Pedro. “*Acondicionamiento de Residuos Sólidos Mediante Compostaje*”. Proyecto de título (Ingeniería civil). Concepción, Chile. Universidad del Bío Bío, Depto de Ingeniería civil, 2003.
- Aguilera, K; Muñoz, B; Aubad A; Yañez, B; De la Cruz, S. “*Primera experiencia Chilena de tratamiento mecánico biológico para la gestión de integral de residuos sólidos urbanos*”, Área de proyectos GPR, Gestión de proyectos regionales, 2009.
- CONAMA. *Política ambiental de la Region del Biobio*.
- CISTERNA, Pedro. “*Tratamiento de Residuos sólidos*”.

Apunte clases de electivo, 2013.

- Toro, Rocio. *Manejo de residuos Sólidos en Chile.*(En línea). Acceso 20 de Agosto de 2013.
- SIN AUTOR. Manejo de residuos sólidos en Chile.
<http://www.slideshare.net/enriquebio2/manejo-de-residuos-slidos-en-chile/18>
Acceso 25 de agosto de 2013.
- Alcolea M, González C. "Manual de Compostaje doméstico", Barcelona, España, 2000.
- SIN AUTOR. "Reciclaje, La costumbre de reutilizar lo que botamos",
<http://www.conama.cl/portal/1301/propertyvalue-13316.html>. Acceso 23 de Agosto de 2013.
- Conama RM, "Basura a nivel nacional. Política Nacional para la gestión Integral de los Residuos Sólidos Domiciliarios". <http://www.conama.cl/portal/1301/article-34859.html>, Octubre de 2008. Consulta 20 de Agosto de 2013.
- Gescam Consultores Ambientales y la corporación Ambiental del Sur, "Estudio de la Gestión de Residuos Sólidos Domiciliarios de Chimbarongo". Diciembre de 2008.
- Navarro R. "Manual para hacer composta aeróbica (en línea)". <http://www.cestafoe.org/recursos/saneamiento.htm>. Acceso 30 de Septiembre de 2013.
- Melo, C. "*Análisis de viabilidad económica y financiera de una planta de tratamiento de residuos sólidos en el departamento del cauca*", Proyecto de título (Ingeniero Industria Especialista en gestión de Residuos Sólidos), UNIVERSIDAD Bogotá, Colombia Julio de 2013 <file:///C:/Users/DAVID/Downloads/MeloCesar2013.pdf>. Acceso 10 de Septiembre de 2013.

- Política de gestión integral de residuos sólidos, comisión nacional del medio ambiente, gobierno de Chile, 17 de enero de 2005.
- Rodríguez, P. "Gestión y tratamiento de residuos sólidos urbanos", Capítulo 8. Universitaria Girona (España), 2008.
- II Simposio Iberoamericano de Ingeniería de Residuos, Barranquilla, 24 y 25 de septiembre de 2009.
- Córdova Carolina, "Estudio de Factibilidad técnico- económica para instalar una planta de compostaje, utilizando desechos vegetales urbanos". Proyecto de Título (Ingeniero Forestal). Universidad de Chile. Facultad de ciencias forestales, Santiago Chile 2006.
- Borner J, Klopping T. "El desarrollo de la gestión de residuos sólidos en Alemania y posibles enseñanzas para una gestión participativa de residuos sólidos en Santiago de Chile" Alemania, septiembre de 2003.
http://www.medioambienteonline.com/site/root/resources/case_study/2077.html. Consulta 20 de Agosto de 2013.

ANEXOS

ANEXO A. CONTROL DE VARIABLES DEL PROCESO

A continuación se describen los factores monitoreados dentro de la investigación, los equipos y procedimientos utilizados.

A.1 Humedad interna

La cantidad de humedad presente en la pila es un factor importante para la evolución óptima de la biodegradación aeróbica. Por una parte, el agua es necesaria para que los microorganismos puedan efectuar los procesos metabólicos pero, por otra, un contenido elevado de la misma, favorece la formación de celdas anaeróbicas, cuando el agua sobrante no puede ser eliminada de las pilas.

