



Estado Plurinacional de Bolivia

Ministerio de Medio Ambiente y Agua
Viceministerio de Agua Potable y Saneamiento Básico



Guía para el Aprovechamiento de Residuos Sólidos Orgánicos Mediante Compostaje y Lombricultura



DIRECCIÓN GENERAL DE GESTIÓN INTEGRAL DE
RESIDUOS SÓLIDOS



GUÍA PARA EL APROVECHAMIENTO DE RESIDUOS SÓLIDOS ORGÁNICOS

MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE Y AGUA

AUTORIDADES

Lic. José Antonio Zamora Gutiérrez
Ministro de Medio Ambiente y Aguas

Ing. Rubén Méndez Estrada
Viceministro de Agua Potable y Saneamiento Básico

Ing. Vladimir Onny Gutierrez Ledezma
Director General de Gestión Integral de Residuos Sólidos

EQUIPO DE TRABAJO

Coordinación

Lic. Elisenda Realp Campalans – Agencia de Residuos de Cataluña (ARC)

Elaboración y Redacción

Ing. Vladimir Onny Gutierrez Ledezma – VAPSB/DGGIRS
Lic. Elisenda Realp Campalans - ARC

Diagramación y Maquetación

Ing. Roger Roberto Zeballos Valda VAPSB/DGGIRS

Revisión

Ing. Fernando Peñaranda Rodríguez VAPSB/DGGIRS
Ing. Gladys Limachi Mamani VAPSB/DGGIRS
Ing. Roger Roberto Zeballos Valda VAPSB/DGGIRS

Agradecimientos

Ing. Albert García Ruiz, ARC
Ing. Glòria Batlló Fígols ARC
Ing. Pau Guzman Gallegos ARC
Ing. Francesc Giró Fontanals ARC
Ing. Josep Saña TGA, S.L. (Tècniques de Gestió Ambiental, S.L.)

APOYO TÉCNICO Y FINANCIERO:

Agencia Catalana de Cooperación al Desarrollo (ACCD)
Agencia de Residuos de Catalunya (ARC)

Versión Preliminar

Ing. Nixon Vega S.

Esta publicación debe ser citada como:

MMAyA/VAPSB/DGGIRS/Guía para el Aprovechamiento de Residuos Sólidos Orgánicos, mediante Compostaje y Lombricultura, 2012

Primera Edición: 150 ejemplares

MMAyA/VAPSB/DGGIRS
Calle Capitán Castrillo N° 434
Teléfonos: (591-2) 2-116583 – 2-115571
Fax: 2-116124
E-mail: dggirsvapsb@gmail.com
Bolivia
2013

PRESENTACIÓN

El constante incremento en la generación de residuos sólidos, su amplia composición y la falta de mecanismos adecuados para la gestión controlada de los mismos, está afectando los recursos agua, suelo y aire y en consecuencia un daño al medio ambiente y afectación a la salud de la población. De acuerdo a los datos del Diagnóstico de Gestión de Residuos en Bolivia (MMAyA/2012), se calcula que diariamente se generan 4780 Ton/día de los cuales aproximadamente el 55% corresponde a la fracción orgánica. Una gestión inadecuada de este tipo de residuos ocupa mayor espacio en los sitios de disposición final de residuos, genera una mayor cantidad de lixiviados y al estar mezclados con otro tipo de residuos, como por ejemplo peligrosos, aumenta la carga contaminante.

La fracción orgánica por sus características de biodegradabilidad, pueden ser reinsertados a ciclo productivo natural a través de proyectos de aprovechamiento. El compostaje es una opción que permite a los municipios lograr este propósito, para ello se requiere una participación permanente y corresponsable por parte de las autoridades locales, la población y las instituciones. En ese marco, el Programa Plurinacional para la Gestión Integral de Residuos Sólidos del Ministerio de Medio Ambiente y Agua, establece el desarrollo de los diferentes componentes de la Gestión Integral de Residuos Sólidos, entre ellos el Aprovechamiento de Residuos Sólidos.

En un marco de protección de los Derechos de la Madre Tierra, el “Vivir Bien”, involucra los valores como el “ñandereko” (vida armoniosa), “tekokavi” (vida buena), “ivimaraei” (tierra sin mal), esto implica en consecuencia modificar prácticas de producción, comercio y consumo que se califiquen como contrarias a la preservación de la salud y medio ambiente. La práctica del compostaje permite aprovechar los recursos de la naturaleza nos proporciona con los cuales se puede producir abonos orgánicos, mejorar y restaurar los suelos, nos permite mejorar y cuidar la seguridad alimentaria.

En ese sentido, el Ministerio de Medio Ambiente y Agua, el Viceministerio de Agua Potable y Servicios Básicos, a través de la Dirección General de Gestión Integral de Residuos Sólidos, ha formulado la presente **“Guía de Aprovechamiento de residuos sólidos orgánicos, mediante compostaje y lombricultura”**, que proporciona métodos y criterios técnicos que podrán ser utilizados por los diferentes actores relacionados con el manejo de residuos sólidos como insumos para formular proyectos de aprovechamiento de residuos orgánicos, para el diseño de las infraestructuras necesarias en el ámbito municipal, así como para poder realizar el aprovechamiento de residuos orgánicos en las propias casas o de forma comunitaria.

Por su relevancia y simplicidad, la guía se orienta al compostaje y la lombricultura como técnicas que permiten la obtención de compost y humus de lombriz, abonos orgánicos de gran valor fertilizante.

Se espera que este instrumento sea de utilidad para los diferentes actores involucrados en el manejo de residuos sólidos.

Lic. José Antonio Zamora Gutiérrez
Ministro de Medio Ambiente y Agua

CONTENIDO

1.	GENERALIDADES	2
1.1	Introducción	2
1.2	Marco Conceptual.....	2
1.2.1	Residuos Sólidos	4
1.2.2	Residuos Sólidos Municipales	4
1.2.3	Residuos Sólidos Orgánicos.....	5
1.2.4	Gestión Integral de Residuos Sólidos.....	5
1.3	Principios de la Gestión Integral de Residuos Sólidos.....	6
1.3.1	Instauración de los valores colectivos del Estado	6
1.3.2	Jerarquización de la Gestión Integral de Residuos Sólidos.....	6
1.3.3	Preservación Ambiental.....	6
1.3.4	Participación y Control Social	7
1.4	Efectos de los residuos sólidos orgánicos en rellenos sanitarios y botaderos.....	7
1.5	Beneficios del aprovechamiento de los residuos sólidos orgánicos.....	7
1.6	Compostaje y Lombricultura	8
1.7	El ciclo de la Materia Orgánica.....	9
2.	APROVECHAMIENTO DE RESIDUOS SÓLIDOS ORGÁNICOS	12
2.1	Gestión Municipal de Aprovechamiento de Residuos Sólidos Orgánicos.....	12
2.1.1	Fuentes de generación de residuos sólidos	13
2.1.2	Selección en origen diferenciada de residuos sólidos orgánicos.....	13
2.1.2.1	Selección en origen en los domicilios	14
2.1.2.2	Selección en origen en grandes generadores	15
2.1.2.3	Selección en origen en unidades educativas.....	16
2.1.2.4	Selección en origen en instituciones públicas o privadas	16
2.1.3	Recolección diferenciada y transporte de residuos orgánicos.....	16
2.1.4	Tratamiento de los Residuos Orgánicos.....	18
2.1.5	Reutilización	19
2.1.6	Distribución y Utilización del producto final.....	19
2.1.7	Educación y participación ciudadana	20
2.1.8	Planificación	22
2.1.9	Desarrollo y crecimiento	22
3.	EL COMPOSTAJE.....	24
3.1	El Compostaje.....	24
3.2	Beneficios del uso del compost.....	24
3.3	Factores que influyen en el proceso de compostaje.....	25
3.3.1	Relación Carbono/Nitrógeno (C/N).....	26
3.3.2	Balance de Nutrientes	27
3.3.3	El Oxígeno.....	27
3.3.4	Humedad	28
3.3.5	Temperatura	29
3.3.6	PH (Potencial de Hidrógeno).....	29
3.3.7	Estructura y Homogenización de los Residuos Sólidos.....	30
3.3.8	Condiciones climáticas	31
3.4	Proceso biológico del Compostaje.....	31
3.4.1	Fases del proceso de compostaje	32
3.4.1.1	La fase de descomposición	32
3.4.1.2	Fase de maduración	33
4.	COMPOSTAJE DOMICILIARIO Y/O COMUNITARIO.....	36
4.1	Por qué hacer compostaje domiciliario y/o comunitario	36
4.2	Tipos de residuos apropiados para el compostaje domiciliario y/o comunitario.....	37
4.3	Residuos que no deben ser compostados.....	38
4.4	Compostador domiciliario	39
4.4.1	Herramientas necesarias.....	41
4.4.2	Proceso de compostaje domiciliario	41
4.4.3	Control de parámetros	43
4.4.4	Maduración y cosecha del compost.....	43

4.4.5	Activadores	45
4.4.6	Solución de problemas	45
4.4.7	Usos del compost	46
4.4.8	Compostaje Comunitario	47
5.	PLANTAS DE COMPOSTAJE	50
5.1	Métodos de Compostaje	50
5.1.1	Sistemas Abiertos	51
5.1.1.1	Compostaje en pilas con aireación por volteo	51
5.1.1.2	Compostaje en pilas o silos estáticos con aireación por ventilación forzada	52
5.1.2	Sistemas Cerrados	55
5.1.2.1	Reactores verticales	55
5.1.2.2	Reactores horizontales	55
6.	OPERACIONES EN UNA PLANTA DE COMPOSTAJE	59
6.1	Factibilidad para la construcción de una planta de compostaje	59
6.1.1	Participación ciudadana	59
6.1.2	Disponibilidad de materia prima seleccionada	59
6.1.3	Opciones para el Uso de Compost	59
6.1.4	Financiamiento del proyecto	60
6.1.5	Capacidad Institucional	60
6.1.6	Disponibilidad de sitio para la construcción de la planta de compostaje	60
6.2	Operaciones en una planta de compostaje	61
6.2.1	Recepción y descarga de los residuos	62
6.2.2	Separación de residuos impropios	62
6.2.3	Trituración del material estructurante	63
6.2.4	Mezcla u homogenización de los materiales a compostar	63
6.2.5	Descomposición o Degradación aerobia de los residuos	65
6.2.6	Control del Proceso	65
6.2.7	Maduración del compost	65
6.2.8	Parámetros de madurez del compost	66
6.2.9	Cribado y clasificación del compost	66
6.2.10	Empacado y Almacenamiento	67
6.2.11	Calidad de Compost	67
6.2.12	Gestión de aguas y lixiviados	68
6.2.13	Tratamiento de gases y eliminación de polvo	68
6.3	Tipos de plantas para compostaje, sistemas abiertos	68
6.3.1	Planta de compostaje manual	69
6.3.1.1	Infraestructura y obras complementarias en una planta manual de compostaje	74
6.3.2	Planta semi mecanizada para compost	78
6.3.2.1	Infraestructura y obras complementarias en una planta semimecanizada de compostaje	83
6.3.3	Planta Mecanizada de Compost	83
7.	CRITERIOS PARA EL DISEÑO DE UNA PLANTA DE COMPOSTAJE	87
7.1	Generalidades	87
7.1.1	Dimensionamiento	88
7.1.2	Diseño	88
7.1.3	Gestión	89
7.2	Cuantificación de los residuos a compostar	89
7.3	Determinación de la Ubicación de la Planta de Compostaje	91
7.4	Formulación de la Mezcla de los Residuos a Compostar	92
7.4.1	Unidad de Compostaje (Uc)	92
7.4.2	Diseño de la pila o hilera para la Unidad de Compostaje (Uc)	94
7.4.3	El Tiempo de Compostaje (Tc)	96
7.5	Determinación del área requerida para la planta de compostaje	96
7.5.1	Requerimiento de área para el proceso de compostaje	97
7.6	Manejo de Lixiviados	101
7.7	Sistema de aireación forzada	103
7.7.1	Diseño de la plataforma	104
7.7.2	Diseño de la red de aireación	106
7.7.3	Instalación de ventiladores	107
7.8	Infraestructura de la Planta de Compostaje	108

7.8.1	Obras Preliminares	108
7.8.2	Infraestructura Proceso de Compostaje	108
7.8.3	Infraestructura Administrativa y Obras Complementarias.....	109
7.9	Aplicación del Compost.....	111
7.10	Los Nutrientes en el Compost.....	111
8.	LOMBRICULTURA.....	116
8.1	La Lombricultura	116
8.2	Beneficios del humus de lombriz.....	117
8.3	El proceso de lombricultura	118
8.3.1	La lombriz (principal componente del proceso)	118
8.3.2	Condiciones óptimas para las lombrices	118
8.3.3	Procedimiento para la elaboración de humus.....	119
8.4	Principales parámetros de control en el proceso de lombricultura.....	119
8.4.1	Humedad	119
8.4.2	Temperatura	120
8.4.3	PH.....	120
8.4.4	Aireación.....	120
8.5	Cosecha y multiplicación de las camas	120
8.6	Diseño de la planta de lombricultura	121
9.	BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA.....	123
10.	ANEXO 1: TÉCNICA PARA LA FORMULACIÓN DE LA MEZCLA PARA EL COMPOSTAJE	125
11.	ANEXO 2: USOS RECOMENDADOS PARA EL COMPOST.....	128
12.	ANEXO 3: MÉTODOS PARA VALORAR LA MADUREZ DEL COMPOST.130	
1.	Métodos Físicos	130
2.	Métodos Químicos (Análisis en Laboratorio).....	132
3.	Métodos Biológicos.....	136

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1: Composición de los residuos sólidos	3
Figura 1.2: El ciclo de la materia orgánica	3
Figura 1.3: Gestión de residuos sólidos orgánicos en el Municipio de Tiquipaya	4
Figura 1.4: Gestión Integral de Residuos Sólidos	5
Figura 1.5: Jerarquización de la Gestión Integral de Residuos Sólidos	6
Figura 1.6: Compostaje y Lombricultura	8
Figura 1.7: Residuos sólidos orgánicos y compostaje	9
Figura 1.8: El ciclo de la materia orgánica	10
Figura 2.1: Gestión Municipal de Residuos Sólidos Orgánicos	12
Figura 2.2: Gestión de Residuos Sólidos	14
Figura 2.3: Separación en origen de residuos sólidos	15
Figura 2.4: Separación en mercados de residuos sólidos	16
Figura 2.5: Recolección diferenciada y transporte de residuos sólidos	17
Figura 2.6: Digestión anaerobia de residuos orgánicos líquidos. Tecnología de bajo coste	18
Figura 2.7: Usos del compost	20
Figura 2.8: Campañas educativas	21
Figura 3.1: La humedad en el proceso de compostaje y en el producto terminado	28
Figura 3.2: Variación de la temperatura en el proceso de compostaje	29
Figura 3.3: Tendencias evolutivas de las principales variables durante el compostaje	30
Figura 3.4: Proceso de compostaje aeróbico	32
Figura 3.5: Fases del proceso de compostaje	34
Figura 3.6: Cambio del aspecto de los residuos conforme avanza el proceso de compostaje	34
Figura 4.1: Ciclo del Compostaje Domiciliario	36
Figura 4.2: Residuos que pueden ser compostados	38
Figura 4.3: Compostador domiciliario cilíndrico de malla de acero	39
Figura 4.4: Compostador domiciliario de malla gallinera	40
Figura 4.5: Compostador domiciliario de tabillas de madera	40
Figura 5.1: Sistemas de compostaje	50
Figura 5.2: Conformación de Pilas	52
Figura 5.3: Sistemas de aireación forzada	53
Figura 6.1: Proceso general en una planta de compostaje	61
Figura 6.2: Ejemplo de una Planta de Compostaje	62
Figura 6.3: Composición de la mezcla de residuos a compostar	64
Figura 6.4: Tipos de plantas para compostaje	69
Figura 6.5: Operaciones una planta de compostaje manual	70
Figura 6.6: Diagrama de operaciones una planta de compostaje manual	73
Figura 6.7: Obras complementarias en una planta manual de compostaje	74
Figura 6.8: Obras complementarias de Seguridad	75
Figura 6.9: Disponibilidad de espacio para planta manual de compostaje	75
Figura 6.10: Áreas Necesarias para una planta de Compostaje	76
Figura 6.11: Ejemplo de diseño de una planta de compostaje	77
Figura 6.12: Operaciones en una planta de compostaje semimecanizada	78
Figura 6.13: Ejemplo Planta de compostaje mecanizada con infraestructura cerrada	83
Figura 6.14: Ejemplo Planta de compostaje mecanizada con infraestructura abierta	84
Figura 6.15: Ejemplos de maquinaria para planta de compostaje mecanizada	85
Figura 7.1: Criterios de Diseño para una Planta de Compostaje	87
Figura 7.2: Diseño de una planta de compostaje	88
Figura 7.3: Ciclo PHVA	89
Figura 7.4: Conformación de Pilas o Hileras	94
Figura 7.5: Conformación de Pilas o Hileras	94
Figura 7.6: Dimensiones de la Unidad de Compostaje (Uc)	95
Figura 7.7: Forma de Apilado de Pilas de Compost	95
Figura 7.8: Dimensiones de la Pila para Compostaje	96
Figura 7.9: Instalación de drenaje para lixiviados y depósitos	103
Figura 7.10: Otras opciones para almacenamiento de lixiviados	103
Figura 7.11: Sistemas de aireación forzada	104
Figura 7.12: Construcción de la plataforma para conformación de pilas	105
Figura 7.13: Ejemplo de distribución de la plataforma para conformación de pilas	105
Figura 7.14: Ejemplo esquema de la tubería	106
Figura 7.15: Instalación de ventiladores	108
Figura 7.16: Ejemplo de preparación de la mezcla de residuos a compostar	109
Figura 7.17: Cerca típica y cortina arbórea	110
Figura 8.1: Tipos de Lombriarios o Lombricomposteras	116

Figura 8.2: Diseño de un Lecho para lombricultura 121
 Figura 12.1: Test de autocalentamiento Vaso Dewar y variación de temperatura 131

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 2.1: Fuentes de Generación Vs Tipo de Residuo 13
 Cuadro 3.1: Relación Carbono/Nitrógeno de diferentes materiales orgánicos, Base Seca 26
 Cuadro 3.2: Condiciones de parámetros referenciales para el proceso de compostaje 31
 Cuadro 4.1: Principales indicadores que determinan la “madurez” del compost domiciliario 44
 Cuadro 4.2: Solución de problemas comunes en el compostaje domiciliario 45
 Cuadro 4.3: Diferentes usos del compost 46
 Cuadro 5.1: Comparación de sistemas abiertos con los sistemas cerrados 56
 Cuadro 6.1: Operaciones en una planta de compostaje 61
 Cuadro 7.1: Estimación de la cantidad de residuos sólidos orgánicos generados en domicilios 90
 Cuadro 7.2: Estimación de la cantidad de residuos sólidos orgánicos generados en mercados 90
 Cuadro 7.3: Cuantificación de los residuos sólidos orgánicos por fuente de generación 92
 Cuadro 7.4: Resumen del área requerida para compostaje 101
 Cuadro 7.5: Elementos químicos que las plantas necesitan tomar del suelo para vivir 112
 Cuadro 7.6: Contenido promedio en nutrientes (sobre materia total) de varias materias orgánicas y minerales 114
 Cuadro 8.1: Diferencia entre los Métodos de Lombricultura y Compostaje 117
 Cuadro 8.2: Usos del Humus 117
 Cuadro 8.3: Ciclo productivo de la lombriz 118
 Cuadro 8.4: Diferencias en los Parámetros de control para los procesos de lombricultura y compost 120
 Cuadro 10.1: Técnica para la Formulación de Mezcla de Compostaje 125
 Cuadro 11.1: Usos Recomendados para el Compost 128
 Cuadro 12.1: Test autocalentamiento 131
 Cuadro 12.2: Cálculo del índice de madurez Solvita® 135
 Cuadro 12.3: Relación entre el Índice de Madurez Solvita® y las características del compost 135

GLOSARIO DE TÉRMINOS

A.

Abono Orgánico. Es un fertilizante que proviene de animales, restos vegetales de alimentos, restos de cultivos u otra fuente orgánica y natural.

Acopio. Acción de reunir residuos sólidos en un lugar determinado y adecuado para su recolección, transporte, tratamiento o disposición final.

Aerobio. Microorganismo que crece y que vive en presencia de oxígeno.

Ambiente. Conjunto de elementos naturales o inducidos por el hombre que interactúan en un espacio y tiempo determinados.

Anaerobio. Microorganismo que crece y que vive en ausencia completa o casi completa de oxígeno.

Aprovechamiento de residuos sólidos.

Es el conjunto de medidas que tienen por objeto la valorización o la reincorporación al ciclo productivo de los diferentes recursos presentes en los mismos, mediante reutilización, reciclaje, tratamiento biológico o generación de energía

Aseo urbano.

Es el servicio público municipal consistente en almacenamiento, barrido y limpieza, recolección, transporte, transferencia, tratamiento y disposición final de los residuos sólidos municipales.

B.

Basura. Se entiende por basura todo residuo sólido o semisólido —con excepción de excretas de origen humano o animal— que carece de valor para el que la genera o para su inmediato poseedor. Están comprendidos en la misma definición los desechos, cenizas, elementos de barrido de calles, residuos industriales, de hospitales y de mercados, entre otros. Es sinónimo de desechos o residuos sólidos.

Biodegradable. Dicho de la materia orgánica, que puede descomponerse en los elementos químicos que los conforman, debido a la acción de agentes biológicos, como plantas, animales, microorganismos y hongos, bajo condiciones ambientales naturales.

Biogás. Mezcla de gases de bajo peso molecular (metano, bióxido de carbono, etc.), producto de la descomposición anaerobia de la materia orgánica.

Botadero.

Lugar de disposición final de residuos sólidos que no cumple con normas técnicas, ni disposiciones ambientales vigentes o crea riesgos para la salud y seguridad humana o para el ambiente general.

C.

Compactación. Acción de presionar cualquier material para reducir los vacíos existentes en él. El propósito de la compactación en el relleno sanitario es disminuir el volumen que ocuparán los residuos sólidos a fin de lograr una mayor estabilidad y vida útil.

Compost. Producto inocuo y libre de efectos fitotóxicos que resulta del proceso de compostaje constituido por una materia orgánica estabilizada donde no se reconoce origen, puesto que se habrá degradado generando partículas más finas y oscuras. Es un abono orgánico natural que por sus características tiene la capacidad de mejorar la fertilidad del suelo.

Compostaje. Proceso de descomposición bioquímica de los residuos sólidos biodegradables como restos de frutas, verduras, de podas, pasto, hojas, etc., bajo condiciones controladas por la acción de microorganismos (hongos, bacterias, actinomicetos) y de la fauna típica del suelo (gusanos de tierra, cochinillas, etc.) fijando nutrientes y carbono en formas que pueden ser utilizadas directamente como abono orgánico.

D.

Densidad. Masa o cantidad de materia de un determinado residuo sólido municipal contenida en una unidad de volumen.

Diseño. Trazo o delineación de una obra o figura. Se aplica el término al proyecto básico de la obra.

Disposición Final. Acción de depositar permanentemente residuos sólidos en una infraestructura adecuada y autorizada.

Dren. Estructura que sirve para el saneamiento y la eliminación del exceso de humedad en los suelos.

E.

Educación Ambiental. Es la formación del ser humano en actitudes, valores, destrezas y habilidades de comprensión, cuyas acciones deberán estar encaminadas a la protección del medio ambiente para la actual y futura generación, asimismo a asumir la responsabilidad de evitar los daños e impactos negativos que se ocasionan sobre el medio ambiente.

I.

Impacto ambiental. Modificación del ambiente ocasionada por la acción del hombre o de la naturaleza.

G.

Generador. Cualquier persona que como resultado de sus actividades de consumo o producción libera residuos sólidos al ambiente.

Gestión integral de residuos sólidos.

Conjunto de acciones articuladas e integradas con los diferentes actores de la sociedad, para la formulación e implementación de políticas, estrategias y normativa orientadas al desarrollo institucional, la planificación, la sostenibilidad, la gestión operativa y accesibilidad a los servicios de aseo, la participación ciudadana, la investigación y desarrollo tecnológico, así como el control y evaluación permanente, a fin de prevenir, aprovechar, tratar y disponer de forma sanitaria y ambientalmente segura los residuos sólidos.

L.

Lixiviado o percolado. Líquido producido fundamentalmente por la precipitación pluvial que se infiltra a través del material de cobertura y atraviesa las capas de basura, transportando concentraciones apreciables de materia orgánica en descomposición y otros contaminantes. Otros factores que contribuyen a la generación de lixiviado son el contenido de humedad propio de los desechos, el agua de la descomposición y la infiltración de aguas subterráneas.

M.

Manejo de residuos sólidos.

Componente operativo de la gestión integral de residuos sólidos que consiste en la realización de las etapas de acondicionamiento y clasificación, almacenamiento, recolección, transporte, tratamiento y disposición final de residuos sólidos.

Material de cobertura. Capa superficial de tierra en cada celda que tiene como finalidad aislar los residuos del ambiente externo, controlar infiltraciones y la presencia de fauna nociva.

Medida de mitigación. Implementación o aplicación de cualquier política, estrategia, obra o acción, tendiente a eliminar o minimizar los impactos adversos que pueden presentarse durante las diversas etapas de desarrollo de un proyecto.

Monitoreo ambiental. Sistema de seguimiento continuo de la calidad ambiental a través de la observación, medidas y evaluaciones de una o más de las condiciones ambientales con propósitos definidos.

N.

Nivel freático. Profundidad a la que se encuentran las aguas freáticas. Este nivel baja en tiempo de estiaje y sube en etapa de lluvias.

Normas Técnicas.

Son aquellas que se emiten por consenso y son aprobadas por un organismo reconocido en el marco del Sistema Boliviano de Normalización, Metrología, Acreditación y Certificación.

P.

Pendiente. Inclinación que tiene un terreno o cualquier elemento tomando como base la relación entre la longitud horizontal y la vertical.

Permeabilidad. Es la capacidad del suelo para conducir o transportar un fluido cuando se encuentra bajo un gradiente. Varía según la densidad del suelo, el grado de saturación y el tamaño de las partículas.

Precipitación pluvial. Agua atmosférica que cae al suelo en estado líquido o sólido (lluvia, nieve o granizo).

Prevención. Conjunto de disposiciones y medidas anticipadas para evitar el deterioro de un elemento.

R.

Reciclaje. Proceso de valorización que sufre un material o producto para ser reincorporado al ciclo de producción o de consumo que consiste en transformar los residuos en materia prima secundaria para que ésta pueda ser usada en el proceso de fabricación del mismo producto o de otro. Incluye la transformación del material orgánico, pero no el aprovechamiento energético ni la transformación en materiales que se vayan a usar como combustibles o para operaciones de relleno.

Recolección. Operación consistente en recoger los residuos generados y transportarlos a las instalaciones de almacenamiento, transferencia, tratamiento, aprovechamiento y/o a un sitio de disposición final.

Reducción. Conjunto de acciones encaminadas a reutilizar, reparar o compostar los residuos dependiendo su naturaleza en la fuente de generación, de manera que estos no sean entregados al operador del servicio de aseo y por tanto disminuya la cantidad de residuos a disponer en rellenos sanitarios.

Recuperación. Actividad relacionada con la obtención de materiales secundarios, bien sea por separación, desmantelamiento, recolección o cualquier otra forma de selección de los residuos sólidos con el objeto de reciclarlos o volverlos a utilizar.

Relleno sanitario. Obra de ingeniería para la disposición final segura de residuos sólidos en sitios adecuados y bajo condiciones controladas para evitar daños al ambiente y la salud.

Residuos sólidos. Materiales generados en los procesos de extracción, beneficio, transformación, producción, consumo, utilización, control, reparación o tratamiento, cuya calidad no permite usarlos nuevamente en el proceso que los generó y que pueden ser objeto de tratamiento y disposición final.

Residuos sólidos aprovechables. Son todos los residuos susceptibles de ser sometidos a procesos de recuperación, reutilización, reciclaje, tratamiento biológico (compostaje, biodigestión) o de obtención de energía.

Residuos sólidos domiciliarios. Son los generados en los hogares como resultado de actividades domésticas.

Residuos sólidos especiales. Son residuos de características diversas cuyas formas de recolección tratamiento y/o disposición final requieren condiciones particulares para cada tipo de residuo.

Residuos sólidos industriales. Son los residuos sólidos cualquiera sea su estado y grado de peligrosidad, que provienen de cualquier actividad industrial o manufacturera.

Residuos sólidos industriales asimilables a domiciliarios. Son aquellos que si bien son generados en industrias por sus características pueden ser manejados conjuntamente con los residuos domiciliarios.

Residuos sólidos municipales. Son aquellos que se generan en las viviendas, parques jardines, vía pública, oficinas, mercados, comercios, demoliciones, construcciones, instalaciones, establecimientos de servicios y en general todos aquellos generados en actividades municipales que no requieran técnicas especiales para su control, excepto los peligrosos y potencialmente peligrosos de hospitales, clínicas, laboratorios, actividades industriales, artesanales, comerciales y centros de investigación.

Residuos sólidos orgánicos. Comprende los residuos generados principalmente en lugares donde se realicen actividades de cocina, consumo de alimentos, jardinería y poda de plantas, centros de abasto de frutas, verduras u otros productos generados por acción de la naturaleza. Su característica principal es que pueden ser descompuestos por la acción natural de organismos vivos como lombrices, bacterias y hongos principalmente.

Residuos sólidos peligrosos. Son aquellos que conllevan riesgo potencial al ser humano o al ambiente, por poseer cualquiera de las siguientes características: corrosividad, explosividad, inflamabilidad, patogenicidad, bioinfecciosidad, radiactividad, reactividad y toxicidad.

Reutilización. Cualquier operación mediante la cual se vuelve a utilizar el residuo en el estado en que se encuentre.

S.

Suelo: Material o cuerpo natural compuesto por partículas sueltas no consolidadas de diferentes tamaños y de un espesor que varía de unos centímetros a unos cuantos metros, el cual está conformado por fases sólida, líquida y gaseosa, así como por elementos y compuestos de tipo orgánico e inorgánico, con una composición variable en el tiempo y en el espacio.

Sanearamiento. Control de todos los factores del ambiente físico del hombre que ejercen o pueden ejercer un efecto pernicioso en su desarrollo físico, salud y supervivencia.

T.

Tratamiento de residuos sólidos. Conjunto de operaciones encaminadas a la transformación física, química, térmica o biológica de los residuos para el aprovechamiento de los recursos contenidos en ellos o para reducir la peligrosidad de los mismos.

U.

Usuario. Persona natural o jurídica que se beneficia con la prestación de un servicio público, ya sea como propietario del inmueble en donde este se presta o como receptor directo de dicho servicio.

V.

Vectores. Seres vivos que intervienen en la transmisión de enfermedades al llevarlas de un enfermo o de un reservorio a una persona sana.

Vida útil: Es el periodo de tiempo en que el sitio de disposición final será apto para recibir los residuos sólidos urbanos y de manejo especial. El volumen de los residuos y material térreo depositados en este periodo, es igual al volumen de diseño.

Capítulo I: Generalidades

GENERALIDADES

1.1 Introducción

Bolivia, ha asumido un rol importante en las acciones de preservación de la naturaleza frente a las amenazas que se ciernen sobre el planeta y la humanidad, a través del establecimiento de los derechos de la madre tierra, que son: derecho a la vida, a la diversidad de la vida, al agua, al aire limpio, al equilibrio, a la restauración y a vivir en un ambiente sano libre de contaminación.

Una forma de incursionar en el cumplimiento de estos derechos es la implementación de la Gestión Integral de Residuos Sólidos, en cuyo marco la prevención en la generación de los residuos y su aprovechamiento se convierten en los componentes clave a partir de los cuales se logra una reducción de los residuos que van a los sitios de disposición final y se aprovecha un residuo transformándolo en un recurso valioso.

Desde el Gobierno del Estado Plurinacional de Bolivia se impulsan políticas orientadas al aprovechamiento de los residuos sólidos con el objetivo de minimizar los impactos negativos en el medio ambiente, la salud y fomentar la conciencia ciudadana.

La presente guía está dirigida a aquellas personas que desde los gobiernos municipales tienen la responsabilidad de la gestión integral de los residuos sólidos, así como a aquellas personas o colectivos que quieran implementar estrategias de aprovechamiento de residuos orgánicos en sus propias casas o instituciones. Su objetivo principal es proporcionar herramientas para fomentar el aprovechamiento de los residuos sólidos orgánicos mediante el compostaje y la lombricultura.

La guía proporciona los siguientes contenidos:

- ✓ Marco conceptual sobre la problemática de los residuos sólidos.
- ✓ Los componentes del aprovechamiento de residuos orgánicos
- ✓ El compostaje
- ✓ Compostaje domiciliario y comunitario
- ✓ Compostaje municipal
- ✓ La lombricultura

1.2 Marco Conceptual

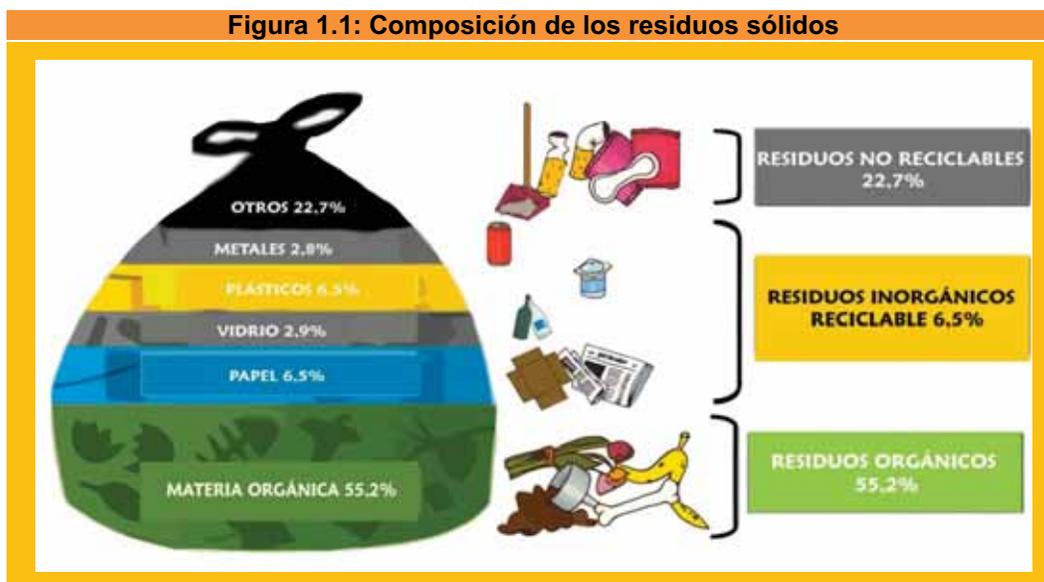
Según datos del Diagnóstico Nacional de Gestión de Residuos Sólidos¹, en Bolivia se generan aproximadamente 4,782 toneladas de residuos sólidos al día, de los cuales el 87% se genera en área urbana y el 13% en área rural. La producción per-cápita de residuos sólidos varía en un rango de 0,20 Kg/hab-día en áreas rurales a 0,53 Kg/hab-día, en áreas urbanas, con lo cual da un promedio nacional de 0,50 Kg/hab-día.

La composición media de residuos sólidos que genera una familia, nos indica que aproximadamente el 77% de los residuos podrían ser aprovechados (55% son residuos orgánicos y 22% residuos inorgánicos reciclables) y el 23% restante corresponden a residuos no aprovechables o comúnmente llamados "basura".

La mayoría de estos residuos aprovechables son vertidos de forma descontrolada a espacios no adecuados formando pasivos ambientales. De total de sitios de disposición final municipal, el 90,8% son botaderos a cielo abierto, el 6,1% botaderos controlados y el 3,1% son rellenos sanitarios.

¹MMAyA/VAPSB/DGGIRS/Diagnóstico de la Gestión de Residuos Sólidos en Bolivia

Figura 1.1: Composición de los residuos sólidos



Fuente: MMAyA/VAPSB/DGGIRS/Diagnóstico de la Gestión de Residuos Sólidos en Bolivia/2010

Los residuos orgánicos, cuando son destinados a un botadero o a un relleno sanitario, generan lixiviados (líquidos percolados) y emisiones de gases de efecto invernadero que deben ser recolectados y tratados generando costos de operación importantes; cuando no son tratados, generan contaminación a las aguas, suelo y atmósfera.

En contrapartida, cuando el residuo orgánico es tratado en plantas de compostaje, lombricultura o de biodigestión, se convierte en un abono orgánico un recurso de altamente valioso para la mejora de suelos, en áreas verdes, la agricultura y reforestación, que coadyuvan a garantizar la seguridad alimentaria, la recarga de acuíferos y a mejorar suelos erosionados. Con el aprovechamiento de los residuos orgánicos imitamos a la naturaleza cerrando el ciclo de la materia orgánica y “devolviendo a la tierra lo que ella nos ha dado”.

Figura 1.2: El ciclo de la materia orgánica



Fuente: Cartilla Compostaje Domiciliario y Lombricultura, 2011 Agencia de Residuos de Cataluña.

En algunos municipios del país se ha comenzado con la implementación de proyectos piloto de aprovechamiento de residuos orgánicos, que consisten en la separación en origen de los residuos, la recolección diferenciada y la producción de compost y humus. Sin embargo, respecto al total de residuos generados en el país, se calcula que actualmente a nivel nacional se recupera solo el 0,9% de los residuos sólidos orgánicos, lo cual muestra la necesidad de impulsar políticas y proyectos relacionados con la gestión de los residuos orgánicos.



Fuente: MMAyA/VAPSB/DGGIRS/ Diagnóstico de la Gestión de Residuos Sólidos en Bolivia

A continuación se describen algunos conceptos que nos ayudaran a conceptualizar el problema de los residuos sólidos orgánicos en el marco de la Gestión integral de residuos.

1.2.1 Residuos Sólidos

Los residuos sólidos, son *“materiales generados en los procesos de extracción, beneficio, transformación, producción, consumo, utilización, control, reparación o tratamiento, cuya calidad no permite usarlos nuevamente en el proceso que los generó, que pueden ser objeto de tratamiento y/o reciclaje”*²

1.2.2 Residuos Sólidos Municipales

Los residuos sólidos municipales, son aquellos que se generan en domicilios, áreas públicas, comercios, instituciones de servicios, establecimientos de salud, mataderos e industrias (sólo asimilables a domiciliarios). Este tipo de residuos sólidos, por sus características pueden clasificarse en residuos sólidos comunes, peligrosos y especiales:

- ♻️ Los residuos sólidos comunes comprenden residuos sólidos orgánicos, reciclables y no aprovechables, los cuales no presentan características de peligrosidad y pueden ser recolectados, aprovechados y dispuestos por el sistema convencional de servicios de aseo.
- ♻️ Los residuos sólidos peligrosos son aquellos que *“conllevan riesgo potencial al ser humano o al ambiente, por poseer cualquiera de las siguientes características: corrosividad,*

²Ley de Medio Ambiente N°1333, Reglamento de Gestión de Residuos Sólidos, Bolivia

explosividad, inflamabilidad, patogenicidad, bioinfecciosidad, radiactividad, reactividad y toxicidad, y que conllevan riesgo potencial al ser humano y medio ambiente”. Son municipales porque se generan en los domicilios, comercios, instituciones de servicios, establecimientos de salud (excepto radiactivos) y otras fuentes que no impliquen procesos productivos, de manufactura o instalación de servicios.

- Los residuos sólidos especiales comprenden los residuos de características muy diversas que se generan en el medio urbano y cuyas formas de recolección y tratamiento varían sustancialmente a los residuos sólidos comunes. Clasifican en este tipo de residuos los vehículos en desuso, residuos de aparatos eléctricos y electrónicos, residuos voluminosos de muebles, chatarra, residuos de la construcción, animales muertos, llantas y neumáticos desechados y residuos forestales.

1.2.3 Residuos Sólidos Orgánicos

Los residuos sólidos orgánicos, son todos aquellos que tienen en su estructura básicamente carbono, nitrógeno, oxígeno, hidrógeno y pueden descomponerse por la acción natural de organismos vivos como lombrices, bacterias y hongos. Estos pueden ser cáscaras de verduras, residuos de alimentos, frutos, residuos de cosechas, hojas de árboles, entre otros, los cuales se generan en actividades de cocina, consumo de alimentos, jardinería y poda de plantas, centros de abasto de frutas, verduras u otros productos generados por acción de la naturaleza.

1.2.4 Gestión Integral de Residuos Sólidos

Se define como el conjunto de acciones articuladas e integradas con los diferentes actores de la sociedad, para la formulación e implementación de políticas, estrategias y normativa orientadas al desarrollo institucional, la planificación, la sostenibilidad, la gestión operativa y accesibilidad a los servicios de aseo, la participación ciudadana, la investigación y desarrollo tecnológico, así como el control y evaluación permanente, a fin de prevenir, aprovechar, tratar y disponer de forma sanitaria y ambientalmente segura los residuos sólidos.



Fuente: MMAyA/VAPSB/DGGIRS, Programa Plurinacional de Gestión Integral de Residuos Sólidos 2011-2015

1.3 Principios de la Gestión Integral de Residuos Sólidos

El Programa Plurinacional de Gestión Integral de Residuos (PPGIRS/2011-2015)³, aprobado con Resolución Ministerial N°370, del Ministerio de Medio Ambiente y Agua, plantea principios orientados a implementar la Gestión Integral de Residuos Sólidos en el país. Para fines de la presente guía se citan aquellos que se relacionan de manera directa:

1.3.1 Instauración de los valores colectivos del Estado

“Establece que de acuerdo a lo prescrito en la Constitución Política del Estado, la gestión integral de residuos sólidos debe sustentarse en los valores de “suma qamaña” (vivir bien), “ñandereko” (vida armoniosa), “tekokari” (vida buena), “irimarei” (tierra sin mal), debiendo en consecuencia todo miembro de la sociedad adecuar su comportamiento, modificando prácticas de producción, comercio y consumo que se califiquen como contrarias a la preservación de la salud y medio ambiente.”

1.3.2 Jerarquización de la Gestión Integral de Residuos Sólidos

“Establece el orden de las acciones a desarrollar para el manejo de los residuos sólidos: prevenir, aprovechar y disponer. Este orden significa, que desde el punto de vista ambiental, la mejor alternativa es prevenir evitando la generación de residuos y reduciendo su peligrosidad. En segundo lugar, si no es posible evitar su generación, se debe buscar su aprovechamiento mediante la reutilización, reciclaje o tratamiento biológico para su reintroducción en nuevos procesos productivos. En tercer lugar, se debe optar por el aprovechamiento energético y por último la disposición final de aquellas fracciones de residuos no aprovechables.”

Para los residuos sólidos peligrosos, hay que tener en cuenta antes de su disposición final será necesario un proceso de tratamiento.

Figura 1.5: Jerarquización de la Gestión Integral de Residuos Sólidos



Fuente: MMAyA/VAPSB/DGGIRS/Programa Plurinacional de Gestión Integral de Residuos Sólidos 2011-2015

1.3.3 Preservación Ambiental

“Establece que la gestión integral de los residuos sólidos debe orientarse a la prevención de riesgos de contaminación para el agua, aire, suelo, flora y fauna, fundamentada en la protección de la madre tierra para el vivir bien de las generaciones actuales y futuras”.

³ El PPGIRS 2011-2015, tiene como objetivo principal implementar y lograr la sostenibilidad de la gestión integral de residuos sólidos a nivel nacional, a través de la aplicación de políticas nacionales que promuevan la prevención, aprovechamiento, tratamiento y disposición final segura y sanitaria e incorporando la participación de los diferentes actores públicos, privados, de apoyo y la sociedad en su conjunto.

1.3.4 Participación y Control Social

“Establece que, en la concepción y desarrollo de la gestión integral de residuos sólidos, debe promoverse la incorporación del accionar participativo de la población y la educación sostenida, con una eficiente y permanente comunicación para lograr una óptima sensibilización y colaboración de todos los actores. Asimismo, deberá asegurarse el ejercicio del control de la sociedad organizada”.

1.4 Efectos de los residuos sólidos orgánicos en rellenos sanitarios y botaderos

La fracción orgánica de los residuos generados en un municipio, como se ha señalado anteriormente, corresponde a más del 50% del total de los residuos sólidos generados, por cuanto es un componente fundamental que influye en todas las etapas del servicio de aseo, particularmente en la disposición final, elevando los costos de operación e incrementando los impactos ambientales como se detalla a continuación:

-  **Generan lixiviados:** La descomposición de los residuos orgánicos al interior de los rellenos sanitarios o botaderos debido a su gran contenido de humedad (50 a 80 %), es una de las principales fuentes de generación de lixiviados en los rellenos sanitarios o en los botaderos. En los botaderos este líquido se incorpora a las aguas superficiales o se infiltra hasta llegar a las aguas subterráneas causando problemas de contaminación.
-  **Generan biogás, gases de efecto invernadero:** La degradación anaerobia de los residuos orgánicos en el interior del relleno sanitario tiene como consecuencia la generación de gases, principalmente gas metano. Estos gases, denominados *biogás*, son considerados de efecto invernadero que contribuyen al cambio climático global; en los botaderos, cuando estos gases no son captados es fuente generadora de incendios y contaminación atmosférica.
-  **Disminuyen la vida útil del relleno sanitario y dificultan la operación:** La disposición final de residuos orgánicos, ocupa mayor espacio y disminuye la vida útil del relleno sanitario. Por otro lado, por el grado de humedad y su composición requiere de mayor cantidad de material de cobertura.
-  **Generan Olores:** La degradación en condiciones anaeróbicas de los residuos orgánicos en el interior del relleno sanitario, provoca emanación de olores desagradables que deben ser mitigados

1.5 Beneficios del aprovechamiento de los residuos sólidos orgánicos

En contrapartida, el aprovechamiento de los residuos sólidos orgánicos, sea mediante compostaje o mediante lombricultura, genera beneficios ambientales y económicos, que son:

Beneficios ambientales:

- ✓ Menor cantidad de lixiviados generados y menor riesgo de contaminación de las aguas.
- ✓ Menor cantidad de gases efecto invernadero disminuyendo su impacto en relación al cambio climático.
- ✓ Menor uso de terreno para disposición final con posibilidad de extender la vida útil del relleno sanitario.
- ✓ Se produce compost que puede servir como mejorador de suelos y abono orgánico y no produce sobrecarga química al suelo.
- ✓ Reemplazo de fertilizantes químicos por un abono orgánico.

Beneficios económicos:

- ✓ Posibilidad de extender la vida útil del relleno sanitario.
- ✓ Disminuye la generación de lixiviados en el relleno y por lo tanto los costos de tratamiento de éstos.
- ✓ Disminuye la generación de biogás en el relleno y por lo tanto los costos de captación y tratamiento de este.
- ✓ Se genera posibilidad de venta o de uso del compost o humus de lombriz para fines municipales (viveros, áreas públicas, protección de cuencas, reforestación de rellenos clausurados) o privados productivos (agricultura, jardinería)
- ✓ En el caso de aprovechamiento mediante biodigestión, uso del biogás como energía y/o de los subproductos, biol y compost como fertilizantes naturales.
- ✓ Reemplazo de fertilizantes químicos por un producto más económico y natural.

1.6 Compostaje y Lombricultura

Con el compostaje y la lombricultura los materiales orgánicos (restos de frutas y verduras, de podas, pasto, hojas, etc.), son transformados (descompuestos), a través de procesos biológicos para obtener Compost o humus de lombriz, abonos orgánicos naturales.

Figura 1.6: Compostaje y Lombricultura



Fuente: MMAyA/VAPSB/DGGIRS

El **compostaje** es un proceso aeróbico controlado de descomposición de los restos (restos de frutas y verduras, de podas, pasto, hojas, etc.), orgánicos principalmente por parte de microorganismos (hongos, bacterias, actinomicetos) y de la fauna típica del suelo (gusanos de tierra, caracoles, cochinillas, etc) para la obtención de abono orgánico.

La **lombricultura**, es el cultivo de las lombrices de tierra con el fin de transformar residuos orgánicos en humus. El humus es la capa superior de la tierra de color oscuro formado por la ingesta de los residuos orgánicos.

Las lombrices cavan la tierra, lo que mejora la fertilización, aireación y la formación del suelo. La lombriz más utilizada en la lombricultura es la Roja Californiana (*Eisenia Foetida*).

Los parámetros de producción normalizados, indican que de cada 100 kg de residuos orgánicos se pueden obtener mediante compostaje o lombricultura unos 30 kg de compost o abono orgánico.

Nota: El tratamiento biológico de residuos mixtos orgánicos e inorgánicos sin separación en origen no se considera compostaje.

Figura 1.7: Residuos sólidos orgánicos y compostaje



Fuente: Agencia de Residuos de Cataluña

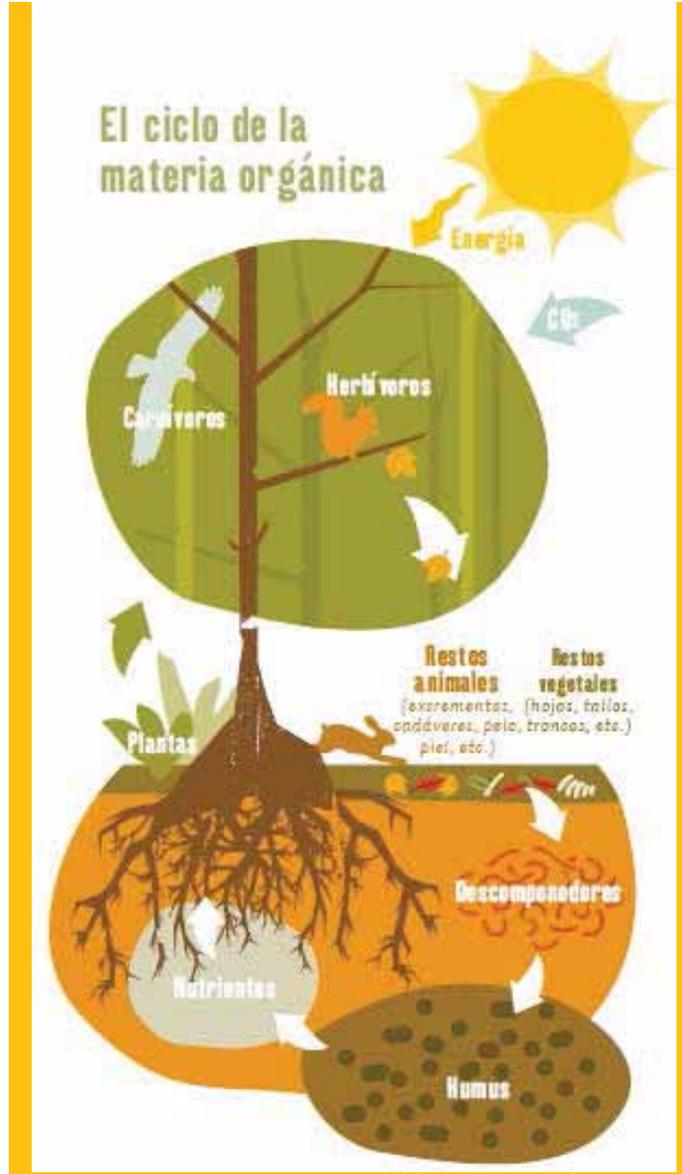
1.7 El ciclo de la Materia Orgánica

La naturaleza recicla la materia orgánica y se auto-provee de nutrientes, de manera que cierra su propio ciclo. Todo sale de la tierra y vuelve a ella en forma de excremento, hojas y otros restos de vegetales, cadáveres de animalitos, etc.; los organismos descomponedores del suelo transforman estos restos vegetales y animales en humus, la capa fértil de la tierra de los bosques de dónde las plantas absorben los nutrientes

Los procesos del compostaje y la lombricultura, imitan a la naturaleza; reciclan la materia orgánica y permiten cerrar el ciclo de la materia orgánica.

El compost y humus de lombriz obtenidos de los procesos de compostaje y lombricultura son de nuevo aplicados en la agricultura y la jardinería como abono y estructurante del suelo, de forma que se constituirán en el substrato para la producción de alimentos u otras especies vegetales, cerrando de esta forma el ciclo.

Figura 1.8: El ciclo de la materia orgánica



Fuente: Agencia de Residuos de Cataluña

Capítulo II: Aprovechamiento de Residuos Sólidos Orgánicos

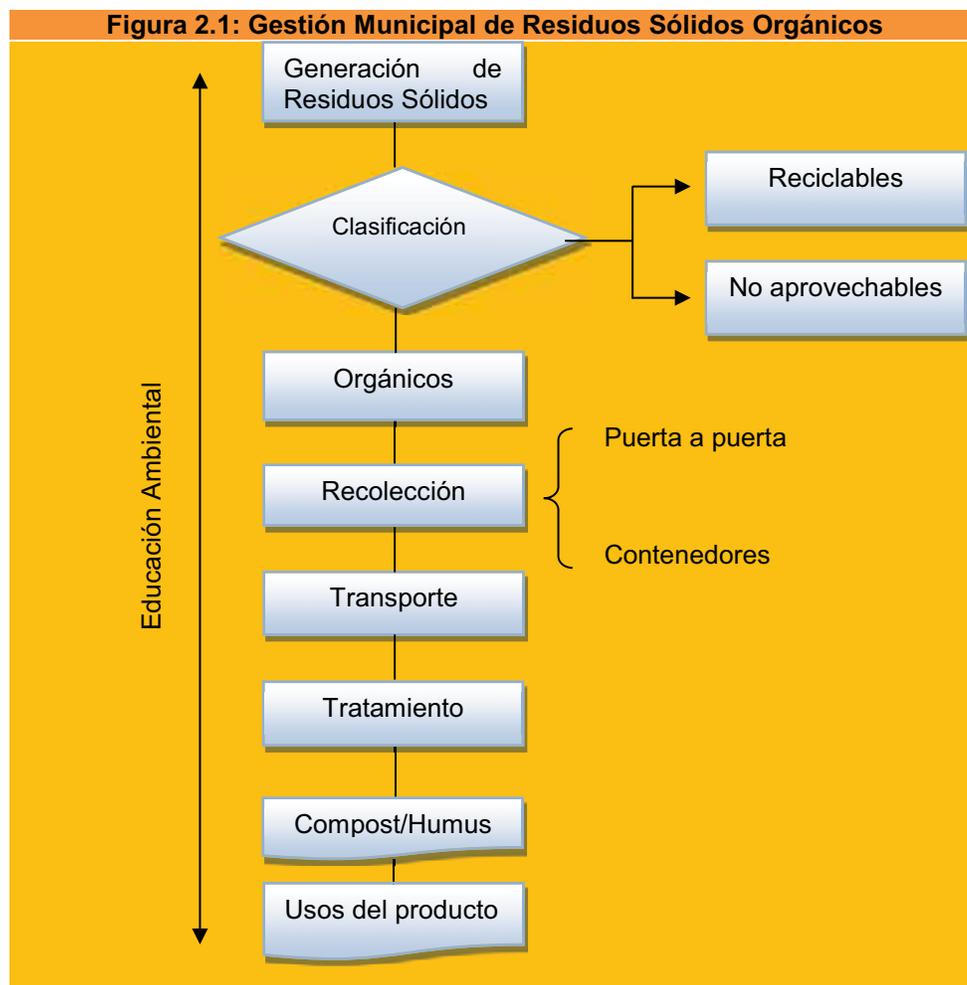
APROVECHAMIENTO DE RESIDUOS SÓLIDOS ORGÁNICOS

El Aprovechamiento de los Residuos Sólidos Orgánicos en un municipio puede permitir la reducción de hasta un 50% en el peso de los residuos que vayan a ser depositados en el relleno sanitario. Este hecho supone el incremento de la vida útil del relleno, mayor facilidad en su operación, además del beneficio ambiental que supone reincorporar la materia orgánica a la naturaleza mediante la aplicación de compost, humus de lombriz.

2.1 Gestión Municipal de Aprovechamiento de Residuos Sólidos Orgánicos

La gestión municipal para el aprovechamiento de residuos sólidos orgánicos debetomar en cuenta lossiguientes componentes básicos:

- ♻️ Clasificación y Almacenamiento de los residuos,
- ♻️ Recolección diferenciada y transporte,
- ♻️ Tratamiento,
- ♻️ Distribución y Utilización del Producto.



Un componente decisivo y transversal en la gestión municipal de aprovechamiento, corresponde a la educación ambiental mediante instrumentos de formación, comunicación y participación ciudadana, de manera que se pueda lograr las metas planetadas y su sostenibilidad.

Todos estos componentes deberán ser planificados a detalle previamente a iniciar con un proyecto de aprovechamiento.

Cuando se elabora un proyecto municipal de aprovechamiento de residuos sólidos orgánicos es conveniente empezar su implementación en aquellos barrios o comunidades que muestren mayor interés, para aprovechar el entusiasmo existente y lograr experiencias exitosas que puedan ser mostradas y replicadas para el resto de la población.

2.1.1 Fuentes de generación de residuos sólidos

Los residuos orgánicos forman parte de los residuos domiciliarios (de los domicilios), residuos comerciales (mercados y restaurantes), residuos de jardinería, residuos industriales (industrias de la alimentación), residuos de mataderos, residuos agrícolas, ganaderos y forestales y lodos de tratamiento biológico. Como fuentes de generación de residuos sólidos orgánicos dentro de un municipio, se identifican las siguientes:

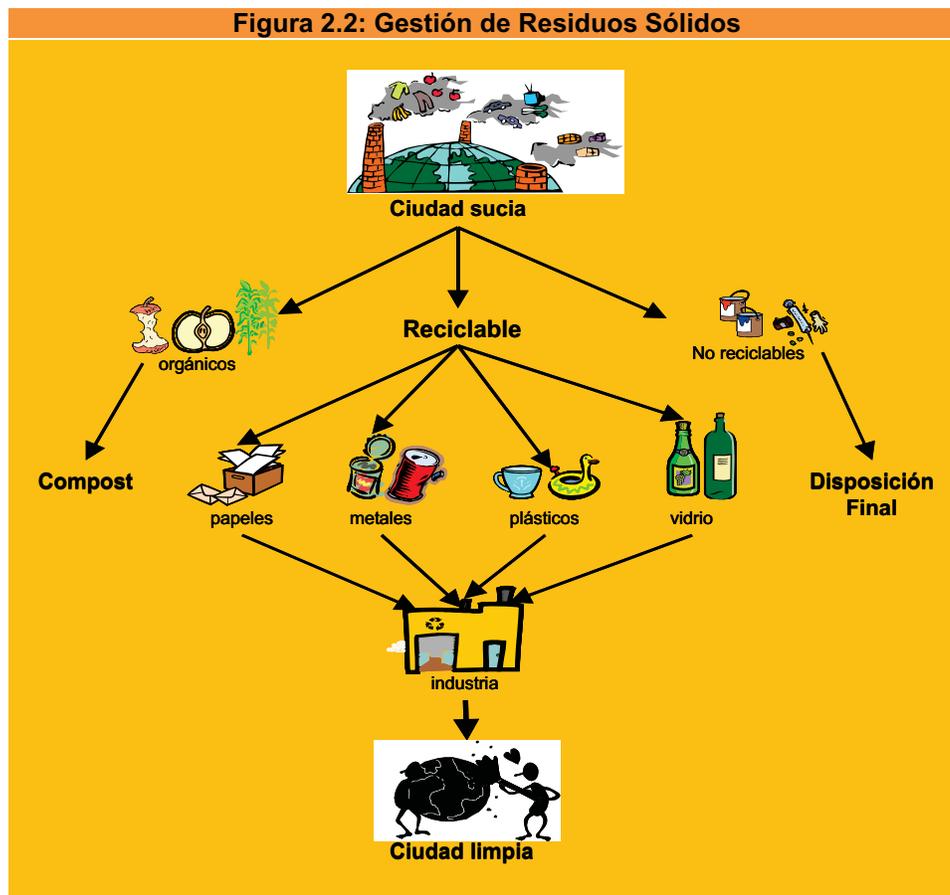
Cuadro 2.1: Fuentes de Generación Vs Tipo de Residuo	
Fuente de generación	Tipo de residuo
Domicilios	Restos de comida
Restaurantes	Restos de comida
Mercados y Ferias	Restos de comida, de vegetales y frutas
Parques y jardines	Restos de las podas y residuos verdes
Plantas de tratamiento de aguas residuales biológicas	Lodos de la depuración
Empresas procesadoras de alimentos	Alimentos caducados y otros restos
Actividades agropecuarias	Estiercol
Actividades agroforestales	Restos de madera
Mataderos	Estiercol, sangre, vísceras, cuernos...
Indústrias de la alimentación	Restos de la producción

Fuente: MMAyA/VAPSB/DGGIRS

Los datos de generación de residuos sólidos orgánicos, tanto en cantidad como en tipo y fuente de generación, serán los datos de partida para realizar una buena planificación de los componentes de aprovechamiento.

2.1.2 Selección en origen diferenciada de residuos sólidos orgánicos

La selección en origen de los residuos sólidos orgánicos consiste en separar y seleccionar en la fuente de generación, es decir, en el lugar donde se generan (domicilios, restaurantes, mercados, etc). Se debe evitar que los residuos inorgánicos y los residuos peligrosos se mezclen con los residuos orgánicos de forma de poder obtener un compost apto para ser usado en la agricultura.



Fuente: Grupo Ciudad Saludable, Recolección Selectiva de Residuos

Una correcta selección o separación en origen de los residuos orgánicos, permitirá de forma adicional, que los residuos reciclables seleccionados no estén humedecidos y sucios por el contacto con los residuos orgánicos, incrementando así sus posibilidades de reciclaje.

El éxito de un proyecto de aprovechamiento tanto para materiales orgánicos como inorgánicos, depende de una correcta separación en origen ya que ésta permite aumentar la pureza de cada tipo de residuos (materiales) y la mayor eficiencia de su tratamiento de compostaje o reciclaje.

2.1.2.1 Selección en origen en los domicilios

La selección en origen se podrá realizar a diferentes niveles en el municipio. El número de fracciones de residuos a separar o seleccionar dependerá del grado de sensibilización y concientización de la población o actores que participen en este proceso, así como de diferentes factores relativos al contexto municipal (equipamiento, personal, etc). Para fines de aprovechamiento y educación ciudadana el PPGIRS 2011-2015, plantea la separación de residuos en tres fracciones:

-  Recipientes de color verde, para residuos orgánicos,
-  Recipientes de color amarillo, para residuos reciclables,
-  Recipientes de color negro, para residuos no aprovechables.



Fuente: MMAyA/VAPSB/DGGIRS/Material Educativo de Difusión/2012

Si existe alta concientización se podría llegar a separar los residuos inorgánicos reciclables en plásticos, papel, vidrio y metal.

2.1.2.2 Selección en origen en grandes generadores

Los mercados son los mayores generadores de residuos orgánicos. De manera general, se estima que de los residuos orgánicos generados en el municipio aproximadamente un tercio provienen de mercados y restaurantes.

En el caso de los mercados y ferias, es necesario trabajar aspectos organizativos y de capacitación con los gremios. Tres son los modelos que pueden implementarse:

- ✓ Instalación de contenedores de gran volumen (mayor a 1m³),

- ✓ Vaciado directo de los tachos de los comerciantes al camión recolector,
- ✓ Sistema combinado

Figura 2.4: Separación en mercados de residuos sólidos



Fuente: MMAyA/VAPSB/DGGIRS

2.1.2.3 Selección en origen en unidades educativas

La importancia de la selección en origen de los residuos en estos lugares, recae especialmente en el componente educativo. En las unidades educativas, se debe promover la selección diferenciada en varias fracciones, básicamente en función de los residuos que se generen en el desayuno escolar y en las actividades escolares: orgánico (si existe este residuo), plásticos, papel y resto no aprovechable.

Para efectivizar este proceso, la coordinación con la distrital de educación y con los directores de los centros educativos es imprescindible.

2.1.2.4 Selección en origen en instituciones públicas o privadas

Se trata de la selección de residuos sólidos, en instituciones del ámbito público y/o privado como: bancos, organismos del estado, establecimientos de salud, industrias, aeropuertos, terminales de bus, etc. En estas instituciones, a no ser que se justifique de forma razonada, normalmente, la selección diferenciada solo justifica para papeles y plásticos; no para residuos sólidos orgánicos.

2.1.3 Recolección diferenciada y transporte de residuos orgánicos

La recolección diferenciada de los residuos orgánicos consiste en la recolección y el traslado de forma diferenciada de estos residuos seleccionados desde las diversas fuentes de generación hasta el sitio de tratamiento/aprovechamiento. Teniendo en cuenta los distintos generadores, pueden implementarse diferentes modelos de recolección:

- Recolección diferenciada puerta a puerta:** Los residuos sólidos seleccionados pueden ser entregados al recolector directamente. La recolección y transporte puede realizarse en vehículos mecanizados o manuales.
- Recolección en acera:** Los residuos sólidos seleccionados son acumulados en la acera principalmente en bolsas. La recolección puede ser en esquina o puntos intermedios.
- Contenedores diferenciados públicos:** Recolección mediante contenedores en puntos fijos. Estos contenedores deben estar identificados mediante un color o etiqueta.

Figura 2.5: Recolección diferenciada y transporte de residuos sólidos



Recolección diferenciada, La Paz



Recolección manual diferenciada, Santa Cruz



Recolección diferenciada, Cochabamba



Recolección diferenciada, Tiquipaya



Recolección diferenciada, El Alto



Recolección diferenciada, Comarapa

Fuente: MMAyA/VAPSB/DGGIRS

Para el transporte, el equipo y los vehículos de recolección deben ser adecuados y suficientes para los volúmenes recolectados. La recolección diferenciada puede realizarse en días alternos o en un mismo día dependiendo la disponibilidad de equipos, el diseño de los mismos y el contexto del área donde se realiza el servicio. En ambos casos, las frecuencias de recolección y las rutas deben ser planificadas y comunicadas a los usuarios. Con fines comunicativos y de educación ambiental, es importante que los vehículos estén pintados o señalizados en función del residuo que vayan a recolectar.

La definición de la cantidad de camiones recolectores, su desempeño y el diseño de rutas de recolección, debe realizarse en base a la cantidad de residuos que se genera usualmente, estos datos provienen en base a un estudio de caracterización. Con base en estos valores se define el vehículo recolector con la capacidad y el diseño requeridos.

2.1.4 Tratamiento de los Residuos Orgánicos

El tratamiento de los residuos sólidos orgánicos consiste en el proceso de transformación del residuo orgánico en compost, humus. Existen diferentes alternativas para el tratamiento de estos residuos:

- a) **Compostaje:** Consiste en la transformación controlada de materiales orgánicos (restos de frutas y verduras, de podas, pasto, hojas, etc.), a través de un proceso biológico para obtener compost, un abono natural. Esta transformación inicia con la descomposición de los residuos orgánicos por parte de microorganismos (hongos, bacterias, actinomicetos y fauna típica del suelo, gusanos de tierra, caracoles, cochinillas, etc.) en condiciones aerobias, es decir en presencia de oxígeno. A través del control y el monitoreo varios factores, se puede favorecer, e incluso acelerar, el proceso de degradación. Los diversos grados de control llevan a varias técnicas de compostaje, a nivel domiciliario, por ejemplo, se realiza el auto compostaje que consiste en una técnica casera de fácil implementación; a mayores escalas, el compostaje se puede realizar mediante diferentes técnicas. Una descripción a detalle de este proceso se describe en el capítulo 3 de esta Guía.
- b) **Lombricultura.** Se trata de la transformación controlada de materiales orgánicos (restos de frutas y verduras, etc.), a través de un proceso biológico para obtener humus de lombriz derivando en un abono natural. Esta transformación consiste en la descomposición de los restos orgánicos por parte de las lombrices del tipo californianas. Una descripción a detalle de este proceso se describe en el capítulo 8 de esta Guía.
- c) **Digestión anaerobia o biometanización.** Se trata de un proceso mesofílico, de degradación anaerobia (sin oxígeno) de la materia orgánica con la obtención final de una mezcla gaseosa conocida como biogás. El biogás contiene aproximadamente un 30% de dióxido de carbono y entre un 50 a 60% de gas metano y que puede ser usado como combustible o transformado en energía térmica y/o eléctrica. Además, se obtiene un lodo residual que previo tratamiento de compostaje tiene un valor de fertilizante rico en nutrientes (el biol). El biogás es aprovechado para la obtención de energía y el resto de subproductos como fertilizantes orgánicos ya sea en forma sólida o líquida (aplicación foliar).

Figura 2.6: Digestión anaerobia de residuos orgánicos líquidos. Tecnología de bajo coste



Biodigestores tubulares plásticos en serie (Matadero Municipal de Cochabamba, 2013)



Recuperación energética del biogás

Fuente: Jaime Martí Herrero (CIMNE)

Existen modelos de biodigestores de tecnología a bajo costo como son los biodigestores tubulares plásticos, que consiste en aprovechar el polietileno tubular empleado típicamente en carpas solares pero en color negro para este caso, para disponer de una cámara de varios metros cúbicos herméticamente aislada. Este hermetismo es esencial para que se produzca las reacciones biológicas

anaerobias (Botero & Preston, 1987) (Guía de Diseño y Manual de Instalación, Martí Jaime, GTZ, La Paz, Bolivia). Los modelos tubulares de biodigestores se están extendiendo entre los pequeños productores agropecuarios de Latino América, debido a su bajo coste, fácil manejo y mantenimiento. La auto producción de biogás como combustible, pero principalmente, la obtención de biol como fertilizante ecológico, son los productos valorados por los productores, además de otros como el cocinar sin humo, la reducción de carga de trabajo en la recolección de leña y el ahorro que supone en fertilizantes químicos.

Estos modelos están resultando exitosos para residuos agropecuarios homogéneos y líquidos como estiércoles mezclados con agua. Además están siendo probados de forma exitosa para el tratamiento de otros residuos no agropecuarios, como pueden ser aguas miles de café, residuos líquidos de matadero o aguas negras y grises domiciliarias.

No obstante, la digestión anaerobia de residuos sólidos orgánicos domiciliarios o de industria alimentaria aún no está muy extendida en la región puesto que la tecnología demostrada en países tecnificados, supone altas inversiones y sistemas difíciles de implementar en nuestros países. Pero por otro lado, existen experiencias exitosas en la India con biodigestores tubulares capaces de tratar 0,25Tn/día de sólidos orgánicos de mercados o domicilios, obteniendo igualmente biogás y biol. Es así que es necesaria la investigación y desarrollo de tecnologías de bajo costo, para adaptarlas a nuestros países.

2.1.5 Reutilización

La utilización de los residuos orgánicos como fuente de alimento para animales, es una de las alternativas de reuso de los residuos de mayor data histórica y que se sigue dando en nuestras zonas rurales y debería ser la primera alternativa a tomar en cuenta. Lo importante de esta forma de utilización, es que los residuos orgánicos no esten mezclados o contaminados con otro tipo de residuos. En ese sentido no se debe permitir la alimentación de residuos en los sitios de disposición final y puntos de acopio, puesto que aquello genera, un alto riesgo de contaminación en la seguridad alimentaria y salud de la población.

2.1.6 Distribución y Utilización del producto final

La distribución consiste en la identificación de usuarios para la utilización del producto obtenido. Cuando se trata de una producción a pequeña escala, por lo general el compost puede ser empleado para actividades de mantenimiento de áreas verdes, en viveros o como material de cobertura final para rellenos sanitarios. A medida que la producción incrementa en las plantas municipales, es necesario identificar otro tipo de usuarios, de manera que el producto pueda tener una rotación frecuente, de manera de evitar la acumulación excesiva puesto que podría afectar el presupuesto. En determinados casos habrá que mejorar la calidad del producto o modificar ciertos parámetros de producción de acuerdo a las necesidades del mercado.

Determinar cual va a ser la utilización del producto final es uno de los componentes fundamentales a ser analizado; el producto obtenido debe tener un uso, ya sea comercial o no. Si el compost no se utiliza, no se completa el ciclo para el cual se instrumentó el proyecto y se pierden los beneficios de mejoramiento de suelo que ofrece el producto. Para asegurar la utilización del compost es necesario identificar antes de implementar el proyecto a los posibles usuarios, así como los mecanismos de entrega.

Los usos pueden ser varios en función de los requisitos y contexto municipal:

-  **Uso de compost y humus de lombriz por parte de la municipalidad**, ya sea como substrato para plantines en viveros, para mantenimiento de parques y jardines, arquitectura de paisajes, como abono en actividades de reforestación o en cierres de rellenos sanitarios.

- ♻️ **Donación del compost y del humus como incentivo**, se puede proporcionar en forma gratuita a las familias que realizan la selección en origen para su uso en la casa; o también donar el producto en ferias para incentivar el compostaje o lombricultura domiciliaria
- ♻️ **Venta del compost y del humus de lombriz**, se puede comercializar el producto a personas individuales o personas colectivas mediante convenios con cooperativas de producción orgánica para su uso en la agricultura o otras.
- ♻️ **Uso del compost y del humus de lombriz en obras públicas**, su uso puede ampliarse a otros ámbitos como por ejemplo en la hidrosiembra de taludes de carretera.

Figura 2.7: Usos del compost



Uso de compost para cobertura final de Cierre,



Usos del compost en la agricultura, San Matias



Relleno sanitario de Mallasa



Embolsado de humus de lombriz, Tiquipaya

Fuente: MMAyA/VAPSB/DGGIRS

2.1.7 Educación y participación ciudadana

Se debe tener en cuenta que para implementar cualquier proyecto de aprovechamiento de residuos orgánicos, es necesario promover un cambio de hábitos, de organización y de procesos de la población y de sus instituciones. Esto se logrará mediante el desarrollo de una efectiva campaña de difusión y capacitación dirigida a todos los participantes del proyecto (desde la generación, la separación de residuos en fuente y el servicio de recolección y transporte). Dentro de esa campaña será importante resaltar y demostrar que la producción de compost representa un beneficio social, ambiental y económico.

Para fomentar la participación de la población e instituciones, se recomienda desarrollar una estrategia de planeación participativa y lograr que otros actores, además de los promotores principales del proyecto, se apropien del mismo y lo tomen como objetivo propio. La estrategia de comunicación e información, deberá incluir una campaña comunicativa, contextualizada al público objetivo, deberá ser continua y estar acompañada de una estrategia informativa a la población de los logros que se van

obteniendo con su participación. El objetivo de éstas es lograr una apropiación real del problema por parte de la población y conseguir su participación activa.

Por otro lado, la capacitación del personal del servicio de aseo y de los usuarios es condición indispensable para lograr un proyecto municipal exitoso. La capacitación puede ser sencilla, pero debe ser continua para afianzar conocimientos y mejorar continuamente los procesos productivos.

Los aspectos detallados de cómo diseñar e implementar la educación ambiental y ejemplos de campañas comunicativas y actividades a ser implementadas se presentan en la Guía de Educación Ambiental (MMAYA/VAPSB/DGGIRS/2012)

Figura 2.8: Campañas educativas

<p>Capacitación a técnicos municipales, Planta de compostaje Kara Kara– Cochabamba</p>	<p>Capacitación a estudiantes, Relleno Sanitario de Mallasa – La Paz</p>
<p>Estrategia de capacitación, Comarapa</p>	

Fuente: MMAY/VAPSB/DGGIRS

Un aspecto a tener en cuenta es la posibilidad de incorporar en la propia planta de compostaje, un espacio para educación ambiental, de forma que la visita de la propia instalación pueda servir como actividad de educación ambiental para escuelas, vecinos... En este sentido se diseñarán carteles y recorridos por la planta con esta finalidad.

2.1.8 Planificación

Para asegurar la implementación del proyecto de compostaje y su sostenibilidad, se debe realizar una adecuada planificación y gestión administrativa, esto involucra prever los recursos económicos, recursos humanos, la infraestructura y equipamiento requerido para la producción, la capacitación, el desarrollo de estrategias de distribución y utilización de los productos y seguimiento. Una buena planificación de las actividades ayuda a controlar y asegurar el cumplimiento de los resultados esperados.

2.1.9 Desarrollo y crecimiento

Cuando no existe experiencia de compostaje en un municipio, se recomienda comenzar el proyecto con los residuos sólidos de fácil acceso (residuos de jardinería, mercados) y con pocos actores involucrados en el proceso. Posteriormente se puede ampliar paulatinamente hacia otras fuentes de generación, asegurando el correcto funcionamiento de la planta y monitoreando siempre al grado de la participación de la ciudadanía, la calidad de la separación de los residuos y la calidad de la compost.

No siempre es posible atender al 100% de la ciudadanía y esta, a su vez, no está siempre comprometida al 100% con el proyecto. Este factor puede ser un punto de oportunidad si se sincronizan bien las actividades, o un punto crítico a la larga si no se toman en cuenta. Por otro lado, el crecimiento no solo estará limitado por los recursos y el compromiso social, sino también por el mercado.

Capítulo III: El Compostaje

EL COMPOSTAJE

3.1 El Compostaje

El compostaje es tan antiguo como la agricultura y culturalmente ha estado ligado exclusivamente a la filosofía de conservación de la fertilidad del suelo. Hoy en día el interés por el compostaje es sobre todo la necesidad de buscar soluciones al manejo de los residuos sólidos orgánicos, debido a los grandes volúmenes generados y los efectos que se originan ante su manejo inadecuado.

Como se ha mencionado, el compostaje es la descomposición biológica aerobia de los constituyentes orgánicos de los residuos sólidos, desarrollado bajo condiciones controladas en el cual intervienen varios microorganismos que requieren de humedad adecuada y substratos orgánicos heterogéneos. Mediante este proceso se obtiene un producto orgánico, higienizado y estabilizado, denominado compost que resulta beneficioso para el suelo y el crecimiento de las plantas.

El compostaje es una tecnología sencilla y económica para aprovechar los residuos sólidos biodegradables. Se puede aplicar tanto a gran escala en plantas centralizadas (a nivel municipal o empresarial), a pequeña escala de forma individual en los domicilios (en el jardín, en el huerto) o de forma comunitaria (por ejemplo en comunidades rurales).

Compostaje en planta centralizada: Es el compostaje de grandes cantidades de residuos orgánicos, separados previamente en origen. El compost obtenido puede tener diferentes utilidades, en función de su calidad final. Existen diferentes métodos a ser implementados en una planta de compostaje.

Compostaje domiciliario: Es el compostaje realizado en los propios domicilios, permite compostar los restos de la cocina y del jardín y obtener abono para ser aplicado en el propio jardín. Es un proceso a pequeña escala que permite el manejo en origen de los residuos evitando sus costos de recolección y transporte.

Compostaje comunitario: Es el compostaje realizado por la comunidad (juntas de vecinos, distritos, escuelas), a pequeña escala, localizado en las proximidades de donde se generan los residuos y manejado y controlado por los propios generadores. El compost obtenido es utilizado por la población participante en el proceso de compostaje.

3.2 Beneficios del uso del compost

Como hemos visto en el Capítulo 1, existen beneficios económicos y ambientales que justifican el aprovechamiento de los residuos orgánicos. Adicionalmente a estos beneficios, el uso del compost es también beneficioso para el medio ambiente y la agricultura por las siguientes razones:

Beneficios del uso de compost

El compost es un producto que se caracteriza por su elevado contenido en materia orgánica estabilizada y su poder fertilizante.

Tiene un doble carácter de enmienda orgánica y de abono orgánico.

El compost puede emplearse como restituidor de la materia orgánica en los suelos en proporciones adecuadas, lo cual es fundamental para garantizar la fertilidad y evitar la desertificación a largo plazo.

El compost mantiene las características necesarias del suelo de cultivo, armonizando las condiciones físicas y biológicas, ahorrando fertilizantes.

Mejora las propiedades físicas del suelo:

Aporta estructura al suelo y contribuye a la calidad de sus propiedades de aireación. Reduce la densidad aparente, aumenta la porosidad y la permeabilidad hídrica y gaseosa.

Se obtienen suelos con mayor capacidad de retención de agua mediante la formación de agregados, implicando un ahorro de agua y aumentando la resistencia del suelo en periodos de sequía. Se obtienen suelos más esponjosos, facilitando el trabajo de estos. Reduce la erosión y favorece la conservación del suelo

Mejora las propiedades químicas:

Aumenta el contenido en nutrientes, macronutrientes Nitrógeno (N), Fósforo (P), Potasio (K), micronutrientes y mejora la capacidad de intercambio de cationes del suelo.

Constituye una fuente y almacén de nutrientes para los cultivos. Sus elementos nutritivos están en forma de humus, fácilmente utilizables.

Mejora la actividad biológica del suelo:

La materia orgánica del suelo actúa como fuente de energía y nutrición para los microorganismos presentes en el suelo, el compost incrementa la cantidad y diversidad de los microorganismos en beneficio del suelo. Los microorganismos viven a expensas del humus y contribuyen a su mineralización.

Una población microbiana activa es índice de fertilidad de un suelo, es fundamental para el mantenimiento de las redes ecológicas.

Aumenta la actividad enzimática del suelo, mejorando su productividad natural

3.3 Factores que influyen en el proceso de compostaje

En el proceso de compostaje, los microorganismos son los responsables de la transformación de la materia orgánica, por lo tanto, todos aquellos factores que puedan inhibir su crecimiento y desarrollo, afectarán también sobre el proceso. Los factores más importantes que intervienen en este proceso biológico son: temperatura, humedad, pH, oxígeno, relación C/N y población microbiana. Intervienen también parámetros que ayudan a confirmar que todo se va desarrollando según las previsiones, como el aspecto y olor de los materiales en las diferentes etapas y, si es preciso, se deben adoptar las medidas correctoras necesarias para reactivar el proceso ante posibles incidencias.

3.3.1 Relación Carbono/Nitrógeno (C/N)

La relación C/N, expresa las unidades de Carbono por unidades de Nitrógeno que contiene un material. El Carbono es una fuente de energía para los microorganismos y el Nitrógeno es un elemento necesario para la síntesis proteica. Una relación adecuada entre estos dos nutrientes, favorecerá un buen crecimiento y reproducción de los microorganismos.

Una relación C/N óptima de entrada, es decir de material "crudo o fresco" a compostar es de 25 unidades de Carbono por una unidad de Nitrógeno, es decir $C(25)/N(1) = 25$. Los valores óptimos de esta relación para un buen compostaje se encuentran entre 20 y 30 (es decir, 20 de C por 1 de N y 30 de C por 1 de N).

Aunque puede variar un poco de una región a otra en función de las características de los residuos orgánicos, en términos generales se puede decir que:

- ♻️ Residuos sólidos orgánicos de domicilios separados selectivamente. Relación C/N de 18-22
- ♻️ Residuos sólidos orgánicos de mercados. Relación C/N de 22-25

Si los residuos sólidos orgánicos contienen demasiado carbono (por ejemplo $C/N=40$), la relación será muy alta y el proceso será lento, las temperaturas no subirán suficientemente y se perderá el exceso de carbono en forma de dióxido de carbono. Si, por el contrario, el material contiene demasiado nitrógeno, (por ejemplo $C/N=10$) la relación es baja y se producirán pérdidas de este elemento en forma de amoníaco (NH_3). Es decir, cuando los materiales de origen tienen una relación C/N más alta, deben añadirse materiales ricos en nitrógeno, como estiércol, desperdicios de alimentos (como las cáscaras de las frutas y verduras), hojas frescas, lodos de plantas de tratamiento de aguas (libres de contaminantes tóxicos) u otro material verde o fresco. Cuando la relación es más baja, debe compensar la mezcla, añadiendo componentes ricos en carbono, como paja, ramas y hojas secas y desperdicios de papel, esto residuos también se conocen como residuos cafés.

Los residuos de origen vegetal, presentan por lo general una relación C/N elevada. Las plantas contienen más nitrógeno cuando son jóvenes y menos en su madurez. Los residuos de origen animal presentan por lo general una relación C/N baja.

Existen tablas, donde es posible obtener las relaciones de estos elementos para diferentes tipos de residuos. A manera de orientación en el siguiente cuadro se muestran los valores de relación C/N de algunos materiales orgánicos.

Si se desconocen estas relaciones en el material a compostar, lo aconsejable es realizar en un laboratorio las determinaciones correspondientes según lo establecido en las Normas Bolivianas siguientes:

- ✓ NB 744 Residuos Sólidos -Preparación de Muestras para su Análisis en el Laboratorio.
- ✓ NB 748 Residuos Sólidos - Determinación de Nitrógeno Total
- ✓ NB 751 Residuos Sólidos -Determinación de Materia Orgánica
- ✓ NB 752 Residuos Sólidos - Determinación de la Relación Carbono-Nitrógeno

Cuadro 3.1: Relación Carbono/Nitrógeno de diferentes materiales orgánicos, Base Seca			
Material orgánico	C%	N%	Relación C:N
Aserrines	40	0,1	400
Podas, tallos, maíz	45	0,3	150
Paja de caña	40	0,5	80
Hojas de árboles	40	1,0	40
Estiércol de equino	15	0,5	30
Estiércol de ovino	16	0,8	20

Cuadro 3.1: Relación Carbono/Nitrógeno de diferentes materiales orgánicos, Base Seca

Heno	40	2,0	20
Estiércol bovino	7	0,5	15
Estiércol de gallina	15	1,5	10
Harina de sangre	35	15	2

Fuente: OPS/OMS, Manual para la Elaboración de Compost-Bases conceptuales y procedimientos

Durante el proceso de compostaje se producen pérdidas de carbono en forma de CO₂, por lo que la relación C/N irá disminuyendo hasta alcanzar un valor entre 12 y 15 en el producto final, valor que también depende del material de partida. Si el valor final de C/N es inferior, indica que el compost se ha mineralizado excesivamente y, si es muy alto, puede indicar que no se ha descompuesto suficientemente. La estabilidad de este valor es un buen indicio de que la degradación ha finalizado y el compost ha madurado correctamente.

3.3.2 Balance de Nutrientes

Puede suceder que el material que se dispone no presenta una relación C/N apropiada para su compostaje, en este caso, se debe proceder a realizar una mezcla con otros materiales para lograr una relación apropiada, este procedimiento se conoce como *Balance de Nutrientes*.

Suponiendo que se dispone de aserrín y excretas de ganado, un balance adecuado se lograría mezclando 3 partes de excreta bovina con una parte de aserrín, obteniendo una relación C/N de entrada de aproximadamente 20. Cuando se refiere a partes, las mismas pueden estar representadas por unidades de masa (Kg, Ton) o volumétricas (l, m³). Desde el punto de vista práctico es aconsejable manejarse con medidas volumétricas por ej. m³. Para este ejemplo, se mezclarían 3 m³ de excreta con 1 m³ de aserrín.

Con respecto al Balance de Nutrientes, existen las siguientes reglas básicas:

1. Utilizando materiales con una buena relación C/N, no es necesario realizar mezclas.
2. Los materiales con relativo alto contenido en Carbono deben mezclarse con materiales con relativo alto contenido en Nitrógeno y viceversa.

Para el proceso de compostaje de residuos sólidos orgánicos domiciliarios o de mercado, estos residuos deben ser mezclados con residuos o materiales vegetales. Ésta mezcla tiene, por un lado, el objetivo de garantizar una relación C/N adecuada y por otro lado, garantizar la suficiente porosidad para permitir la circulación de aire y por lo tanto el proceso aerobio.

En el caso de compostar Residuos Sólidos Orgánicos (RSO) frescos de domicilios o mercados, el porcentaje ideal en volumen de RSO domiciliarios y material vegetal es de 1:1 en volumen, es decir un volumen o capa de residuo sólidos orgánico de domicilio o mercado y un volumen o capa de residuo o material vegetal (residuos secos).

En el caso de compostar RSO de domicilios y/o mercados con estiércol y material vegetal, el porcentaje ideal es de 1:1:2, es decir un volumen o capa de residuo sólidos orgánicos de domicilio o mercado, un volumen o capa de estiércol y dos volúmenes o capas de residuo o material vegetal (residuos secos).

3.3.3 El Oxígeno

Es un elemento esencial para la descomposición aerobia y la supervivencia de los microorganismos. Cuando falta oxígeno en la mezcla, mueren los organismos aeróbicos y comienza una descomposición anaerobia (que es más lenta y desprende un olor desagradable). Para asegurar la suficiencia de oxígeno, es necesario:

- Que la mezcla tenga la porosidad suficiente de un 25% y que ésta sea homogénea en toda la masa, de forma que existan poros, bolsones o túneles de aire.
- Que la mezcla esté aireada de forma que reciba suficiente oxígeno, volteando o removiendo las pilas (aireación manual o mecánica), o introduciendo aire forzado por la base de la mezcla a través de tuberías (aireación forzada).

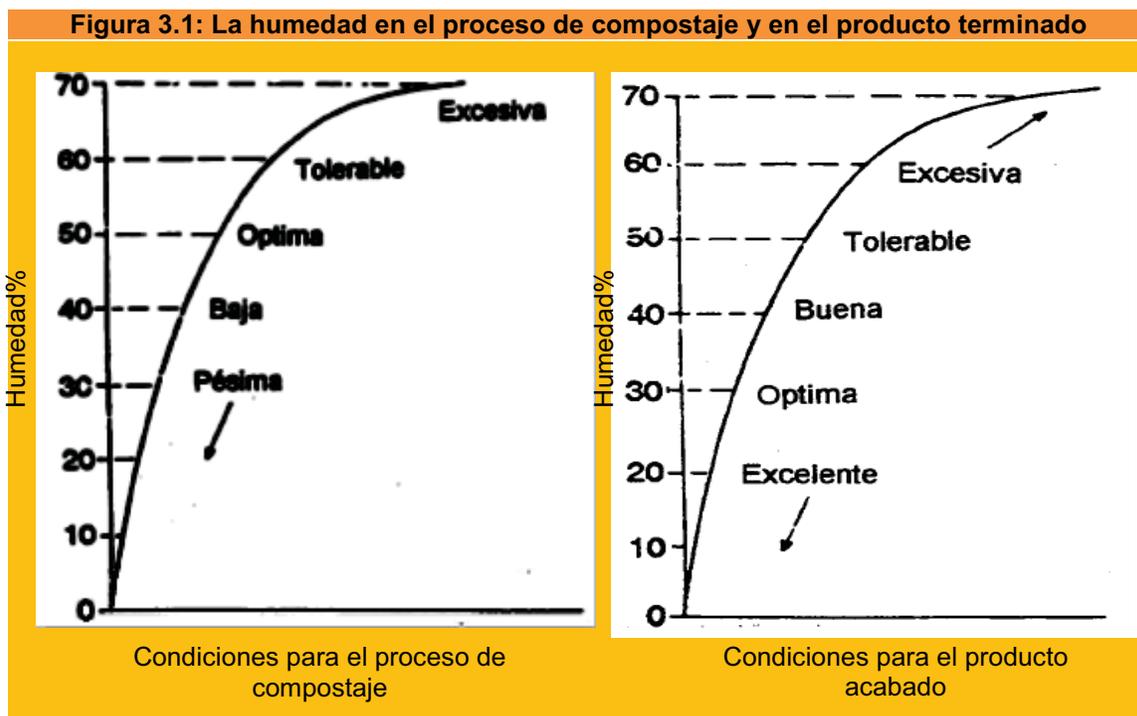
3.3.4 Humedad

La aireación debe balancearse con el mantenimiento de la humedad, ya que el agua es otro elemento esencial para la supervivencia de los microorganismos que participan en el compostaje. El nivel de humedad de la masa de los residuos depende de su granulometría, porosidad y grado de compactación. Para un buen proceso de compostaje, la humedad puede iniciar entre 60-65% para mantenerse alrededor de un 50% durante el proceso y llegar hasta un 30 o 40% al finalizar proceso.