Durante la biodegradación aeróbica, el contenido de agua debe mantenerse en un nivel adecuado para la misma.

A.1.1 Equipos utilizados para determinación de humedad

- Horno de secado con circulación de aire y temperatura (110°C).
- Balanza de precisión (0.01).
- Las Herramientas utilizadas fueron las siguientes: vaso toma de muestras, guantes y mascarilla.

A.1.2 Procedimiento control de humedad

Se toma una muestra de 5 gramos de RSU y se dispone en un crisol limpio, seco y previamente pesado.

Luego se deja el crisol sobre una paila de aluminio, la que se introduce al horno durante 2 horas, a una temperatura de 110°C. Al transcurrir las 2 horas, se retira la muestra del horno dejando enfriar en un desecador; 20 minutos más tarde, se retira la muestra del desecador y se determina el peso del crisol con la muestra seca.

Finalmente al tener los datos, se puede determinar el porcentaje de sequedad y humedad de la muestra, según las ecuaciones (1) y (2).

$$\text{Sequedad(\%)} = \left(\frac{M_c + m_s - M_c}{M_c + m_h - M_c} \right) \times 100 \quad \text{Ec. (1)}$$

Donde:

M_c : Masa crisol

$M_c + m_h$; Masa crisol con muestra húmeda.

$M_c + m_s$: Masa crisol con muestra seca.

Determinación humedad,

$$\text{Humedad(\%)} = 100 - \text{sequedad(\%)} \quad \text{Ec. (2)}$$

A.2 Temperatura

En la biodegradación aeróbica se libera energía en forma de calor y la temperatura asciende paralelamente a la actividad de los microorganismos. A su vez, el rendimiento de los microorganismos durante la degradación depende de la temperatura, alcanzando un máximo en la fase de biodegradación intensiva, de aproximadamente 70 °C.

La medición de la temperatura permite reconocer desviaciones de la evolución óptima y generar acciones para mejorar las condiciones en las que tiene lugar la biodegradación aeróbica.

A.2.1 Equipo utilizado

- Termómetro digital.

A.2.2 Procedimiento control de temperatura:

La temperatura debe ser medida y registrada diariamente. Se debe monitorear introduciendo el termómetro en la pila en 3 puntos diferentes (extremos y centro de la pila), con lo que se realiza un promedio, para obtener la temperatura media de la pila.

A.3 pH

Durante la experiencia la medición del pH permitió ver la condición del proceso, debido a que cuando éste cambia de condición aeróbica a la anaeróbica, se representa con una caída de hasta aproximadamente 4,5.

A.3.1 Equipos utilizados

- Cuchara (toma de muestra).
- Envase de aluminio (toma de muestra).
- pH metro.
- Embudo cónico.
- Balanza de precisión (0,01).
- Vaso precipitado.
- Papel filtro.
- Matraz Erlenmeyer.
- Soporte universal.

A.3.2 Procedimiento control de pH

Se tomó una muestra representativa de 10 gramos de RSU, depositándola en un vaso precipitado al cual se le añaden 50 ml de agua destilada, se revuelve cuidadosamente, hasta obtener una muestra homogénea, la que se deja reposar durante 15 minutos. Luego, la mezcla se deposita en un embudo cónico, que en su interior contiene papel filtro, cayendo hasta el vaso precipitado que está bajo el embudo.

Para finalizar el proceso, se introduce el papel filtro en la muestra contenida en el vaso precipitado, entregando el valor del pH de la muestra. Luego, se introduce el pH metro, cuidando no tocar las paredes del vaso para no afectar la medición, y se registra nuevamente, el valor del pH.

Los dos datos obtenidos, la mayoría de la veces, eran similares pero durante todo el proyecto, se trabajó con el valor entregado por el pH metro debido a su precisión (0,01).

A.4 Sólidos Volátiles y Sólidos Minerales.

A.4.1 Equipos utilizados

- Horno- mufla eléctrica capaz de mantener una temperatura de 550°C.
- Crisoles de porcelana.
- Desecador.
- Pinzas.
- Balanza de precisión.

A.4.2 Procedimiento utilizado control Sólidos Volátiles y Sólidos Minerales

Para determinar los sólidos volátiles y los sólidos minerales, se utiliza la muestra seca que se obtiene al finalizar el proceso de medición de humedad. Para lo anterior, ésta se calcina en un horno mufla a 550°C durante dos horas, luego se retira, dejando enfriar en un desecador por aproximadamente, 20 minutos.

La pérdida de peso en la calcinación se considera como el contenido de materia orgánica que es capaz de volatilizarse, correspondiendo al porcentaje de Sólidos Volátiles presentes en la muestra. Las cenizas restantes en el crisol, son los Sólidos Minerales.

Determinación del porcentaje de sólidos volátiles y minerales de la muestra, según las ecuaciones (3) y (4).

$$\text{Sólidos Volátiles (\%)} = \left(\frac{M_c + m_s - M_c + m_c}{M_c + m_s - M_c} \right) \times 100 \quad \text{Ec. (3)}$$

$$\text{Sólidos Minerales (\%)} = 100 - \text{Sólidos Volátiles (\%)} \quad \text{Ec. (4)}$$

A.5 Frecuencia en la medición de los Parámetros

Durante la investigación, la frecuencia de los parámetros se resume en la tabla A.5.

Tabla A.5: Frecuencia de Monitoreo variables.

Parámetro	Medición
Humedad	Diariamente
Temperatura	Diariamente
Ph	Cada dos días
Sólidos volátiles y Sólidos minerales	Cada dos días

Fuente: Elaboración propia.

ANEXO B. REGISTRO CONTROL DE VARIABLES.

. Tabla B.1 Registro Temperaturas Pila 1

Día Nº	Fecha	T1 (°C)	T2 (°C)	T3 (°C)	Temperatura Ambiental (°C)	Temperatura promedio (°C)
0	Ma 01 oct	18,2	25,3	15,6	14,1	19,7
1	Mi 02 oct	18,5	25,5	17,2	16,3	20,4
2	Ju 03 oct	16,7	22,8	14	19,6	17,8
3	Vi 04 oct	20,5	32	24	21,3	25,5
4	Lun 07 oct	19,8	18,4	18	19	18,7
5	Ma 08 oct	14,6	14,1	17,1	15,5	15,3
6	Mi 09 oct	14,6	14,5	17,1	15	15,4
7	Ju 10 oct	13,9	12,3	12,6	19,7	12,9
8	Vi 11 oct	15,2	14,8	14,7	16,1	14,9
9	Lun 14 oct	14,2	16	14,6	19	14,9
10	Ma 15 oct	15	17,3	16	22	16,1
14	lun 21 oct	14,5	12,1	12	15,0	12,9
15	Ma 22 oct	11,0	14,0	11,2	14,3	12,1
16	Mi 23 oct	13,0	14,4	13,8	16,8	13,7
17	Ju 24 oct	11,4	14,9	11,2	22,4	12,5
18	Vi 25 oct	14,8	15,1	16,4	16	15,4
19	Lun 28 oct	16,1	17	17	16,4	16,7
20	Ma 29 oct	14,2	13,6	15,8	18,3	14,5
21	Mi 30 oct	13,2	14	14,1	14,5	13,8
24	lun 04 nov	16	17,6	15,6	23,5	16,4
26	Mi 06 nov	14,3	15,2	14,7	15,5	14,7
27	Ju 07 nov	16,8	17	16,5	19,3	16,8
28	Vi 08 nov	15,3	16,1	15,1	17,7	15,5
29	lun 11 nov	16,0	18,4	16,4	17,5	16,9
30	Ma 12 nov	18	21	18,8	22,3	19,3
31	Mi 13 nov	16,4	19,6	17,3	19,9	17,8
32	Ju 14 nov	15,2	16,2	15,3	17,4	15,6
33	Vi 15 Nov	13,7	14,9	15,0	22,9	14,5
34	Lu 18 Nov	19,7	21,4	22	27,6	21,0
36	Mi 20 nov	18,1	18,3	17	21,5	17,8
38	Vi 22 Nov	18,7	21	17,5	22,6	19,1
39	Lu 25 Nov	15,4	19,1	16,3	19,8	16,9
41	Mi 27 Nov	17,8	19,4	16,7	22,5	18,0
44	Lu 02 Dic	12,2	14,1	13,1	21	13,1
46	Mi 04 Dic	18,4	19	19,3	23,0	18,9
47	Ju 05 Dic	14,1	14,3	15	18	14,5
48	Vi 06 Dic	19,5	20,8	21	19	20,4

Fuente: Elaboración propia

Tabla B.2 Registro de % Humedad Pila 1.