La falta de humedad puede provocar una sensible disminución de la actividad microbiana, detener la degradación y bajar la temperatura. Contrariamente, un exceso de humedad también tiene consecuencias negativas, pues dificulta la circulación del oxígeno y puede provocar la descomposición anaerobia de la mezcla (anaerobiosis), la compactación y el encharcamiento de aguas pluviales expulsan el aire de los vacíos existentes en la pila de residuos, lo cual genera una mayor putrefacción, con desprendimiento de gas sulfhídrico y mercaptanos y en consecuencia desprendiendo malos olores.

En consecuencia, en una operación de compostaje, sea está a gran o pequeña escala, debe haber un monitoreo de la humedad. Si hay exceso de humedad, se puede airear la mezcla o agregar elementos secos como paja y desperdicio de papel que absorban la humedad y por otro lado se deben construir o canales perimetrales para facilitar el flujo de los lixiviados y aguas de lluvia. Contrariamente, si falta humedad, se puede regar la mezcla o taparla con plástico para reducir la evaporación del agua. Hay que tener en cuenta que un exceso de aire puede generar un exceso de evaporación y secar un poco la mezcla.

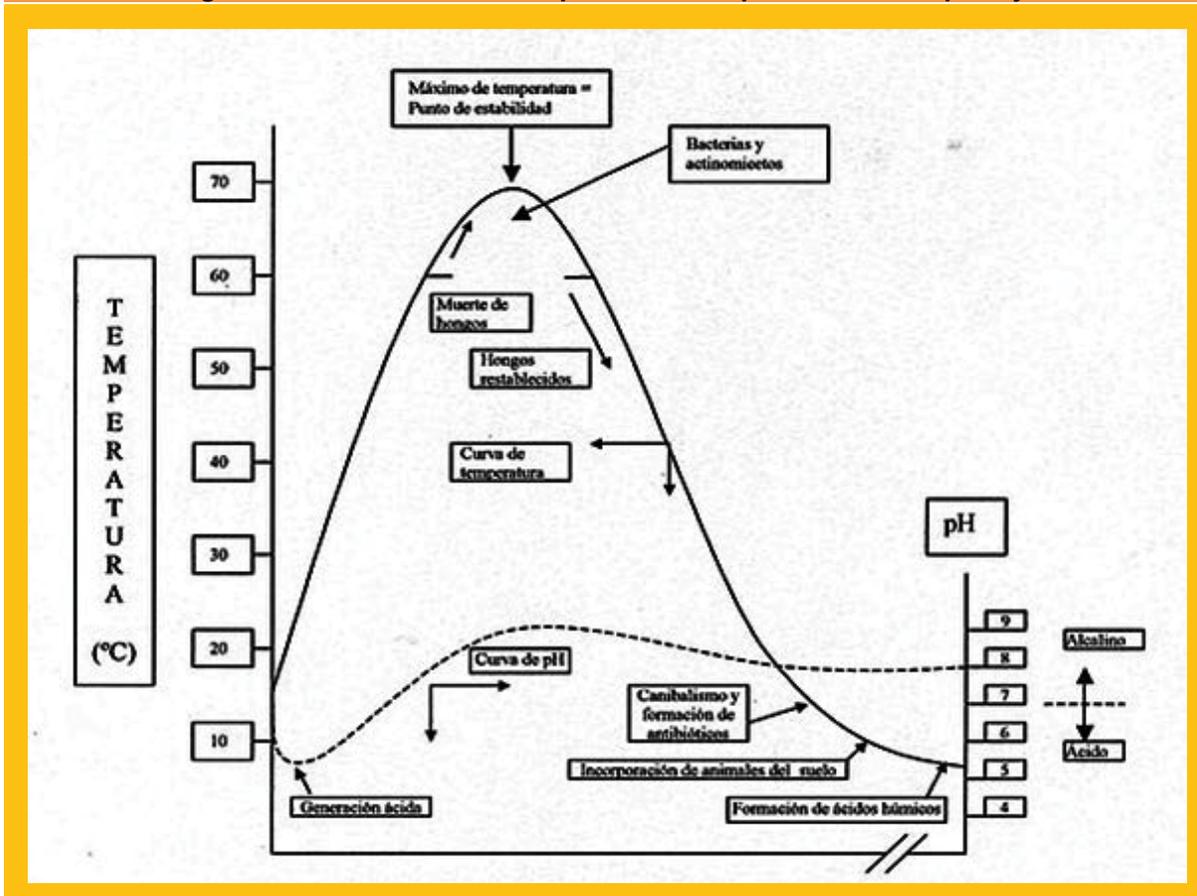
La figura siguiente presenta en forma gráfica lo descrito anteriormente:



3.3.5 Temperatura

Para que los microorganismos puedan transformar la materia orgánica en compost, necesitan de un ambiente cálido. La temperatura es el resultado de la adecuada humedad, aireación y actividad microbiológica. La temperatura ideal es de 50-55°C en las primeras semanas del proceso de descomposición; posteriormente, en la etapa de maduración la temperatura ideal es de 45-50°C, bajando a 30-35°C en el producto final. Durante la etapa de descomposición debe garantizarse la higienización de la mezcla, bajo la cual se produce la muerte de microorganismos dañinos y las semillas de plantas esporádicas; este se da manteniendo la mezcla unas horas a 60°C o unos días a 55°C. Temperaturas superiores a 70°C inhiben la actividad microbiana por lo que es importante la aireación del compost para disminuir la temperatura y evitar la muerte de los microorganismos benéficos. Durante estos cambios de temperatura las poblaciones bacterianas se van sucediendo unas a otras. Este ciclo se mantiene hasta el agotamiento de nutrientes, disminuyendo los microorganismos y la temperatura. La figura siguiente presenta en forma gráfica lo descrito anteriormente.

Figura 3.2: Variación de la temperatura en el proceso de compostaje

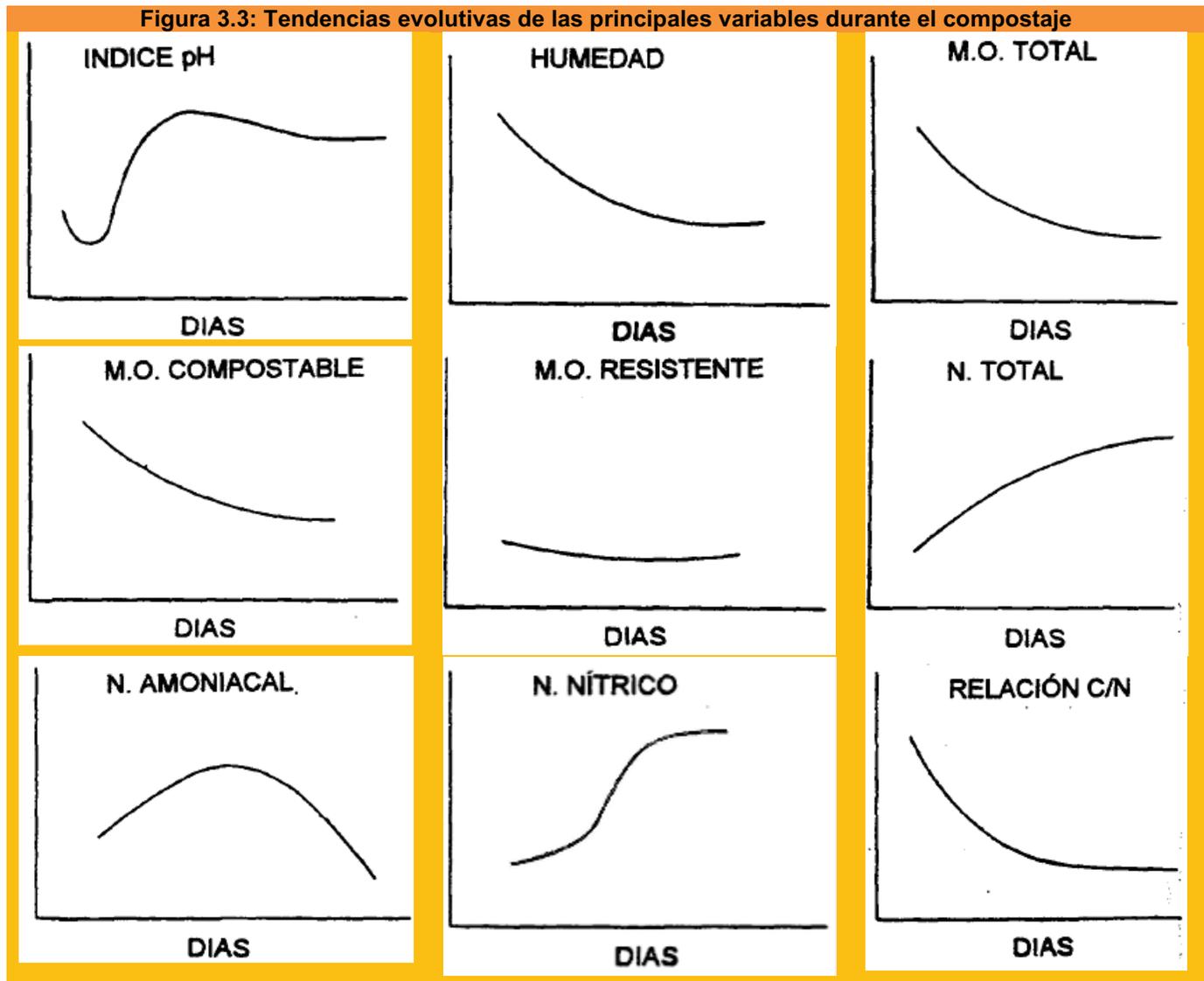


Fuente: Abarrataldea, Manual Práctico y Técnicas de Compostaje, Abarrataldea, 2005

3.3.6 PH (Potencial de Hidrógeno)

Es una medida que indica cómo avanza el proceso; en un inicio su descenso hasta 6,5 indica un proceso normal. Conforme el tiempo transcurre se estabiliza el valor entre 7 y 8, lo que permite la descomposición y la maduración. Un valor superior a 8 provoca pérdidas de nitrógeno en forma de amoníaco.

La figura siguiente presenta las variaciones típicas en los valores de pH, humedad, materia orgánica, nitrógeno, relación C/N y otros parámetros de control:



M.O.- Materia Orgánica; N-Nitrógeno.

3.3.7 Estructura y Homogenización de los Residuos Sólidos

Las claves más importantes del proceso pasan por que la mezcla esté suficientemente estructurada para disponer de la porosidad suficiente, así como que la mezcla sea homogénea.

En el caso de compostaje de residuos orgánicos domiciliarios o de mercados, el material estructurante que le dará al residuo la porosidad suficiente será la materia vegetal (poda) triturada o astilla de madera no tratada.

Las alternativas para el triturado de materiales vegetales leñosos y de gran tamaño, es la utilización de trituradoras o chipeadoras.

La homogenización de los residuos es fundamental para garantizar la porosidad requerida y para que el proceso aerobio se genere de igual forma en toda la masa. La homogenización, que supone la

mezcla de los diferentes residuos a compostar, se puede efectuar de forma manual, con palas cargadoras o con equipos diseñados para tal fin. Los equipos de homogenización, que pueden ser sencillos suponen además de alguna forma una reducción del tamaño de los residuos orgánicos blandos lo que ayuda posteriormente a la velocidad del proceso.

El tamaño indicado de los residuos secos o materiales vegetales a triturar debe ser de 20 mm a 10 mm, un diámetro mayor retardará el tiempo de compostaje; por otro lado, triturar en tamaños menores a los citados, no es aconsejable, ya que la acumulación de materiales con estos diámetros tienden a compactarse en los asentamientos, con lo que disminuye en forma importante la capacidad de intercambio gaseoso.

3.3.8 Condiciones climáticas

Las condiciones climáticas también influyen de manera directa en el proceso de compostaje, como la temperatura, el viento y la lluvia, fundamentalmente cuando este proceso se realiza a la intemperie.

El viento fuerte tiene doble efecto sobre el proceso; baja la temperatura y aumenta la evaporación, y consecuentemente el secado del material. La lluvia no tiene un efecto importante en el proceso siempre y cuando las pilas sean confirmadas en forma piramidal para permitir que el agua escurra por la superficie y el terreno tenga un drenaje y pendiente apropiados (pendiente de 2 a 3%). Si las lluvias son muy densas acompañadas de fuertes vientos logran penetrar de 30 a 40 cm en el material, pero este efecto adverso se vence por medio de las vueltas sucesivas. Sin embargo no se considera conveniente efectuar el volteo en un momento de lluvia por que el material se humedecerá demasiado, y afectará la aireación.

La temperatura exterior muy baja, puede enlentecer un poco el proceso en la fase de inicio; de todas formas, es importante destacar que los microorganismos dentro de los residuos orgánicos generan calor suficiente para alcanzar las condiciones de temperatura ideales independientemente de la temperatura exterior.

En el siguiente cuadro se presenta un resumen de las condiciones más adecuadas para la obtención del compost.

Cuadro 3.2: Condiciones de parámetros referenciales para el proceso de compostaje			
Parámetro	Valor inicial	Proceso	Producto Final
Humedad	60-65%	50-55% en descomposición	30-35%
Temperatura	-	40-45% en maduración 50-55°C en descomposición*	Menor a 35°C
Porosidad	25%-35%		
Relación C:N	30:1 - 35:1	-	10:1 - 12:1
N final **	-	-	2,2-2,7%
P final **	-	-	1%

*Se debe garantizar temperaturas para higienización; unas horas a 60°C o unos días a 55°C.

*Temperaturas de 60 -65°C no serán limitantes pero el proceso será un poco más lento.

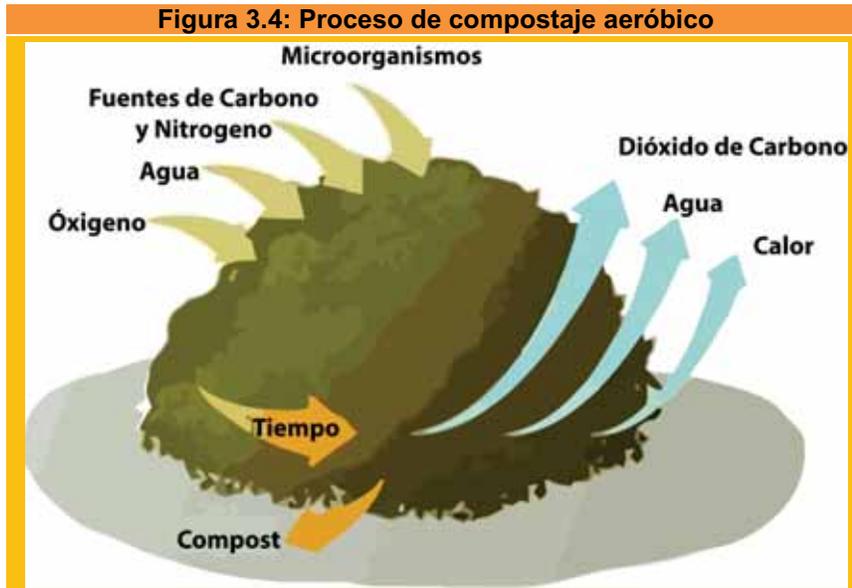
**De compostaje de residuos domiciliarios y mercados.

Fuente: Agencia de Residuos de Cataluña

3.4 Proceso biológico del Compostaje

En el proceso de compostaje, la materia orgánica es degradada con ayuda del aire (que proporciona oxígeno) y los microorganismos, en dióxido de carbono y agua mientras se libera energía en forma de calor, como se muestra en la figura siguiente.

Los microorganismos usan las fuentes de carbono, como son los residuos vegetales o secos (hojas secas, poda, astilla, etc) para su energía y las fuentes de nitrógeno como son los residuos frescos (verduras, frutas, etc) para su crecimiento.



Fuente: Agencia de Residuos de Cataluña



3.4.1 Fases del proceso de compostaje

Una vez se haya realizado la mezcla de una cantidad suficiente de restos orgánicos frescos (de cocina, de mercados, etc.) con los restos vegetales secos (poda triturada, hojarasca seca, etc.), iniciará la transformación o el proceso de compostaje propiamente dicho, que consta de dos fases bien diferenciadas que son:

- ♻️ La fase de descomposición,
- ♻️ La fase de maduración.

3.4.1.1 La fase de descomposición

Denominada también fase de fermentación. Esta fase es la más reactiva y es en la que se pueden observar con más claridad los cambios a los que son sometidos los residuos orgánicos y restos vegetales. En esta fase, los microorganismos y otros descomponedores actúan rompiendo los enlaces de las moléculas de los restos orgánicos; esta rotura de los enlaces y formación de compuestos más simples libera energía, provocando un aumento de temperatura, además consume mucho oxígeno. De hecho, se consumen los componentes más biodegradables, mientras que los biopolímeros más complejos, como la celulosa y la lignina se transforma parcialmente.

Desde un punto de vista microbiológico durante esta fase se producen dos etapas:

- 1) **Etapa de latencia y crecimiento:** Es el período de aclimatación de los microorganismos a su nuevo medio y el inicio de la multiplicación y de la colonización de los residuos. El proceso es iniciado por bacterias mesófilas que trabajan a temperatura aproximada de 45-50°C; se degradan los compuestos más

biodegradables y dura unos 2-4 días. Como resultado de este proceso se comienza a calentar la masa de residuo orgánico. Los organismos liberan ácidos lo que supone una disminución del pH en el medio.

- 2) **Etapa termófila:** Como consecuencia de la intensa actividad de las bacterias y el aumento de la temperatura en la pila de residuos, aparecen organismos termófilos (bacterias y hongos) que actúan a temperaturas mayores (entre 50 y 60° C), produciendo una rápida degradación de la materia. La temperatura alcanzada durante esta fase del proceso garantiza la higienización y eliminación de gérmenes patógenos, larvas y semillas. Pasado este tiempo disminuye la actividad biológica y se estabiliza el medio.

Durante la fase de descomposición la pila o hilera se incrementa la temperatura y cuando se mezcla desprende vapor de agua y calor.

Al finalizar esta fase, el volumen de la pila o montón ha disminuido de forma considerable. Dependiendo del proceso utilizado y de varios otros factores, esta fase del proceso puede durar entre 5 a 8 semanas.

Durante esta fase, se debe controlar cuidadosamente las condiciones de trabajo para evitar:

- ✓ temperaturas excesivas,
- ✓ secado del material,
- ✓ condiciones anaerobias
- ✓ pérdidas innecesarias de NH₃, lo que provocaría pérdida de nutrientes y cierto impacto ambiental.

En esta etapa se debe garantizar la higienización del material. El control de la temperatura y el tiempo (en el que el material está sometido a esta temperatura) suele determinar si se han conseguido las condiciones de higienización. Normalmente se considera necesario mantener el material durante unas horas a 60°C o durante unos días a 55°C.

3.4.1.2 Fase de maduración

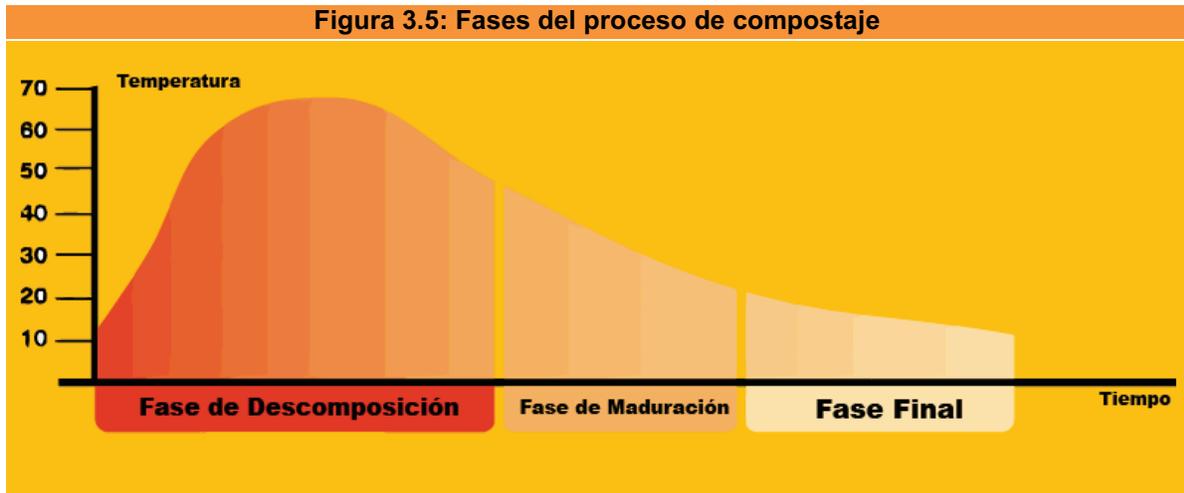
Se considera que esta fase comienza cuando la materia orgánica está prácticamente toda descompuesta, la temperatura sigue descendiendo hasta llegar a temperatura ambiente, el pH tiende a la neutralidad, se genera la estabilización de la materia orgánica (relación C/N) y finalmente, la humificación en la cual la relación C/N puede bajar a niveles inferiores a 12.

Al terminar la maduración, la materia orgánica inicial se ha transformado en un producto estable en el que ya no se reconocen los materiales orgánicos que se habían aportado al comenzar. Para que la maduración sea completa se debe esperar al menos un mes, de esta manera se asegura que los descomponedores han abandonado la pila de compost por ausencia de alimento.

Esta fase acaba conformando las características finales del producto final o compost y el objetivo principal es la estabilización del producto, puede durar entre 2 y 3 meses más. Es importante no usar el compost cuando aún no está maduro.

En función del método de compostaje que se utilice, puede ser que las fases mencionadas, no se cumplan en la totalidad de la masa en compostaje, por lo que es necesario, remover las pilas de material en proceso, de forma tal que el material que se presenta en la superficie, pase a formar parte del centro. Estas remociones y reconfiguraciones de las pilas se realizan en momentos puntuales del proceso, y permiten además airear el material, lo que provoca que la secuencia de las fases descritas se presente por lo general más de una vez.

Como se ha visto, la actividad microbiana genera calor, lo que se manifiesta con el incremento de la temperatura. Controlar la temperatura permite identificar en qué fase está el proceso de compostaje.



Fuente: Agencia de Residuos de Cataluña

Figura 3.6: Cambio del aspecto de los residuos conforme avanza el proceso de compostaje



Fuente: Agencia de Residuos de Cataluña

Capítulo IV: Compostaje Domiciliario y/o Comunitario

COMPOSTAJE DOMICILIARIO y/o COMUNITARIO

El compostaje domiciliario o autocompostaje es el aprovechamiento de los residuos orgánicos mediante compostaje en las propias casas. A través de este sistema, se aprovecha de manera los residuos de cocina y el jardín, para producir un abono natural que se puede aplicar en las plantas, en el jardín o en el huerto. Una variante del compostaje domiciliario es el compostaje comunitario, realizado de forma colectiva en espacios libres o en jardines comunitarios de un conjunto de viviendas, en espacios públicos, en escuelas, etc

Con el compostaje domiciliario se devuelve al suelo los nutrientes y se cierra el ciclo de la materia orgánica. Al hacerlo en el propio hogar, se simplifica el ciclo, ya que el compost se produce en el mismo lugar donde se generan los residuos sólidos orgánicos, con lo cual se contribuye a disminuir los problemas asociados a la disposición final de estos residuos como los lixiviados y gases de efecto invernadero.

De hecho, desde hace mucho tiempo, el compostaje se realiza principalmente en el campo, donde los agricultores producen su propio compost mezclando el estiércol del ganado y los restos de la cosecha, de esta manera se obtiene fertilizante orgánico para aplicar en los campos.

Una variante del compostaje domiciliario es el compostaje comunitario, realizado de forma colectiva en espacios libres o en jardines comunitarios de un conjunto de viviendas, en espacios públicos, en escuelas, etc



Fuente: Agencia de Residuos de Cataluña

4.1 Por qué hacer compostaje domiciliario y/o comunitario

El compostaje domiciliario y/o comunitario tiene similares beneficios tanto para el (la) propio (a) ciudadano (a) que se decide realizar la práctica de compostaje en su hogar, como en su comunidad con la participación de los vecinos. Estos son:

a) Beneficios económicos

- ♻️ Los residuos son compostados en el propio hogar y no son entregados al servicio recolector, por lo que supone un ahorro económico para el municipio.

- ♻ De acuerdo a la composición de los residuos que se generan, mas de la mitad de los residuos domiciliarios son de tipo orgánico, los ahorros en la recolección, tratamiento y disposición final pueden ser importantes; en efecto, los camiones recolectores pueden incrementar su capacidad de recolección en una misma ruta.
- ♻ Se obtiene abono orgánico en el propio hogar a ser usado en el jardín y se evita comprar tierra vegetal obtenida de los bosques, evitando así la erosión de los mismos.

b) Beneficios ambientales

- ♻ Reduce la presión para encontrar un nuevo sitio adecuado para la disposición final debido a que alarga su vida útil, así mismo, disminuye posibles fuentes de conflictos debido a intereses distintos en los usos futuros del suelo.
- ♻ Los residuos sólidos orgánicos son los principales generadores de lixiviados cuando estos son dispuestos en el relleno sanitario. La mezcla de estos residuos con residuos peligrosos, (baterías, químicos) puede generar lixiviados muy tóxicos, incrementando aún más el impacto ambiental hacia el agua, suelo y aire.
- ♻ El compostaje permite aportar nutrientes y proporcionar estructura al suelo, mejorando sus características (calidad, permeabilidad, retención, etc.).

c) Beneficios sociales

- ♻ Ayuda a mejorar la imagen de la municipalidad, puesto que los problemas ambientales tienen una gran importancia desde la perspectiva pública.
- ♻ Ofrece a la población una oportunidad de participar en una actividad de protección ambiental.
- ♻ Es una gran herramienta de educación ambiental y participación ciudadana. Permite visualizar la responsabilidad individual sobre los residuos y permite participar en la solución de una problemática importante. También fomenta la participación ciudadana, a través de experiencias comunitarias que favorecen las relaciones sociales, resaltando valores de responsabilidad, respeto y trabajo en equipo.

4.2 Tipos de residuos apropiados para el compostaje domiciliario y/o comunitario

Para el compostaje domiciliario, se pueden utilizar los residuos de la cocina y los residuos del jardín como hojas o restos de poda. La mezcla de éstos residuos es necesaria puesto que de ésta depende la porosidad de la mezcla necesaria para el proceso así como, la calidad del compost final como la relación carbono y nitrógeno.

El carbono abunda en las partes leñosas de las plantas, como la paja, serrín, ramas etc, és decir, en el material más seco, y el nitrógeno predomina en las partes verdes de las plantas, restos de frutas, césped verde etc. es decir, en los restos que contienen más humedad.

Para obtener un buen compost lo mejor es utilizar una gran variedad de materiales, el siguiente cuadro se listan los materiales que se pueden utilizar:

Los residuos que pueden ser usados en el proceso de compostaje domiciliario o comunitario:

- ♻ Residuos de Rápida Descomposición: hojas frescas; restos de césped; estiércol de animales de corral (gallinas) ; hierbas tiernas.
- ♻ Residuos con Descomposición Lenta: pedazos de frutas y verduras; bolsas de te y pozos de café; paja y heno viejo; restos de plantas; estiércol de animales de granja (caballos, burros y

vacas); flores viejas y plantas de macetas.

- ♻️ Residuos con Descomposición Muy Lenta: hojas de otoño; ramas podadas; serrín y virutas de madera no tratada; cáscaras de huevo; cáscaras de frutos secos; lanas e hilos naturales; pelos y plumas



Fuente: MMAyA/VAPSB/DGGIRS, Cartilla Compostaje Domiciliario y Lombricultura/ 2011

4.3 Residuos que no deben ser compostados

Por otro lado, existen residuos sólidos que no pueden ser compostados, porque no son compostable o porque contienen algún elemento tóxico y podrían contaminar el compost final:

- ♻️ Aserrín de madera tratada con químicos o aglomerados.
- ♻️ Residuos plásticos, metales, vidrios, papel con tinta o impreso y otros residuos no biodegradables.
- ♻️ Cenizas de carbón
- ♻️ Pañales desechables
- ♻️ Revistas ilustradas
- ♻️ Detergentes o productos químicos como pintura
- ♻️ Restos de aspiradora

Hay residuos que son compostables pero en un compostador familiar pueden causar algún problema por lo que mejor *no* incluirlos:

- ♻️ Huesos, espinas y restos de carne: tardan más tiempo en descomponerse y por los olores podrían atraer a roedores e insectos.
- ♻️ Productos lácteos (quesos, yogurt, etc), por los olores podrían atraer a roedores e insectos.
- ♻️ Aceites y grasas, por los olores podrían atraer roedores e insectos
- ♻️ Hierba mala y malezas persistentes, si el proceso de compostaje no llega a las temperaturas deseadas podrían quedarse semillas de éstas hierbas en el compost final.
- ♻️ Plantas enfermas, si el proceso de compostaje no llega a las temperaturas deseadas, el compost final podría tener hongos o otras enfermedades.

4.4 Compostador domiciliario

Hacer compost domiciliario requiere de un espacio, ya sea en un patio, jardín o huerto. El área necesaria varía según la cantidad de residuos biodegradables que se pretenda compostar; el espacio mínimo es un metro cuadrado. Idealmente, el lugar adoptado debe ser protegido de los elementos naturales, por ejemplo la excesiva exposición al sol o al viento puede secar el compost y, por otro lado, el viento y el frío pueden disminuir severamente la temperatura. También la lluvia excesiva puede influir negativamente en el proceso de compostaje.

El compostaje doméstico puede realizarse principalmente de dos maneras: en pila o en un compostador. La elección del sistema de compostaje depende del volumen a compostar, la disponibilidad de espacio y fundamentalmente de la predisposición de la población.

Un compostador es un recipiente construido con material casero para elaborar compost, dentro del cual se acumulan los residuos orgánicos. Existen diferentes formas de construir los compostadores ya sea empleando madera, ladrillos, malla de acero o bien utilizando tambores o barriles de plástico. Las dimensiones del compostador dependen básicamente de la cantidad de residuos orgánicos generados.

El compostador debe ser colocado sobre la tierra, y no sobre cemento, asfalto o pavimento, para permitir a los microorganismos responsables de la biodegradación presentes en el suelo, la colonización del recipiente. Los resultados son mejores si se dispone sobre una capa de ramas gruesas, para permitir la entrada de aire y de la protección del sol y la lluvia.

Existen experiencias locales en los municipios de Vinto y Tiquipaya, donde se ha implementado compostadores domiciliarios tipo cilíndricos construidos con malla de acero. Este tipo de compostadores, permite controlar principalmente la temperatura, humedad y aireación. Por otro lado, se protege de los animales (roedores, perros, etc.) evitando el contacto con el material que se está compostando. La figura siguiente muestra un compostador de este tipo.



Otras variantes de los compostadores son los construidos de mallas de gallinero o de tablillas de madera como se muestran en las figuras siguientes:

Figura 4.4: Compostador domiciliario de malla gallinera



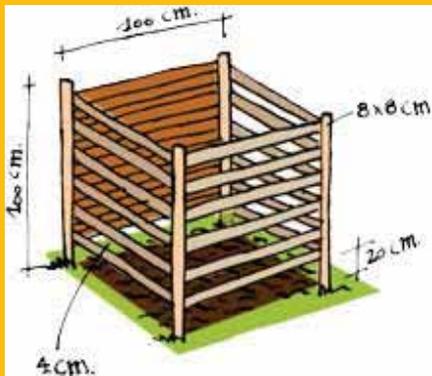
Materiales:

Malla Gallinera
4 postes o listones de sujeción
Lona (recubrimiento)
Alambre de Amarre

Dimensiones:

Largo: 1 m
Ancho: 1 m

Figura 4.5: Compostador domiciliario de tabillas de madera



Materiales:

Tabillas de madera
4 postes o listones de sujeción
Clavos de 1 1/2"

Dimensiones:

Largo: 1 m
Ancho: 1 m
Espacio entre tabillas 0,4 m
Base 0,2m

Fuente: CESTA, Manual para hacer Composta Aereóbica

Figura 4.6: Otros ejemplos de compostadores domiciliarios

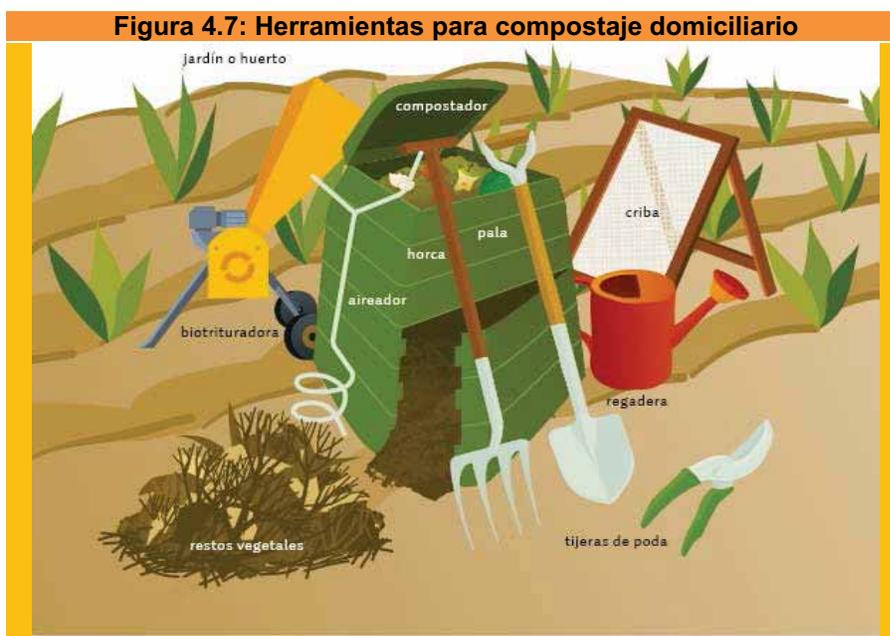


Fuente: Agencia de Residuos de Cataluña

4.4.1 Herramientas necesarias

Las herramientas a emplear durante el proceso de compostaje son:

- ♻️ Trinche o removedor, para mover y airear los materiales
- ♻️ Tijeras de podar, hacha o incluso trituradora de jardín, para trocear los materiales leñosos en piezas menores a 5 cm.
- ♻️ Regadera o manguera de agua para humedecer los residuos cuando lo requieran
- ♻️ Pala, para recoger el compost ya elaborado
- ♻️ Tamiz, para separar la parte compostada de los fragmentos leñosos todavía presentes.



Fuente: Agencia de Residuos de Cataluña

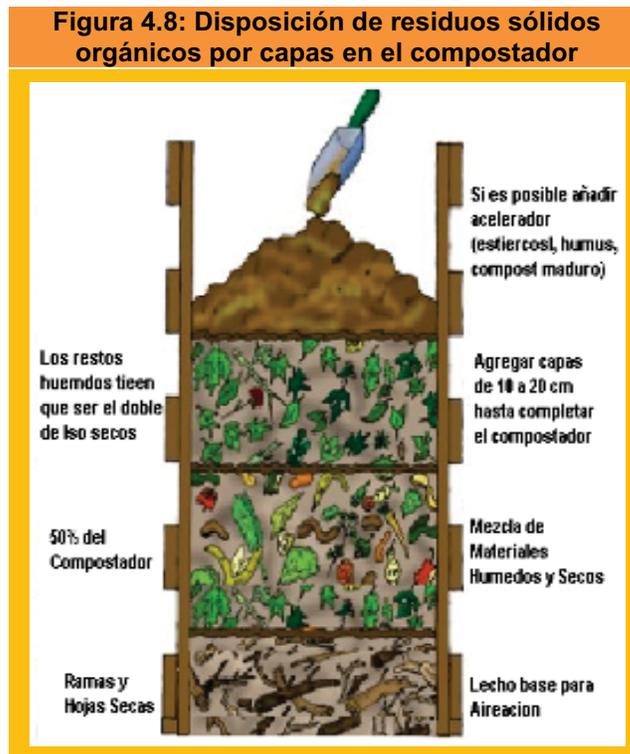
4.4.2 Proceso de compostaje domiciliario

La selección y el almacenamiento de residuos deben realizarse de forma diaria. Para facilitar la recolección de residuos, se aconseja disponer de un recipiente pequeño en la cocina (que es la fuente de producción de residuos más importante), en el cual se almacenarán los residuos conforme se van generando. De esta manera, no será necesario ir al compostador para colocar los residuos cada vez que éstos sean generados.

Los pasos para realizar el compostaje domiciliario son:

- ♻️ **Encontrar un Espacio Adecuado:** El compostador debe estar en contacto directo con el suelo, en un lugar protegido del sol y la lluvia.
- ♻️ **Preparar el Lecho Base:** Empezar colocando un lecho de material leñoso grueso para facilitar la circulación del aire.
- ♻️ **Mezclar Siempre Restos Húmedos y Restos Secos:** Los restos húmedos (fruta, verdura, césped, herbáceas, etc.) son materiales húmedos con un alto contenido de nitrógeno. Los restos secos (hojas secas, paja, ramas trituradas, etc.) absorben el exceso de humedad y aportan mayor proporción de carbono.

En la siguiente figura se esquematiza la forma de para disponer los residuos por capas en el compostador:



- 🌱 **Incorporar Regularmente Residuos:** Residuos secos y húmedos mezclados en proporciones de 10cm de secos y 20 cm de húmedos. Siempre el aporte de materiales húmedos ha de ser el doble que de materiales secos.

Es conveniente remover en cada aportación el material nuevo con el aporte anterior, para evitar la proliferación de moscas en la parte de arriba, especialmente en verano.

- 🌱 **Opcional para Acelerar el Proceso:** Si es posible, añadir a la masa de cuando en cuando un acelerador natural, esencialmente compost maduro, tierra de huerto o estiércol.
- 🌱 **Voltear a Menudo:** El volteo aporta el oxígeno necesario para la supervivencia de los microorganismos aeróbicos, la homogeneización del material y la distribución de la humedad. Se puede realizar con una horqueta (trinche), un aireador o cualquier herramienta que nos sea cómoda. Conviene voltear una vez por semana para evitar la compactación de la mezcla. También es necesario remover siempre que se deposite una cantidad significativa de restos orgánicos.
- 🌱 **Controlar la Humedad y Regar en caso Necesario:** Añadir agua cuando sea necesario. Si la mezcla está muy seca no existe actividad microbiana, si está muy húmeda creará condiciones anaerobias generándose olores desagradables.
- 🌱 **Recoger el Compost cuando este Maduro y cribarlo :** El primer compost maduro se obtiene al cabo de 3 a 6 meses. Puede ser necesario tamizar o cribar el compost madura si este presenta materiales muy gruesos.

Para garantizar que el proceso inicia de manera adecuada, hay que garantizar una cantidad mínima de material o residuos a ser compostados; es decir, la pila debe tener un volúmen mínimo de forma que la temperatura se pueda mantener en el interior de ésta y los microorganismos puedan trabajar. Los volumenes pequeños no logran mantener las condiciones de temperatura y el proceso se para y

se da de forma mucho más lenta.

4.4.3 Control de parámetros

Los parámetros que se deben controlar para obtener un compost de calidad son:

- i) **Humedad:** Para medir la humedad, coloque en la mano un puñado del material que se encuentra hacia el centro de la pila y apriete. La humedad es adecuada si es posible formar una circunferencia del material sin que este gotee, y que tenga la textura de una esponja húmeda. Si está muy mojada la mezcla, agregue un poco de material café. Si está seca, puede agregar agua o material verde.
- ii) **Temperatura:** Dependiendo de los materiales y la frecuencia del mezclado, la temperatura aumentará por acción de los microorganismos. Esta temperatura puede percibirse con la mano o con ayuda de un termómetro de varilla. Cuando la temperatura se eleva sobre los 50° C, se acelera el proceso y se higieniza el futuro compost, eliminando patógenos y semillas. Cada vez que se mezcle habrá un descenso de la temperatura, pero esta volverá a subir en cuanto la pila se re-estabilice. Si el volteo se hace más de dos veces a la semana, es posible que no se alcance la temperatura necesaria para el proceso. Un indicador de que el compost está casi listo, es el descenso de la temperatura, sin importar la frecuencia de volteo.
- iii) **Organismos:** Si el compostador se encuentra directamente sobre el suelo, los organismos se mudarán hacia la mezcla sin ayuda y en el momento que sea necesario. Compostar directamente sobre el suelo favorece el proceso y beneficia el suelo, si no se hace a gran escala.
- iv) **Clima:** La lluvia y frío en exceso afectan el proceso. No se debe aislar el compostador del ambiente porque también necesita el calor del sol y oxígeno del aire fresco; sin embargo, hay que protegerlo. La mejor época para iniciar un compostaje doméstico es en primavera o verano. Durante las épocas frías, la velocidad del proceso disminuirá naturalmente, y volverá a acelerarse cuando regrese el calor.

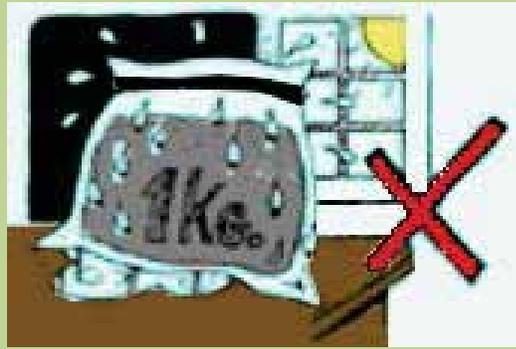
4.4.4 Maduración y cosecha del compost

La duración exacta del proceso de compostaje depende de muchos factores, y por eso es difícil medirla con precisión. Las condiciones climáticas, la frecuencia del mezclado, así como el tipo de materiales incorporados, influyen en la duración del proceso. Un indicador de que el proceso está por finalizar es el descenso de la temperatura y su estabilización casi a la temperatura ambiente, en este momento comienza la fase de maduración. Esta fase puede durar hasta la misma cantidad de tiempo que se llevó la primera y también depende de muchos factores. Si la mezcla ha sido invadida por lombrices de tierra, el producto final es mejor y el tiempo de maduración mayor. La maduración puede realizarse dentro del compostador o en bien, puede retirarse el compost de esta y depositarla en el suelo o en una trinchera. No es recomendable mezclar la composta inmadura con el suelo o adicionarlo a las plantas, ya que podría dañarlos. Al principio, puede parecer difícil saber cuándo está maduro el compost y listo para usarse.

A continuación se presenta una serie de opciones para identificar si el compost está maduro:

Prueba de la Bolsa

Coloque aproximadamente 1 kilo de compost en una bolsa transparente, ciérrela y colóquela en un lugar alejado del sol directo, a temperatura ambiente. Si después de 24 horas la bolsa ha "transpirado", es porque aún no se encuentra madura.



♻️ Prueba de la Humedad (Test del puño)

La muestra de compost se coge del centro de la pila con la mano y se presiona cerrando el puño. Si gotea (transpira líquido por los poros), la muestra está demasiado húmeda. Si al abrir la mano de la muestra se deshace, está demasiado seca. Si no se da ninguno de los casos, el material tiene la humedad adecuada.



Opcionalmente se puede cernir o tamizar el compost con el fin de eliminar algunos restos que se degraden muy lentamente (como huesos, ramas, etc.). El cribado del material depende mucho del uso que se vaya a dar al compost. Se recomienda que el tamiz tenga 10 mm de abertura. Los materiales rechazados durante el cribado dentro del proceso pueden ser reincorporados en un nuevo proceso de compostaje.

Si es grande la cantidad de compost, o la estación del año no permite utilizarla inmediatamente, se puede almacenar en sacos de 5 a 50 kg. Un compost maduro puede almacenarse durante varios meses, incluso años, sin que se altere su composición y estructura. El almacenaje tiene que hacerse de forma tal que las semillas "viajeras" no puedan germinar en él. Si se va almacenar durante largo tiempo o a transportar, es recomendable secarlo al sol colocándolo sobre el piso. De ser posible, colocar una base negra para que los rayos del sol se absorban más eficientemente y el secado sea en menor tiempo. El compost se distribuye sobre la superficie en una delgada capa con ayuda de un rastrillo o escoba en un día soleado y sin riesgo de lluvia.

Cuadro 4.1: Principales indicadores que determinan la "madurez" del compost domiciliario

Factor	Compost Inmaduro	Compost Maduro
Color	Café no oscuro	Café oscuro
Olor	Medianamente pronunciado	Sin olor fuerte
Composición	Hay lombrices. Aún hay partes identificables del material orgánico original	No hay lombrices. El material orgánico no pudo ser identificado
Uso	Cobertura para jardines, arbustos y árboles perennes	Incorporado a la tierra sin restricciones
Cantidad	Poca cantidad (puede dañar el suelo o las plantas)	No hay riesgo, realizar varias aplicaciones

Fuente: MMAyA/VAPSB/DGGIRS./Cartilla Compostaje Domiciliario y Lombricultura, 2011 / Agencia de Residuos de Cataluña

4.4.5 Activadores

Los activadores o catalizadores como el estiércol de vaca, suministran una fuente de nutrición para acelerar la reproducción de microorganismos y por consiguiente la descomposición de la materia, son útiles particularmente donde hay materiales con alto contenido de carbono. Si se necesita se puede agregar un poco del compost ya producido a la pila para introducir más micro organismos que compostan a los materiales de residuos y acelerar el arranque del proceso

No se necesitan activadores comerciales si se garantiza que la mezcla a compostar tiene la relación correcta de Carbono/Nitrógeno. De hecho, es improbable que un activador basado en bacterias comerciales se adapte mejor a descomponer los desechos que las bacterias ya presentes. Algunos activadores se venden sobre la base que tienen hormonas o enzimas para acelerar el proceso de compostaje, pero no hay evidencia de esto en la literatura.

En relación al pH, a menos que los materiales originales sean demasiado ácidos como restos de fruta, o que tengan gran cantidad de carbohidratos fácilmente degradables, el compost final terminará con un pH cercano a neutro.

4.4.6 Solución de problemas

En el siguiente cuadro se presenta un listado de los problemas más comunes, su causa más probable y su solución.

Cuadro 4.2: Solución de problemas comunes en el compostaje domiciliario		
Problema	Causa	Solución
La mezcla está fría y seca	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Hay poco material compostando. ✓ Hay exceso de restos secos; faltan residuos verdes. ✓ Volteamos muy a menudo 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Aumentar el tamaño de la pila de residuos ✓ Añadir restos verdes o regar ✓ Reducir la frecuencia de volteo ✓ protegerla con plástico perforado para guardar el calor ✓ tapar o aislar la pila
La mezcla está muy húmeda	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Hay exceso de restos húmedos. ✓ La mezcla se ha mojado por la lluvia o se ha regado demasiado 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Añadir restos secos y mezclar
La mezcla desprende malos olores	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Falta de oxígeno. ✓ Exceso de humedad. ✓ Exceso de residuos húmedos (nitrógeno) 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Añadir restos secos y remover
Presencia de moscas pequeñas de la fruta	<ul style="list-style-type: none"> ✓ La mezcla no está bien hecha y existen restos frescos en la superficie. ✓ Hay exceso de restos húmedos. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Voltear la mezcla para que los restos frescos no queden en la superficie ✓ Cubrir el compostador con tierra o con hojas
Temperatura baja	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Demasiados residuos verdes (nitrógeno) ✓ Pila demasiado pequeña ✓ Humedad insuficiente ✓ Insuficiente aeración 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Añadir residuos cafés ✓ Aumentar el tamaño de la pila; tapar o aislar la pila ✓ Añadir agua durante el mezclado; cubrir el compostador para evitar que se pierda la humedad

Cuadro 4.2: Solución de problemas comunes en el compostaje domiciliario		
Problema	Causa	Solución
	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Falta de residuos verdes ✓ Tiempo frío 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Voltear/mezclar; agregar trozos de material de tamaños diferentes ✓ Añadir residuos verdes ✓ Aumentar el tamaño de la pila; protegerla con plástico perforado para guardar el calor
Aparición de Moho o manchas blancas	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Hay crecimiento de hongos. ✓ Hay actividad microbiana 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ No preocuparse; es buena señal

Fuente: Agencia de Residuos de Cataluña

4.4.7 Usos del compost

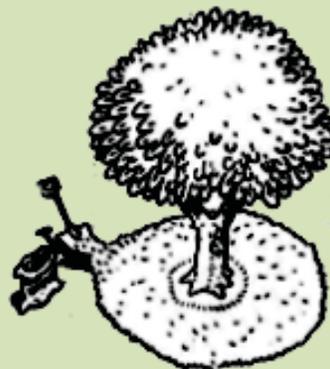
El compost puede ser usado como abono orgánico en plantas, huertos y jardines. A continuación se presenta una lista de posibles usos del compost, así como sus dosis aproximadas.

En el siguiente cuadro se muestra algunos ejemplos para los diferentes usos del compost:

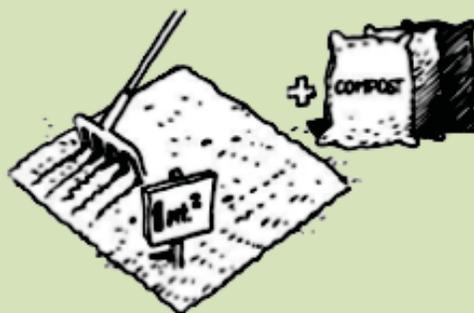
Cuadro 4.3: Diferentes usos del compost	
<p>Almácigos: Una parte de compost por una de tierra o arena.</p>	<p>El diagrama muestra un almácigo con seis compartimentos. A la derecha, una ecuación visual indica: un saco etiquetado como 'COMPOST' más un signo de suma (+) más un saco etiquetado como 'ARENA o TIERRA'.</p>
<p>Macetas: Mezclar una parte de compost por tres de tierra. (Capa de 2 cm de compost)</p>	<p>El diagrama muestra una maceta con una planta. A la derecha, una ecuación visual indica: un saco etiquetado como 'COMPOST' más un signo de suma (+) más tres sacos etiquetados como 'TIERRA'.</p>
<p>Plantas y huertos: Incorporar a los primeros 5 cm del suelo, previamente desmalezado, en primavera.</p>	<p>El diagrama muestra un huerto con varias plantas. Una pala está aplicando compost desde un saco a la superficie del suelo.</p>

Cuadro 4.3: Diferentes usos del compost

Árboles: Aplicar una capa de hasta 5cm de espesor y que cubra desde 15 cm a partir del tronco y hasta un diámetro en suelo del total de su follaje.



Huertos: Incorporar de 2 a 3 kg de compost por cada metro cuadrado de suelo.



Fuente: Rodríguez Marcos, Córdova Ana, Manual de Compostaje Municipal, SEMARNAT, GTZ, INE, 2006

4.4.8 Compostaje Comunitario

Como se ha indicado, una variante del compostaje domiciliario es el compostaje comunitario que se organiza en jardines, plazas o otros recintos del barrio, de forma que sirven para compostar los restos secos de los espacios públicos y los restos de las cocinas de los vecinos del barrio. La gestión y seguimiento de estos compostadores comunitarios puede realizarse desde la propia municipalidad, desde la junta de vecinos, OTB's, grupos de vecinos comunitarios, etc. El compostaje comunitario también puede realizarse en escuelas.

Para hacer compost basta con apilar los residuos en cantidad suficiente y mezcla correspondiente para que se genere el proceso, ya sea en compostador o ya sea en pilas.

Puede ser interesante disponer de una trituradora pequeña para triturar los residuos vegetales y que el municipio puede adquirir para prestar o usar en los distintos puntos de compostaje comunitario del municipio. También se puede alquilar o prestar a las familias que realizan compostaje domiciliario.

Figura 4.9: Compostaje comunitario en pilas y en compostadores de malla



Fuente: Gobierno Municipal de Vinto, Proyecto de Aprovechamiento de Residuos Orgánicos/2012

Figura 4.10: Compostaje comunitario en compostadores y trituradora de material vegetal



Fuente: Agencia de Residuos de Cataluña

Capítulo V: Plantas de Compostaje

PLANTAS DE COMPOSTAJE

Los residuos sólidos orgánicos que no puedan ser aprovechados en la fuente de generación, prioritariamente deben tener como destino el aprovechamiento de los mismos, en este caso a través del compostaje municipal. Dicho proceso requiere la implementación de infraestructura, equipos, personal y sobre todo el apoyo tanto de las autoridades locales como la población en su conjunto.

Es importante resaltar que las plantas de compostaje municipal pueden ayudar con los gastos del servicio municipal de servicio de aseo si estas son planeadas y operadas aplicando criterios adecuados de eficiencia técnica, ambiental y económica.

5.1 Métodos de Compostaje

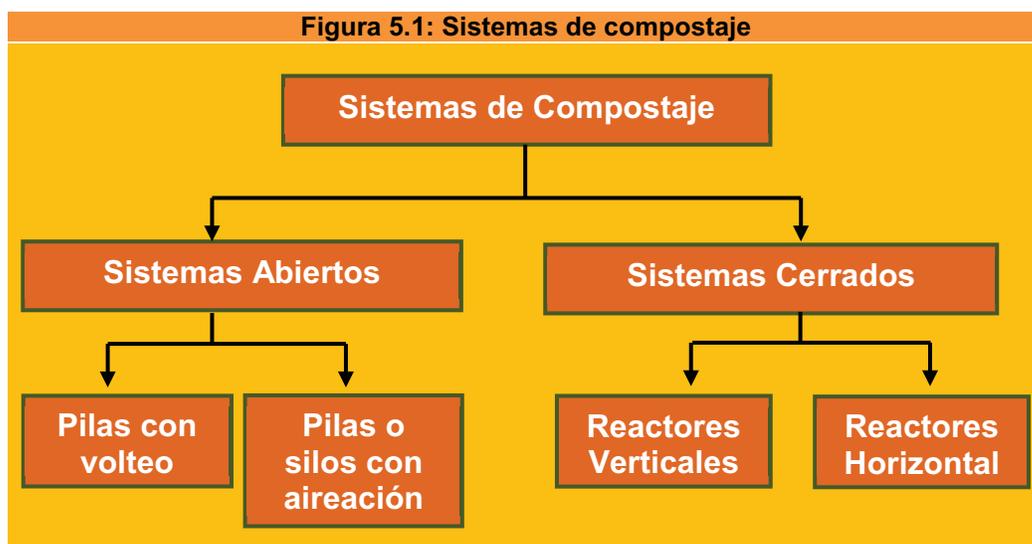
Para llevar a cabo el proceso de compostaje, existen diferentes métodos, todos ellos con la finalidad de controlar y optimizar los parámetros que intervienen en el compostaje, de forma de obtener un producto final con la suficiente calidad requerida para su utilización como abono orgánico.

Por lo general las diferencias de los métodos existentes, se presentan en la fase de descomposición del proceso de compostaje, el resto de etapas del proceso acostumbran a ser similares en un sistema u otro. Así, las etapas de pre-tratamiento como la recepción de materiales, mezcla o homogenización, la etapa de maduración, y la etapa de post-tratamiento de cribado, no difieren de un sistema a otro.

Lo importante para seleccionar el método adecuado, es evaluar primero las condiciones particulares de cada lugar.

Los métodos utilizados se pueden clasificar en dos grupos:

- ♻️ **Sistemas abiertos:** La etapa de descomposición se realiza en montones, pilas o hileras de forma abierta, en lugares abiertos o espacios con cubierta.
- ♻️ **Sistemas cerrados:** La etapa de descomposición se realiza dentro de reactores.



Aunque los procesos microbianos son los mismos para todos los procesos aeróbicos, cada planta es única y debe ser diseñada de acuerdo con sus propios parámetros de entrada y posibilidad económica. En el momento de diseñar una nueva planta, o hacer más eficaz una instalación vieja, varios factores deben ser teniendo en consideración. Algunos de estos factores son la capacidad de la planta, los tipos de residuos a tratar, la superficie disponible, el clima de la región, la disponibilidad de mano de obra, disponibilidad de equipos, datos demográficos y la ubicación de la planta.

5.1.1 Sistemas Abiertos

Los sistemas abiertos son los sistemas tradicionales de compostaje. Los residuos orgánicos a compostar se disponen en pilas o hileras de forma abierta o en infraestructuras cubiertas. La aireación de la masa se realiza de forma natural, por volteo (manual o mecánico) o mediante ventilación forzada. La altura de las pilas varía según las características del material y del equipo para la mezcla.

5.1.1.1 Compostaje en pilas con aireación por volteo

Los materiales se amontonan por capas sucesivas de diferentes materiales formando pilas o hileras. La forma que toma es similar a la de una sección triangular o trapezoidal. El montón de la pila, debe tener el suficiente volumen para conseguir un adecuado equilibrio entre la humedad y la aireación y debe estar en contacto directo con el suelo. Si las pilas son demasiado grandes, el oxígeno no podrá penetrar en el centro, mientras que si son demasiado pequeñas no se mantendrá la temperatura adecuada para el proceso.

Una vez conformada la pila, debe realizarse de forma periódica la mezcla de la masa conformada y la suficiente aireación, esto se puede lograr mediante el volteo que puede ser de forma manual o mecanizada en función de los volúmenes a compostar. Los volteos sirven para homogeneizar la mezcla y su temperatura, a fin de eliminar el excesivo calor, controlar la humedad, y sobre todo para incorporar oxígeno. Una vez volteada la pila, la ventilación se da por convección natural a través de los espacios que se generan, de forma que el aire caliente que sube desde el centro de la pila crea un vacío parcial que aspira el aire de los lados. La frecuencia de volteos depende del tipo de material, el tamaño del material, de la humedad y de la rapidez con la cual se desea realizar el proceso, es habitual realizar un volteo cada 6 - 10 días o incluso cada 20 días.

En plantas con una capacidad de producción menor a 2 Ton/día de residuos es recomendable realizar volteos manualmente, en este caso las pilas no deberán exceder de 1,5 m de altura y 6 m de largo de manera de facilitar los volteos. En plantas con una capacidad productiva mayor a 2 Ton/día, las dimensiones de la pila pueden alcanzar una altura mayor a 2 m y hasta 30 m de largo, para ello es recomendable contar con equipo mecánico para facilitar el traslado de material, la conformación de pilas, el volteo y el cribado.

En ambos casos (pila con volteo manual o mecánico) es recomendable que el ancho en su base sea de 2,5 a 3 m. Normalmente, el alto será la mitad de la base.

El proceso de compostaje, puede realizarse al aire libre o bajo infraestructuras cubiertas sin paredes. La existencia de cubiertas no es necesaria pero reducen la generación de lixiviado por contacto con la lluvia y según como pueden diseñarse de forma que permitan el recojo de agua de lluvia para reutilizar como agua de riego junto a los lixiviados para generar la humedad requerida en la pila.

Dependiendo las condiciones locales y el proceso de homogenizado, la duración del proceso de descomposición (Fase Termofílica) es de dos a tres meses, para pasar posteriormente al periodo de maduración, durante un mes. Aproximadamente todo el proceso dura entre tres a cuatro meses, sin embargo depende del material y los controles que se realicen.

Se ha usado con éxito para compostar estiércol, restos de poda, fangos y residuos sólidos orgánicos domiciliarios, los cuales ayudan a acortar el proceso de descomposición por la elevada cantidad de microorganismos que tienen.

Dependiendo el volumen, este tipo de sistema, requiere de mayor espacio y tiempo de descomposición que el sistema de pilas con ventilación forzada.

Por otro lado, en el caso de que el volteo sea mecanizado, es importante considerar el costo de la maquinaria y el combustible.

Figura 5.2: Conformación de Pilas



Recepción y picado de residuos orgánicos, Planta de compostaje, Tiquipaya

Conformación de pilas, Planta de compostaje, Santa Cruz

Conformación de pilas, Planta de compostaje, Kara Kara-Cochabamba

Conformación de pilas en sistema cubierto. Planta de compostaje, Comarapa

Conformación de pilas, Planta de compostaje, Mallasa-La Paz

Pilas volteadas con volteadora

Fuente: MMAyA/VAPSB/DGGIRS

5.1.1.2 Compostaje en pilas o silos estáticos con aireación por ventilación forzada

A través de este sistema, las pilas en descomposición se mantienen estáticas y la aireación para el aporte de oxígeno se produce mediante un sistema mecánico de ventilación. El sistema de ventilación se instala en la base de las pilas y consta de un sistema de tuberías perforadas conectadas a un sistema de ventiladores que insuflan el aire. Las tuberías pueden estar directamente sobre el piso o dentro de canales, construidos en piso de hormigón. La bibliografía consultada, menciona la posibilidad de realizar la ventilación forzada por aspiración del aire o por insuflado del aire, aunque normalmente se usa el sistema de insuflar.

Como la aireación se realiza por las tuberías de la base, no es necesario el volteo, pero si es necesario homogeneizar previamente el material verde y el material estructurante (material café) de forma que la porosidad inicial de la mezcla a descomponer sea la adecuada. Este sistema permite alturas entre 2 a 3 m de las pilas o silos y facilita la descomposición en menor tiempo, de forma que con este método se optimiza mucho el espacio requerido. Normalmente para mejor optimización del espacio, este sistema se utiliza acopiando el material en forma de silos de hormigón, o en forma de túneles o trabajando en un sistema en “meseta”.

Para facilitar la aireación y evitar el taponamiento de los orificios de las tuberías, se suele adicionar en la parte inferior de la pila material poroso como ramas de poda triturada o astilla.

El sistema de aireación se diseña teniendo en cuenta una distribución homogénea del aire en la pila, pudiéndose tener sistemas concéntricos, de espina de pescado o lineales. La conformación de las pilas, puede realizarse al aire libre o bajo naves cubiertas con o sin paredes. La existencia de cubiertas no es necesaria pero reducen la generación de lixiviado por contacto con la lluvia.

La duración del proceso de descomposición es de unas 5 semanas, para pasar posteriormente a la etapa de maduración. El funcionamiento será satisfactorio mientras se mantengan las condiciones aerobias y de porosidad de la mezcla y el contenido de humedad requerido.

La principal ventaja de este método es la optimización del espacio y el menor consumo energético pues el consumo de energía eléctrica de los ventiladores es menor al consumo de combustible de la maquinaria de volteo, puesto que inicialmente requiere de la homogenización inicial del material y quedará estático durante todo el proceso de descomposición.

Las figuras siguientes muestran el proceso descrito:

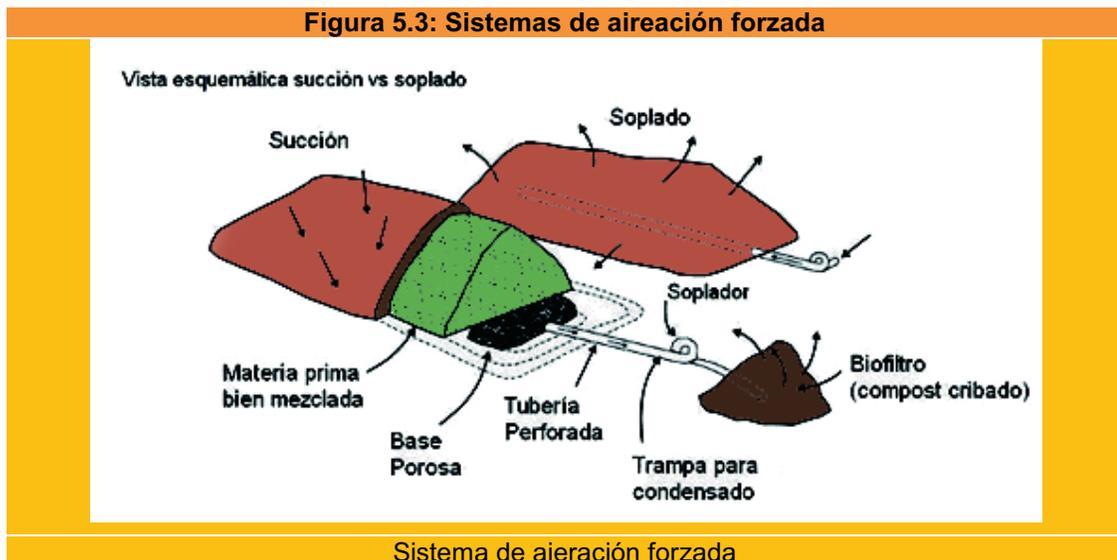


Figura 5.3: Sistemas de aireación forzada



Los sistemas abiertos pueden ser bajo cubierta o al aire libre.

Figura 5.4: Sistemas abierto. Bajo cubierta o al aire libre



Fuente: Agencia de Residuos de Cataluña

5.1.2 Sistemas Cerrados

Son sistemas desarrollados para reducir considerablemente la superficie de compostaje y lograr un mejor control de los parámetros de descomposición y controlar los olores de forma más adecuada. Comúnmente se hace uso de la ventilación forzada. En estos sistemas, la fase de descomposición se realiza en reactores que pueden ser de dos tipos: horizontales o verticales.

- ✓ Reactores verticales (Continuos o Discontinuos)
- ✓ Reactores horizontales (Estáticos o Con rotación)

La fase final de maduración se hace al aire libre o en naves abiertas.

5.1.2.1 Reactores verticales

Son reactores de 4 a 10 m de altura que constan de un cilindro cerrado, aislado térmicamente, que en su parte inferior posee un sistema de aireación y extracción de material. A medida que se va extrayendo el material descompuesto, el material fresco va descendiendo. El control de la aireación se realiza por la temperatura y las características de los gases de salida (éstos son aspirados por la parte superior del reactor). El tiempo de residencia⁴ del residuo orgánico en el reactor acostumbra a ser de 2 semanas y el producto requiere generalmente un tratamiento posterior de maduración.

5.1.2.2 Reactores horizontales

El material se somete al proceso de descomposición en condiciones estáticas (reactor túnel) o de volteo periódico (reactor rectangular dinámico). Los reactores, tienen forma de caja rectangular de 4m de altura; 5,5m de ancho y longitud variable según el volumen a tratar. La agitación se logra mediante sistemas hidráulicos y la aireación se realiza por sistemas situados en la parte inferior. El tiempo de residencia dentro del reactor es normalmente de 2 semanas y el producto requiere generalmente un tratamiento posterior de maduración.

El sistema mediante reactores requiere de menos espacio pero de mucha más inversión por ser un método muy tecnificado y el consumo energético es alto.

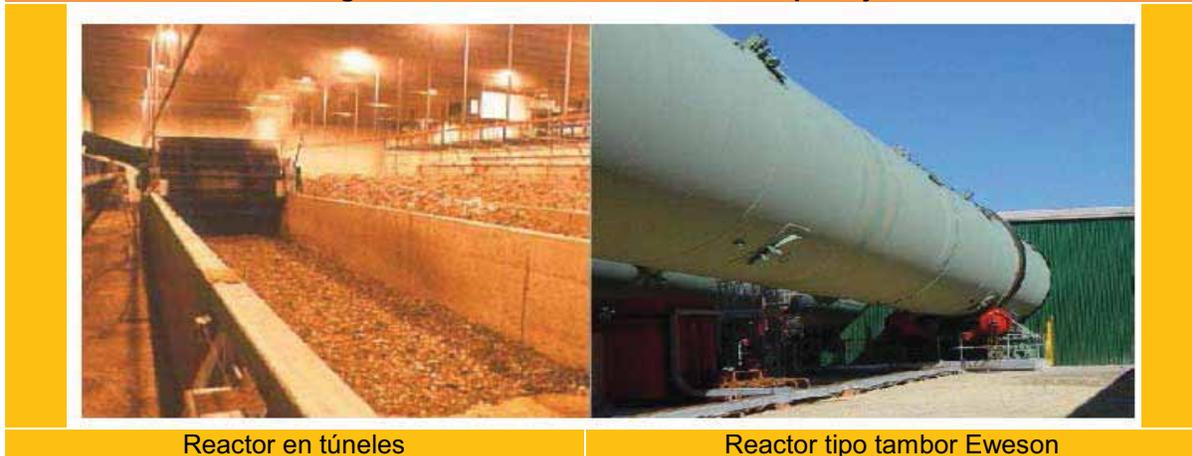
Estos reactores son tanques cilíndricos con sección circular o cuadrada, donde de forma continua se agregan los materiales, el agua y el aire. Los materiales ingresan por la parte izquierda del mismo y se efectúa la formulación en ese punto. Con la ayuda de la helicoidal en la pared del tanque, el material se va desplazando hacia la derecha conforme el tanque gira. Por la parte central se agrega agua y aire necesarios para la degradación; también se agrega la recirculación de materiales no completamente degradados. En el centro de la primera sección del reactor se lleva a cabo la degradación, en donde la temperatura y la humedad del proceso se controlan mediante sensores y aspersores. La maduración se lleva a cabo en la segunda sección del reactor e incluso, es posible incluir el lombricompostaje como operación en estos reactores. Al final, en el área derecha del cilindro, se tiene una criba que permite la salida de los materiales finos y la recirculación de los compuestos orgánicos no degradados.

Algunas diferencias con relación al diseño, incluyen un tornillo sin fin en lugar de la helicoidal o un pistón; una sección cuadrada o una mayor inclinación para aprovechar la gravedad como fuerza de transporte. Incluso existe un diseño basado en una columna con "válvulas" interiores para cada etapa.

En algunas plantas se puede combinarla operación del reactor con el método de pilas.

⁴ Es un parámetro utilizado en reactores continuos que expresa el tiempo necesario para tratar un volumen de corriente de alimentación igual al volumen del reactor. Se calcula dividiendo el volumen del reactor (ml) por el caudal de reactivos que entra al reactor (ml/min).

Figura 5.5: Sistemas cerrados de compostaje



El cuadro siguiente presenta algunos elementos comparativos entre los sistemas abiertos y cerrados descritos:

Cuadro 5.1: Comparación de sistemas abiertos con los sistemas cerrados		
Aspectos	Sistemas abiertos	Sistemas cerrados
Aspectos técnicos	<p>Es la tecnología menos compleja.</p> <p>Se recomienda la aireación manual en plantas de tamaños pequeños.</p> <p>Se recomienda la aireación forzada cuando hay restricciones de espacio y cuando hay que realizar el volteo de forma mecanizada.</p>	<p>Requiere la instalación de bioreactores lo que técnicamente es más exigente en su instalación, operación y mantenimiento.</p> <p>Cuando la digestión es anaerobia se requiere de un sistema de tratamiento de gases.</p> <p>Requiere de una rigurosa separación en la fuente ya que las bacterias anaerobias son muy sensibles a sustancias tóxicas.</p> <p>En caso de realizar aprovechamiento energético de los gases producidos se requieren de un proceso de remoción de impurezas que es técnicamente complejo.</p>
Disponibilidad en el mercado local	Los recursos para su implementación se encuentran disponibles localmente.	Los bioreactores no se encuentran disponibles localmente.
Áreas instalaciones requeridas	<p>Las áreas requeridas son función de las cantidades a manejar y de la duración del ciclo de compostaje. Se estima un índice de 2,5 a 3m² por tonelada al día recibida.</p> <p>Requiere de zonas para: descarga y separación, conformación de pilas, refinamiento y empaque de compost.</p>	Requiere de zonas la construcción de los birreactores, instalaciones para tratamiento de lixiviados, instalación es para tratamiento de gases.
Costos	Es la alternativa de menor costo	<p>Costos de inversión, y operación y mantenimiento son elevados.</p> <p>Se tiende a triplicar los costos de compostaje por tonelada producida.</p>
Aspectos ambientales	Se pueden generar olores	Requiere de sistemas de manejo de

Cuadro 5.1: Comparación de sistemas abiertos con los sistemas cerrados		
Aspectos	Sistemas abiertos	Sistemas cerrados
	<p>ofensivos durante los procesos de descarga. Si la composición y aireación de la mezcla es adecuada los olores no deberían existir.</p> <p>La aireación forzada minimiza el riesgo de olores.</p> <p>Requiere de sistemas el manejo de lixiviados.</p>	<p>lixiviados y gases.</p> <p>Se generan mayores cantidades de gases de efecto invernadero.</p> <p>Es posible realizar un mejor control de olores</p>
Aspectos sociales	Demanda mano de obra	Demanda mano de obra calificada

Capítulo VI: Operaciones en una Planta de Compostaje

OPERACIONES EN UNA PLANTA DE COMPOSTAJE

En este capítulo se darán algunos criterios y orientaciones respecto a la factibilidad de construir una planta municipal de compostaje, se describirán las diferentes operaciones técnicas que se dan en una planta así como criterios de diseño para la construcción y operación de éstas.

6.1 Factibilidad para la construcción de una plantade compostaje

Antes de entrar a valorar la factibilidad de la construcción de una planta municipal de compostaje es importante considerar que una planta de compostaje requiere de una inversión de recursos, por lo cual debe ser analizada con mucho cuidado.

Si bien representa una oportunidad para mejorar el medio ambiente con el aprovechamiento de los residuos orgánicos y por consiguiente extender la vida útil del relleno sanitario del Municipio por la reducción de residuos sólidos que serán depositados en él, es importante considerar los costo de construcción, operación y mantenimiento de la misma, puesto que se debe garantizar su funcionamiento y sostenibilidad en el mediano y largo plazo.

Al inicio de las operaciones de una planta municipal de compostaje se recomienda que la escala de trabajo sea pequeña ya que, en general, no existe personal capacitado para operar estas plantas y tiene que implementarse un “aprendizaje institucional” al interior de la planta, por lo cual es importante contar con personal que tenga previa experiencia, de manera de facilitar el proceso de aprendizaje.

La factibilidad de construir una planta de compostaje municipal dependerá de encontrar soluciones adecuadas a los siguientes elementos críticos:

1. Participacion ciudadana
2. Disponibilidad de materia prima seleccionada (residuo orgánico),
3. Opciones para el uso del compost,
4. Financiamiento del proyecto,
5. Capacidad institucional,
6. Disponibilidad de terreno.

6.1.1 Participacion ciudadana

La implementación de un sistema de aprovechamiento de residuos sólidos depende entre otros, de un factor importante como es la disponibilidad de la población a realizar separación en origen puesto que de no ser así no se contará con la materia prima necesaria para operar la planta. Entonces es importante el desarrollo de un programa de sensibilización, acompañado de normativa (ordenanza municipal) con lo cual se genere el soporte necesario para iniciar y mantener la continuidad del mismo.

6.1.2 Disponibilidad de materia prima seleccionada

En la etapa de planificación de una Planta de Compostaje es importante identificar las fuentes generadoras de residuos sólidos orgánicos y asegurar los volúmenes mínimos de materia prima que serán recolectados y transportados hasta la planta de compostaje municipal.

6.1.3 Opciones para el Uso de Compost

La demanda de compost por lo general no esta desarrollada en los municipios, por consiguiente las ventajas ambientales que se obtienen por la elaboración del compost tienen que ser la base de la política Municipal de aprovechamiento de los residuos orgánicos (reducir la cantidad de residuos para su transporte y disposición final, disminuir generación de lixiviados y biogás en el sitio de disposición final, aumentar la vida útil del relleno). Aún así es importante identificar los posibles usos del compost antes de empezar el proyecto para evitar que el material acumulado quede almacenado sin uso. Los

posibles usos van desde un uso municipal en viveros, parques y jardines, áreas de recuperación de suelo municipal, sector agrícola y hasta un uso comercial.

Por otro lado el uso de producto dependerá de los parámetros de calidad logrados.

6.1.4 Financiamiento del proyecto

El costo de inversión en la Planta de Compostaje, capital de operación y los costos de mantenimiento deberán ser considerados. Antes de decidir construir una planta de compostaje debe asegurarse que se dispone de las fuentes de financiamiento necesarias. Los costos de inversión incluyen el terreno, la obra civil y la maquinaria. Los costos de operación incluyen aquellos relacionados con el pago de recursos humanos, combustibles, maquinaria, mantenimiento correctivo y preventivo. Ambos tipos de costos pueden resultar en una carga adicional para los gobiernos municipales.

6.1.5 Capacidad Institucional

Una Planta de Compostaje no es una obra que se construya y después continúe funcionando por sí sola. Es una instalación donde se invierten recursos que requiere de un proyecto municipal, políticas locales y una administración permanente y adecuada, independientemente que las autoridades continúen o no el gobierno local en próximas gestiones. De acuerdo a la planificación de la gestión integral de residuos sólidos, deben considerarse proyectos de compostaje, preverse los recursos necesarios y así como identificarse los responsables para la operación, mantenimiento y continuidad del mismo. En ese marco, se recomienda consultar la “Guía para la formulación de programas municipales en Gestión Integral de Residuos Sólidos” del Ministerio de Medio Ambiente y Agua, 2012.

6.1.6 Disponibilidad de sitio para la construcción de la planta de compostaje

Otro factor no menos importante, es la disponibilidad de un sitio adecuado para la construcción de una planta de compostaje centralizada, ya que determina la viabilidad del proyecto. La primera acción que se debe llevar a cabo, es conocer el área donde se puede localizar el proyecto, para lo cual se puede recurrir a la información cartográfica disponible en el municipio sobre referencias de áreas de equipamiento, áreas que podrían ser expropiadas o en su caso, se puede emplazar en el propio relleno sanitario, siendo mejor esta opción debido a la maquinaria o personal que podría emplearse. Aun así debe considerarse los parámetros de ubicación del sitio, los cuales se describen más adelante.

Para que el aprovechamiento de residuos sólidos orgánicos sea efectivo deben realizarse las siguientes acciones:

- ♻️ Separar o seleccionar los residuos en origen clasificando los mismos en diferentes fracciones (ejemplo, orgánicos, reciclables y no aprovechables); esta actividad debe ser realizada por el ciudadano/a, en forma permanente hasta convertirse en un hábito. La selección en origen es especialmente importante en el caso de los residuos orgánicos, puesto que de esta depende la calidad del producto.
- ♻️ Analizar el tipo de separación adecuado según el contexto de la población y el modelo de gestión a implementar.
- ♻️ Diseñar e implementar de forma continua una campaña educativa y comunicativa para lograr cambiar el hábito del ciudadano/a.
- ♻️ Recolectar y transportar los residuos de forma selectiva; es decir, la empresa u operador de aseo debe planificar la recolección y el transporte diferenciado para los residuos separados por el ciudadano/a.

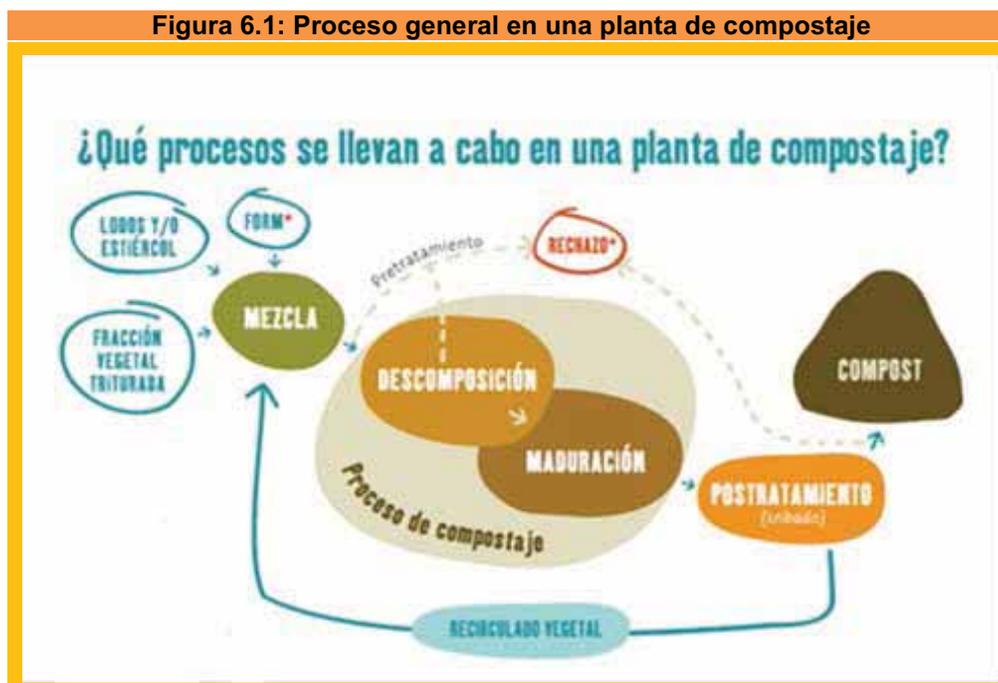
6.2 Operaciones en una planta de compostaje

Por lo general las operaciones que se realizan en una planta de compostaje son las siguientes:

Cuadro 6.1: Operaciones en una planta de compostaje	
Etapa	Operación
Recepción	Recepción
Pre-Tratamiento	Descarga del residuo o materia orgánica
	Trituración de la fracción vegetal o acopio de material estructurante ya triturado (por ejemplo, astilla)
	Separación de impropios de la materia orgánica (manual o mecanizada).
Tratamiento	Mezcla y homogenización de los materiales, residuos sólidos orgánicos y material estructurante.
	Fase de descomposición.
	Fase de maduración.
	Control de parámetros del proceso y madurez del compost
Pos-Tratamiento	Recolección y gestión de lixiviados
	Cribado del compost.
	Almacenado y empaçado (si corresponde)
	Parámetros de calidad del compost

Las operaciones de separación, reducción de tamaño (tritución de la fracción o materia vegetal), formulación, balance de nutrientes, mezcla y homogenización, se realizan antes de la conformación de las pilas y tienen como objetivo acondicionar la masa de residuos para optimizar el proceso.

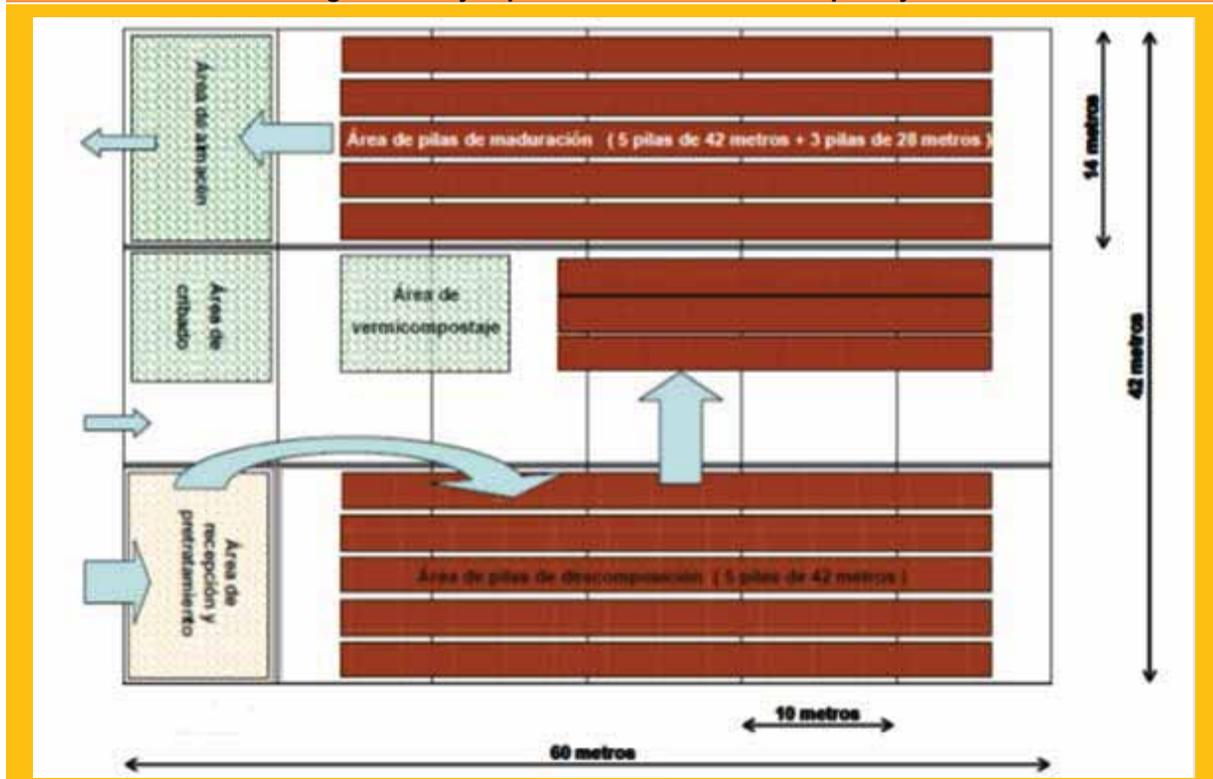
Figura 6.1: Proceso general en una planta de compostaje



Fuente: Agencia de Residuos de Catalunya

***FORM.:** Fracción orgánica municipal (residuo seleccionado en origen de domicilios). El hecho de que puedan llegar materiales impropios junto a la materia orgánica, hace necesario realizar operaciones para la separación de éstos generando un rechazo o resto que debe ir a relleno sanitario.

Figura 6.2: Ejemplo de una Planta de Compostaje



Fuente: Agencia de Residuos de Cataluña

A continuación se realiza una descripción general de cada una de las operaciones mencionadas.

6.2.1 Recepción y descarga de los residuos

Los residuos orgánicos ingresan a una zona de descarga (recepción), esta zona puede tratarse de un terraplén o simplemente una playa de descarga abierta. La zona de descarga debe estar impermeabilizada y prever el recojo de lixiviados.

En las plantas de compostaje de gran capacidad, debe incluirse el pesaje de los residuos que entran en la planta.

Es importante que el tiempo desde la descarga hasta la preparación y homogenización del material para la conformación de pilas sea mínimo de forma de minimizar olores.

6.2.2 Separación de residuos impropios

En el caso que se reciban residuos procedentes de la recolección selectiva de residuos sólidos urbanos (fracción orgánica seleccionada en origen), puede ocurrir que estos vengan mezclados con algún tipo de material impropio que por error ha sido recolectado junto a los residuos orgánicos.

Tras la descarga, se extienden estos residuos y un operario se encarga de retirar de forma manual aquella fracción no orgánica más evidente o voluminosa (bolsas de plástico, elementos grandes y otros). El resto de materiales impropios pequeños, como son, trozos pequeños de plástico o vidrio, es mejor seleccionarlos posteriormente, cuando el material orgánico ha sufrido cierta descomposición, ya

sea realizando un cribado intermedio entre la etapa de descomposición y la de maduración o ya sea en el propio cribado final, después de la etapa de maduración.

A efectos de la calidad posterior del compost el material de entrada debería estar libre de materiales impropios (materiales inorgánicos). Idealmente el porcentaje de impropios en la mezcla a compostar debería ser "0" (cero), aunque se estima que hasta un nivel de 2% de impropios, éstos pueden ser separados del compost final en el trómel de cribado o tamiz.

Si existiera un nivel de materiales impropios superior (no permisible superior al 10%), sería necesario una planta de alta mecanización que requeriría de equipos específicos para la separación de impropios, como trómeles intermedios, mesas densimétricas y otros equipos y asumiendo de todas formas aunque aceptable, una disminución en la calidad final del compost.

6.2.3 Trituración del material estructurante

Para que el proceso sea efectivo se necesita de material estructurante que le dará la porosidad necesaria a la mezcla. El material estructurante normalmente corresponde a material de poda triturada o en casos en los que no existe poda, en astilla de madera no tratada, seleccionada.

Los restos vegetales (fracción vegetal), procedentes en su mayoría de restos de poda, tras su descarga, se introducen en una máquina trituradora, de forma de reducir el tamaño de estos residuos.

En algunos casos antes del proceso de trituración en la maquinaria dependiendo la capacidad de la misma, las ramas de poda deben ser picadas con empleo de un machete, hacha, o sierra mecánica, para facilitar el proceso de trituración.

En caso de disponer de residuos orgánicos frescos pero de consistencia muy dura, por ejemplo piñas u otros, podría considerarse la opción de su trituración previa al proceso de compostaje.

6.2.4 Mezcla u homogenización de los materiales a compostar

Una de las etapas fundamentales de todo proceso de compostaje es mezclar los materiales secos y húmedos en las proporciones adecuadas. La mezcla y homogenización de los diferentes materiales nos permite obtener una masa lo más homogénea posible y con la porosidad, tamaño, relación C/N, pH y humedad adecuada para poder garantizar el proceso de compostaje. Los rangos de los parámetros a obtener en esta etapa son los indicados en el cuadro 3.2.

En ocasiones puede ser conveniente agregar materiales que tienen alta población de microorganismos como el compost ya producido a modo de material "inoculante"⁵ o "activadores"⁶ como el rumen o estiércol de forma de intentar acelerar el proceso de compostaje.

⁵ Un inoculador es un cultivo de microorganismos que se agrega a una pila de compost para acelerar el proceso de compostaje. Es posible acelerar el proceso inoculando la pila compost ya producido.

⁶ Los activadores o catalizadores como el excremento de vaca, suministran una fuente de nutrición para acelerar la reproducción de microorganismos y por consiguiente la descomposición de la materia, son útiles particularmente donde hay materiales con alto contenido de carbono.