Día Nº	Peso crisol (grs)	Peso crisol +muestra húmeda (grs)	Peso crisol +muestra seca (grs)	Sequedad %	Humedad %	Temperatura promedio (°C)
1	29,06	34,05	30,25	23,85	76,15	20,4
2	26,94	31,95	28,28	26,75	73,25	18,4
3	29,06	34,06	30,69	32,60	67,40	30,7
4	26,93	31,96	28,8	37,18	62,82	23,5
5	26,93	32,04	28,91	38,75	61,25	21,6
6	26,93	31,99	28,87	38,34	61,66	19,1
7	26,93	31,96	28,71	35,39	64,61	18,0
8	29,06	34,05	31,2	42,89	57,11	16,3
9	29,06	34,16	30,76	33,33	66,67	16,7
10	26,93	31,94	28,92	39,72	60,28	17,9
14	26,93	31,96	28,8	37,18	62,82	12,9
15	29,06	34,1	30,65	31,55	68,45	12,1
16	29,06	34,04	31,5	49,00	51,00	13,7
17	26,93	31,95	28,91	39,44	60,56	12,5
18	26,93	31,94	28,66	34,53	65,47	15,4
19	26,93	31,92	28,78	37,07	62,93	16,7
20	26,93	31,93	28,8	35,78	64,22	14,5
21	29,06	34,07	30,80	34,73	65,27	13,8
24	29,06	34,06	30,82	35,20	64,80	16,4
25	29,06	34,06	30,91	37,00	63,00	16,0
26	29,06	34,05	30,8	34,87	65,13	14,7
27	29,06	34,06	30,82	35,20	64,80	16,8
28	29,06	34,06	30,87	36,20	63,80	15,5
29	29,06	34,05	30,86	36,07	63,93	16,9
30	29,06	34,07	31,1	40,72	59,28	19,3
31	29,06	34,03	30,97	39,50	60,50	17,8
32	29,06	34,06	31	38,80	61,20	15,6
33	29,06	34,08	31,3	44,62	55,38	14,5
34	29,06	34,04	31,45	47,99	52,01	28,8
36	29,06	34,05	31,74	53,71	46,29	19,8
38	29,06	34,06	31,65	51,80	48,20	26,3
39	26,93	31,92	29,65	54,51	45,49	22,9
41	26,93	31,93	29,76	56,60	43,40	24,0
44	26,93	31,93	29,83	58,00	42,00	26,0
46	26,94	31,94	29,95	60,20	39,80	26,5
48	29,05	34,05	32,29	64,80	35,20	28,9

Fuente: Elaboración propia.

Tabla B.3. Registro pH, % SSV y % SSM Pila 1.

Día N°	pH	Peso crisol	Peso crisol +muestra seca	Peso crisol +cenizas	SSV	SSM
		(grs)	(grs)	(grs)	%	%
1	4,4	29,06	30,25	29,16	91,60	8,40
3	6,23	29,06	28,28	28,98	89,74	10,26
4	7,54	26,93	30,69	27,35	88,83	11,17
6	7,18	26,93	28,8	27,19	86,10	13,90
8	6,98	29,06	31,2	29,39	84,58	15,42
9	7,18	29,06	30,76	29,36	82,35	17,65
14	7,32	26,93	28,8	27,31	79,68	20,32
16	8,1	29,06	31,5	29,58	78,69	21,31
18	7,54	26,93	28,66	27,32	77,46	22,54
19	7,15	26,93	28,78	27,4	74,59	25,41
21	7,2	29,06	30,8	29,52	73,56	26,44
24	7,21	29,06	30,82	29,54	72,73	27,27
26	7,53	29,06	30,80	29,55	71,84	28,16
28	7,44	29,06	30,87	29,55	72,93	27,07
31	6,92	29,06	30,97	29,61	71,20	28,80
33	7,82	29,06	31,3	29,71	70,98	29,02
34	6,92	29,06	31,45	29,76	70,71	29,29
36	7,2	29,06	31,74	29,84	70,90	29,10
38	7,35	29,06	31,65	29,87	68,73	31,27
39	7,34	26,93	29,65	27,81	67,65	32,35
41	7,4	26,94	29,76	27,85	67,73	32,27
44	7,3	26,93	29,83	27,87	67,59	32,41
46	7,44	26,94	29,95	27,92	67,44	32,56
48	7,31	29,5	32,29	30,49	64,52	35,48

Fuente: Elaboración propia.

Tabla B.4 Constante de Reacción (Kd) Pila 1.

Día N°	%SV	%SM	%SV rest	%SV no bio	%SV bio	$LN((SV_t - SV_{nb}) / (S_{Vo} - SV_{nb}))$
1	91,60	8,40	91,60	64,52	27,08	0,000
3	89,47	10,53	89,47	64,52	24,95	0,082
4	88,83	11,17	88,83	64,52	24,31	0,108
6	86,10	13,90	86,10	64,52	21,58	0,227
8	84,58	15,42	84,58	64,52	20,06	0,300
9	82,35	17,65	82,35	64,52	17,83	0,418
14	79,68	20,32	79,68	64,52	15,16	0,580
16	78,69	21,31	78,69	64,52	14,17	0,648
18	77,46	22,54	77,46	64,52	12,94	0,739
19	74,59	25,41	74,59	64,52	10,07	0,989
21	73,56	26,44	73,56	64,52	9,04	1,097
24	72,73	27,27	72,73	64,52	8,21	1,194
26	71,84	28,16	71,84	64,52	7,32	1,308
28	72,93	27,07	72,93	64,52	8,41	1,170
31	71,20	28,80	71,20	64,52	6,68	1,399
33	70,98	29,02	70,98	64,52	6,46	1,433
34	70,71	29,29	70,71	64,52	6,19	1,476
36	70,90	29,10	70,90	64,52	6,38	1,446
38	68,73	31,27	68,73	64,52	4,21	1,862
39	67,65	32,35	67,65	64,52	3,13	2,159
41	67,73	32,27	67,73	64,52	3,21	2,132
44	67,59	32,41	67,59	64,52	3,07	2,178
46	67,44	32,56	67,44	64,52	2,92	2,227
48	64,52	35,48	64,52	64,52	0,00	

Fuente: Elaboración propia.