La homogenización o mezcla puede realizarse mediante medios de herramientas manuales (azadón, pala), mediante pala cargadora, mediante volteadora (en caso de plantas que pilas volteadas por volteadora) o mediante equipos de homogenización. Para plantas de capacidades de material medias o altas, disponer de un equipo homogenizador será muy importante. Como equipos de homogenización pueden usarse algunos equipos adaptados de los que se usan en agricultura como son los “unifeed” (equipos para mezclas de balanceado para alimentación animal), o equipos esparcidores de estiércol, siempre y cuando se inviertan los ejes para que se concentre y conformen las pilas mientras se va mezclando el material (ver fotografías en Figura 6.11). También se pueden comprar a empresas especializadas o hacer construir de forma local equipos de homogenización compuestos por una tolva o tanque con tornillos sin fin.

En función de los materiales a compostar y con el objetivo de que el producto final tenga una relación C/N adecuada, se deberá realizar un balance de materia de forma de garantizar que las proporciones de materiales a compostar garantizan tanto la relación C/N como la porosidad necesaria. La porosidad es un parámetro clave en el proceso; si la porosidad no es suficiente el proceso no se desarrollará correctamente y se arrastrarán problemas en todo su curso. También hay que garantizar la humedad inicial requerida.

Cuando se compostan residuos sólidos orgánicos de domicilios o mercados (cáscaras vegetales, restos de comida); se recomienda la mezcla con fracción vegetal (poda o astilla) en una proporción 1:1 en volumen. En determinados casos de uso de astilla puede evaluarse como suficiente una relación 2:1.

Si la mezcla, es de residuos sólidos de domicilios o mercados y de estiércol; se recomienda la mezcla con fracción vegetal (poda o astilla) en una proporción 1:1:2 en volumen (1 parte de residuo de domicilio, una de estiércol y dos de fracción vegetal).

Estos porcentajes en volumen de la mezcla garantizan la relación C/N así como la porosidad adecuada que debe ser del 25%.

Para iniciar el proceso también es importante la humedad de la mezcla que debe ser de máximo el 65% al inicio para pasar al 55% en la fase de descomposición.

Algunos datos para los materiales orgánicos más comunes, residuos orgánicos de domicilio y fracción vegetal son los siguientes:



Fuente: Agencia de Residuos de Cataluña

6.2.5 Descomposición o Degradación aerobia de los residuos

El material a compostar se dispone en forma de pilas o en silos, donde se produce la primera fase de la degradación de los residuos orgánicos (con incremento de la temperatura de la pila). Las pilas se pueden remover de forma manual, mecánicamente o pueden permanecer estáticas si existe un sistema de ventilación forzada, esto con el fin de oxigenarlas y favorecer que se realice la degradación del residuo por parte de los microorganismos; por otro lado, se riega para mantener la humedad.

En esta etapa se debe llevar a cabo la higienización del material que consiste en la eliminación de los microorganismos patógenos, así como la presencia de semillas que pudieran molestar en el momento de aplicación del compost final, garantizando que la pila llegue a temperaturas de 60°C durante unas horas o 55°C durante unos días.

6.2.6 Control del Proceso

Durante las etapas de descomposición y de maduración se deben controlar de forma prioritaria los parámetros de humedad, temperatura y oxígeno.

- ♻️ **Humedad.** Para controlar la humedad, se requiere de una estufa y de una balanza que permite medir la humedad por sistemas sencillos de cálculo de las diferencias de peso entre la muestra inicial y la muestra secada a 105°C en 24h, de acuerdo a análisis estandarizados (ver Anexo 3 *Métodos para valorar la madurez del compost*). La humedad se puede medir de dos a tres veces por semana. También se podrá recurrir a inspecciones visuales y táctiles del grado de humedad de las pilas (método del puño).
- ♻️ **Temperatura.** Para controlar la temperatura se usan sondas largas conectadas a termómetros analógicos o digitales. La temperatura se controla cada 2 días en varios puntos de la pila y en varias profundidades.
- ♻️ **Oxígeno.** El control del nivel de oxígeno también es importante para garantizar el proceso aeróbico en la masa de residuos. Si se dispone de recursos suficientes se puede disponer de un oxímetro que va incorporado a una sonda que permite medir el nivel de oxígeno dentro de la pila. Si no se dispone de recursos puede recurrirse a métodos “caseros” como el olor (comprobar que no existe olor a putrefacción dentro de la masa que se composte) o puede construirse una sonda (sin el oxímetro) con una bomba manual de aspiración y simplemente comprobar que dentro de la masa existe aire.

Los valores adecuados son los mencionados en el Cuadro 3.2: Condiciones de parámetros referenciales para el proceso de compostaje

Si los valores obtenidos de humedad indican que se requiere incrementar la humedad, hay que proceder al riego de la pila o silo. El riego puede ser con agua o en las primeras etapas de proceso puede ser con el propio lixiviado recolectado; en el caso del riego con lixiviado, el único requisito es que posteriormente a éste deben garantizarse temperaturas de higienización (55-60°C).

6.2.7 Maduración del compost

Finalizado el proceso de descomposición o degradación de la materia orgánica por los microorganismos, se retira el material con ayuda de una pala cargadora o de forma manual y se transporta a la zona de maduración. Durante el proceso de maduración el material se estabiliza y el compost termina de desarrollar las características deseadas para sus posteriores aplicaciones. Generalmente, este periodo de maduración se lleva a cabo en una zona diferente al sitio donde se ha realizado la fase activa del compostaje, no obstante, la maduración se puede realizar en el mismo sitio y en la misma pila donde ha tenido lugar la fase activa.

Durante esta fase es importante controlar mediante aporte de agua o volteo las temperaturas demasiado elevadas que podría ralentizar⁷ o inhibir la actividad microbiana, así como la excesiva sequedad por lo que se debe regar hasta las humedades requeridas.

Normalmente la duración de esta etapa es de unas 6 semanas para residuos de alta biodegradabilidad.

6.2.8 Parámetros de madurez del compost

Es necesario evaluar la madurez del compost debido a: 1) un ahorro económico ya que el tiempo de maduración se limita al indispensable, 2) permite asegurar la calidad del compost, evitando la comercialización de productos inmaduros.

Cuando un compost va a ser utilizado deben tenerse unas mínimas garantías de que su uso no es peligroso para el suelo y las plantas. De ese modo debe de estar higienizado (libre de patógenos y semillas malas) y debe alcanzar un grado de estabilidad mínimamente adecuado.

La aplicación de un compost inmaduro puede provocar un bloqueo biológico del nitrógeno asimilable. También la descomposición posterior a su aplicación produce un descenso del contenido de oxígeno, así como un aumento de temperatura del mismo y el desarrollo de sustancias fitotóxicas.

Existe una variedad de métodos para la determinación del grado de madurez del compost que presentan distintos grados de dificultad y de fiabilidad. Los más usuales son:

-  Métodos Físicos: Olor, temperatura, color, Grado de Madurez-Test de Autocalentamiento
-  Métodos Químicos: pH, humedad, relación C/N, Índice de Madurez-Test Solvita®,
-  Métodos biológicos: Test de germinación, test de crecimiento, índice respirométrico.

El método que se realiza de forma más usual por su relación sencillez/fiabilidad es el test de autocalentamiento para medir el grado de madurez, éste acompañado de los métodos físicos (olor, temperatura, color y del nivel de humedad).

En el anexo 3 se indica el detalle de todos los métodos.

6.2.9 Cribado y clasificación del compost

Finalizado el proceso de maduración, el compost pasa al área de refinado donde se realiza la separación de impurezas que pudieran quedar (piedras, fragmentos de vidrio, trozos de plástico, etc.), restos de la fracción vegetal de mayor tamaño y se consigue la homogeneización del compost final, para obtener un producto final con un aspecto fino y uniforme.

La fracción de rechazo, formada por impurezas, se envía posteriormente al relleno sanitario y los restos vegetales más gruesos se vuelven a introducir al inicio del proceso de compostaje como material estructurante. El compost fino está listo para su comercialización.

Para el cribado, se usan equipos como mallas estáticas en plantas manuales y trómel o mesa vibrante que pueden ser construidos a nivel local para plantas semimecanizadas o mecanizadas. Normalmente se considera un tamaño de la malla del trómel o mesa de 10mm-12mm.

Es importante diseñar adecuadamente la alimentación a estos equipos pues es mejor que ésta alimentación sea en continuo. También es importante tener en cuenta el mecanismo de salida del material.

⁷ Hacer más lento un proceso o una actividad

En esta etapa, si se diera el caso de haber compostado una materia orgánica con un porcentaje elevado de material impropio, > 2%, se debería tener en cuenta una separación con equipos específicos de los materiales impropios (mesa densimétrica, separador balístico, separador neumático, separador electromagnético). Cada uno de estos equipos presenta su particularidad y eficiencia en separar varios o un material. También en estos casos se podría dar el caso de necesitar separar del material estructurante sus partículas impropias con equipos específicos. Estos equipos se podrían incluir solo en plantas muy tecnificadas.

En esta etapa se deberá tener en cuenta de proteger la maquinaria bajo cubierta y de tomar las precauciones para generar el mínimo de polvo.

En esta fase se realizan regularmente los análisis para garantizar la calidad del compost.

6.2.10 Empacado y Almacenamiento

Dependiendo las condiciones de uso y el consumidor final, el compost puede ser envasado en bolsas de plástico o bien empleado en cantidades mayores, para lo cual no se requieren envases. Si el compost se va a empaquetar en bolsas de plástico su contenido en humedad debe ser máximo del 35% de lo contrario, seguirá descomponiéndose y fermentará. El envasado puede ser manual (badilejo o pala pequeña para facilitar su llenado a mano y un sellador) o mecanizado. En función del destino final del producto, o atendiendo a los requerimientos del cliente, el compost se puede mezclar con arena, tierra, turba, etc. para conseguir el producto deseado. Esta mezcla se realiza mediante pala cargadora. El compost final obtenido se almacena hasta el momento de su venta o aplicación al terreno.

Para cada operación se deberá disponer de la infraestructura y maquinaria o equipamiento adecuado, que deberá ser diseñado específicamente para cada operación y tipo de material, así como en función del tipo y capacidad de la planta.

Por su mayor aplicabilidad en nuestros países, a continuación se describen tipos y criterios de diseño para plantas de sistemas abiertos de compostaje, ya sea con volteo o con aireación forzada en la fase de descomposición.

6.2.11 Calidad de Compost

La calidad del compost viene determinada por los diferentes aspectos que se listan a continuación, y que adquieren más o menos relevancia según su destino o uso:

- ✓ La Calidad Física: presencia/ausencia de impurezas, granulometría, facilidad de aplicación.
- ✓ La Calidad Sanitaria: presencia/ausencia de parásitos y patógenos humanos, animales o vegetales, presencia/ausencia de entonces de malas hierbas.
- ✓ La Calidad Agronómica: riqueza en nutrientes vegetales, pH, salinidad.
- ✓ La Calidad Química: concentración de metales pesados y microcontaminantes orgánicos.
- ✓ La Madurez: estabilidad de su materia orgánica.

Cada una de estas facetas de la calidad del compost es el resultado de un conjunto variado de factores, ya sean externos a la instalación, ya sea derivados de su diseño o de su explotación.

En todo momento debe garantizarse la calidad del compost producido para lo cual se debe efectuar los correspondientes análisis de control como: pH, Salinidad, Materia Orgánica, Nitrógeno, Fósforo, Potasio, Materia Seca, Grado de Madurez.

En caso que la calidad del producto obtenido no se ajuste a la calidad mínima exigida, especialmente en lo referente a la estabilidad de la materia orgánica, se deberá efectuar las intervenciones y modificaciones necesarias en el proceso (incremento en suduración, incremento en la proporción de fracción vegetal, etc.)

6.2.12 Gestión de aguas y lixiviados

La pavimentación o impermeabilización y el grado de pendiente de las superficies en contacto con los residuos orgánicos frescos, zona de recepción, zona de homogenización y zona para la fase de descomposición es fundamental para garantizar la recolección de los lixiviados e impedir su infiltración en el terreno.

Los lixiviados se almacenan temporalmente en depósitos o piscinas para que sean devueltos mediante riego a la masa compostable y garantizar así el mantenimiento del grado de humedad a lo largo del proceso.

Para evitar rebalses, acumulación de lodos y no afectar la calidad del material del depósito, con una periodicidad máxima anual, se debe limpiar el depósito o piscina de lixiviados. En caso de precipitación pluvial, las piscinas o depósitos no deben superar el 75% del volumen útil.

Las aguas de lluvia y los lixiviados, se deben gestionar de forma adecuada recogiendo mediante drenes separadas y conducir hacia los depósitos de almacenamiento que se han previsto a tal finalidad.

Hay que tener en cuenta que la mayor producción de lixiviados se producirá por la lluvia, por lo que durante la operación de la planta, es recomendable proteger la zona de descomposición (en caso de lugares con abundante lluvia) mediante cubiertas o techos e incorporar materiales absorbentes en la base como cartón (de hueveras) troceado o aserrín.

Es importante tomar en cuenta que en ningún caso, se debe realizar el vertido de lixiviados en el cauce público o permitir su infiltración en el terreno.

Las aguas de lluvias sucias o limpias se podrán recoger con la finalidad de riegos en la fase de maduración o usos internos de lavado en el caso de las aguas limpias (procedentes de techos y otros).

6.2.13 Tratamiento de gases y eliminación de polvo

Existen diferentes equipos para el tratamiento de gases que pueden ser incorporados en las plantas de alta capacidad y tecnología con la finalidad de minimizar la posible emanación de estos y olores. De todas formas el mejor gas es el que no se produce y esto se consigue con una buena operación de la planta.

También en instalaciones grandes puede ser útil proveer sistemas de eliminación de polvo en algunas operaciones o plantear sistemas fáciles como construcción de protecciones del viento.

Para cada operación se deberá disponer de la infraestructura y maquinaria o equipamiento adecuado, que deberá ser diseñado específicamente para cada operación y tipo de material, así como en función del tipo y capacidad de la planta.

6.3 Tipos de plantas para compostaje, sistemas abiertos

A efectos de esta guía, describiremos los sistemas abiertos por ser sistemas más simples y apropiados a nuestro medio. En sistemas abiertos de compostaje, el proceso puede realizarse de forma manual, semi mecanizada o mecanizada. El tipo de planta dependerá del volumen de residuos que se deben compostar, la composición de éstos y de los recursos disponibles.

Figura 6.4: Tipos de plantas para compostaje



Planta manual de compost, Comparapa



Planta semi mecanizada de compost, Tiquipaya



Planta semicanizada de compost, Santa Cruz



Planta semicanizada de compost, La Paz



Planta mecanizada de compost con piso ventilado, Manresa, El Bages, Catalunya



6.3.1 Planta de compostaje manual

El proceso de compostaje en una planta manual como su propio nombre lo indica, comprende las operaciones realizadas de forma directa por medio de herramientas manuales, en áreas o espacios cuya capacidad no excede un volumen mayor a 2 Ton/día de residuos. En las siguientes figuras se muestran las operaciones que se realizan en este tipo de plantas.

Figura 6.5: Operaciones una planta de compostaje manual

Operación	
1	<p>Recolección de residuos sólidos. La recolección se realiza por medio de carritos manuales, en trimóvil o en camiones convencionales de recolección.</p>
2	<p>Recepción y descarga de residuos. Los residuos se descargan a campo abierto.</p>
	<p>El área disponible puede estar construida con hormigón o puede ser sobre suelo natural compactado e impermeabilizado.</p>
3	<p>Triturado de material vegetal. Para el caso de poda, se emplean tijeras, machetes o hachas; sin embargo, una trituradora pequeña puede ser de gran ayuda.</p>



Figura 6.5: Operaciones una planta de compostaje manual

<p>4</p>	<p>Descomposición, este proceso comprende las siguientes operaciones:</p> <p>1) Conformación de Pilas. Durante esta etapa se realiza la conformación de pilas mezclando los materiales secos y húmedos en las proporciones adecuadas.</p> <p>Normalmente se puede llegar a conformar pilas de 3m de base y 1,5m de alto como máximo.</p> <p>Conformada la pila ingresa a la etapa de descomposición.</p> <p>2) Volteo o aireación. Comprende el volteo manual y la incorporación de tubos huecos en la vertical de la pila de forma que se favorezca la ventilación natural de la pila</p> <p>3) Control de Humedad. Con ayuda de recipientes o manguera. El agua proviene de la red municipal o canales de riego muy cercanos. No es muy recomendable hacer la humectación manualmente en zonas con problemas de abastecimiento de agua, debido a las distancias necesarias para acarrear el líquido.</p> <p>4) Control de Temperatura. Se debe controlar la temperatura para garantizar que el proceso funciona correctamente</p>	
----------	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-------------------------------------------------------------------------------------

Figura 6.5: Operaciones una planta de compostaje manual

5	<p>Maduración. Se conforman las pilas con ayuda de palas, bieldos y carretillas.</p>	
6	<p>Transporte para tamizado. Luego de la operación de maduración el compost es trasladado hacia otra área para realizar el tamizado correspondiente.</p>	
7	<p>Tamizado. Utilizando mallas montadas en marcos de acero (reuso de tambores de camas) o madera, pala y carretilla.</p>	
8	<p>Envasado. Comprende el llenado y pesado manual del producto. Puede también envasarse los productos en bolsas de yute o plástico.</p>	

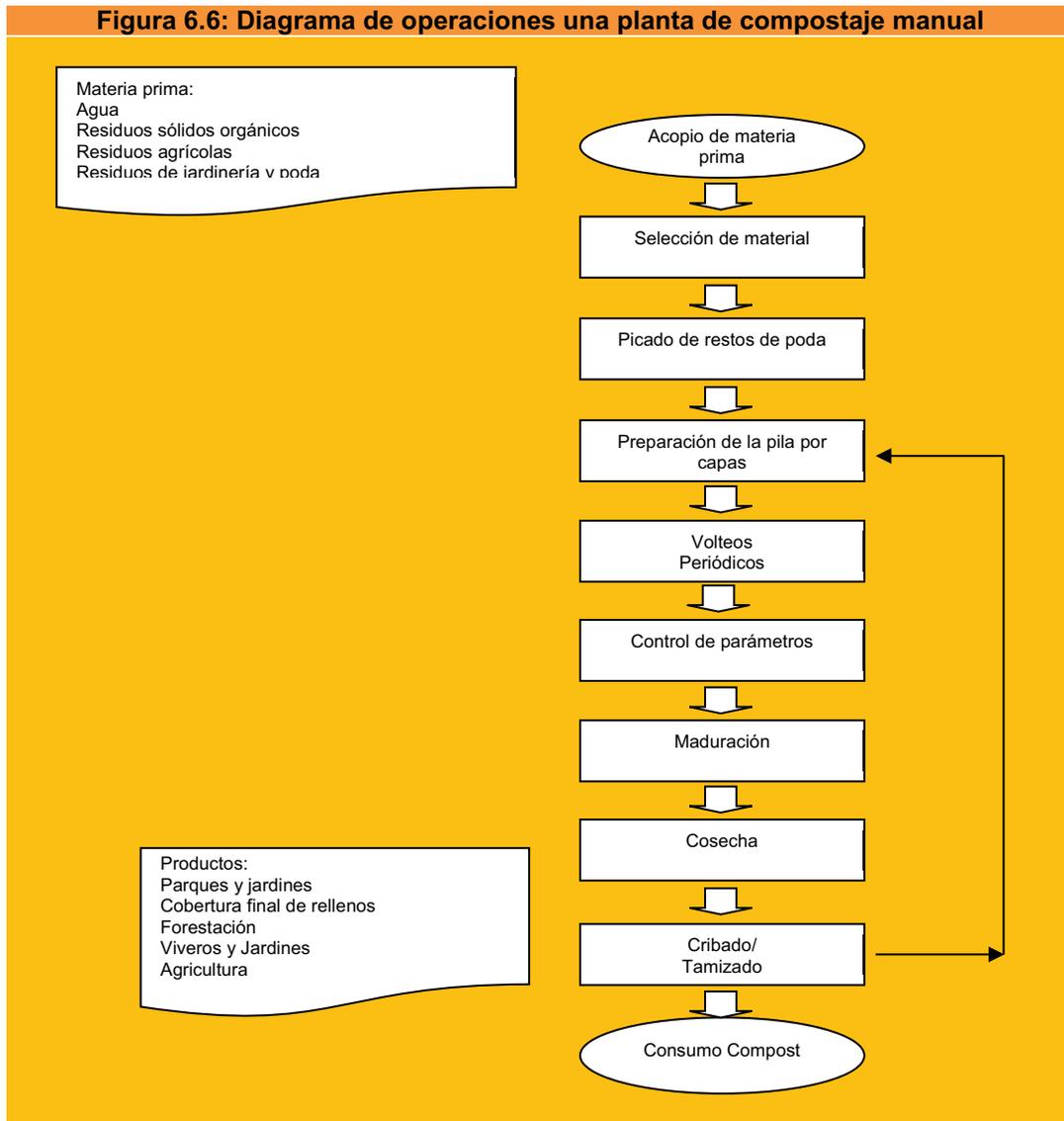
Figura 6.5: Operaciones una planta de compostaje manual



Fuente: MMAyA/VAPSB/DGGIRS

En la siguiente figura se muestra en forma resumida las operaciones que se realizan en una planta de compostaje manual:

Figura 6.6: Diagrama de operaciones una planta de compostaje manual



6.3.1.1 Infraestructura y obras complementarias en una planta manual de compostaje

Una planta de compostaje manual puede implementarse dentro el mismo predio donde funciona el relleno sanitario, sin embargo requiere de las condiciones adecuadas para no contaminar el producto, mitigar el impacto ambiental y preservar la seguridad y salud ocupacional de los operarios, o bien, puede implementarse en un espacio fuera de este, por ejemplo en un área de equipamiento o área comunitaria; esta segunda opción sería más recomendable por evitar largos traslados del residuo.

El área y topografía deben ser adecuadas a los requerimientos de producción y almacenamiento de producto, por lo general en ese tipo de plantas se requiere una superficie entre 0,25 a 1 Has, calculando más o menos unos 2,5m² por Ton/año de capacidad de la planta.

Como infraestructura civil básica dentro la planta se requiere la disponibilidad de los siguientes ambientes:

- 1) Ambiente para una oficina de administración de la planta,
- 2) Ambiente para el resguardo de las herramientas,
- 3) Servicios de sanitarios de higiene (baños y duchas),
- 4) Ambiente techado con paja, cañahuecas o material similar para facilitar las reuniones o descanso del personal,
- 5) Cerco perimetral y puerta de ingreso. El cerco, puede ser a base de bolillos y alambre de púas y guardando relación con los objetivos del proyecto,
- 6) Cerco vivo y área de amortiguamiento con especies adecuadas,
- 7) Caminos interiores para la circulación de vehículos.

También es importante prever de la disponibilidad de agua, para la que se pueden construir si se requiere construcciones para la cosecha de agua y la disponibilidad de electricidad.

Figura 6.7: Obras complementarias en una planta manual de compostaje



Así mismo para la seguridad física del área, es necesario realizar el cerco perimetral, que puede ser a base de bolillos y alambre de púas y guardando relación con los objetivos del proyecto también deberá realizarse el cerco vivo y preverse un área de amortiguamiento con especies adecuadas.

Figura 6.8: Obras complementarias de Seguridad



Cerco perimetral y puerta de ingreso a planta de compostaje



Jardines interiores en la planta manual



Área de amortiguamiento

Fuente: MMAyA/Municipio de Tiquipaya/ Proyecto de aprovechamiento de residuos sólidos orgánicos/2012

El suelo debe estar libre de malezas y residuos, en determinados casos para habilitar el área se requiere el apoyo de maquinaria pesada, como una moto-niveladora y pala cargadora para apoyar en la adecuación del sitio.

Figura 6.9: Disponibilidad de espacio para planta manual de compostaje





Fuente: Proyecto de aprovechamiento de residuos sólidos orgánicos, MMAyA/Municipio de Tiquipaya/2012

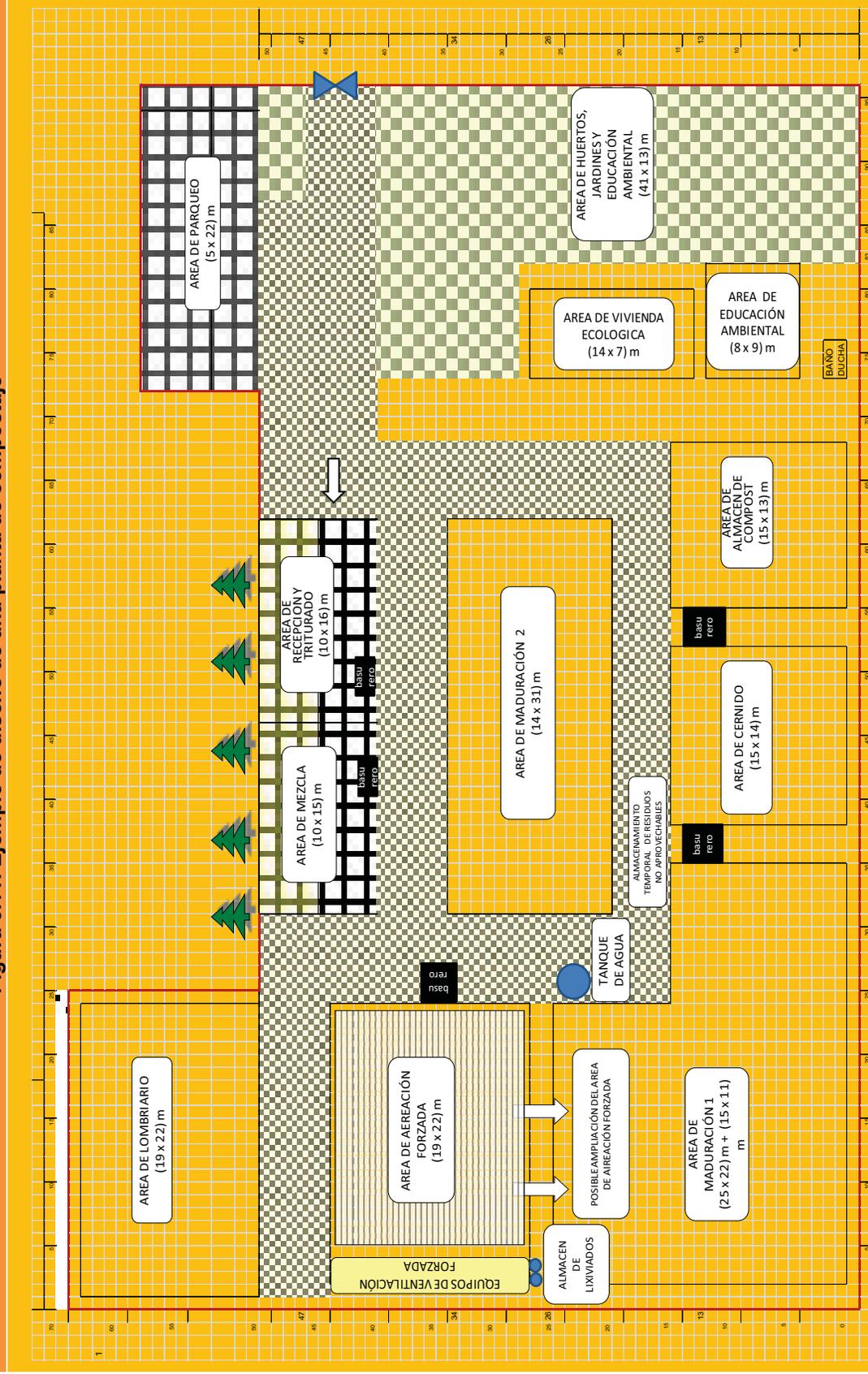
La disponibilidad de espacio incluye tener las áreas adecuadas para realizar las operaciones anteriormente descritas para el proceso de compostaje.



Fuente: Proyecto de aprovechamiento de residuos sólidos orgánicos, MMAyA/Municipio de Tiquipaya/ 2012

En la siguiente figura se muestra un ejemplo del diseño para el funcionamiento manual de la planta.

Figura 6.11: Ejemplo de diseño de una planta de compostaje



Fuente: MMAyA/Municipio de Tiquipaya/Proyecto de aprovechamiento de residuos sólidos orgánicos / 2012

6.3.2 Planta semi mecanizada para compost

La diferencia en el proceso de compostaje en una planta semimecanizada o mecanizada, consiste en la escala productiva y por tanto en el empleo de infraestructura y maquinaria de mayor envergadura, aunque las operaciones para la producción de compost son similares. Por lo general en una planta semimecanizada se maneja un volumen entre 2 a 10 Ton/día de residuos sólidos orgánicos, en tanto que en una planta mecanizada un volumen mayor a 10Ton/día. En la siguiente figura se muestra las operaciones que se realizan en este tipo de plantas:

Figura 6.12: Operaciones en una planta de compostaje semimecanizada

Operación	
1	<p>Recolección de residuos sólidos. Se realiza por de los camiones convencionales de recolección o mediante contenedores.</p> 
2	<p>Almacenamiento de residuos. Los residuos se descargan a campo abierto o en muelles de descarga. El área disponible puede estar construida con hormigón o puede ser sobre suelo compactado impermeabilizado con previsión de recolección de lixiviados.</p> 
3	<p>Triturado de material vegetal. Para el caso de poda, se puede emplear maquinarias como trituradoras o chipeadoras.</p> <p>Chipeadora: Maquinaria equipada con disco o tambor de carga manual, de arrastre o autopulsadas, motor a explosión o eléctrica. Puede trozar o picar ramas de 5" a 18". La capacidad de producción varía de 1000 a 6000 Kg/h.</p>  <p style="text-align: center;">Chipeadora</p>

Figura 6.12: Operaciones en una planta de compostaje semimecanizada

<p>4</p>	<p>Triturador: Maquinara equipada con martillo y cuchilla, de carga manual, motor a explosión, puede triturar ramas hasta 3" dependiendo la capacidad. La muestra de la foto es relativamente pequeña pero las hay de mayores capacidades.</p>	
	<p>Pre-tratamiento, este proceso comprende las siguientes operaciones:</p> <p>1) <i>Preselección de las impurezas</i> más grandes presentes, que puede realizarse manualmente. La eliminación de impropios pequeños se hace en el proceso intermedio o al final</p>	<p>Trituradora</p> 
	<p>2) <i>Homogenización y conformación de pilas</i>. La conformación de pilas se realiza en capas mediante minicargadores o conformadores de pila.</p> <p>La homogenización puede realizarse mediante:</p> <ul style="list-style-type: none"> - <i>Homogenizador</i>. Tanque o tolva con 2 o 4 tornillos sin fin dependiendo la capacidad de producción dispuestos en sentidos opuestos horizontalmente - <i>Equipo de volteo</i> sea maquina cargadora o volteadora. 	
	<ul style="list-style-type: none"> - <i>Esparcidor de estiércol</i> adaptado, con los ejes invertidos). Equipo provisto de una chata y de un homogenizador tipo tornillo sin fin. Puede conformar pilas hasta 1,5 m. - Equipos "unifeed" asimilables a los equipos que realizan mezcla de balanceados para los animales. <p>Con los homogenizadores también puede trocearse los materiales.</p>	<p>Conformador de pilas y homogenizador</p>  <p>Conformador de pilas y homogenizador</p>

Figura 6.12: Operaciones en una planta de compostaje semimecanizada



Homogenizador

5 **Volteo o aireación.** En función del método de compostaje, comprende la conformación de la pila o silo y la aireación forzada mediante ventiladores para la difusión de oxígeno o el volteo.



Pala mecánica (Minicargador)

El *volteo* puede realizarse con la maquinaria empleada para la conformación de pilas o con maquinaria específica de volteo

1) *Pala Mecánica:* Está compuesta por una pala frontal con planchas de acero y dos brazos articulados. El otro extremo de los brazos va montado en un tractor.



La manera adecuada para que la pala cumpla su función es elevar el material y dejarlo caer desde cierta altura de manera que el compost se oxigene mientras cae al suelo, realizando esto sucesivamente hasta haber volteado todo el material de la pila.

2) *Volteadora de Compost.* Está compuesta por una estructura metálica que soporta el mecanismo completo, y está soportada por un eje con ruedas en la parte posterior de la estructura y conectado a un tractor tanto en el enganche como en la toma fuerza de éste.

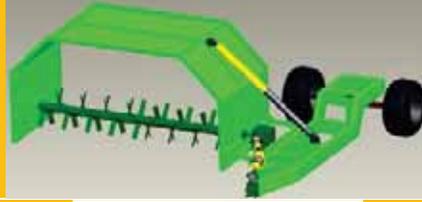
El compost va apilándose en la parte posterior de la volteadora en forma trapezoidal y pareja debido a que las paletas del rotor están configuradas de



Removedor – Aierador

Figura 6.12: Operaciones en una planta de compostaje semimecanizada

manera que se forman dos anillos sinfín que impulsan el material hacia el centro de la pila. La volteadora avanza a través de la pila arrastrada por el tractor que avanza paralelo a la pila de compostaje. Está diseñada para pilas de unos 3 m de ancho y 1.5 m de alto.



Aireación Forzada. En caso de utilizar aireación forzada pueden emplearse ventiladores centrífugos de media presión (turbina, envolvente, motor) con la curva caudal-presión necesario para el insuflado de aire de acuerdo a diseño.



Ventilador centrífugo

El aporte de oxígeno se puede realizar por succión o inyección. Este aporte se realiza de forma continua pero en intervalos definidos según diseño y pruebas de campo que pueden ir ligados a un termostato.

6

Humedad: Sistema de irrigación con aspersores, tubería y bombas. Puede emplearse el mismo lixiviado generado; siempre y cuando se garantice la higienización posterior del material



Medidor de oxígeno

Equipos de Medición:

♻️ **Control de Humedad.** Se medirá la humedad con el método de secado a 105°C con estufa y pesado inicial y final con balanza o mediante técnica del puño, manual.

♻️ **Control de oxígeno.** Sonda y oxímetro

♻️ **Control de temperatura.** Puede emplearse el termómetro de compost analógico, existen sensores con un rango de -10 a 90°C, con un largo de sonda de 40 cm a 1,5 m.



Termómetro de compost analógico

♻️ **pH.** Puede medirse por medio de un Peachímetro de calibración manual y electrodo incorporado. La medición se realiza en el material en solución.



Peachímetro

Figura 6.12: Operaciones en una planta de compostaje semimecanizada

<p>7 Maduración. Se construyen pilas cónicas, triangulares o semiesféricas. Esta actividad puede realizarse por medio de un minicargador.</p>	
<p>8 Tamizado. Luego de la operación de maduración el compost es trasladado hacia otra área para realizar el tamizado correspondiente.</p> <p>Tamizado, puede realizarse utilizando mallas en mesas vibratorias, mallas estáticas o trómel, la alimentación puede ser continua por medio de cintas o manual dependiendo el volumen de materia y ritmo de producción.</p>	 <p>Malla estática</p>  <p>Mesa vibratoria para tamizado</p>   <p>Trómel</p>
<p>9 Envasado. Comprende el llenado y pesado de compost. Por lo general en este tipo de plantas el uso del producto se realiza a gran escala, la carga al camión se realiza con la ayuda de maquinaria.</p>	
<p>10 Empleo de compost en vivero. El compost puede ser empleado en diferentes usos, como el vivero por ejemplo</p>	

6.3.2.1 Infraestructura y obras complementarias en una planta semimecanizada de compostaje

Al igual que una planta de compostaje manual, una planta de compostaje semimecanizada el área debe presentar las condiciones adecuadas para no contaminar el producto, mitigar el impacto ambiental y preservar la seguridad y salud ocupacional de los operarios, la planta puede estar ubicado próximo al relleno sanitario o bien en un espacio fuera de este, por ejemplo en un área de equipamiento o área comunitaria.

El área y topografía deben ser adecuadas a los requerimientos de producción y almacenamiento de producto, por lo general ese tipo de plantas requieren una superficie entre 1 a 2 Has, en función de la capacidad real y del método de compostaje.

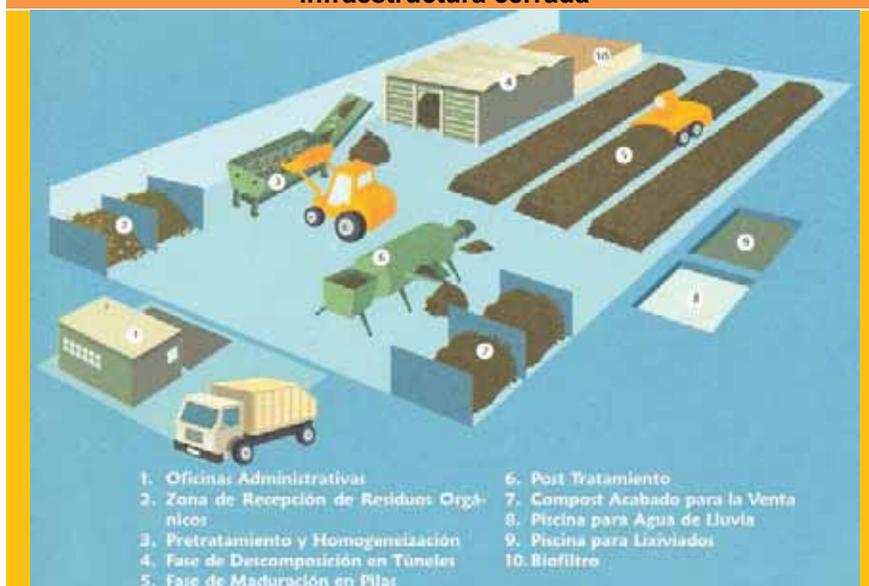
Como infraestructura civil básica dentro la planta se requiere la disponibilidad de los siguientes ambientes:

- 1) Ambiente para una oficina de administración de la planta,
- 2) Ambiente para el resguardo de las herramientas,
- 3) Portería,
- 4) Servicios de sanitarios de higiene (baños y duchas),
- 5) Instalaciones de agua y energía eléctrica,
- 6) Centro de reuniones,
- 7) Cerco perimetral y puerta de ingreso. El cerco, puede ser a base de bolillos y alambre de púas y guardando relación con los objetivos del proyecto,
- 8) Cerco vivo y área de amortiguamiento con especies adecuadas,
- 9) Caminos interiores para la circulación de vehículos.

6.3.3 Planta Mecanizada de Compost

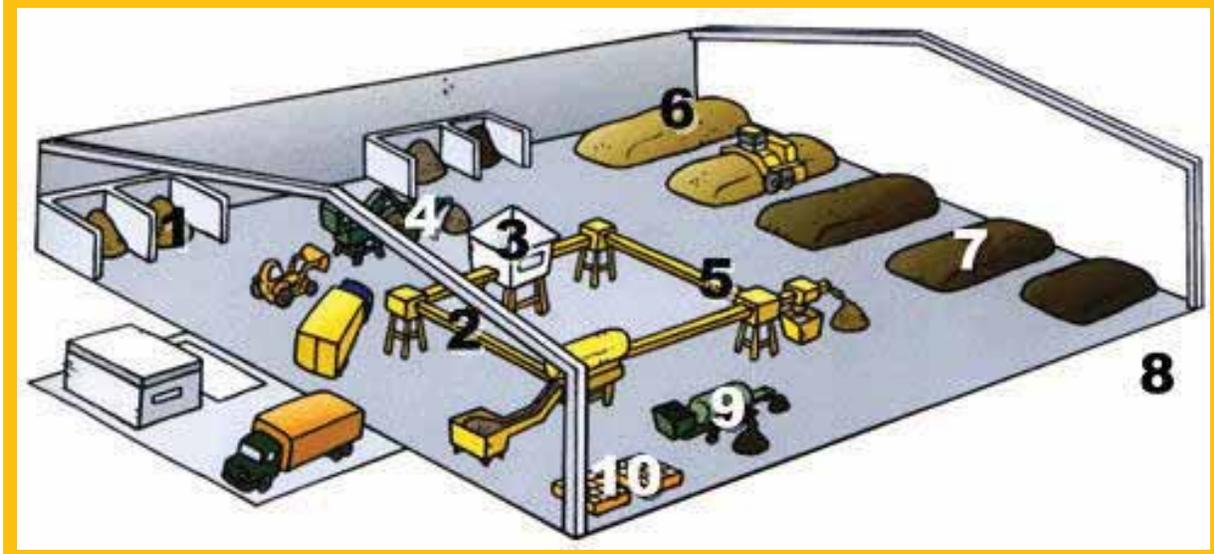
Es importante mencionar que a medida que vaya incrementando los volúmenes de producción de residuos o la necesidad de capacidad productiva sea mayor, se puede optar por la tecnificación de la producción lo cual requiere la inserción y puesta en marcha de equipos sofisticados, así como la disponibilidad de una mayor infraestructura. Esta producción puede realizarse en infraestructuras cerradas o bien a la interperie.

Figura 6.13: Ejemplo Planta de compostaje mecanizada con infraestructura cerrada



Fuente: Agencia de Residuos de Cataluña

Figura 6.14: Ejemplo Planta de compostaje mecanizada con infraestructura abierta



Fuente: <http://www.ison21.es>

El proceso de producción del compost en una planta industria o mecanizada por lo general lleva las siguientes operaciones:

1. Recepción de la fracción orgánica.
- 2 y 3. Trómel, una gran criba cilíndrica separa la materia orgánica de las impurezas, según necesidad se instalan otros equipos para separación de impropios. Éste paso solo es necesario si existen elevados niveles de impropios y puede ubicarse al principio o entre la etapa de descomposición y la de maduración.
4. Recepción de la fracción vegetal y trituración.
5. Mezcla y homogenización. Se mezclan las dos fracciones: 65-75% orgánica y 25-35% vegetal triturada.
6. Disposición en pilas o en silos sobre suelo hormigonado o plataforma aireada: Con una pala mecánica se forman pilas en un cobertizo con o sin paredes y preparado para colectar los lixiviados.
7. Volteado de las pilas y control de las condiciones ambientales del proceso. Para que se descomponga bien, hay que mantener las condiciones de humedad, temperatura y oxígeno. Por eso se riegan las pilas con los propios lixiviados y se remueven con una máquina volteadora.
8. Maduración del compost en pilas
9. Cribado del compost maduro. A las 12-14 semanas el compost se criba para que quede homogéneo y fino. Si quedan desechos vegetales, vuelven al proceso. En función de la cantidad de impropios en el material de entrada a la planta, este proceso de cribado final incluye equipos especializados de separación de residuos inorgánicos.
10. Compost final del proceso.

En la figura siguiente se presentan algunos tipos de maquinaria empleados en plantas altamente mecanizadas:

Figura 6.15: Ejemplos de maquinaria para planta de compostaje mecanizada



Trituradoras de fracción vegetal de alta capacidad



Homogenizadores de alta capacidad



Trómel intermedio de malla grande para separación de impropios

Trómel final de refinó con mesa densimétrica para separación de impropios

Fuente: Agencia de Residuos de Cataluña

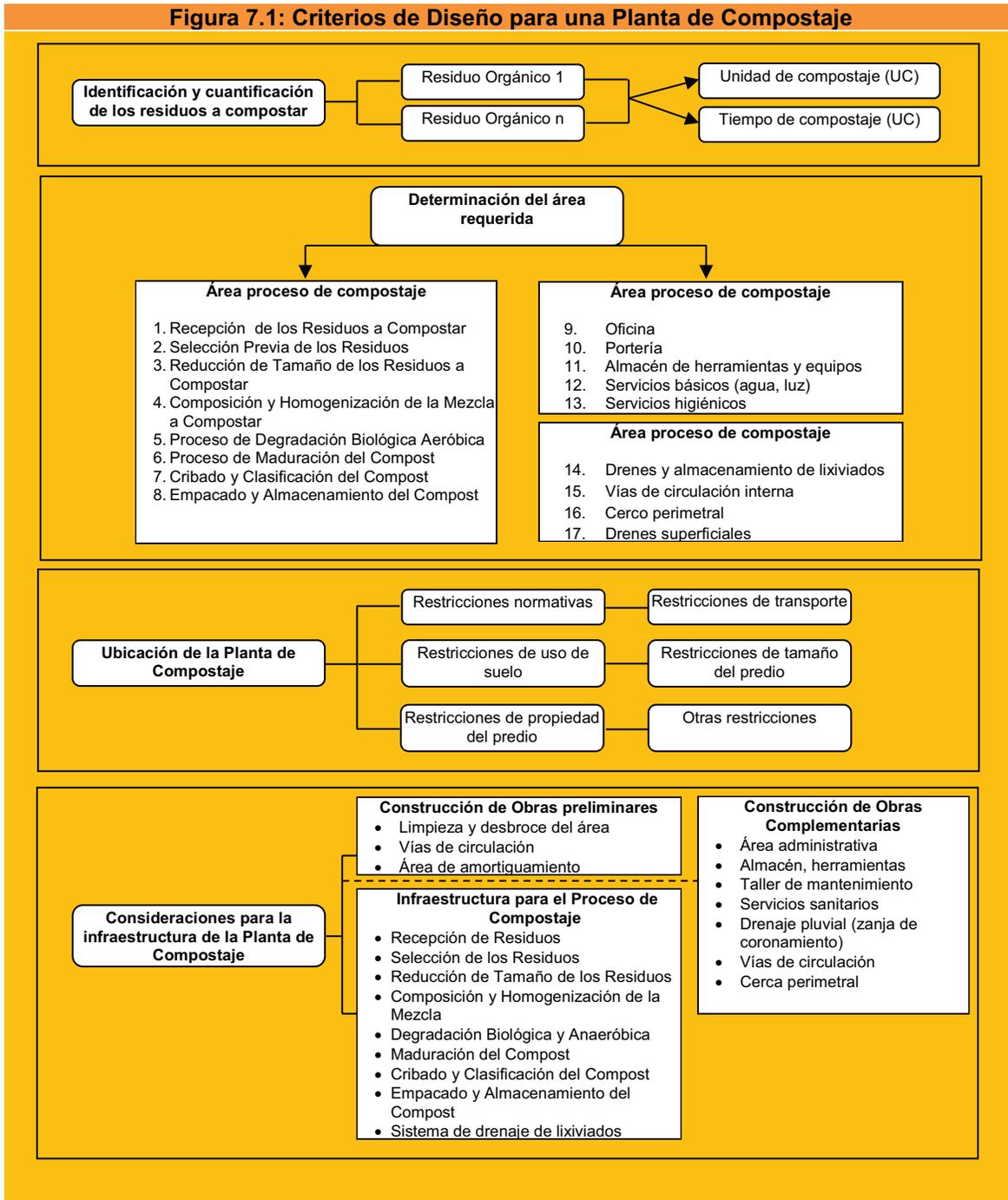
Capítulo VII: Criterios para el Diseño de una Planta Municipal de Compostaje

CRITERIOS PARA EL DISEÑO DE UNA PLANTA DE COMPOSTAJE

7.1 Generalidades

En el presente capítulo se plantean una serie de criterios a tener en cuenta en el proceso de diseño de una planta de compostaje. Estos corresponden a:

Figura 7.1: Criterios de Diseño para una Planta de Compostaje



Antes de iniciar con este capítulo es importante destacar que el éxito de funcionamiento y sostenibilidad de una planta de compostaje recae en tres aspectos básicos:

1. Dimensionamiento
2. Diseño
3. Gestión.

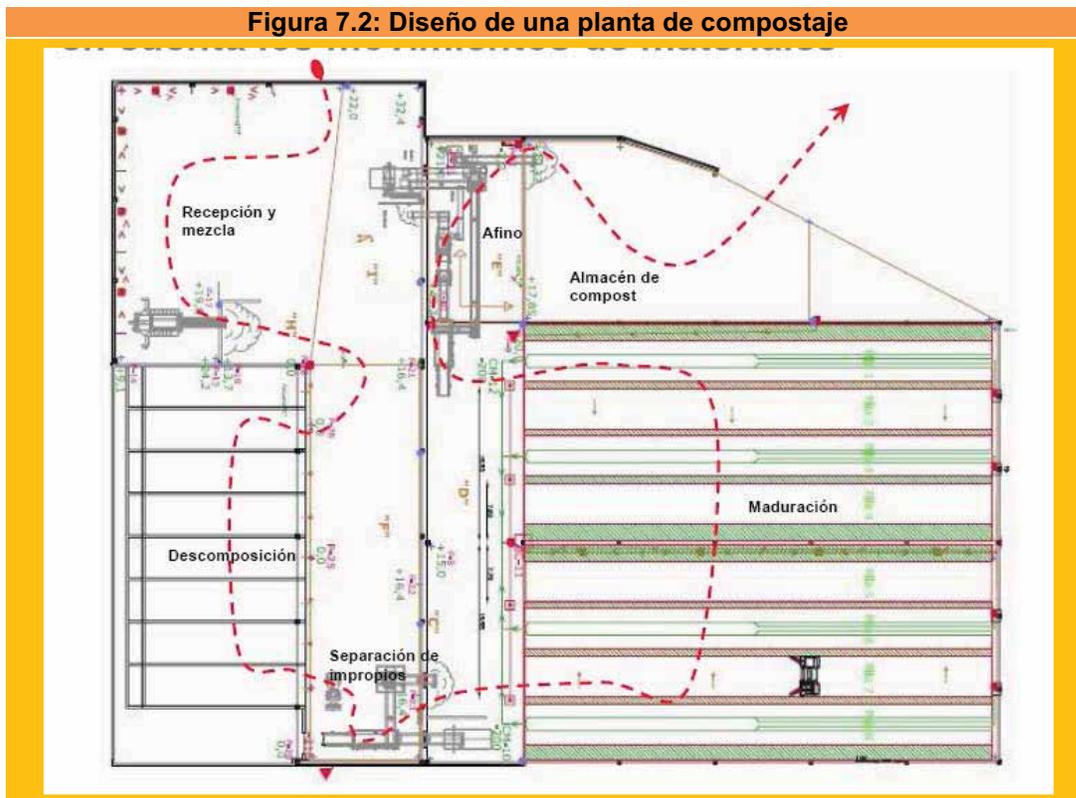
7.1.1 Dimensionamiento

Determinar la capacidad de la planta es un aspecto fundamental en el diseño; esta capacidad vendrá determinada por la cantidad de residuos que se quieran procesar. Es importante tener en cuenta que si bien puede iniciarse el proyecto con poca capacidad, la planta debe estar diseñada de forma que pueda ampliar ésta capacidad hasta llegar a poder tratar los residuos orgánicos generados en el municipio, para lo que se necesitará de los datos básicos de producción y caracterización de residuos del municipio.

Asi mismo, es importante determinar el tipo de planta de compostaje que se va implementar (manual, semi-mecanizada o mecánica) y si esta va a ser abierta o cerrada. La elección de alternativa permitirá determinar el dimensionamiento de los recursos necesarios para la producción de compost, referente al personal necesario, maquinaria y características, herramientas, infraestructura y los controles necesarios durante el proceso.

7.1.2 Diseño

Es importante tener en cuenta los movimientos físicos de los materiales en proceso, es decir la distribución de los diferentes espacios dónde se llevan a cabo las diferentes etapas y operaciones de la planta, deben ser diseñadas de acuerdo a los flujos de material con el objetivo de optimizar el uso de espacio y recursos disponibles.



Fuente: Agencia de Residuos de Cataluña. Diseño de planta mecanizada

7.1.3 Gestión

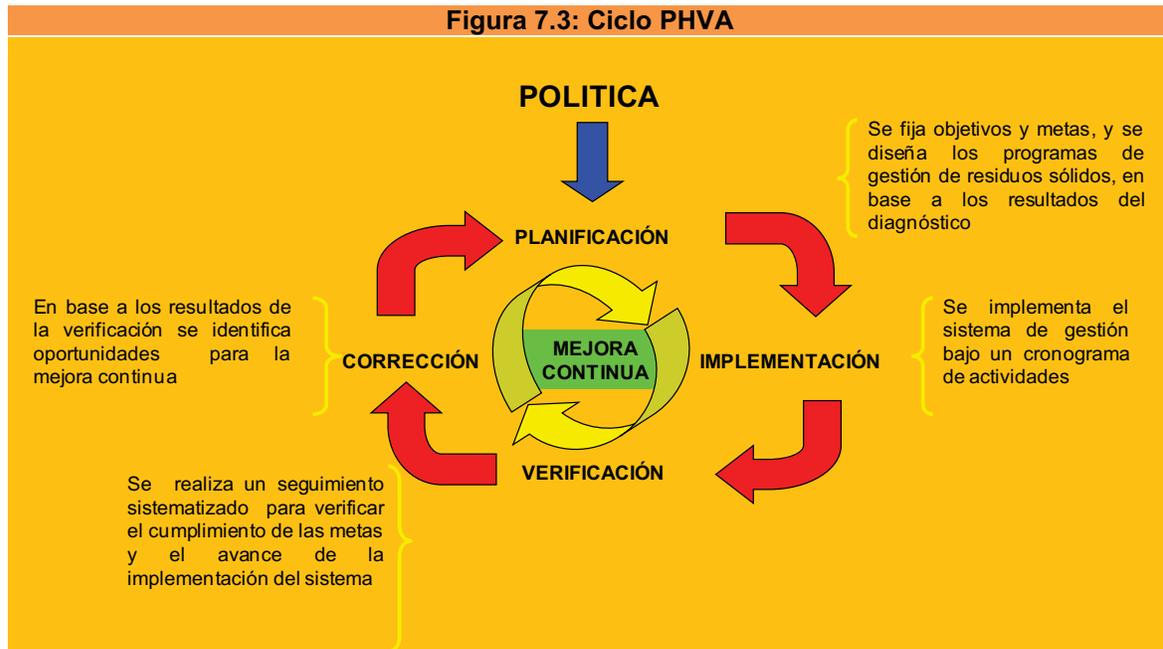
Es importante prever una adecuada gestión antes, durante y después del proceso de compostaje. Realizar una adecuada gestión requiere planificar, administrar y controlar el proceso, para lo cual es necesario desarrollar políticas y estrategias locales orientadas a promover un sistema adecuado de manejo de residuos sólidos, el aprovechamiento de los mismos, así como la asignación de personal clave y recursos económicos para garantizar el funcionamiento, la sostenibilidad y competitividad de la planta en el largo plazo.

La planta de compostaje deberá contar con un manual de operación de forma que el personal asignado para su funcionamiento sepa en todo momento los aspectos a tener en cuenta y se pueda evaluar el funcionamiento de la planta en base a este manual. El Manual de Operación, incluirá el detalle de los materiales de entrada, del proceso y de todas las operaciones involucradas en éste, detalle de la calidad del compost, aspectos ambientales, de salud, así como aspectos de seguridad industrial y laboral.

La gestión de residuos sólidos implica organizar las actividades para la implementación del sistema de manejo de los residuos sólidos y su aprovechamiento en base a los resultados previamente definidos. Por tanto, el manejo de los residuos sólidos debe ser tomado en cuenta por el generador, el operador y el administrador, para cualquier actividad que involucre la generación de residuos sólidos.

Un buen sistema de gestión de residuos sólidos se desarrolla de forma secuencial en las etapas de: Planificación, implementación, verificación y corrección, dentro de un ciclo de mejora continua.

Para mayores referencias se recomienda revisar la Norma Boliviana NB 69012 “Guía para implementar sistemas de manejo y de gestión para residuos sólidos – MGRS”.



Fuente: NB 69012 “Guía para implementar sistemas de manejo y de gestión para residuos sólidos – MGRS”.

7.2 Cuantificación de los residuos a compostar

Como primera medida debe cuantificarse la cantidad y composición física de los residuos sólidos que se generan en el municipio o localidad. Con base a la composición se calculará la cantidad de

orgánicos que se generan por tipo de fuente, que pueden ser: domicilios, mercados, restaurantes, entre otros.

Cada gobierno municipal debe contar u obtener estos datos básicos. De forma referencial se pueden considerar los siguientes datos:

Producción per-cápita de residuos sólidos domiciliarios

Se calcula que el Índice Promedio Ponderado de Producción Per Cápita de residuos domiciliarios en Bolivia es de 0,50 Kg/habitante-día, con un rango de variación de 0,53 Kg/hab-día en áreas urbanas y 0,20 Kg/hab-día en áreas rurales.

Composición física de los residuos sólidos

En términos generales, la fracción orgánica representan el 55,2% del total de los residuos generados, los residuos inorgánicos reciclables representan el 22,1% y el 22,7% restante es considerado como residuo no aprovechable; de los cuales se estima que el 4% son residuos peligrosos generados por los establecimientos de salud.

Composición de residuos sólidos municipales por fuente de generación

Se estima que el 80% de los residuos recolectados corresponden a domiciliarios; el 7,6% a las áreas públicas; el 6,4% a los mercados; el 0,8% a los establecimientos de salud y el 5,3% a mataderos e industrias.

Densidad

Cuando se trate de residuos sólidos sueltos puede emplearse una densidad de 300 Kg/m³, cuando estos son recolectados puede emplearse una densidad entre 400 a 500 Kg/m³, dependiendo el vehículo de recolección y el mecanismo de compactación.

Para fines de cuantificación de los residuos sólidos orgánicos generados, se puede emplear el siguiente cuadro:

Cuadro 7.1: Estimación de la cantidad de residuos sólidos orgánicos generados en domicilios					
Población [Hab] (1)	PPC [Kg/Hab-día] (2)	Generación Domiciliaria [Ton/día] (3)	Generación Municipal [Ton/día] (4)	RSO [Ton/día] (5)	RSO [Ton/año] (6)

(1) y (2) Se obtiene a través de trabajo de campo

(3) Se obtiene de la multiplicación de (1) x (2)

(4) Para determinar la generación municipal, al dato de generación domiciliaria se incrementa entre el 20 a 30% dependiendo las características del municipio. Es decir (3) x 1,2 o 1,3

(5) De los residuos generados en domicilios, se asumen que el 55% corresponde a residuos sólidos orgánicos. Es decir (4) x 55%.

 Si se busca determinar la cantidad de residuos orgánicos generado en mercados, debe estimarse el volumen generado en el día, esto puede realizarse observando el camión recolector que atiende al lugar o cuantificando los contenedores ubicados en el mercado. Con base al volumen y peso volumétrico puede calcularse la cantidad generada. Puesto que la mayor proporción de los productos corresponde a hortalizas, legumbres, frutas o residuos de cocina, se puede estimar que aproximadamente el 80% de los residuos corresponde a materia orgánica.

Cuadro 7.2: Estimación de la cantidad de residuos sólidos orgánicos generados en mercados					
Nombre	Volumen	Peso	Peso	RSO	RSO

Cuadro 7.2: Estimación de la cantidad de residuos sólidos orgánicos generados en mercados

Mercado (1)	recolectado [m3] (2)	volumétrico [Kg/m3] (3)	recolectado [Ton/día] (4)	[Ton/día] (5)	[Ton/año] (6)

(1) y (2) Se obtiene a través de trabajo de campo

(2) Puede estimarse calculando el volumen de la tolva receptora del camión recolector

(4) Resulta de: (2) x (3) /1000

(5) De los residuos generados en los mercados, el 80% corresponde a residuos sólidos orgánicos. Es decir (4) x 80%.

Con base a los datos precedentes, se puede definir la capacidad productiva de la planta y las necesidades en área, infraestructura y maquinaria que se requieren. Como se ha mencionado en una primera etapa se puede comenzar a escala pequeña o en determinadas comunidades o distritos hasta lograr desarrollar y posicionar el proyecto en el municipio o área de servicio.

7.3 Determinación de la Ubicación de la Planta de Compostaje

Una vez cuantificado el potencial de residuos orgánicos existente en el área de servicio, el siguiente aspecto de importancia a considerar en la implementación de un proyecto de compostaje municipal es la posible ubicación de la planta.

Está demostrado que con una correcta operación de la planta no deben generarse molestias, especialmente en plantas de pequeñas capacidades. Aún y así hay que tener en cuenta que la planta es susceptible de generar en determinadas circunstancias, pequeños olores, insectos, tráfico camiones y operación de equipos (en plantas mecanizadas), aspectos que deben ser neutralizados mediante técnicas apropiadas, y ser tomados en cuenta para minimizar las posibles molestias e impacto a la población.

Se recomienda prestar atención a las siguientes restricciones para la ubicación del sitio de la planta de compostaje municipal.

a) Restricciones para minimizar el impacto de la instalación

En el país no existe una normativa que establezca restricciones para la ubicación de una Planta de Compostaje Municipal, sin embargo por las características del proceso de compostaje sería recomendable tomar las siguientes precauciones de forma referencial:

- ✓ Guardar distancia a núcleos poblacionales (300-500 metros).*
- ✓ Estar alejado de fuentes de aguas superficiales y subterráneas (300 metros).
- ✓ No tender pendientes pronunciadas (> 5%).
- ✓ Contar con una dirección del viento contraria a las poblaciones.
- ✓ No encontrarse en áreas protegidas.
- ✓ No encontrarse en lugares con periodos de recurrencia de inundaciones

* Dependerá de las condiciones locales de la planta y el contexto local de la comunidad.

b) Restricciones de transporte

El sitio seleccionado deberá tener en cuenta las necesidades de transporte de materia prima, compost o bien para el transporte de los materiales de rechazo hasta el sitio de disposición final. No existe una receta única puesto que en función del contexto municipal y del planteamiento que exista entorno a los materiales a compostar y uso del compost puede ser más conveniente una cosa o la otra.

c) Restricción del Uso del suelo circundante

Para evitar problemas con grupos de la comunidad y vecinos se recomienda ubicar las plantas en suelos con uso agropecuario o industrial. El cambio de uso del suelo sólo debe considerarse como última opción.

d) Restricción del tamaño del predio

Las plantas de compostaje requieren de una cantidad suficiente de superficie para asegurar el desarrollo de las operaciones de producción. Para plantas poco mecanizadas y teniendo en cuenta un criterio en función a la capacidad de tratamiento anual se puede considerar una necesidad de superficie de unos $2,5m^2/Tn.año$. En función del nivel de mecanización de la planta se requerirá más o menos superficie.

En algunos casos puede ser recomendable que la planta de compostaje esté ubicada en los mismos predios del relleno municipal para poder aprovechar la infraestructura, servicios y maquinaria en este existente, pero en algunos casos puede no ser así dependiendo de las distancias a la población y del uso que se quiera dar al compost. En caso se requiera para viveros o proyectos de reforestación puede ser que la ubicación en el relleno no sea lo más apropiado. Si el compost se quiere usar en el cierre técnico de las celdas antiguas del relleno, entonces sería mejor ubicarla cerca de este.

7.4 Formulación de la Mezcla de los Residuos a Compostar

Una vez identificadas las cantidades generadas y su procedencia, debe cuantificarse los volúmenes de residuos a compostar, así como la frecuencia de ingreso de los mismos a la planta de compostaje. Los datos de volumen nos permitirán calcular la Unidad de Compostaje (Uc) y el Tiempo de Compostaje (Tc) que son la información base para el diseño de la planta de compostaje.

A continuación se proporcionarán datos para la conformación de los volúmenes de residuos a compostar. La información proporcionada se basa en los sistemas de pilas volteadas y de pilas con aireación forzada por ser los más usuales.

7.4.1 Unidad de Compostaje (Uc)

La Unidad de Compostaje, es la masa de residuos ($m^3/día$ o $Kg/día$) que nos permitirá definir la conformación de la pila y que ingresará al sistema como una unidad independiente del resto. Para efectos de la presente Guía la Uc corresponde a la cantidad de Residuos Sólidos Orgánicos (RSO) que ingresan a la Planta en sus diferentes fracciones como residuos húmedos o verdes, residuos secos, estiércol, aserrín y otros. La unidad de compostaje guarda relación con los parámetros de las diferentes fracciones orgánicas referente como el peso, la relación C/N y la Humedad. Para tal efecto se puede utilizar la metodología presentada en el Anexo 1: *Técnica para la Formulación de la Mezcla para el Compostaje*.

A manera de ejemplo, el siguiente cuadro puede utilizarse para fines de cuantificación de los residuos sólidos orgánicos según las características particulares de cada municipio:

Cuadro 7.3: Cuantificación de los residuos sólidos orgánicos por fuente de generación		
Residuos	Peso (Ton/día)	Observación
RSO generados en el municipio		Lo que se genera en RSO del municipio
RSO aprovechables		Lo que se podría aprovechar con proyecto de recolección selectiva
RSO aprovechados en planta		Lo que inicialmente se aprovechará en el municipio.
RSO domiciliarios		
RSO mercados		

Cuadro 7.3: Cuantificación de los residuos sólidos orgánicos por fuente de generación

RSO de poda		
RSO de madera seca		
RSO de mataderos		
RSO de lodos		
RSO agrícolas		
Total (Ton)		

Normalmente, a nivel de municipio, los materiales a compostar consisten en los residuos orgánicos domiciliarios y de mercado y residuo vegetal de poda. También se mezcla rumen de matadero con la finalidad de acelerar el proceso de compostaje.

Ejemplo 1: Residuos sólidos orgánicos de mercados o domicilios y astilla como material estructurante

Por ejemplo en un municipio donde solo se dispone de RSO de mercados y no existen residuos de poda, para el proceso, como material estructurante debemos usar material tipo astilla de madera.

La proporción de materiales cuando compostamos RSO domiciliarios y astilla debe ser aproximadamente de 2:1, es decir 2 m³ de RSO y 1 m³ de astilla. El cálculo en peso puede realizarse de la siguiente forma:

Proporción/Fracción	RSO	Astilla
Volumen (m3)	2	1
Densidad (Ton/m3)	0,6	0,3
Peso (Ton)	1,2 Ton	0,3 Ton

Con base a una relación de tres simple directa, se calcula que por cada Ton de residuos orgánicos se requieren 0,25 Ton de astilla.

La astilla se recupera al final del ciclo de proceso, en el cribado, puesto que no toda se degrada en el proceso de compostaje y ésta se reintroduce en el proceso de mezcla, haciendo de alguna manera también la función de inocular bacterias. Por cada ciclo de producción, se calcula una pérdida de la astilla de un 10% máximo, por lo que casi toda la astilla se recupera al final del ciclo y puede ser reintroducida en el proceso como estructurante.

Ejemplo 2: Residuos sólidos orgánicos de mercados o domicilios y poda triturada como material estructurante

Cuando usamos poda triturada como material seco y estructurante, la proporción ideal es de 1:1 en volumen, es decir 1 m³ de RSO y 1 m³ de poda. El cálculo en peso puede realizarse de la siguiente forma:

Proporción/Fracción	RSO	Poda triturada
Volumen (m3)	1	1
Densidad (Ton/m3)	0,6	0,3
Peso (Ton)	0,6 Ton	0,3 Ton

Con base a una relación de tres simple directa, se calcula que por cada Ton de residuos orgánicos se requieren 0,50 Ton de poda. En función de la porosidad de la mezcla, la proporción de la mezcla podría llegar a ser 2:1.

La poda triturada también se recupera al final del ciclo en el proceso de cribado pero se degrada en mucha más proporción que la astilla.

7.4.2 Diseño de la pila o hilera para la Unidad de Compostaje (Uc)

Cuando conformamos pilas para compostaje, la base deberá estar entre 2 a 3 metros y la altura la mitad de la base, lo que nos permitirá obtener una buena relación Superficie/Volumen. No es aconsejable la conformación de montones de pequeños volúmenes, ya que las fluctuaciones de temperatura en estos pequeños volúmenes son muy bruscas.

Figura 7.4: Conformación de Pilas o Hileras

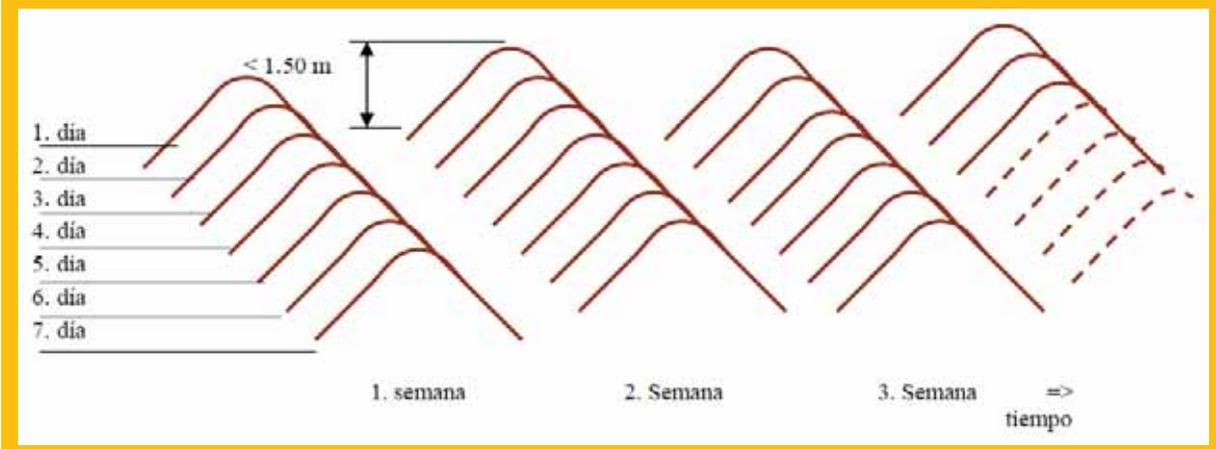


Figura 7.5: Conformación de Pilas o Hileras

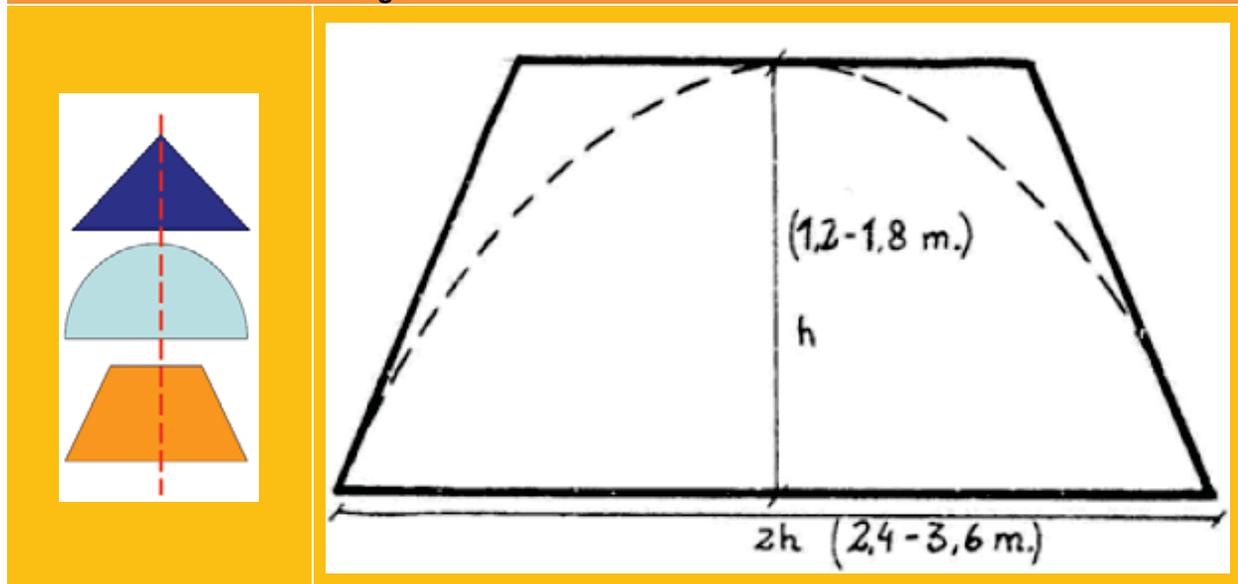


Figura 7.6: Dimensiones de la Unidad de Compostaje (Uc)



Fuente: <http://www.cdrtcampos.es/lanatural/compostaje.htm>

Lo ideal es conseguir al menos 1m³ de pila para mantener el calor (200 kg aproximadamente equivale a 0,8m³). Por lo que, en función de la densidad se debe conseguir al menos 250 kg de residuos en la semana de conformación de la pila.

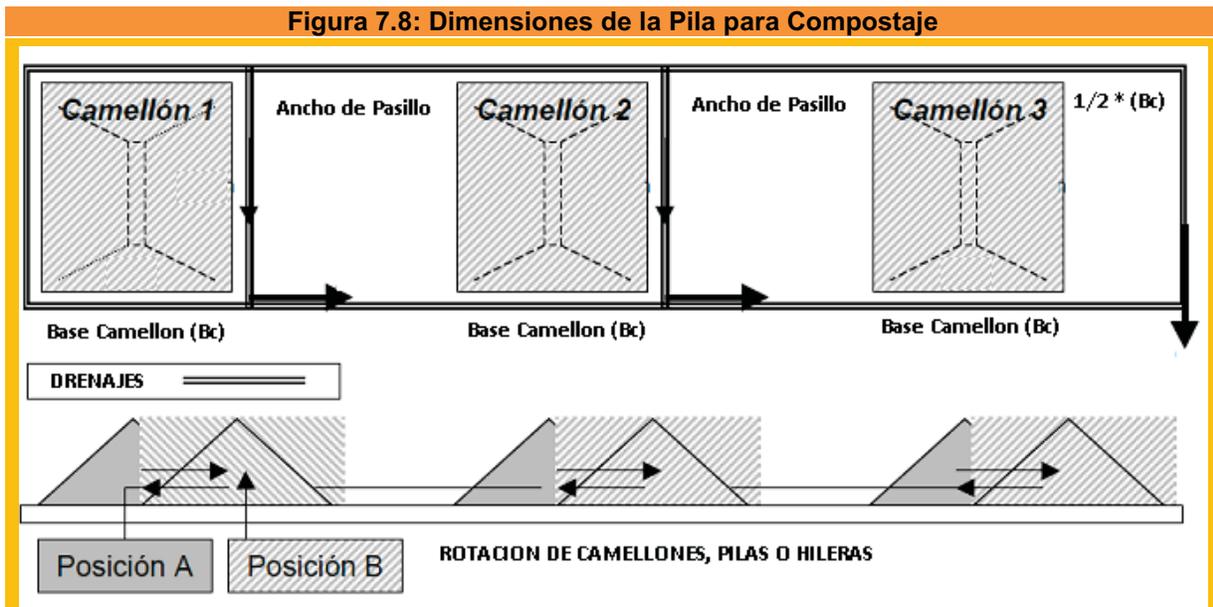
Dependiendo la forma de apilado, para el cálculo del área de la pila del material pueden aplicarse una de las siguientes fórmulas:

Figura 7.7: Forma de Apilado de Pilas de Compost		
Sección	Forma de apilado	Superficie de la sección
Trapezoidal		$S = \frac{B + b}{2} * h$
Triangular		$S = \frac{B * h}{2}$
Rectangular		$S = B * h$
Semicircular		$S = \frac{\pi * h * B * L}{2}$

Fuente: Guía de Soporte para el Diseño y Explotación de Plantas de Compostaje, Agencia de Residuos de Cataluña

Si tuviéramos un montón de longitud de 1 m, el volumen de la pila sería S*1 m³ y la superficie que ocuparía sería de B*1 m². Por lo tanto la capacidad de carga, o el volumen en m³ de mezcla a compostar que es posible acumular por cada m² de superficie, se calcula dividiendo (S*1 m³) por (B * 1 m²), es decir, S / B.

Para la pila más pequeña se debe contar con al menos 1m^2 de área; más el área operacional de volteo de la pila más el área de seguridad. Si se construyen varias pilas se contar los pasillos operacionales.



Fuente: Organización Panamericana de Salud, Organización Mundial de la Salud. Manual para la Elaboración de Compost-Bases Conceptuales y Procedimientos.

En el caso de trincheras, silos o módulos para el método de aireación forzada, el volumen para la Unidad de Compostaje puede llegar a ser de 2 m de alto y 4 de ancho en forma cuadrada por lo que se aprovecha mucho el espacio.

7.4.3 El Tiempo de Compostaje (T_c)

Se entiende por Tiempo de Compostaje (T_c), el transcurrido desde la conformación de la pila o hilera hasta la obtención de compost estable. El T_c , varía según las características de los residuos a compostar, las condiciones climatológicas (temperatura, ambiente, % de humedad, etc.), la técnica empleada para el compostaje y las características del producto final que se desea obtener. Con frecuencia este tiempo puede estar entre los 90 a 180 días para los residuos orgánicos municipales.

Los valores de la U_c y de la T_c , servirán para el cálculo del área necesaria para llevar a cabo el proceso de compostaje.

7.5 Determinación del área requerida para la planta de compostaje

Una planta de compostaje deberá contar con una área global que incluirá el área para el proceso de compostaje, para el área administrativa y para infraestructura complementaria.

El factor fundamental para el dimensionamiento de la planta de compostaje es la disponibilidad de materia prima, así como el método o técnica utilizada para el proceso de compostaje. En términos generales, para el método de pilas volteadas, esta área será aproximadamente:

- ♻️ Si la materia prima es menor a 2 Ton/día se deberá contar con una superficie hasta 3.000 m^2 para la infraestructura de la planta de compostaje e infraestructuras complementarias necesarias.

- ♻️ Si la materia prima estará entre 2 Ton/día a 10 Ton/día se deberá contar con una superficie hasta 2 Has (20.000 m²), tanto para la infraestructura de la planta y las obras complementarias para su funcionamiento.
- ♻️ Si la materia prima será mayor a 10 Ton/día la superficie recomendable será mayor a 2Has (20.000 m²) para la infraestructura de la planta y las obras complementarias para su funcionamiento.

En el caso de emplear sistemas de ventilación forzada por la base, el espacio requerido es menor pues se aprovecha más el espacio en volumen y se requiere de menos tiempo de compostaje.

A continuación se dan algunas orientaciones para poder determinar de forma más precisa el área necesaria para la planta de compostaje.

7.5.1 Requerimiento de área para el proceso de compostaje

Las diferentes etapas en el proceso de compostaje pueden ser diseñadas de forma independiente. Como se ha indicado en el apartado anterior, estas corresponden a: recepción y selección de los residuos a compostar; trituración del material vegetal; mezcla de residuos a compostar; degradación aeróbica o descomposición de los residuos; maduración del compost; cribado y clasificación del compost; almacenamiento y empaquetado.

Previamente deberá calcularse la cantidad de residuos que se espera recibir al vida útil del proyecto, de manera de prever los incrementos en volumen que podría generarse durante dicho tiempo. Para cálculo se puede aplicar la siguiente fórmula:

$$Ucf = Uci * (1 + i\%)^t$$

Donde:

Ucf = Cantidad de residuos sólidos orgánicos recepcionados en planta(ton/día) año final del proyecto

Uci = Cantidad de residuos sólidos orgánicos recepcionados en planta (ton/día) al año 0 del proyecto

i% = tasa de crecimiento

t = años de vida útil del proyecto

1. Área para la Recepción y Selección Previa de los Residuos a Compostar (Ar)

Para calcular el área requerida para la recepción de residuos sólidos orgánicos, se puede emplear la siguiente ecuación:

$$Ar (m^2) = \frac{Ucf}{Ds * Hc}$$

Donde:

Ucf = Cantidad de residuos sólidos a recibir en plana (Ton/día)

Ds = Densidad de los residuos sólidos recepcionados (Ton/m³)

Hc = Altura de los residuos dispersos (m)

Los residuos en el área de selección deberán ser esparcidos para poder realizar la separación de residuos impropios de volumen o riesgo considerable como pilas, plásticos, vidrios, metales y otros, para lo cual se debe expandir los residuos a una altura que puede variar entre 20 a 40 cm dependiendo del volumen de residuos a compostar.

2. Área para el triturado de material seco (A_t)

En esta área se deberá contar el espacio adecuado para el acopio de la poda o de otro material seco, el espacio para el funcionamiento del equipo de trituración o chipeado de los residuos y el material triturado.

$A_t =$ según volumen de poda a ser almacenado y espacio de trituradora

Por lo general, se puede considerar un 20% adicional del área de recepción (A_r)

3. Área para la Homogenización del Material a Compostar (A_h)

Para la composición y homogenización de la mezcla, si se realiza de forma manual, se puede usar la misma área utilizada para la recepción y selección de los materiales. Si se realiza de forma mecanizada con homogenizador, se debe preveer el área necesaria para la maquinaria.

4. Área de rechazo (A_s)

En los procesos de recepción, homogenización y mezcla se extraen contaminantes considerados como rechazos del proceso los cuales deben ser llevados posteriormente a disposición final. Según experiencias en plantas de compostaje, el porcentaje de rechazos debería ser máximo de 2% y solo hasta 10% si existe suficiente mecanización de la planta para extraerlos. Se deberá contar con el espacio para el almacenamiento de éste rechazo que dependerá de la calidad del material de entrada y del tiempo de almacenamiento de éste antes de ser destinado a relleno. Se puede contar con contenedores para almacenarlo.

5. Área para la descomposición o degradación de residuos

En el caso de sistemas de descomposición por pilas volteadas, el área estará determinada por la Unidad de Compostaje (U_{cf}), el Tiempo de Degradación (T_d) y el volumen de las pilas.

Debemos considerar además el espacio necesario entre pilas a los que llamaremos pasillos y que será el espacio necesario para manejar las pilas. Las dimensiones del mismo estarán sujetas a la forma en que se realicen las operaciones de remoción y aireación. Si esta remoción es manual, el ancho del pasillo puede situarse en el entorno de 2 a 2,5 m. Si la operación es mecanizada (pala cargadora), los pasillos tendrán que tener el ancho suficiente para que la máquina pueda movilizarse y realizar la remoción de los montones siendo el más adecuado un ancho de 4 m, si el volteo es con volteadora, será necesario considerar el ancho necesario para ésta.

Adicionalmente, para el cálculo del área requerida para la conformación de las pilas de degradación se tienen en cuenta los siguientes parámetros.

h_d = Altura de las pilas (m)

B_d = Ancho base de las pilas (m)

D = Densidad de residuos en las pilas (Ton/m³)

T_d = Duración de ciclo de degradación (días)

U_{cf} = Residuos a recibir en planta (Ton/día)

L_f = Longitud total de fila estándar de degradación (m) (7 días de material acumulado)

$$\text{Volumen de la pila para degradación} = \frac{U_{cf} * T_d}{D}$$

Si la conformación de la pila es triangular, el área mínima por pila y la longitud total de la misma puede determinarse de la siguiente manera:

$$\text{Longitud total de la pila} = \frac{\text{Vol pila de degradación}}{(\text{Bd} * \text{hd})/2}$$

$$\text{Nº total de pilas} = \frac{\text{Longitud total de la pila}}{\text{Lf}}$$

$$\text{Área de pilas de degradación} = \text{Nº total de pilas en degradación} * \text{Bd} * \text{Lf}$$

La longitud estándar de la pila de compostaje (*Lf*) es variable, en plantas pequeñas se recomienda un largo entre 10 a 15 m, en plantas grandes o con sistema de volteo mecánico puede alcanzar un largo de hasta 100m.

En caso de aplicar un sistema con volteo mecánico, se puede tomar una distancia entre pilas de 4m para el tránsito de maquinaria o en su caso el ancho de la volteadora. Cuando se traten pilas estáticas con sistema de aireación forzada la distancia entre pilas puede disminuir de 1-0,5m. Para los canales perimetrales puede considerarse un ancho de 50 cm. En consecuencia para un sistema de con volteo mecánico, el área total para degradación se estima de la siguiente forma:

$$\text{Área total de degradación} = \text{Área de pilas de degradación} + \text{Área de pasillos entre pilas} + \text{Área de canales perimetrales}$$

El área de pasillos entre pilas puede calcularse multiplicando la Longitud estándar de la pila (*Lf*) por el ancho del pasillo. El mismo cálculo se realiza para los canales perimetrales.

6. Área de maduración

El área de maduración debe contar con la suficiente capacidad para conformar filas de material proveniente de las filas de fermentación cuyo volumen se ve reducido a la mitad. El cálculo del área de fermentación parte de las siguientes consideraciones para la conformación de las filas:

hm = Altura de las filas (m)

Bm = Ancho base de las filas (m)

Dm = Densidad de residuos en las filas (Ton/m³)

Tm = Duración de ciclo de maduración (días)

Ucf = Residuos a recibir en planta (Ton/día)

Lf= Longitud total de fila estándar de degradación (m)

$$\text{Longitud total de la pila de maduración} = \frac{\text{Vol pila de degradación} * 1/2}{(\text{Bm} * \text{Hm})/2}$$

$$\text{Nº de pilas} = \frac{\text{Longitud total de la pila}}{\text{Lf}}$$

$$\text{Área de pilas de maduración} = \text{Nº total de pilas en maduración} * \text{Bm} * \text{Lf}$$

El ancho pilas puede disminuir a 2m para el tránsito de maquinaria o de personal, de manera que se pueda retirar el compost una vez este maduro.

$$\text{Área total de maduración} = \text{Área de pilas de maduración} + \text{Área de pasillos entre pilas}$$

El área de pasillos entre pilas puede calcularse multiplicando la Longitud estándar de la pila (Lf) por el ancho del pasillo.

7. Área de cribado

El material resultante del proceso de maduración debe ser afinado a través del cribado en una zaranda y el retiro de posibles residuos impropios presentes en el compost. La cantidad de compost cribado y embalado diariamente provendrá de una pila de maduración y se puede considerar una altura de cribado de 1,5 que sería lo adecuado, para realizar el cribado del compost, con un intervalo de tiempo de una semana minimamente. Hay que tener en cuenta que el volumen de los residuos habrá disminuido nuevamente por la pérdida de humedad y el proceso de maduración del compost, en tal situación se puede considerar que una vez terminado el proceso de maduración el material que pasará a la etapa de cribado y clasificación es un 30% de su volumen inicial.

$$\text{Área de cribado} = \frac{\text{Vol pila de degradación} * 1/3}{\text{Altura de cribado}} + \text{espacio de maquinaria}$$

8. Área de Almacenamiento

Para el almacenamiento se dispondrá de un área suficiente para albergar el volumen generado al día durante un mes correspondiente a 1/3 del volumen inicial procesado al día, pues se espera una rotación del inventario constante.

Considerando una altura de almacenamiento de 2m el área estimada para este fin se estima de la siguiente forma:

$$\text{Área de almacenamiento} = \frac{\text{Vol pila de degradación} * 1/3 * \text{Período de almacenamiento}}{\text{Altura de almacenamiento}}$$

9. Obras complementarias

La infraestructura administrativa con la que se debe contar en la Planta de Compostaje Municipal es básicamente: Oficina, portería, baños y almacén de herramientas y servicios básicos (agua, electricidad y alcantarillado o pozo séptico). El dimensionamiento de esta infraestructura es variable de acuerdo a las necesidades del Municipio y los usos que pueda dar a esta infraestructura. Esta área puede ser variable pero puede fluctuar entre 50 a 120m²

La infraestructura complementaria requerida en la planta de compostaje municipal esta referida a la preparación de vías de circulación al interior de la planta para los vehículos que ingresan la materia prima como para los que recogen el producto final, las piscinas o depósitos de lixiviados, la preparación de un área de amortiguamiento al contorno de la planta de compostaje y la construcción de un cerco perimetral y zanja de coronamiento si el caso lo requiera.

Cuadro 7.4: Resumen del área requerida para compostaje

Área	Total (m ²)
Recepción de material	
Reducción de tamaño de residuos	
Homogenización	
Rechazo	
Degradación	
Maduración	
Cribado	
Almacenamiento	
Otras áreas*	
Total área compostaje	

* Será también de mucho interés preveer una area para educación ambiental, de forma de poder diseñar la instalación preveiendo que esta pueda ser usado como espacio educativo y de visitas.

En el caso de usar un sistema abierto pero de aireación forzada, ya sea mediante la conformación de pilas o mediante la conformación de silos o mesetas, el cálculo del área de descomposición variará por disminuir el ancho de los pasillos en el caso de las pilas y por eliminar este ancho y optimizar el espacio en altura en el caso de silos o acopio en meseta.

7.6 Manejo de Lixiviados

En el proceso de transformación de los residuos en compost, la materia orgánica se degrada formando un fertilizante líquido orgánico denominado lixiviado. La humedad de la materia orgánica es el principal factor que acelera la generación de lixiviados.

Los lixiviados de la producción de compost, contienen una alta concentración en sales minerales y gran cantidad de nutrientes, microorganismos y materia orgánica. Su coloración es coloración es negra-marrón. La calidad de un lixiviado siempre dependerá del material inicial con el que se haga el compost, de los procedimientos que se sigan cuando se lleva a cabo el proceso del compostaje, de la temperatura de la que llegue el compost, del tiempo que se emplee, de la humedad del proceso y del buen mantenimiento del lixiviado cuando se almacene.

El mismo lixiviado puede ser recirculado como agua de riego en las pilas, dependiendo del volumen de residuos sólidos a compostar, por lo general se realiza de forma manual o por bombeo automatizado desde las piscinas o depósitos, dependiendo el caudal generado. Después del riego con lixiviado debe garantizarse siempre una fase de higienización posterior. Para evitar mal olor el sistema de riego a las pilas puede ser por goteo con tubería perforada por encima de las pilas.

Para el drenaje de lixiviados, debe preverse la pendiente suficiente en el piso para garantizar la recolección de lixiviados por medio de un drenaje construido en uno de los perímetros de la plataforma. Cuando mínimo debe garantizarse una pendiente del 2%.

Para el cálculo de la generación de lixiviado, hay que tener en cuenta dos cosas:

1. El lixiviado generado por el propio material
2. El lixiviado generado por las lluvias que circulan por las plataformas sucias.

El volumen de lixiviado generado por el propio material dependerá mucho del tipo de material y proporción que cuente de fracción vegetal; preliminarmente se puede estimar entre 40 a 80 litros por Ton.

Para determinar la cantidad de lixiviado generado al año en una instalación, se puede aplicar la siguiente ecuación:

$$V_{id} = Qd * (0,05) * \left(\frac{1 \text{ año}}{52 \text{ semanas}}\right) * Td * 1,5$$

$$V_{lm} = Qd * (0,01) * \left(\frac{1 \text{ año}}{52 \text{ semanas}}\right) * Tm * 1,5$$

Donde:

V_{id} y V_{lm} = Volúmenes en m^3 de lixiviado para que habrá de almacenar procedente respectivamente de las etapas de descomposición y de maduración al año.

Qd = Capacidad de diseño de la instalación, excluyendo el estructurante, expresada en Ton/año.

Td ; Tm = Duración en semanas, de las etapas de descomposición y maduración respectivamente.

1,5 = Factor de seguridad.

El agua de lluvia que recibe la superficie del material, mayoritariamente se absorbe en los primeros centímetros de la masa a compostar y por lo tanto no se recoge como agua lixiviada. Así mismo debe determinarse la cantidad de agua que circula por los espacios sin material, los pasillos en el caso de pilas. Para obtener este dato, se debe multiplicar los m^2 de la superficie descubierta por la pluviometría.