Tabla B.5. Registro de Temperaturas Pila 2

Día N°	Fecha	T1 °C	T2 °C	T3 °C	Temperatura Abiental (°C)	Temperatura promedio (°C)
0	Ma 01 Oct	16,5	23,3	15,4	14,1	18,4
1	Mi 02 Oct	18,4	21,2	20,8	16,3	20,1
2	Ju 03 Sept	16,3	20,1	18,5	19,6	18,3
3	Vi 04 Sept	26,7	33,3	23,2	21,3	27,7
4	Lu 07 Oct	23,7	25,5	21,3	19,0	23,5
5	Ma 08 Oct	20,0	19,4	17,3	15,5	18,9
6	Mi 09 Oct	15,0	17,8	14,9	15,0	15,9
7	Ju 10 Oct	17,0	16,0	23,1	19,7	18,7
8	Vi 11 Oct	16,0	17,1	15,2	16,1	16,1
9	Lu 14 Oct	15,0	18,2	14,4	19,0	15,9
10	Ma 15 Oct	17,3	18,7	16,2	22,0	17,4
14	Lu 21 Oct	14,2	14,8	12,3	15,0	13,8
15	Ma 22 Oct	12,7	13,3	10,8	14,3	12,3
16	Mi 23 Oct	14,4	15,6	16	16,8	15,3
17	Ju 24 Oct	12,0	12,6	11,8	22,4	12,1
18	Vi 25 Oct	15,8	15,8	14,7	16,0	15,4
19	Lu 28 Oct	16,4	16,5	15,0	16,4	16,0
20	Ma 29 Oct	14,2	14,3	13,7	18,3	14,1
21	Mi 30 Oct	13,9	14,4	14,1	14,5	14,1
24	Lu 04 Nov	16,1	18,0	16,2	23,5	16,8
26	Mi 06 Nov	14,7	15,8	15,7	15,5	15,4
27	Ju 07 Nov	17,4	19,0	16,9	19,3	17,8
28	Vi 08 Nov	13,6	16,3	15,3	17,7	15,1
29	Lu 11 Nov	17,0	19,1	17,3	17,5	17,8
30	Ma 12 Nov	20,5	22,3	19,7	22,3	20,8
31	Mi 13 Nov	18,7	20,2	18,9	19,9	19,3
32	Ju 14 Nov	16,9	18,0	17,7	17,4	17,5
33	Vi 15 Nov	15,1	17,0	15,2	22,9	15,8
34	Lu 18 Nov	34,5	35,8	32,9	27,6	34,4
36	Mi 20 Nov	22,5	23,0	22,8	21,5	22,8
38	Vi 22 Nov	27,7	30,3	28,2	22,6	28,7
39	Lu 25 Nov	17,3	28,2	26,2	19,8	23,9
41	Mi 27 Nov	25,2	28,3	27,9	22,5	27,1
44	Lu 02 Dic	21,3	28,3	27,1	21,0	25,6
46	Mi 04 Dic	28,3	30,1	29,2	23,0	29,2
48	Vi 06 Dic	30,3	31,5	30,7	19,0	30,8

Fuente: Elaboración propia.

Tabla B.6 Registro % de Humedad Pila 2.

Día N°	Peso crisol (grs)	Peso crisol +muestra húmeda (grs)	Peso crisol +muestra seca (grs)	Sequedad %	Humedad %	Temperatura promedio (°C)
1	20,00	25,03	21,62	32,21	67,79	18,4
2	19,99	25,1	22,64	51,86	48,14	20,1
3	19,97	24,87	21,24	25,92	74,08	18,3
4	19,98	25,02	21,77	35,52	64,48	27,7
5	19,97	25,05	21,49	29,92	70,08	23,5
6	21,24	26,23	22,79	31,06	68,94	18,9
7	21,25	26,27	22,42	23,31	76,69	15,9
8	19,98	25,00	22,28	45,82	54,18	18,7
9	19,99	24,99	20,99	20,00	80,00	16,1
10	24,84	29,83	26,76	38,48	61,52	15,9
14	21,24	26,25	22,77	30,54	69,46	17,4
15	20,83	25,86	23,37	50,50	49,50	13,8
16	21,24	26,23	23,77	50,70	49,30	12,3
17	21,24	26,29	21,82	11,49	88,51	15,3
18	20,83	25,87	22,50	33,13	66,87	12,1
19	20,80	25,81	22,03	24,55	75,45	15,4
20	20,79	25,78	22,43	32,86	67,14	16,0
21	20,82	25,82	22,34	30,40	69,60	14,1
24	21,23	26,24	23,16	38,52	61,48	14,1
25	26,94	31,95	28,89	38,92	61,08	16,8
26	20,79	25,83	23,28	49,40	50,60	15,4
27	20,84	25,83	23,23	47,90	52,10	17,8
28	20,79	25,77	22,87	41,77	58,23	15,1
29	21,25	26,25	23,37	42,40	57,60	17,8
30	21,25	26,28	23,46	43,94	56,06	20,8
31	21,25	26,24	23,58	46,69	53,31	19,3
32	24,84	29,84	27,55	54,20	45,80	17,5
33	20,79	25,82	23,10	45,92	54,08	15,8
34	20,79	25,77	22,84	41,16	58,84	34,4
36	20,79	25,76	22,94	43,26	56,74	22,8
38	21,24	26,25	23,63	47,70	52,30	28,7
39	20,79	25,73	23,47	54,25	45,75	23,9
41	24,84	29,87	27,97	62,23	37,77	27,1
44	24,84	29,82	27,93	62,05	37,95	25,6
46	24,84	29,83	27,94	62,12	37,88	29,2
48	24,84	29,86	28,03	63,55	36,45	30,8

Fuente: Elaboración propia.

Tabla B7. Registro Ph, %SSM y %SSV Pila 2.

Día N°	pH	Peso crisol	Peso crisol +muestra seca	Peso crisol +cenizas	SSV	SSM
		(grs)	(grs)	(grs)	%	%
1	6,23	20,92	22,62	21,10	89,41	10,59
3	5,74	20,86	22,12	20,94	93,65	6,35
4	6,03	20,78	22,30	20,91	91,45	8,55
6	5,77	21,25	22,42	21,37	89,74	10,26
8	6,12	19,99	20,99	20,10	89,00	11,00
9	7,76	24,84	26,76	25,12	85,42	14,58
14	7,93	20,83	23,37	21,22	84,65	15,35
16	7,33	21,24	21,82	21,34	82,76	17,24
18	7,61	20,8	22,03	21,02	82,11	17,89
19	6,21	20,79	22,43	21,09	81,71	18,29
21	7,05	21,23	23,16	21,61	80,31	19,69
24	6,81	26,94	28,89	27,33	80,00	20,00
26	8,05	20,79	23,28	21,34	77,91	22,09
28	6,77	20,79	22,87	21,29	75,96	24,04
31	7,20	21,25	23,58	21,85	74,25	25,75
33	8,17	20,79	23,10	21,37	74,89	25,11
34	8,08	20,79	22,84	21,32	74,15	25,85
36	8,13	20,79	22,94	21,35	73,95	26,05
38	8,75	21,24	23,63	21,87	73,64	26,36
39	7,94	20,79	23,47	21,54	72,01	27,99
41	7,83	24,84	27,97	25,69	72,84	27,16
44	7,64	24,84	27,93	25,72	71,52	28,48
46	7,57	24,84	27,94	25,74	70,97	29,03
48	7,33	24,84	28,03	25,79	70,22	29,78

Fuente: Elaboración propia.

Tabla B.8 Constante de Reacción (kd) Pila 2.

Día N°	%SV	%SM	%SV rest	%SV no bio	%SV bio	$LN((SV_t - SV_{nb}) / (SV_0 - SV_{nb}))$
1	89,41	10,59	89,41	70,22	19,19	0,000
3	93,65	6,35	93,65	70,22	23,43	-0,200
4	91,45	8,55	91,45	70,22	21,23	-0,101
6	89,74	10,26	89,74	70,22	19,52	-0,017
8	89,00	11,00	89,00	70,22	18,78	0,022
9	85,42	14,58	85,42	70,22	15,20	0,233
14	84,65	15,35	84,65	70,22	14,43	0,285
16	82,76	17,24	82,76	70,22	12,54	0,426
18	82,11	17,89	82,11	70,22	11,89	0,478
19	81,71	18,29	81,71	70,22	11,49	0,513
21	80,31	19,69	80,31	70,22	10,09	0,643
24	80,00	20,00	80,00	70,22	9,78	0,674
26	77,91	22,09	77,91	70,22	7,69	0,914
28	75,96	24,04	75,96	70,22	5,74	1,207
31	74,25	25,75	74,25	70,22	4,03	1,561
33	74,89	25,11	74,89	70,22	4,67	1,413
34	74,15	25,85	74,15	70,22	3,93	1,587
36	73,95	26,05	73,95	70,22	3,73	1,637
38	73,64	26,36	73,64	70,22	3,42	1,725
39	72,01	27,99	72,01	70,22	1,80	2,369
41	72,84	27,16	72,84	70,22	2,62	1,990
44	71,52	28,48	71,52	70,22	1,30	2,691
46	70,97	29,03	70,97	70,22	0,75	3,244
48	70,22	29,78	70,22	70,22	0,00	

Fuente: Elaboración propia.