Para determinar la cantidad de agua de lluvia acumulada de superficies se puede aplicar la siguiente ecuación:

$$V_s = (S_1 + S_2 + S_3 + \dots) * PP * Fs / 1000$$

Donde:

V_s = Volumen, en m^3 , que habrá almacenar procedente de las zonas anteriormente mencionadas, que no estén protegidas de la lluvia.

S_1, S_2, S_3, \dots = Superficie, en m^2 , de las zonas mencionadas.

PP = Lluvia máxima en 24 horas para un período de retorno de 10 años, expresada en l/m^2

Fs = Factor de seguridad, igual a 1,25 si la pluviometría anual medida es inferior a 600 l/m^2 y 1,50 si es superior a este valor.

La capacidad total de lixiviados generados será:

$$Vl = V_{id} + V_{lm} + V_s$$

El volumen de almacenamiento dependerá de la frecuencia de remoción del lixiviado a las pilas considerando los volúmenes en época de lluvia para evitar rebalses.

En referencia al tipo de infraestructura para almacenaje, cada una tiene sus ventajas o desventajas que deben ser valoradas en función del tipo de planta y su contexto.

Figura 7.9: Instalación de drenaje para lixiviados y depósitos



Drenaje de lixiviados

Depósito de lixiviados

Fuente: Proyecto de aprovechamiento de residuos sólidos orgánicos, MMAyA/Municipio de Tiquipaya /2012

Figura 7.10: Otras opciones para almacenamiento de lixiviados



Depósitos

Piscinas de almacenamiento

Fuente: Agencia de Residuos de Cataluña

7.7 Sistema de aireación forzada

El sistema de aireación forzada, es un método técnicamente viable que puede ser aplicado en municipios de diferentes categorías poblacionales según las necesidades de producción. Entre las ventajas principales de este método se refieren al requerimiento de menos tiempo y espacio, no requiere volteos y por otro lado, el costo del consumo energético generado por la aireación forzada es menor que el costo del combustible en caso de volteo con maquinaria.

La ventilación forzada se realiza por la base de la pila y para lograrlo se pueden usar dos métodos:

- 1) Tuberías perforadas encima del piso y en la base de la pila
- 2) Pisos de hormigón ventilados. Canalización de tuberías perforadas dentro de un piso de hormigón o incluso insuflado por debajo de una plataforma de hormigón agujereada.

Aunque su construcción es un poco más costosa, se recomiendan los pisos o pavimentos ventilados, puesto que los sistemas que tienen las tuberías perforadas directamente encima del suelo y bajo el material, pueden verse perjudicados por la pala cargadora en las operaciones de carga y descarga del material.

Los sistemas de aireación forzada son realmente efectivos en el caso de una disposición del material en forma de silos puesto que en este caso se optimiza mucho el espacio.



Fuente: TGA, S.L. (Tècniques de Gestió Ambiental, S.L.). Catalunya

7.7.1 Diseño de la plataforma⁸

La construcción del piso podrá ser hormigón armado u hormigón ciclópeo dependiendo la presión de carga y la maquinaria a emplear sobre la plataforma. En el caso de plataformas con tuberías incorporadas, durante la construcción de plataformas debe preverse también la construcción de canales para incorporar las tuberías para la circulación del aire. Los propios canales servirán también para la recolección de lixiviados para posteriormente drenarse a depósitos o piscinas. El número de canales y tuberías dependerá del diseño y de las necesidades de caudal de aire en función del volumen de material a ser aireado (será diferente para pilas aireadas o para silos, por ejemplo). Las tuberías de la base de la plataforma deben ser de polietileno para no verse afectadas por el calor, las de distribución pueden ser de PVC.

Los detalles de lo descrito se presentan en las figuras siguientes:

⁸ TGA, S.L. (Tècniques de Gestió Ambiental, S.L.). Catalunya

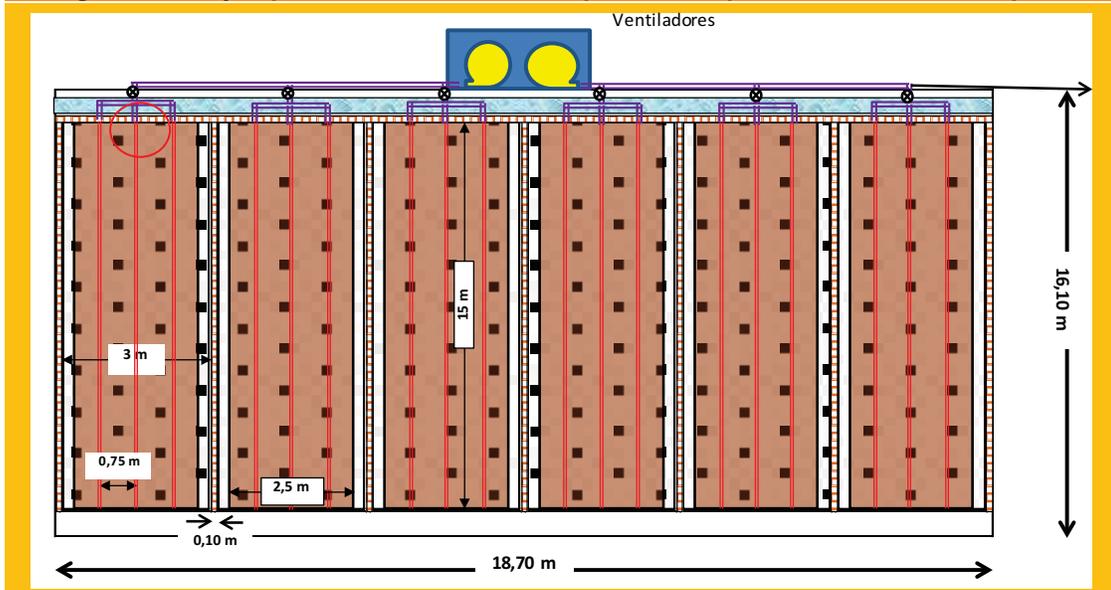
Figura 7.12: Construcción de la plataforma para conformación de pilas



Fuente: Proyecto de aprovechamiento de residuos sólidos orgánicos, MMAyA/Municipio de Tiquipaya

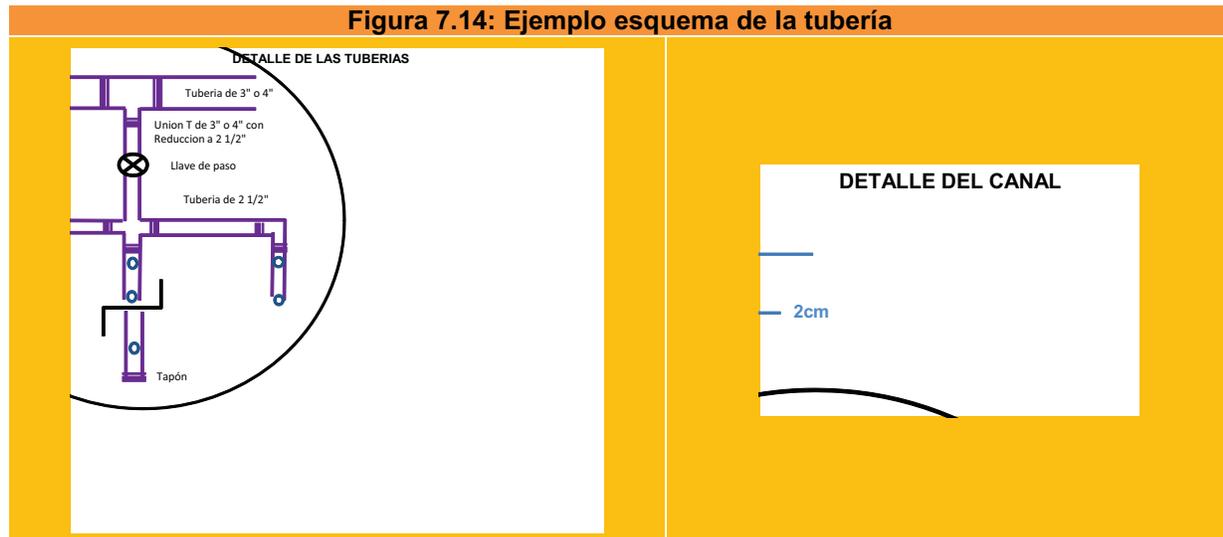
Como ejemplo a continuación se muestra la distribución de la plataforma diseñada con sistema de aireación forzada.

Figura 7.13: Ejemplo de distribución de la plataforma para conformación de pilas



Fuente: MMAyA/Municipio de Tiquipaya - Proyecto de aprovechamiento de residuos sólidos orgánicos /2012

Para el caso de depositar la materia orgánica en forma de silos con altura del material, se necesitan tres tubos de aireación para lograr una correcta aireación; en el caso de depositar la materia orgánica en pilas, es suficiente con un tubo por pila.



Fuente: MMAyA/Municipio de Tiquipaya - Proyecto de aprovechamiento de residuos sólidos orgánicos /2012

7.7.2 Diseño de la red de aireación⁹

Los parámetros de diseño deben tomar en cuenta la capacidad del sistema para renovar el aire (oxígeno) de la masa de residuos cada tiempo de forma de garantizar que la masa se mantiene con el grado suficiente de oxigenación. Teniendo en cuenta esto, los datos de partida son:

- ♻ Masa de residuo a compostar y altura
- ♻ Porosidad
- ♻ Largo y ancho de las pilas o silos.

Así mismo, las variables de diseño:

- ♻ Diámetro del tubo que insufla aire por el piso
- ♻ Diámetro de los agujeros del tubo que insufla aire
- ♻ Diámetro del tubo que distribuye el aire
- ♻ Curva Caudal - presión que deben dar los ventiladores o turbinas
- ♻ Tiempo de funcionamiento de los ventiladores.

El cálculo de los ventiladores, debe realizar considerando la porosidad (%) de la mezcla a compostar y la renovación (min) del aire de la masa de residuos.

Por lo general la tubería para la base debe ser de un diámetro de unos 3" para un largo de las pilas de los 15-18m, de forma de garantizar que el aire llega al final del tubo. La tubería de distribución debe ser de unos 4".

⁹TGA, S.L. (Tècniques de Gestió Ambiental, S.L.). Catalunya

Ejemplo para el dimensionamiento de las pilas en un sistema de aireación forzada

El Municipio Y cuenta con una población de 10.000 habitantes, en la cual se ha previsto instalar una planta de compostaje por sistema de aireación forzada, para lo cual se tienen los siguientes datos de partida, por ejemplo:

Masa de residuos que ingresa a planta por día	5 Ton/día
Dimensiones de la pila	2 (a) * 1,5 (h) * (l)
Densidad del residuo	0,5 Ton/m ³
Masa de los residuos por cada metro en la pila	Volumen de la pila x cada metro de longitud: 2 * 1,5 * 1 = 3 m ³ Masa de residuos x cada metro de la pila: 3 m ³ * 0,5 Ton/m ³ = 1,5 Ton.
Longitud de la pila ocupada por tonelada de residuos	Relación de tres proporcional: Si cada metro de longitud recibe 1,5 Ton 5 Ton/día de residuos ocuparán aprox. 3,5 m.

Normalmente se calcula un ancho de plataforma para que pueda recibir el material total de 5 semanas (tiempo requerido para la descomposición) a modo de una pila o silo por cada 5 días de material recibido. Con estos datos, se asume que en la zona A, se descargan la primera semana 25 Ton/semana (5 Ton/día * 5 días/semana). Estas 25 Ton/semana ocupan una pila de 16,6m. Por lo que la plataforma idealmente debería disponer de un largo de pila de 16,6 para 6 pilas (1 pila semanal más un ancho de pila que se adiciona como comodín). El ancho será el necesario para las 6 pilas y los pasillos normalmente de 50cm.

Se puede realizar el cálculo para una disposición del material en silos de forma que el espacio necesario será mucho menor.

7.7.3 Instalación de ventiladores

En el mercado puede encontrarse ventiladores centrífugos de presión media de diferentes tamaños de turbina, de diferentes potencias y aportes de caudal de aire, a diferentes presiones, los cuales pueden adecuarse a las necesidades de aireación que se tiene en la planta de compostaje.

Es importante destacar que el ventilador debe dar un caudal a una presión determinada que vendrá asociada básicamente al largo de la tubería y diámetro del agujero de insuflado.

Para la instalación del ventilado deberá considerarse la ubicación, la instalación eléctrica (trifásica o monofásica) y potencia.

Figura 7.15: Instalación de ventiladores



Fuente: MMAyA/Municipio de Tiquipaya - Proyecto de aprovechamiento de residuos sólidos orgánicos/2012

El régimen de funcionamiento de los ventiladores se determina en función del tiempo de actividad de la pila más activa y depende mucho del material a compostar y del caudal de los ventiladores (por ejemplo, 10 minutos funcionando y entre 10-15 minutos parado).

7.8 Infraestructura de la Planta de Compostaje

7.8.1 Obras Preliminares

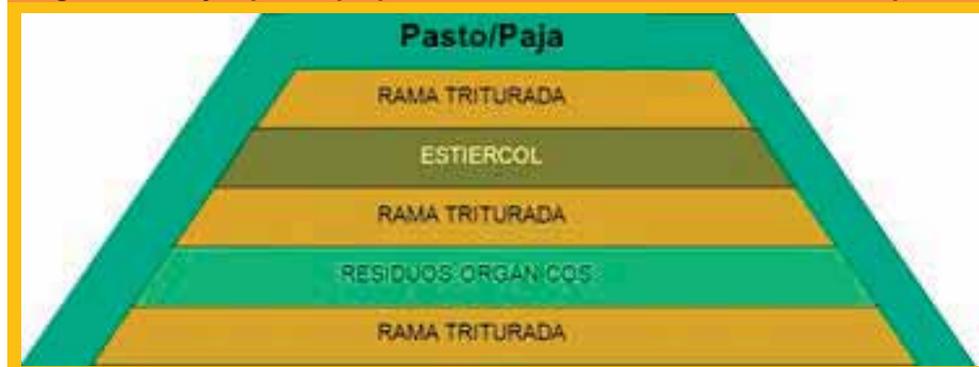
- 🔄 **Limpieza y desbroce del sitio de emplazamiento de la planta de compostaje:** En el terreno se debe preparar un área que servirá de base o suelo de soporte, siendo por lo general necesaria la tala de árboles y arbustos, puesto que éstos constituirán un obstáculo para construcción y operación de la Planta. Esta limpieza deberá retirar la capa orgánica del suelo y realizar una nivelación del terreno de forma de tener pendientes menores al 5%, así mismo se adecuará el suelo con material impermeable (arcilloso).
- 🔄 **Vías de circulación:** Se deberán prever áreas de circulación para el ingreso de los vehículos con materia prima y la salida de los vehículos con producto final, con formación de vías para la descarga de los residuos, vías de circulación para el acarreo de los residuos por las playas de compostaje y vías de circulación del personal encargado del manejo de la planta.

7.8.2 Infraestructura Proceso de Compostaje

- 🔄 **Recepción y selección de los residuos a compostar:** Durante la recepción y la clasificación de los residuos, producirán lixiviados que deberán ser recolectados y almacenados para ser usados en riego posterior de las pilas. El área de recepción de materia prima y selección de los residuos deberá contar con impermeabilización de base o pavimentada, el sistema de recolección de lixiviados por medio de rejillas o canales perimetrales. Asimismo esta área deberá contener un espacio para la disposición del material rechazado (plásticos, baterías, vidrio, metal, textiles etc.)
- 🔄 **Área de homogenización de los residuos:** Durante la reducción de tamaño y la homogenización de los residuos a compostar también se produce lixiviados por lo que esta área tendrá que contar con impermeabilización de base y sistema de recolección de lixiviados.
- 🔄 **Composición de la mezcla de residuos a compostar:** Durante la preparación de la mezcla a composta se pierde humedad en los residuos orgánicos, esta pérdida de

humedad será por la evapotranspiración y la generación de lixiviado por lo que esta actividad tendrá que ser realizada en un área con base impermeabilizada y con sistema de recolección de lixiviado.

Figura 7.16: Ejemplo de preparación de la mezcla de residuos a compostar



- ♻️ **Descomposición o Degradación aerobia de los residuos:** Una vez preparada la mezcla con la relación Carbono/Nitrógeno, porosidad y el porcentaje de humedad adecuado no se tendría mayor generación de lixiviado si se trabaja en playa de compostaje cubierta. En el caso de precipitaciones pluviales y que se trabaje con playas de compostaje abiertas se generará lixiviado por el agua de lluvia. El área para esta fase deberá ser en una playa con base impermeable pavimentada y canales de recolección de lixiviados.
- ♻️ **Maduración del compost:** El área de maduración del compost podrá ser en playa abierta, puesto que las precipitaciones pluviales no generan mayores lixiviados por el grado de degradación que se tiene en la materia ya compostada. Podría ser recomendable la compactación del terreno pero en principio no se requiere de alta impermeabilización.
- ♻️ **Cribado y clasificación del compost:** Esta operación separa el compost en fracciones: la más fina como compost listo, la mediana como biofiltro y la gruesa como inóculo para la actividad de composición de los residuos orgánicos. El tamaño de la malla de cribado, ya sea de trómel o de mesa vibradora, depende del uso final del compost. Una medida común es de 10 mm para los finos.
- ♻️ **Almacenamiento:** De procederse al almacenamiento de compost en montones no se requerirá mayor infraestructura, puesto que en producto estará estabilizado y representará un abono orgánico, si se realiza el empacado del compost se requerirá un cobertizo cubierto para resguardar el producto de las condiciones climáticas.

7.8.3 Infraestructura Administrativa y Obras Complementarias

♻️ Área administrativa

La infraestructura para la parte administrativa de la planta de compostaje está constituida por una oficina para personal técnico operativo, una alacena para los equipos de control del proceso (termómetro, medidor de pH y otros equipos de control), servicios sanitarios y portería.

♻️ Almacén de equipos y herramientas

Se deberá construir un almacén para guardar equipos, herramientas y materiales que sean de uso de la planta de compostaje, el tamaño dependerá de los equipos

(chipeadora, trituradora, pala cargadora, volteador, etc.) y las herramientas (palas, trinchas, carretillas, mangueras, bomba de agua, etc.), con los que se disponga.

♻️ Servicios sanitarios

Los servicios sanitarios se instalarán conforme a los requisitos que establezcan las disposiciones aplicables, es recomendable realizar el tratamiento de las aguas residuales domésticas por separado y no de forma conjunta con los lixiviados.

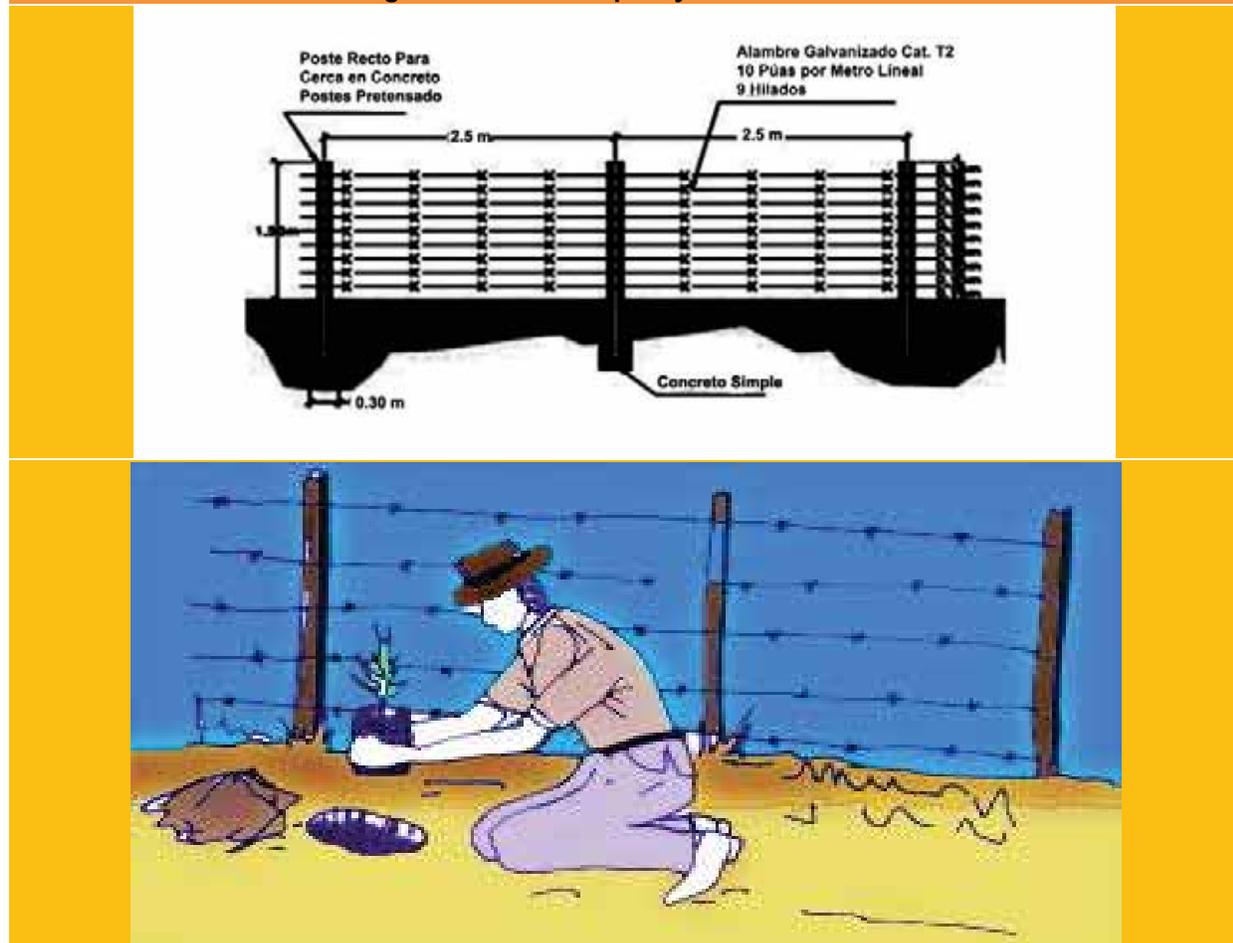
♻️ Drenaje pluvial (Zanja de Coronamiento)

Las obras de drenaje se construirán en los límites de la planta de compostaje o específicamente de la playa de compostaje tienen como objeto la captación del escurrimiento de aguas pluviales, los canales deberán revestirse con material apropiado.

♻️ Cerca perimetral y cerco vivo de arboles

La planta de compostaje municipal deberá estar cercada, como mínimo con alambre de púas de cinco hilos de 1.50 m de alto, a partir del nivel del suelo con postes de madera, hormigón o tubos galvanizados, debidamente empotrados y colocados a cada 2.5 m entre sí, con alambre de púas entreverados cada 0.15 m., para evitar el ingreso de animales que buscaran los residuos orgánicos frescos. El cerco puede ser de malla olímpica para mayor seguridad.

Figura 7.17: Cerca típica y cortina arbórea



Es también necesaria la conformación de un cerco vivo de árboles y arbustos como aislamiento visual, pues oculta de los vecinos y transeúntes la vista de los residuos sólidos orgánicos frescos; da buena apariencia estética al contorno del terreno. Se recomienda plantar árboles de rápido crecimiento (pino, eucalipto, bambú, etc.)

Área de amortiguamiento

El área de amortiguamiento deberá diseñarse y construirse en un espacio perimetral a la planta de Compostaje, iniciando la reforestación con especies de arbustivas de rápido crecimiento y arborización de forma de atenuar el paisaje y servir de cortina arbórea.

7.9 Aplicación del Compost

El compost producido en una planta de compostaje o individualmente en el jardín domiciliario, bajo las condiciones indicadas, se puede utilizar como abono o como tierra humus para las siguientes aplicaciones:

- ✓ Agricultura
- ✓ Silvicultura, Reforestación
- ✓ Sustrato para plantines
- ✓ Mantenimiento de parques y jardines
- ✓ Arquitectura de paisaje
- ✓ Producción de filtros biológicos para el tratamiento industrial del aire usado

En el Anexo 2 se describen los *Usos recomendados para el Compost* en diferentes cultivos.

El uso de compost para determinadas actividades depende del grado de madurez y del tipo de cultivo para el cual se destina, siendo las épocas óptimas para su aplicación primavera y otoño, épocas en que el suelo está caliente y la adición del compost lo calentará aún más favoreciendo la actividad de los microorganismos y el desarrollo de las raíces de la planta.

Diferenciamos dos grados de madurez:

-  Compost fresco (2-3 meses compostando): el que ha tenido un período de madurez corto y en el que se aprecia aún material sin descomponer. Se usa principalmente como protección frente o ante los cambios de temperatura y de humedad, en especial frente a heladas. Además mejora las características del suelo y evita la aparición de malas hierbas.
-  Compost maduro (aproximadamente 4-6 meses compostando): aquel que ha tenido un período de madurez largo y no se aprecian materiales sin descomponer (excepto aquellos de muy lenta descomposición, ramas, cáscaras de huevo, etc.). Se diferencia fácilmente por su textura terrosa y su color oscuro. Su uso principalmente es como fertilizante ya que aporta elementos minerales (Nitrógeno, fósforo, potasio, etc.), además de ser un buen mejorador de suelos por favorecer la capacidad de retención de agua.

7.10 Los Nutrientes en el Compost

En el compost los nutrientes forman parte de un entramado en el cual están unidos a otras moléculas, básicamente orgánicas, que modulan y facilitan la liberación y posterior absorción de los nutrientes por parte de las plantas¹⁰.

Los elementos químicos que sirven de alimento a los vegetales se clasifican en dos grupos: macronutrientes y micronutrientes.

¹⁰Adaptado de Los Nutrientes en el Compost, Salvador Cid, www.compostadores.com.

- Los macronutrientes son los que las plantas necesitan en mayor proporción, ya que constituyen los elementos químicos más abundantes de su composición orgánica.
- Los micronutrientes u oligoelementos, en cambio, son necesarios en muy pequeñas cantidades y, por ello, su presencia en las plantas es más reducida que en el caso de los macronutrientes. Sin embargo, tanto unos como otros son esenciales para el buen desarrollo de los vegetales.

En el siguiente cuadro se detallan los elementos químicos que las plantas necesitan tomar del suelo para poder vivir, su clasificación en función de la abundancia relativa en la composición vegetal y la proporción media aproximada de cada elemento dentro del conjunto.

Cuadro 7.5: Elementos químicos que las plantas necesitan tomar del suelo para vivir				
Macronutrientes				Micronutrientes
Primarios		Secundarios		
N	2,0%	Ca	1,3%	Fe, Zn, Cu, Mn, Mo, B, Cl. La suma de todos ellos supone el 1% de la composición química de las plantas
P	0,4%	Mg	0,4%	
K	2,5%	S	0,4%	

En el suelo tienen que abundar los macronutrientes porque las plantas los necesitan en mayor proporción. Los micronutrientes, en cambio, pueden ser más escasos, pero también tienen que estar presentes.

Cuando un suelo está desequilibrado en nutrientes, los vegetales que crecen en él, manifiestan síntomas que alertan la falta de elementos químicos en las plantas y, por lo tanto, también en el suelo. En estos casos, para corregir el desequilibrio es preciso añadir los nutrientes deficitarios.

Un compost bien maduro, que ha sufrido un proceso de formación correcto y se ha obtenido a partir de residuos variados, tiene la ventaja de incorporar todos los elementos esenciales para las plantas y aportar riqueza y equilibrio de nutrientes al suelo donde se aplica.

A continuación se describe las funciones de cada nutriente en la planta y su proporción en el compost:

- Nitrógeno (N):** fomenta el crecimiento de la parte aérea de los vegetales (hojas, tallos). Es, en parte, responsable del color verde de las plantas y confiere resistencia a las plagas. Su proporción en el compost varía en función del grado de madurez, de manera que el compost fresco es pobre en nitrógeno, mientras que la concentración crece a medida que el compost madura. En promedio, la proporción oscila entre el 1 y el 2 % en el compost maduro. La forma química mayoritaria de absorción de nitrógeno por parte de las plantas son los nitratos, que abundan en el compost maduro. En el compost fresco, el nitrógeno predominante es en forma de amonio (NH_4^+), menos tolerable o absorbible por la mayoría de vegetales.
- Fósforo (P):** es muy importante en la maduración de flores, semillas y frutos. Interviene en la formación y desarrollo de las raíces y tiene un papel importante en la resistencia a la sequía. Su proporción en el compost es entre el 0,8 y el 2,5 %, mayoritariamente en forma de Óxido de Fósforo (P_2O_5), y varía en función del tipo de restos de los cuales proviene el compost. Las plantas lo absorben en forma de fosfatos. Se puede enriquecer el suelo o el compost con fósforo si se añade gallinaza, cenizas, huesos molidos o roca fosfatada. Sin embargo, el humus de lombriz, sin necesidad de enriquecerlo con fósforo, aporta las cantidades suficientes de este elemento para equilibrar los suelos que son deficitarios.
- Potasio (K):** es decisivo en el desarrollo de toda la planta, posibilita que las raíces y los tallos sean fuertes y las semillas, los frutos y las hojas, grandes. Proporciona resistencia a las plagas y enfermedades, colabora en la circulación de los otros nutrientes alrededor de la

planta y regula las funciones vegetales. En el compost se encuentra en una proporción de entre el 1 y el 1,5 %, en forma mayoritaria de óxido de potasio (K_2O). Se absorbe en forma elemental o combinada (cloruro, fosfato, nitrato, etc.). El compost se puede enriquecer en potasio con cenizas, estiércol u hojas de banana. Como en el caso del fósforo, el humus obtenido con restos de cocina aporta el potasio suficiente para corregir los suelos deficitarios en este nutriente.

- ♻️ **Calcio (Ca):** es importante en la formación de las paredes celulares de las plantas. La proporción en el compost oscila entre el 2 y el 8 %, en función de los materiales utilizados para elaborarlo. Se encuentra en el compost y en el suelo en forma de sales (nitratos, fosfatos, carbonatos, etc.). También es absorbido en estas combinaciones.
- ♻️ **Magnesio (Mg):** forma parte de la clorofila (molécula vegetal que confiere el color verde en las plantas) y actúa en el metabolismo del fósforo. En el compost se encuentra en proporciones inferiores al 1%, en forma combinada, incorporado a sustancias inorgánicas, como el sulfato de magnesio.
- ♻️ **Azufre (S):** tiene función estructural y funcional, ya que forma parte de los aminoácidos, constituyentes básicos de las proteínas, y de los enzimas, los cuales posibilitan las reacciones químicas vegetales. Interviene en la asimilación del CO_2 por parte de las plantas y en la captura de la energía luminosa necesaria para realizar la fotosíntesis. En el compost, el azufre está en proporciones inferiores al 1 %, en forma de sulfatos. En estado elemental tiene propiedades antiparasitarias.
- ♻️ **Hierro (Fe):** participa en la formación de la clorofila, en la fijación del nitrógeno y en el proceso respiratorio de los vegetales. Por lo tanto, tiene importancia en el aspecto, color y vigor de las plantas. Como el resto de micronutrientes, también el hierro se encuentra en un porcentaje inferior al 1 % en el compost. Tal y como pasa con otros elementos químicos, el pH del suelo puede causar el bloqueo de la absorción del hierro por parte de las plantas, ya que puede impedir su solubilización en el agua de riego.
- ♻️ **Zinc (Zn):** tiene importancia en la formación y maduración de las semillas; participa en la síntesis de clorofila, la fotosíntesis y la asimilación del nitrógeno; promueve las auxinas (fitohormonas), responsables del crecimiento vegetal. Suele encontrarse en forma de sales, como el sulfato de cinc.
- ♻️ **Cobre (Cu):** es importante por sus funciones enzimáticas e interviene en la producción de aminoácidos y en la formación de la clorofila. La planta absorbe sus sales, como el sulfato de cobre o el cloruro de cobre.
- ♻️ **Manganeso (Mn):** favorece la síntesis de clorofila, la fotosíntesis y la asimilación de nitratos; activa varias enzimas vegetales e interviene en la captación de CO_2 , en el metabolismo del hierro y en el de otras moléculas orgánicas. Se absorbe en forma de sulfato de manganeso.
- ♻️ **Molibdeno (Mo):** es imprescindible para fijar el nitrógeno y utilizarlo en los procesos fisiológicos de las plantas; forma parte de algunas enzimas vegetales que intervienen en procesos metabólicos, como la transferencia de electrones. Puede encontrarse bloqueado por causa de un pH inadecuado del suelo. Este problema se puede solucionar si se corrige el pH.
- ♻️ **Boro (B):** participa en los procesos de crecimiento de los tejidos vegetales y, por lo tanto, influye en el tamaño de las hojas y los frutos; tiene un papel fundamental en el mantenimiento de la estructura de la pared celular y de las membranas. El pH elevado bloquea su asimilación por parte de las plantas.
- ♻️ **Cloruro (Cl):** es vital en los procesos bioquímicos de la fotosíntesis y en la activación de varias enzimas vegetales que hacen posible el crecimiento de la planta y su resistencia a la

sequía y a las enfermedades. Interviene en los procesos osmóticos celulares y en el desarrollo foliar, fomentando la multiplicación celular. La proporción de cloruro en el compost es también inferior al 1 %, ya que se trata de un micronutriente, pero se ha demostrado que la presencia de este elemento en el suelo estimula el crecimiento de algunos microorganismos antagónicos de ciertos patógenos de las plantas.

El contenido promedio en nutrientes del producto final, ya sea compost o humus de lombriz, depende mucho del material inicial que ha sido compostado y de la calidad del proceso que se haya dado. A modo referencial se puede dar los siguientes valores:

Cuadro 7.6: Contenido promedio en nutrientes (sobre materia total) de varias materias orgánicas y minerales					
	Carbono orgánico (%)	Nitrógeno (% N)	Fósforo (% P₂O₅)	Potasio (%K₂O)	C/N
Compost*	27	2,2 - 2,7	1,4	1,3	12-14
Humus**	14-30%	2 -3	2 -2,5	1 - 1,5	10-13

*Compost de Residuos orgánicos de recolección selectiva de domicilios y mercados

** Medias de diferentes tipos de residuos en origen

Fuente: Adaptado de varias fuentes

Capítulo VIII: Lombricultura

LOMBRICULTURA

8.1 La Lombricultura

La lombricultura es una técnica que consiste en la utilización de lombrices para la obtención de humus que es un abono natural a partir de restos de materia orgánica. La lombricultura se puede realizar a varias escalas, y la más pequeña en tamaño, aunque no en importancia es la lombricultura domiciliar, que es realizada en las propias viviendas con el residuo orgánico generado en la casa, asimismo se puede realizar a nivel municipal realizado en plantas municipales con los residuos orgánicos recolectados por el servicio de aseo urbano. Se pueden diferenciar dos tipos de lombricultura.

- ✓ El compostaje con ayuda de lombrices
- ✓ La lombricultura intensiva.

La diferencia es la siguiente: En el compostaje con ayuda de lombrices, ayudan con su movimiento a mezclar, mover y airear la masa de residuos. En la lombricultura intensiva, las lombrices comen los materiales compostables completamente; el producto son las heces fecales de las lombrices (lombricompost) que es un humus extremadamente fino y con características excelentes de un fertilizante. La diferencia entre los dos tipos de lombricultura se muestra en el siguiente cuadro:

Lombricultura doméstica: Se trata de realizar el reciclaje de nuestros residuos orgánicos de origen vegetal ayudándonos de las lombrices en nuestra propia casa. Es una técnica que puede llevarse a cabo en espacios reducidos. Para ello es necesario conocer la cantidad de residuos en volumen que produce la casa durante el mes, ya que así se deberá construir un lombrario o lombricompostador capaz de procesar esa misma cantidad de materia orgánica en un mes. Un sistema de casero consta de tres cajas plásticas. Una de ellas alberga las lombrices y restos orgánicos precompostados donde están las lombrices inicialmente. La siguiente caja es la que se encargará de recibir los restos orgánicos que se generen durante el mes, y la tercera caja es la encargada de recoger los lixiviados de las dos anteriores cajas.

Lombricultura municipal: Es un proceso similar al compostaje anteriormente descrito, a diferencia del compostaje los principales encargados de la degradación de la materia orgánica son las lombrices. Este proceso puede partir de residuos orgánicos frescos o de residuos orgánicos en los que se haya producido una primera fase de descomposición o compostaje.

Figura 8.1: Tipos de Lombrarios o Lombricomposteras



En el siguiente cuadro se muestran algunas diferencias entre los métodos de lombricultura y compostaje:

Cuadro 8.1: Diferencia entre los Métodos de Lombricultura y Compostaje			
Asunto	Lombricultura Intensiva	Compostaje con Lombrices	Compostaje Estándar
Objetivo	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Cría de lombrices como alimento agropecuario. ✓ Producción de humus como fertilizante. ✓ Aprovechamiento o valorización de los residuos orgánicos 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Producción de humus como fertilizante ✓ Aprovechamiento o valorización de los residuos orgánicos 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Producción de compost como abono orgánico ✓ Aprovechamiento o valorización de los residuos orgánicos
Cantidad de Compost Producido	Aproximadamente 30% del peso de los residuos orgánicos crudos	Aproximadamente 30% del peso de los residuos orgánicos crudos	Aproximadamente 30% del peso de los residuos orgánicos crudos
Siembra de Lombrices	4000 lombrices por m ³ o 1 a 2 kg de lombriz por 1 kg de residuo orgánico.	600- 700 lombrices o 200 gr de lombrices por m ³	
Tiempo necesario	4 - 6 meses	3- 6 meses	3 – 6 meses
Producto	Heces de lombriz (humus arcilloso)	Compost enriquecido	Compost
Cosecha de lombrices	2 meses después del comienzo de la implementación. Posteriormente cada mes.	Paralelamente a la cosecha del producto.	
Problemas de olores	No hay	Poco (durante la descarga de material y la mezcla/revuelta)	Durante la descarga de material y la mezcla/revuelta.
Productos Colaterales	Lombrices (comida para pollo, polluelo, pescado etc.)	Compost grueso (material de filtro biológico, material de estructura o relleno)	Compost grueso (material de filtro biológico, material de estructura o relleno)

Fuente: Adaptado de Manual de Compostaje para Municipios, Eva Roben, Ecuador, Loja, 2002

8.2 Beneficios del humus de lombriz

Los beneficios son similares a los del compostaje doméstico o municipal. Las principales razones son las siguientes:

1. El humus obtenido puede ser utilizado a nivel doméstico en plantas y jardines como a nivel municipal en áreas agrícolas, viveros y áreas verdes como un fertilizante orgánico.
2. Se reduce la cantidad de materia orgánica que podría ir al relleno sanitario y consecuentemente la generación de lixiviados y biogás.
3. Evitamos para la tierra el uso indiscriminado (e inadvertido) de productos artificiales, que determina que el suelo, con el correr del tiempo, quede sujeto a una pérdida de fertilidad.
4. Las lombrices producen un humus de alta calidad con una estructura muy estable, lo cual supone una serie de ventajas frente a otro tipo de abonos orgánicos.
5. El humus de lombriz tiene una alta calidad debido a su efecto en las propiedades biológicas del suelo y se dice que “Vivifica el suelo”. Presenta 2 billones de colonias de bacterias por gramo de humus.

El humus de lombriz es un abono orgánico abundante en nutrientes. Por esta razón puede ser utilizado en dosis más bajas que el resto de los abonos orgánicos lo que garantiza la fertilidad de suelos y sustratos. La cantidad a emplear depende de la modalidad de cultivo que se realice. A continuación se recomienda algunas dosis de humus.

Cuadro 8.2: Usos del Humus	
Huertos familiares	600 gramos/m ²

Cuadro 8.2: Usos del Humus	
Flores	20 a 50 gramos / planta
Césped	500 g/m ²
Macetas	8 cucharadas por maceta.
Plantas medicinales	30 a 40 g / planta.
Huertos Intensivos	0,6 a 1 kg/m ² .
Organopónicos	0,6 a 1 kg/m ²

Fuente: PNUD, INIFAT, Manual para la Producción de Abonos Orgánicos en la Agricultura Urbana, 2002

8.3 El proceso de lombricultura

8.3.1 La lombriz (principal componente del proceso)

En las plantas de lombricultura, se colocan lombrices para apoyar al proceso de compostaje o para realizar la degradación de los residuos orgánicos frescos completamente. Se pueden utilizar los siguientes tipos de lombrices en la lombricultura:

-  Lumbricus rubellus
-  Eisenia Foetida (lombriz roja californiana)
-  Eisenia Andrei

Entre estos tipos de lombrices, la lombriz roja californiana es la más común en América Latina. Las lombrices de la especie Eisenia Foétida, (lombriz roja californiana), ingieren grandes cantidades de materia orgánica descompuesta, de esta ingesta, hasta un 60 % se excreta en una sustancia llamada humus de lombriz, que constituye un sustrato ideal para la proliferación de microorganismos útiles. Las lombrices transforman los minerales no asimilables presentes en los residuos municipales y residuos animales, en nitratos y fosfatos directamente asimilables por las plantas.

El humus de lombriz es inodoro, no se pudre ni fermenta y su apariencia general es similar a la borra del café. En los análisis químicos realizados al humus de lombriz se detecta la presencia de hasta 5 % de nitrógeno, 5 % de fósforo, 5 % de potasio, 4 % de calcio, una carga bacteriana de 2 billones por gramo y un pH entre 7 y 7,5. De todos los estudios realizados se concluye que la lombricultura es un fertilizante orgánico de alta calidad, acción prolongada, fácil y económica producción.

Dependiendo las condiciones locales de producción, se calcula que de una sola lombriz se obtiene alrededor 10.000 lombrices al cabo de un año según el siguiente cuadro que contempla promedios tales como: 1 cocón de lombriz, cada 10 naces 3 (3*3=9 por mes, 27 en 3 meses). Con un 50-70% de pérdida de migración o muerte quedan entre 8 y 13 lombrices. Partiendo de una, se obtiene, entonces un promedio de 10 cada tres meses.

Cuadro 8.3: Ciclo productivo de la lombriz		
1 Lombriz	1 ciclo de 3 meses	10 lombrices por trimestre
1 Lombriz	4 ciclos de 3 meses	10*10*10*10=10.000 por año

Nota: Estos valores son posibles en laboratorio pues en la práctica, por la incidencia de diversos factores climáticos y humanos, el rendimiento es menor, considerándose que una producción de 1.500 lombrices anuales denota un adecuado manejo de la cría.

Fuente: Díaz Eduardo, Guía de Lombricultura, Municipio Capital de La Rioja, 2002

8.3.2 Condiciones óptimas para las lombrices

Para mantener en condiciones óptimas el medio en el que se desarrollan las lombrices y poder conseguir un buen producto, se recomiendan las siguientes condiciones:

-  **Ausencia de luz:** Las lombrices viven debajo de la superficie del suelo, no toleran bien la luz, Para asegurar que se dispersen homogéneamente por todo el cuerpo de los residuos, se recomienda cubrir el área de lombricultura, esto se puede hacer con pasto, con hojas, tierra humus o con compost listo de esta forma evitar la exposición directa de la luz solar.

-  **Humedad:** Las lombrices tienen una cutícula permeable haciendo que pierda agua fácilmente, no les conviene que baje drásticamente la humedad, porque no sólo paraliza la actividad sino que puede reducirnos la población de lombrices, la humedad adecuada es de 55 a 65 %.
-  **Temperatura:** La temperatura óptima debe oscilar entre los 20° - 25° C, aunque resisten temperaturas entre los 0° -45° C. Así cuando la temperatura es inferior a 7°C, las lombrices no se reproducen, pero siguen produciendo abono, aunque en menor cantidad.
-  **pH:** No soportan valores inferiores a 4.5, la acidez les resulta desagradable, el óptimo se encuentra entre 6 y 8 aunque algo leve pueden tolerarla.
-  **Alimentación:** Prefieren los restos vegetales algo descompuestos con una relación C/N relativamente baja, esto hace que presenten una fuerte selectividad con respecto a la vegetación que existe sobre el suelo. Los restos de verduras y frutas de cocina son de su agrado en cuanto a la relación C/N.

La lombriz roja alcanza su madurez reproductora a los 3 meses de edad, una vez cumplido este periodo ya está en condiciones de aparearse. Se reproduce con un periodo de 7 a 10 días. De cada cocón (huevo) depositado salen como media entre 2 y 20 lombrices que son totalmente independientes, de un tamaño de 1 mm, presentan un color blanco transparente que se vuelve rosado a los 5 ó 6 días, y que pasa definitivamente a rojo oscuro a los 15-20 días.

Son muy prolíficas, por lo que una sola lombriz adulta puede reproducirse unas 36 veces al año y cada una producir 0,3 gr diarios de humus.

8.3.3 Procedimiento para la elaboración de humus

El procedimiento para la elaboración de humus (lombricompost) en una planta de tratamiento de residuos sólidos debe considerar los siguientes aspectos:

-  **Materia Prima para el proceso:** Como ya se dijo anteriormente la materia prima para la elaboración de humus puede ser el compost o iniciar con residuos sólidos orgánicos frescos. En el caso de iniciar el proceso con los residuos orgánicos frescos, se deberá tener mayores cuidados, ya que la etapa mesófila y termofila pueden afectar a las lombrices en el proceso de producción.
-  **Preparación de las camas para el proceso:** Primero se deberá colocar un colchón de paja o pasto en toda el área de lombricultura, este procedimiento se sigue cuando la materia orgánica a procesar no está convenientemente degradada. Este colchón sirve de refugio a la lombriz californiana en el caso de sufrir cambios medioambientales en su medio de crianza. La temperatura óptima es de 20° - 25° C.
-  En el caso de contar con material ya degradado (compost), dicho material es depositado en las camas de lombricultura en capas de 25 cm. Para un metro cúbico de compost se requieren aproximadamente 57.000 lombrices, los que producirán 2,8 Kg de humus por día.

8.4 Principales parámetros de control en el proceso de lombricultura

8.4.1 Humedad

Debe preverse un 60% para facilitar la ingestión del alimento y el deslizamiento de las lombrices a través de material. Si la humedad no es adecuada puede dar lugar a la muerte de la lombriz. Las lombrices toman el alimento absorbiéndolo, por tanto la falta de humedad les imposibilita dicha operación, en cambio, el exceso de humedad origina empapamiento y una oxigenación deficiente.

Los sistemas de riego empleados son el manual y por aspersión. El procedimiento manual consta de una manguera de goma flexible, que por su sencillez es muy fácil de realizar, siendo necesaria la

dedicación de un operario exclusivamente en esta labor. Los encharcamientos deben evitarse, ya que un exceso de agua desplaza el aire del material y provoca fermentación anaeróbica.

Para comprobar el grado de humedad en las camas de lombricultura el operario deberá empuñar un poco de material en proceso y al presionarlo deberán caer unas gotas continuas de agua; de presentarse un chorro continuo de agua la humedad será excesiva y de haber un pequeño goteo o no caer ninguna gota de agua habrá deficiencia.

8.4.2 Temperatura

El rango óptimo de temperatura para el crecimiento de las lombrices se encuentra entre 12 a 25° C. Durante el invierno, si los cambios de temperatura son muy bruscos, será necesario cubrir las camas de lombricultura con pajas o chala, u otro material que evite los cambios bruscos de temperatura.

Durante el verano si la temperatura es muy elevada, se recurrirá a riegos más frecuentes, manteniendo los lechos libres de malas hierbas, procurando que las lombrices no emigren buscando ambientes más frescos.

8.4.3 PH

El pH óptimo es 7, aunque se puede trabajar en un rango de 6 a 8 en pH

8.4.4 Aireación

Es fundamental para la correcta respiración y desarrollo de las lombrices; si la aireación no es la adecuada el consumo de alimento se reduce, en consecuencia también se reduce la reproducción de las lombrices.

Cuando se observe compactación en las camas de lombricultura será necesario removerlas, ese momento también se aprovechará para retirar restos de residuos que no hayan sido retirados en el proceso de compostaje, por consiguiente se recomienda que la altura en las camas de lombricultura no exceda de los 50 cm a 100 cm.

Cuadro 8.4: Diferencias en los Parámetros de control para los procesos de lombricultura y compost		
Parámetros de Proceso	Humus	Compost
Relación carbono-nitrógeno	15/1 a 20/1	20/1 a 30/1
Tamaño de los residuos		10 a 20 mm
Humedad	55 a 60 %	35 a 60 %
pH	6 a 8	4 a 8
Temperatura	20 a 25 Grados	Llega a 75 Grados
Presencia de Luz	No toleran	No afecta al proceso

8.5 Cosecha y multiplicación de las camas

Durante los 3 primeros meses las lombrices no necesitarán ningún cuidado especial, solamente el riego y la comida. Transcurrido ese tiempo las lombrices habrán ingerido el 90% de los residuos orgánicos, por tanto habrá que multiplicar las camas.

Los métodos de cosecha más utilizados se describen a continuación:

- a) **Método con malla:** La cosecha puede realizarse de diferentes formas aunque la más efectiva resulta ser colocando una malla en la superficie del lombriario y depositando el alimento sobre ésta, al cabo de tres o cuatro días cuando las lombrices suban a comer (lo cual se aprecia visualmente) se retira la malla y con ella las lombrices. Esta operación se repite cuantas veces sea necesaria.

- b) **Método del raspado:** Se deposita material fresco (alimento) en la superficie y a los 2 a 3 días manualmente se extraen los 10 cm superiores de toda la superficie con la ayuda de una pala; se vierte ese contenido en una cama nueva, se alimentan y se riegan. En la segunda semana, se extraen de la misma cama otros 10 cm, se depositan en una segunda cama de nueva creación, se alimentan ambas y se riegan, entonces las lombrices subirán a ingerir los alimentos. En la tercera semana se extraen los últimos 10 cm superiores donde quedan aproximadamente el 5% de las lombrices. De esta forma se extrae el humus que está en el fondo de la cama del lombrinario.
- c) **Método de la pirámide:** Se extraen los primeros 10 cm del lombrinario y se exponen al sol en forma de cono. Al cabo de 20 o 30 minutos se abre el cono y se extraen las lombrices agrupadas en el centro y en el fondo separando del humus.
- d) **Método de tamizado:** Consiste en hacer pasar el material extraído de la superficie del lombrinario por tamices que permitan separar el humus de las lombrices.

8.6 Diseño de la planta de lombricultura

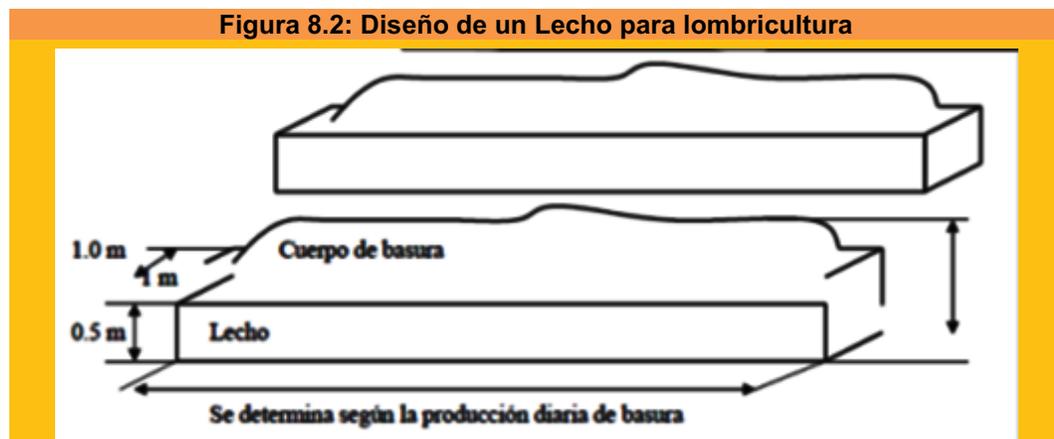
Hay diferentes modelos para construir una planta de lombricultura. El principio de construcción no es diferente si se trata de una lombricultura intensiva o del compostaje con ayuda de lombrices.

En el caso de tratarse de compostaje con ayuda de lombrices simplemente se deja a las lombrices sobre las pilas o hileras, de donde migran al interior del cuerpo de los residuos orgánicos.

Otra posibilidad es la lombricultura en lechos, que se pueden construir de ladrillos, madera, cemento o de otro material conveniente y económico. Los lechos no deben tener una profundidad de más que 50 cm, para evitar que ocurran condiciones anaeróbicas. De la misma manera, deben tener un ancho de no más que 1 m para el mantenimiento y la operación de la planta, el largo de los lechos es técnicamente sin importancia.

En plantas municipales de lombricultura, donde se descargan algunas toneladas de residuos orgánicos diariamente, se recomienda seleccionar el largo de los lechos de tal manera que cada lecho contenga el volumen de los residuos orgánicos que se produce diariamente. Como se puede cargar residuos hasta 50 cm arriba del lecho, para una producción diaria de 10 toneladas de desechos biodegradables, el cálculo del volumen del lecho sería el siguiente:

- ✓ 10 toneladas de residuos sólidos con una densidad de $0.7 \text{ Ton/m}^3 = 14.3 \text{ m}^3$ de residuos orgánicos
- ✓ Volumen necesario del lecho = $1/2$ del volumen de los residuos orgánicos = 7.15 m^3
- ✓ Ancho del lecho = 1 m (fijo)
- ✓ Profundidad del lecho = 0.5 m (fijo)
- ✓ Largo del lecho = 14.3 m (seleccionado: 15 m)



Para comunidades pequeñas, los lechos se pueden diseñar para contener la cantidad de residuos que se produce durante 2 o 3 días o durante una semana. No deben ser más grandes los lechos para asegurar un proceso de pre-fermentación homogéneo.

La cantidad de lechos debe ser suficiente para asegurar que se quede el material durante al menos 5 - 6 meses si se trata de una lombricultura con ayuda de lombrices o 3 - 4 meses si se trata de una lombricultura intensiva.

Para un desagüe fácil de las aguas lixiviadas, se debe construir el lecho con una inclinación de 1 - 2 % y un orificio de desagüe. Con esa medida, se impide la putrefacción del material dentro del lecho y además el lixiviado es un magnífico biol, o fertilizante líquido para ser usado de forma diluida a nivel foliar o en el suelo.

BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA

1. Szttern Daniel, Pravia Miguel, Manual para la Elaboración de Compost-Bases Conceptuales y Procedimientos, Organización Panamericana de Salud, Organización Mundial de la Salud, Uruguay, 1999.
2. Navarro, Ricardo A. Manual para hacer Composta Aeróbica, El Salvador, Amigos de la Tierra CESTA
3. Muñoz, José T., El Manejo de los Residuos Orgánicos y su Contribución a la Solución de Problemas Medio Ambientales, Universidad Nacional de Colombia, 2005.
4. Eva Röben, Manual de Compostaje para Municipios, Ecuador, Ilustre Municipalidad de Loja, 2002.
5. Abarrataldea, Manual Práctico y Técnicas de Compostaje, Abarrataldea, 2005.
6. Rodríguez, Marcos S.; Córdova, Ana V., Manual de Compostaje Municipal- Tratamiento de Residuos Sólidos Urbanos, SEMARNAT – INE – GTZ; México; 2006.
7. Barrera G. Raquel, Compostaje de Residuos Sólidos Orgánicos, Aplicación de Técnicas Respirométricas en el Seguimiento del Proceso, España, Barcelona, Universidad Autónoma de Barcelona, Departamento de Ingeniería Química, 2006.
8. Sadzawka, Angélica; Carrasco, María; Grez, Renato; Mora, María, Métodos de Análisis de Compost, Chile, Santiago, Instituto de Investigaciones Agropecuarias, Seria de Actas INIA-N°30, 2005.
9. Peña, Elizabeth; Carrión, Miriam; Martínez Francisco; Rodríguez Adolfo y Companioni, Nelso, Manual para la Producción de Abonos Orgánicos en la Agricultura Urbana, México, Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, INIFAT, 2002
10. Guia de Suport per al Disseny i l'Explotació de Plantes de Compostatge, Barcelona, Agència de Residus de Catalunya, 2008
11. Huerta, L.; Soliva, Z.. Compostaje de Residuos Municipales, Control del Proceso Rendimiento y Calidad del Producto, 2008
12. Marti, Jaime H, Biodigestores Familiares, Guía de Diseño y Manual de Instalación GTZ-Energía, Bolivia, 2008.
13. Manual de compostatgecasolà, Mancomunitat Penedés Garraf, 2008
14. Pérez Manuel, Estudio y Desarrollo de Técnicas Respirométricas para el Control de la Estabilidad del Compost, Tesis Doctoral, Universidad de Córdoba, Facultad de Ciencias, 2008
15. MMAyA/VAPSB/DGGIRS, Diagnóstico de la Gestión de Residuos Sólidos en Bolivia, Bolivia, Ministerio de Medio Ambiente y Agua, 2010.
16. MMAyA/VAPSB/DGGIRS, Programa Plurinacional de Gestión Integral de Residuos Sólidos en Bolivia 2011-2015, Ministerio de Medio Ambiente y Agua, 2011.
17. MMAyA/VAPSB/DGGIRS, Cartilla de Compostaje Domiciliario y Lombricultura, Ministerio de Medio Ambiente y Agua, 2011.
18. Ley de Medio Ambiente N°1333, Reglamento de Gestión de Residuos Sólidos, Bolivia, 1995.
19. Instituto Boliviano de Normalización y Calidad, Norma Boliviana NB742-760, Bolivia, Ministerio de Desarrollo Humano, 1996.
20. Grupo de Acción para el Medio Ambiente, Manual de Vermicompostaje, <http://www.asociaciongrama.org/documentacion/manuales/Manual%20de%20Vermicompostaje%20GRAMA.pdf>, 20 de diciembre 2011.
21. Composta, Manual de Compostaje Doméstico, http://www.compostar.com.ar/Manual_Web.pdf, 20 de diciembre 2011.
22. Lombricultivos para la Elaboración del Humus, <http://www.lombricultivos.8k.com/index.html>, 01 de noviembre 2011.
23. Asociación Amigos de la Tierra, Manual de Compostaje, <http://www.boletinagrario.com/ap-22,manual-compostaje-amigos-tierra,163,138.html>, 26 de mayo 2010.

ANEXO 1

Técnica para la Formulación de la Mezcla para el Compostaje

ANEXO 1: Técnica para la Formulación de la Mezcla para el Compostaje

Esta técnica está basada en valores típicos reportados para los diferentes materiales; sin embargo, no es exacta ya que depende de la cantidad de carbono, nitrógeno y agua contenidos en los residuos a compostar, estos valores se encuentran en el siguiente cuadro.

Los pasos de la técnica son los siguientes:

1. Anotar en la columna "Peso" el correspondiente a los residuos
2. Para cada residuo multiplicar el "Peso" por el "%N", dividir entre 100 y anotar en la columna "N".
3. Para cada residuo multiplicar el "Peso" por el "%C", dividir entre 100 y anotar en la columna "C".
4. Para cada residuo multiplicar el "Peso" por el "% H₂O", dividir entre 100 y anotar en la columna "H₂O".
5. Sumar los valores de la columna "Peso" y anotar el total en la fila "Suma".
6. Sumar los valores de la columna "N" y anotar el total en la fila "Suma".
7. Sumar los valores de la columna "C" y anotar el total en la fila "Suma".
8. Sumar los valores de la columna "H₂O" y anotar el total en la fila "Suma".
9. Dividir la suma de la columna "C" entre la suma de la columna "N" y anotar el resultado en la casilla "C/N".
10. Dividir la suma de la columna "H₂O" entre la suma de la columna "Peso" y anotar el resultado en la casilla "Humedad".

Si la relación C/N (20/1 a 30/1) o la de la humedad (40% - 60%) no se encuentran dentro de los intervalos recomendados, para cada uno de ellos, se deberá añadir o reducir alguno de los componentes y proceder a realizar nuevamente el cálculo hasta que los valores ajusten en los intervalos recomendados.

Cuadro 10.1: Técnica para la Formulación de Mezcla de Compostaje

Material	Composición Aproximada			Peso	N	C	H2O
	%N	%C	%H2O				
Residuos mezclados de rastros	2,550	5,10	70				
Lodos activados crudos	1,400	5,52	75				
Estiércol de aves de corral	0,315	4,73	95				
Lodos Actuados digeridos	0,470	7,35	75				
Estiércol de vaca	0,170	3,05	93				
Estiércol de cerdo	0,300	5,00	92				
Pasto	0,545	12,95	70				
Melaza acuática	0,075	1,54	95				
Estiércol de oveja	0,933	20,53	75				
Estiércol de caballo	0,230	5,75	93				
Residuos de fruta	0,300	13,22	75				
Paja de avena	0,735	35,25	30				
Fracción organiza de RSU	0,189	9,55	55				
Hojas caídas recientemente	0,300	15,00	50				
Paja de trigo	0,210	25,55	30				
Residuos de aserraderos	0,095	15,55	25				
Papel mezclado	0,235	40,55	5				
Aserrín	0,050	25,00	20				
Revistas comerciales	0,057	31,25	5				

Cuadro 10.1: Técnica para la Formulación de Mezcla de Compostaje

Material	Composición Aproximada			Peso	N	C	H2O
	%N	%C	%H2O				
Madera	0,055	40,49	20				
Papel Periódico	0,047	45,20	5				
Agua	0,000	0,000	100				
			Suma				
C/N							
Humedad							

Fuente: Adaptado de 6TZ1999 y Tchobaroglous, et 1993

ANEXO 2

Usos Recomendados para el Compost

ANEXO 2: Usos Recomendados para el Compost

Cuadro 11.1: Usos Recomendados para el Compost		
Cultivo	Dosis (Ton/Has)	Observaciones
Trigo	5,0	Enterrar 4 semanas antes de la siembra
Cebada	5,0	Enterrar 4 semanas antes de la siembra
Avena	0,1	Enterrar 4 semanas antes de la siembra
Maíz	8,0	La mitad de la composta puede mezclarse con los fertilizantes
Arroz	20,0	
Algodón	20,0	Enterrar entre los 20 y 30 cm de profundidad 2 o 3 semanas antes de la siembra
Tabaco	18,0	Enterrar 4 semanas antes del trasplante
Papa	20,0	
Alfalfa	15,0	Enterrar con un pase de arado
Tomate y pimentón	17,0	Enterrar 6 semanas antes del trasplante
Fresa	22,0	
Esparrago	22,0	Ciclo de 4 años, aplicar en el tercero una mitad adicional de la dosis.
Cereales	12,0	Enterrar cada 2 años en la superficie
Pastos	17,0	Enterrar cada 2 años en la superficie
Hortalizas	17,0	Enterrar anualmente en la superficie
Olivo	8,0	Aplicar cada dos años
Manzano y pera	17,0	
Frutos agrios	20,0	Si es plantación nueva 8 kg adicional es para cada árbol
Frutos de semilla grande	13,0	Cada 2 años enterrar superficialmente
Arboles	17,0	Enterrar cada 2 años
Almácigos	35% vol.	Mezclar perfectamente
<p>*La dosis exacta a aplicar depende de la calidad de la composta y de las características del suelo; por este motivo, siempre es recomendable contar con el apoyo de un experto (edafólogo). La dosis recomendada es típica para suelos ordinarios, sin embargo, en suelos desgastados deberá incrementarse. En aplicaciones sucesivas la dosis se reduce. Adaptado de: Deffis CA 1994 y GTZ 1999</p>		

ANEXO 3

Métodos para valorar la madurez del compost

ANEXO 3: Métodos para Valorar la Madurez del Compost

1. Métodos Físicos

Son los más utilizados habitualmente y dan una idea aproximada de la madurez del compost en los siguientes parámetros:

- ♻️ **Olor:** Los materiales frescos desprenden compuestos como amoníaco y ácidos orgánicos que producen malos olores los cuales en un compost suficientemente maduro no deben existir y por el contrario debe desprender un olor similar a la tierra húmeda de bosque.
- ♻️ **Temperatura:** Una vez culminado el proceso la temperatura del compost tiende a equipararse a la temperatura ambiente, si bien la inercia térmica del compost puede dar la apariencia de que el proceso aún no ha finalizado.
- ♻️ **Color:** La descomposición de los materiales frescos implica un oscurecimiento llegando a tener un color marrón casi negro. Debe tenerse en cuenta que el grado de humedad también afecta el color del material.
- ♻️ **Grado de Madurez, Test de Autocalentamiento**¹¹: El objetivo de este Test es determinar el grado de estabilidad de un material en compostaje. Se base en la medida del carácter exotérmico del proceso de compostaje, a partir de una pequeña muestra representativa del material. Cuando se composta una cierta cantidad de residuos sólidos orgánicos se produce una energía en forma de calor que depende de los siguientes factores:
 - ✓ Las condiciones ambientales internas de la masa en proceso (fundamentalmente nivel de oxígeno y grado de humedad).
 - ✓ Las características del propio residuo (presencia de mayor o menor sustancias fácilmente biodegradables) de diferente contenido energético.
 - ✓ Las características y cantidad de material presente (forma, volumen).

La producción de calor se manifiesta en una subida de temperatura de la masa, este proceso esta favorecido por el hecho de que en general los materiales de tipo orgánico suelen ser malos conductores térmicos.

El grado de Autocalentamiento puede determinarse introduciendo una muestra de compost (tamizado a 10 mm y humedad ajustada) dentro de un "Vaso Dewar"¹² de 1,5 l de capacidad, en el cual se procede a medir la temperatura a lo largo de unos 7-10 días. El procedimiento¹³ se detalla a continuación:

- ✓ Tamizar la muestra a 10 mm y comprobar la humedad mediante el test del puño (Ver apartado 4.4.4) realizando un ajuste de la misma si fuera necesario.
- ✓ Introducir la muestra en una Vaso Dewar de 1,5 l sin compactarla (se aconseja ir golpeando suavemente el recipiente contra una superficie blanda a medida que se va introduciendo el material)
- ✓ Colocar la sonda de la temperatura del material hasta que los valores de ésta empiezan a disminuir. El tiempo de ensayo puede oscilar entre 7 a 10 días, según el compost sea joven o maduro respectivamente. Paralelamente se registra la temperatura ambiente de la sala en la que se encuentra el recipiente, restándole el valor de la temperatura ambiente al valor máximo de temperatura alcanzado por el material.

El Test de Autocalentamiento, aplicado a un compost insuficientemente estable, pone en evidencia su actividad biológica a través de cambios de temperatura; los incrementos superiores de temperatura

¹¹ Determina la variación de T debida a la energía desprendida por la actividad biológica asociada a un compost poco estabilizado colocado en un vaso Dewar. Para ello es necesario condiciones adecuadas (aireación y humedad). El método es aplicable a materiales que hayan sufrido la etapa de descomposición.

¹² Recipiente diseñado para proporcionar aislamiento térmico, disminuir las pérdidas de calor por conducción, convección o radiación.

¹³ Adaptado de: Compostaje de residuos sólidos orgánicos. Aplicación de técnicas respirométricas en el seguimiento del proceso, Universidad Autónoma de Barcelona, Barrera G. Raquel, Departamento de Ingeniería Química, Barcelona, España, 2006

indican materiales más inestables. El valor máximo de temperatura alcanzada se asocia a un grado de estabilidad de acuerdo con el siguiente cuadro:

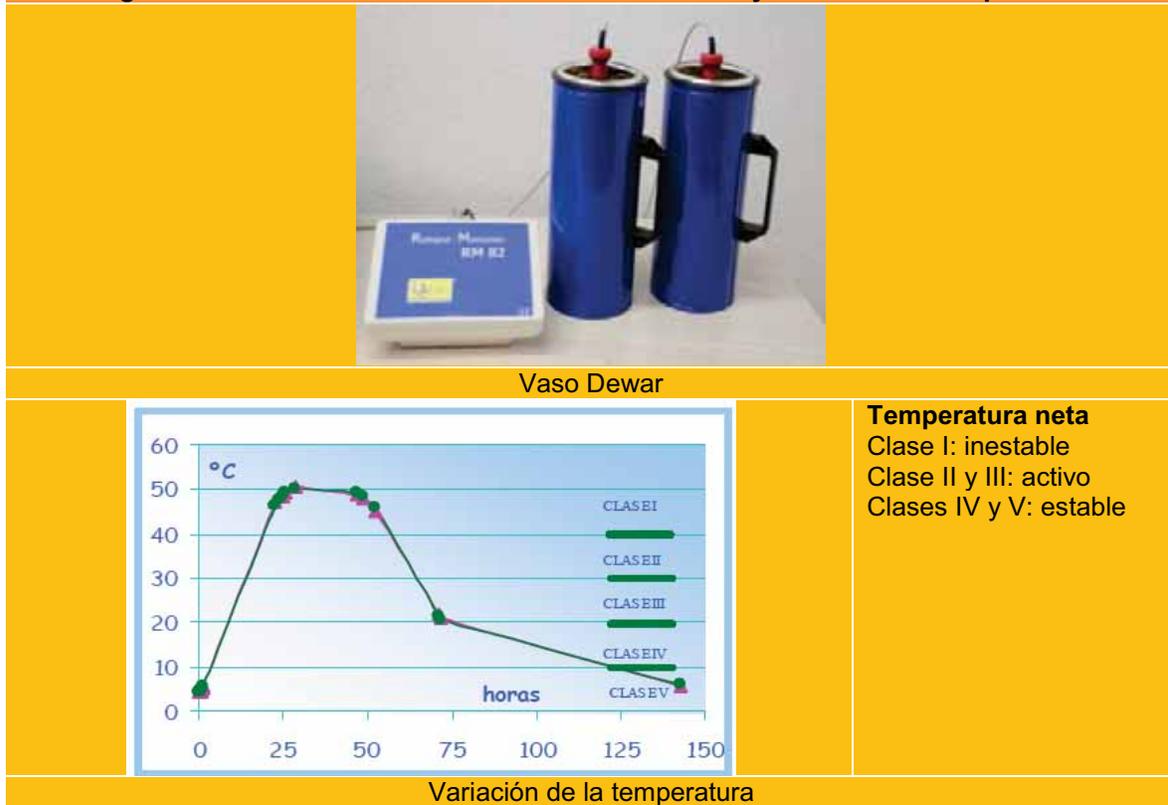
Cuadro 12.1: Test autocalentamiento			
Aumento de Temperatura superior a la Ambiente en °C*	Clase oficial de estabilidad	Descripción de clase o grupo	Grupo principal
0-10	V	Compost maduro, material estable	Compost terminado
10-20	IV	Compost en maduración, moderadamente estable	
20-30	III	Compost activo, material todavía en descomposición	Compost activo
30-40	II	Compost inmaduro; joven o muy activo	
40-50 (o más)	I	Compost fresco, crudo; sólo a material mezclado	Compost fresco

Fuente: Test de Autocalentamiento, Rotte Grade

* La temperatura aumenta a lo largo de las horas de incubación, pero debe restarse la temperatura ambiente, para la comparación y clasificación de las muestras (temperatura neta).

Los diferentes rangos de temperatura dan lugar a clases que se relacionan con la actividad biológica de la muestra; las temperaturas más altas se refieren a materiales más inestables mientras que las inferiores reúnen lo materiales estables. Cuanto más fresco es el compost (Clase I), mayor es el incremento de temperatura alcanzado. Al contrario, cuanto más estable es el compost (Clase V) menor es el incremento de temperatura alcanzado.

Figura 12.1: Test de autocalentamiento Vaso Dewar y variación de temperatura



Fuente: Agencia de Residuos de Cataluña. Uso del Test de Autocalentamiento para la determinación del Grado de Estabilidad de Muestra de Compost, Universidad Politécnica de Catalunya, Escuela Superior de Agricultura de Barcelona

2. Métodos Químicos (Análisis en Laboratorio)

A través de pruebas de análisis de laboratorio (se recomienda ver la Norma Boliviana NB 744) se pueden determinar los siguientes parámetros a determinar pueden ser:

- ♻️ **pH:** El pH finalizado el proceso se estabiliza tomando valores en función del producto de partida entre 7 y 8.

Este parámetro se puede determinar sobre el extracto acuoso de una muestra fresca. Para la obtención del extracto acuoso, la proporción de la muestra/agua comúnmente utilizada es 1/5, para lo cual se pesan 10 gr de muestra seca de compost tamizado (criba de 10 a 16 mm) en una balanza digital con precisión 0,01 gr y se introducen en un tubo de Erlenmeyer de 250 ml junto con 50 ml de agua destilada. Se agita y se deja reposar por un tiempo, posteriormente se filtra el líquido y se introduce el medidor de pH.

Otro método para la determinación de pH, puede realizarse a través de un potenciómetro con compensador de temperatura y electrodos de vidrio y referencia. Para el cálculo se recomienda ver la Norma Bolivia NB 747 (Determinación del pH – Método Potenciómetro)

- ♻️ **Humedad:** Este parámetro se puede medir calculando la pérdida de peso que sufre la muestra cuando se somete a las condiciones de tiempo y temperatura dadas, considerando que dicha pérdida se origina por la eliminación de agua. Para el cálculo se recomienda ver la Norma Bolivia NB 745 (Residuos Sólidos-Determinación de Humedad).

El procedimiento se detalla a continuación:

- ✓ Pesar en un crisol¹⁴ previamente tarado (T) en una balanza de precisión ($\pm 0,01$ gr) la muestra húmeda (Po)
- ✓ Secar la muestra en la estufa a 105°C al menos 18 hrs. Sacar la muestra de la estufa, dejar enfriar en un desecador y posteriormente pesar (Pf)
- ✓ Determinar el porcentaje de humedad (%H) y el porcentaje en materia seca (%MS) según las siguientes ecuaciones:

$$\%H = \frac{(Po - Pf)}{(Po - T)} \times 100$$

$$\%MS = 100 - \%H$$

Otro método para la determinación de este parámetro puede ser mediante el Test del puño, método manual.

- ♻️ **Materia Orgánica:** Este parámetro se puede determinar por gravimetría indirecta en la que se mide la pérdida de peso a causa de la combustión de la materia orgánica, a temperaturas entre 470°C y 560°C de acuerdo al siguiente procedimiento:

- ✓ Pesar en un crisol previamente tarado (T), 10 g (exactitud 0,001 g) de muestra de compost cernido (criba de 10 a 16 mm), molido y libre de materiales inertes. En un desecador secar la muestra a 70±5°C hasta que la masa sea constante. Pesar la muestra seca (Po). A continuación colocar en una mufla¹⁵ y lentamente subir la temperatura a 550 °C durante 2 Hrs y luego disminuir la temperatura a 200 °C de manera progresiva.
- ✓ Retirar la muestra de ceniza de la mufla y colocar en un desecador y dejar enfriar hasta temperatura ambiente, luego pesar la muestra en la balanza de precisión (Pf).

¹⁴El crisol es un aparato o recipiente de laboratorio, que normalmente está hecho de grafito con cierto contenido de arcilla y que puede soportar elementos a altas temperaturas. El crisol es utilizado para fundir sustancias y análisis gravimétricos.

¹⁵Una mufla es un tipo de horno que puede alcanzar temperaturas muy altas para cumplir con los diferentes procesos que requieren este tipo de característica dentro de los laboratorios, como: procesos de control, tratamientos térmicos y secado de precipitados. Las muflas cuentan con dos principales tipos que son: Muflas eléctricas y Muflas de Combustible.

- ✓ El contenido de la Materia Orgánica (%MO) se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$\%MO = \frac{(Po - Pf)}{(Po - Pf)} \times 100$$

- ♻️ **Contenido de Carbono**, el contenido de carbono de la muestra se estima en base al contenido en materia orgánica y considerando que para la mayoría de materiales el contenido en carbono se encuentra entre el 45% y el 60% de la fracción orgánica. Para el cálculo, se determina mediante la siguiente ecuación:

$$\%C = \frac{\%MO}{1,8}$$

- ♻️ **Nitrógeno (Kjeldhal¹⁶)**, es un método que se puede determinar siguiendo el siguiente procedimiento:

- Digestión de la muestra**, con este proceso se transforma todo el nitrógeno orgánico a su forma amoniacal. Este cambio se consigue mezclando la muestra con ácido sulfúrico concentrado, a una temperatura elevada y en presencia de un catalizador.
 - Destilación**, el Nitrógeno Amoniacal $N-NH_4^+$ de una alícuota se desplaza a NH_3 añadiendo un exceso de base y se destila recogiendo en un volumen, conocido y en exceso, de ácido bórico de concentración también conocida.
 - Valoración**, la diferencia entre los equivalentes de ácido inicialmente presentes y los que quedan después de la destilación serán los equivalentes de ácido neutralizados por el amoníaco, es decir, los equivalentes de amoníaco procedentes tanto del Nitrógeno Orgánico (NO) como del $N-NH_4^+$ ya existentes en la muestra. Por diferencia con el $N-NH_4^+$ de la muestra se obtiene la cantidad de (NO) presente en la muestra
- ✓ Se debe pesar en una balanza con una precisión de $\pm 0,01$ gr, una muestra seca y triturada de 0,350 a 0,500.
 - ✓ Luego, hacer un pequeño paquete con papel de filtro o papel de fumar sin la parte engomada e introducirlo en un tubo de digestión Kjeldahl de 100 ml. Añadir poco a poco 25 ml de ácido sulfúrico concentrado, moviendo el tubo y asegurando que el ácido moje toda la muestra. A continuación, añadir una pastilla de catalizador al tubo de digestión. Hacer una prueba en blanco introduciendo en el tubo el papel de filtro y el catalizador.
 - ✓ La digestión en los tubos Kjeldahl, debe realizarse durante 1,5 Hrs a una temperatura de $420^\circ C$. La muestra se digiere hasta que la solución sea transparente, con una cierta tonalidad verdosa, momento en el cual se da por terminada la digestión. Luego, se debe retirar los tubos Kjeldahl del bloque digestor y dejar enfriar. Luego, añadir un volumen de agua aproximadamente 4 veces el volumen de H_2SO_4 y dejar enfriar de nuevo a temperatura ambiente.
 - ✓ Para la destilación se utiliza un aparato de destilación sencilla por arrastre de vapor. Se debe colocar el tubo con la disolución digerida en el aparato de destilación y añadir NaOH (35%) en exceso.
 - ✓ A la salud del refrigerante se coloca en tubo Erlenmeyer con 100 ml de ácido bórico al 4% con indicador mixto.

¹⁶El Método Kjeldahl (Johan Kjeldhal, 1883) es un proceso de análisis químico para determinar el contenido en nitrógeno de una sustancia química. Este método consta de tres etapas que son: 1) Digestión, que comprende la conversión del Nitrógeno en ion amonio NH_4^+ ; 2) Destilación, separación por arrastre con vapor del amoníaco y posterior solubilización en una solución ácida de concentración conocida y 3) Valoración, medición de la cantidad de ácido neutralizado por el amoníaco disuelto, lo cual indica la cantidad de Nitrógeno presente en la muestra inicial.

- ✓ La destilación se dará por finalizada a los 15-20 minutos después de caer la primera gota de destilado o hasta recoger un volumen de 250 ml. Se puede comprobar dejando caer una gota de destilado sobre papel indicador de pH. Si el destilado tiene un pH básico, el proceso de destilación todavía no ha finalizado.
- ✓ En la variación como ácido recolector se usa un ácido débil, el ácido bórico, y se valora entonces el borato amónico, sal básica que se ha formado con un ácido fuerte (HCl 0,25 N) (según la cantidad de borato amónico formado en la muestra se puede utilizar HCl mas diluido) y un indicador de zona ácida. Valorar hasta el virado completo de verde a violeta.
- ✓ Para determinar el porcentaje de Nitrógeno Kjeldahl se utiliza la siguiente ecuación:

$$\%N - Kjeldahl = \frac{(V_1 - V_0) * N * 1,4}{P}$$

Dónde:

V_1 = Volumen de HCl consumido en la valoración (ml)

V_0 = Volumen de HCl consumido en la valoración del blanco (ml)

P = Peso de la muestra (gr)

N = Normalidad del HCl utilizado en la valoración

- ♻️ **Relación C/N:** Disminuye durante la fermentación hasta estabilizarse, alcanzando valores que dependen de los productos de partida. Generalmente se considera maduro con una relación C/N inferior a 20.

La relación Carbono/Nitrógeno (C/N) está en función del % de materia orgánica (% M.O) obtenido de acuerdo a la constante de Jackson y del % de Nitrógeno Total (%N).

Para determinar el contenido de Carbono se multiplica el % de Materia Orgánica por 0,58, donde: 0,58 es la constante dada por Jackson. Por lo tanto, la ecuación para determinar la relación (C/N) es:

$$C/N = \frac{0,58 * (\%MO)}{\%N}$$

Dónde:

% N = porcentaje de Nitrógeno Total

(%MO) = porcentaje de Materia Orgánica

- ♻️ **Determinación del NH_4^+ y del SH_2 :** Si el proceso de compostaje se ha realizado correctamente, al final del mismo no deben detectarse cantidades apreciables de NH_4^+ ni de SH_2 cuya presencia pondría en evidencia la existencia de condiciones reductoras.
- ♻️ **Índice de Madurez, Test Solvita®:** El Test de Solvita® es un procedimiento¹⁷ semicuantitativo de determinación de la liberación de dióxido de carbono (CO₂) y de amoníaco (NH₃) en un espacio cerrado sobre un volumen determinado de compost. Esta prueba proporciona una determinación rápida y exacta de la madurez del compost.

Las concentraciones relativas de CO₂ y NH₃ liberados se expresan en dos paletas de color pre-calibradas.

¹⁷Métodos de análisis de compost, Serie Actas, INIA -N° 30, Instituto de Investigaciones Agropecuarias, Santiago de Chile, 2005

Altos niveles de ácidos grasos volátiles pueden interferir positivamente. Se detectan por un desarrollo de color amarillo fuerte. En este caso, la madurez debe determinarse por otro método.

En los compost inmaduros, altos niveles de NH_3 pueden interferir negativamente en la evolución de CO_2 .

En ciertos compost anaeróbicos o que están sometidos a una activa desnitrificación, puede producirse óxido nitroso, el cual decolora el gel Solvita®.

La prueba debe realizarse en el rango de temperatura de 20-25°C para una interpretación adecuada de los resultados.

El procedimiento es el siguiente:

- Agregar una muestra al Frasco Solvita® hasta la marca indicada, golpeando enérgicamente el fondo del frasco contra el mesón. Los compost gruesos o esponjosos deben compactarse presionando firmemente dentro del frasco.
- Sacar las varillas de sus envoltorios sin tocar con los dedos la superficie con gel. Para ello es importante usar las varillas antes de los 30 min de sacadas de sus envoltorios.
- Introducir las varillas hasta el fondo del frasco y en la orientación correspondiente a los colores del frasco. Cuidar de no golpear el frasco y evitar el contacto del compost con el gel.
- Tapar firmemente el frasco y dejar incubar por 4 Hrs con luz solar directa, a una temperatura ambiente de 20-25°C.
- Sin destapar el frasco, iluminar las varillas con una luz fluorescente de mediana intensidad y leer el color por comparación con las cartas de color proporcionadas con el paquete.
- El color del gel puede cambiar después de las 4 Hrs, por lo que es necesario que la lectura se realice a las 4 Hrs para asegurar una interpretación adecuada.

Para, calcular el Índice de madurez de la muestra con los resultados de los números de los colores para NH_3 y CO_2 y usando el siguiente cuadro:

Cuadro 12.2: Cálculo del índice de madurez Solvita®										
Paleta A (NH_3)			Paleta C (CO_2)							
			1	2	3	4	5	6	7	8
	5	NH_3 muy bajo	1	2	3	4	5	6	7	8
	4	NH_3 bajo	1	2	3	4	5	6	7	8
	3	NH_3 medio	1	1	2	3	4	5	6	7
	2	NH_3 alto	1	1	1	2	3	4	5	6
	1	NH_3 muy alto	1	1	1	1	1	2	3	4

Los resultados a obtener en una escala de 1 a 8, son:

- ✓ Índice de madurez Solvita®
- ✓ Nivel relativo de CO_2 Solvita®
- ✓ Nivel relativo de NH_3 Solvita®

La interpretación de los resultados se puede realizar mediante el siguiente cuadro:

Cuadro 12.3: Relación entre el Índice de Madurez Solvita® y las características del compost		
Índice de madurez Solvita®	Etapas del proceso de compostaje	Tipo de compost
8	Compost inactivo, muy maduro, muy viejo, posiblemente sobre envejecido, semejante a un suelo; sin limitaciones de uso	Compost terminado
7	Compost maduro, viejo, sano; con pocas limitaciones de uso	Compost activo
6	Compost con requerimientos reducidos de	

Cuadro 12.3: Relación entre el Índice de Madurez Solvita® y las características del compost

Índice de madurez Solvita®	Etapas del proceso de compostaje	Tipo de compost
5	saneamiento y aireación; con requerimientos significativamente reducidos de manejo	Compost crudo
4	Compost que está terminando la etapa activa de descomposición y está listo para el saneamiento; con necesidades reducidas de manejo intensivo	
3	Compost en una etapa moderadamente activa de descomposición, con necesidades de manejo	
2	Compost activo; con ingredientes frescos, requiere vigilancia y manejo intensivos	
1	Compost muy activo, fresco, pútrido, con alta velocidad de respiración; requiere aireación muy intensa	
1	Compost fresco, crudo; típico de mezclas nuevas; con extremadamente alta velocidad de descomposición; pútrido o muy maloliente	

3. Métodos Biológicos

Este tipo de métodos ponen de manifiesto la presencia de compuestos fitotóxicos que producen efectos negativos sobre la germinación y el crecimiento de las plantas.

- ✓ **Test de germinación:** Relacionando un porcentaje de germinación y la longitud de las raíces se calcula un índice de germinación. En general se considera maduro cuando este índice es superior al 50%. El test se efectúa a partir de un extracto acuoso del compost en comparación con un blanco (agua destilada).
- ✓ **Test de crecimiento:** Evalúa el efecto sobre el crecimiento en distintas especies vegetales. El Test consiste en preparar un ensayo de crecimiento sobre un sustrato preparado con compost en proporciones concretas en comparación con un sustrato estándar pero sin compost. Suele medirse el crecimiento vegetal en un determinado periodo de tiempo y se compara el sustrato con compost con relación al sustrato sin compost.
- ✓ **Índice respirométrico:** Estudian la demanda de oxígeno del compost que debe disminuir durante el proceso al ir cesando la actividad microbiana. Se basan en medidas respirométricas que cuantifican la cantidad de oxígeno consumido o de anhídrido carbónico desprendido por una muestra de compost en un tiempo determinado. Si el compost no está suficientemente estabilizado el consumo de oxígeno será elevado y si por el contrario existe estabilidad el consumo de oxígeno será menos. Se pueden realizar ensayos estáticos (sin aportación continua de aire al sistema) o dinámicos (con aportación continua de aire al sistema).

Un compost se considera suficientemente maduro cuando:

$$\text{El IRD (Índice Respirométrico Dinámico) es } < 1.000 \text{ mg O}_2 / \text{kg VS} / \text{h}$$

Algunos de los inconvenientes que presentan estos métodos son, que el proceso de incubación puede ser relativamente lento y que la complejidad de los aparatos sea más o menos sofisticada, no obstante hoy en día existen ya algunas técnicas simplificadas que reducen el tiempo del ensayo y la complejidad de los dispositivos.

El índice respirométrico dinámico¹⁸, evalúa el consumo de oxígeno debido a la biodegradación de la fracción fermentable contenido en la biomasa sin limitación del oxígeno. Se puede calcular mediante la siguiente ecuación:

¹⁸Pérez Manuel, Estudio y Desarrollo de Técnicas Respirométricas para el Control de la Estabilidad del Compost, Tesis Doctoral, Universidad de Córdoba, Facultad de Ciencias, 2008

$$IRD_i(mgO_2KgSV^{-1}h^{-1}) = Q * h * \Delta O_2 * Vg^{-1} * 31,98 * 10 * SV^{-1} * h^{-1}$$

Dónde:

IRD_i = Índice de Respiración instantáneo.

Q = Caudal de aire (L · h⁻¹),

ΔO₂ = diferencia de concentración de oxígeno entre la salida y la entrada (%v/v),

Vg = Volumen ocupado por un mol de gas. Asumiendo el valor estándar para T₁ = 273.15 °K y P₁ = 1 atm; Vg₁ = 22.4 L/mol. El valor corregido para Vg(Vg₂) a una T₂ viene calculado con la siguiente expresión; Vg₂ = (Vg₁ · T₂ · T₁⁻¹) donde T representa la Temperatura en grados Kelvin.

31.98 = peso molecular del oxígeno (g/mol).

10 = Coeficiente multiplicativo para conversión de unidades.

SV = Sólidos volátiles (kg). El dato de actividad biológica también puede ser referido a los sólidos (ST) o bien a los sólidos potencialmente fermentables.

h = tiempo en horas durante el cual viene realizada la medida.

El Índice de respiración dinámico (IRD) viene calculado como la media de los 24 valores horarios consecutivos en los cuales la respiración de la masa ha sido más elevada.

El *caudal aportado* en todo momento es uno de los temas más importantes para la correcta realización del índice de respiración dinámico para que garantice las condiciones de aerobiosis. El respirómetro puede actuar con caudal fijo o con caudal variable en función de nuestros objetivos. Para la segunda forma de trabajar, el control se realiza mediante un control feedback. La consigna mínima por debajo de la cual no debe bajar el oxígeno será 14 % y como concentración máxima se fija un 20.5 %. Para la FORSU fresca, se impone como valor inicial un caudal de 120-130 L/h, para un compost fermentado 15-20 días será suficiente con 100 L/h y para compost listos para refinar 50 L/h. El aumento o descenso del aire se hace cada hora en función de la demanda de oxígeno de la hora anterior. El control PID actúa variando un 5% del valor fijado inicialmente, de ahí, que los cambios sean más bruscos cuando el caudal introducido al inicio es más grande, y más lentos cuando el caudal inicial es pequeño.

¡Lo que desechas nos da vida!!!



Viceministerio de Agua Potable y Saneamiento Básico
Dirección General de Gestión Integral de Residuos Sólidos
Calle Capitán Castrillo N° 434 Teléfonos: (591-2) 2116583 – 2115571 Fax: 2-116124
www.mmaya.gob.bo

La Paz, Bolivia 2012

Esta publicación se realizó con el apoyo de:



Agència Catalana
de Cooperació
al Desenvolupament



Generalitat de Catalunya
Departament de Territori
i Sostenibilitat



Agència de
Residus de
Catalunya

