



UNIVERSIDAD DE LA RIOJA

TRABAJO FIN DE ESTUDIOS

Título
Producción sostenible del compostaje para el champiñón de La Rioja a través del análisis del ciclo de vida
Autor/es
Francisco Javier Leiva Lázaro
Director/es
Julio Blanco Fernández y Emilio Jiménez Macías
Facultad
Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial
Titulación
Programa de doctorado Innovación en Ingeniería de Producto y Procesos Industriales (formación)
Departamento
Curso Académico
2013-2014



Producción sostenible del compostaje para el champiñón de La Rioja a través del análisis del ciclo de vida , trabajo fin de estudios de Francisco Javier Leiva Lázaro, dirigido por Julio Blanco Fernández y Emilio Jiménez Macías (publicado por la Universidad de La Rioja), se difunde bajo una Licencia Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-SinObraDerivada 3.0 Unported. Permisos que vayan más allá de lo cubierto por esta licencia pueden solicitarse a los titulares del copyright.

© El autor
© Universidad de La Rioja, Servicio de Publicaciones, 2014
publicaciones.unirioja.es
E-mail: publicaciones@unirioja.es



**UNIVERSIDAD
DE LA RIOJA**

Trabajo de investigación

27-6-2014

**PRODUCCIÓN
SOSTENIBLE DEL
COMPOSTAJE PARA
EL CHAMPIÑÓN DE
LA RIOJA A TRAVÉS
DEL ANÁLISIS DEL
CICLO DE VIDA**

**Programa de Doctorado
"Innovación en Ingeniería del
Producto y Procesos Industriales"**

Curso 2013-2014

Tutores

D. Julio Blanco Fernández

D. Emilio Jiménez Macías

Alumno

Francisco Javier Leiva Lázaro

ÍNDICE

1 ABREVIATURAS	6
2 INTRODUCCIÓN	7
3 OBJETIVOS	7
4 ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA DEL CHAMPIÑÓN	8
4.1 HONGO'S BIOFACTORY	9
4.2 CHAMPRA S.A.T.....	10
4.3 MISPAJ MICELIOS	10
4.4 CARMELO LORENTE ARENZANA Y OTRA SC.....	11
5 ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA (ACV)	12
5.1 ANTECEDENTES	12
5.2 METODOLOGÍA	13
5.2.1 <i>Definición de Objetivos y Alcance</i>	14
5.2.2 <i>Desarrollo del Inventario de Ciclo de Vida (ICV)</i>	15
5.2.3 <i>Evaluación del Impacto del Ciclo de Vida (EICV)</i>	16
5.2.3.1 Clasificación	16
5.2.3.2 Caracterización	17
5.2.3.3 Valoración	17
5.2.4 <i>Fase de interpretación</i>	18
5.3 CATEGORÍAS DE IMPACTO SELECCIONADAS, INDICADORES Y MODELOS	18
5.3.1.1 Calentamiento global.....	19
5.3.1.2 Agotamiento de recursos	20
5.3.1.3 Eutrofización.....	20
5.3.1.4 La acidificación.....	21
5.3.1.5 Oxidantes fotoquímicos.....	22
5.3.1.6 Ecotoxicidad.....	23
5.3.1.7 Uso del suelo	23
5.4 SOFTWARES USADOS EN ACV.....	24
6 EL CHAMPIÑÓN	24
6.1 VALORES NUTRICIONALES.....	28
6.2 ESPECIES SIMILARES AL AGARICUS BISPORUS	29
6.3 FISIOPATÍAS, PLAGAS Y ENFERMEDADES.....	30
6.3.1 <i>Fisiopatías</i>	30
6.3.2 <i>Plagas</i>	30
6.3.3 <i>Enfermedades</i>	31
6.3.3.1 Enfermedades producidas por bacterias	31
6.3.3.2 Enfermedades producidas por hongos.....	32
7 CULTIVO DEL CHAMPIÑÓN	32
7.1 HISTORIA DEL CULTIVO	32
7.1.1 <i>Obtención del micelio</i>	33
7.1.2 <i>Preparación del compost</i>	33
7.1.3 <i>Siembra del inóculo</i>	34
7.1.4 <i>Producción</i>	34
8 HISTORIA DEL COMPOSTAJE	36
9 EL COMPOSTAJE PARA MEJORAR LA CALIDAD Y LA UTILIZACIÓN DE RESIDUOS ORGÁNICOS	38
10 SISTEMAS Y TÉCNICAS DE COMPOSTAJE	41
10.1 SISTEMAS ABIERTOS.....	41
10.1.1 <i>Pilas estáticas</i>	42
10.1.1.1 Pilas estáticas con aireación pasiva.....	42
10.1.1.2 Pilas estáticas con aireación forzada.....	43
10.1.2 <i>Pilas con volteo</i>	44
10.2 SISTEMAS CERRADOS.....	46



10.2.1 Reactores de flujo vertical.....	47
10.2.2 Reactores de flujo horizontal.....	47
11 PARÁMETROS DEL PROCESO DE COMPOSTAJE	48
11.1 HUMEDAD.....	49
11.2 TEMPERATURA.....	50
11.3 PH.....	52
11.4 AIREACIÓN.....	53
11.5 ESPACIO LIBRE.....	54
11.6 NIVEL DE OXÍGENO	56
11.7 PARÁMETROS RELATIVOS A LA NATURALEZA DEL SUSTRATO	57
11.7.1 Relaciones C/N y C/P.....	57
11.7.2 Tamaño de partícula.....	62
11.7.3 Nutrientes.....	62
11.7.4 Conductividad Eléctrica (CE).....	64
11.7.5 Materia orgánica.....	64
12 AGENTES DE DESCOMPOSICIÓN.....	65
12.1 MICROSCÓPICOS.....	65
12.2 MACROSCÓPICOS.....	66
12.3 BASURA ORGÁNICA EN VERTEDEROS.....	66
13 LIXIVIADOS.....	66
14 ETAPAS DEL COMPOSTAJE	68
14.1 FASES DEL PROCESO DE COMPOSTAJE.....	68
14.1.1 Fase mesófila 15 – 40°C.....	68
14.1.2 Fase termófila 40-70 °C.....	68
14.1.3 Enfriamiento de la masa.....	69
14.1.4 Maduración de la masa.....	69
15 BENEFICIOS DEL COMPOST.	70
16 ESTUDIO DEL PROCESO DE COMPOSTAJE EN TÚNELES CON AIREACIÓN FORZADA.	72
16.1 FASES DEL PROCESO DE COMPOSTAJE EN TÚNEL.....	76
16.1.1 Entrada de materias primas.....	77
16.1.2 Mezclado de materias primas.....	78
16.1.3 Fase de premojado de la paja:.....	79
16.1.4 Fase de premezclado.....	79
16.1.5 Fase de mezclado.....	80
16.1.6 Llenado de los túneles y creación de la pila de compost.....	80
16.1.7 Proceso de compostaje en el interior del túnel.....	80
16.1.8 Proceso de pasteurización.....	82
16.1.9 Empaquetado y transporte de los paquetes de compost a los productores y cultivadores.....	82
16.1.10 Recogida de lixiviados.....	83
16.2 DIAGRAMA DE FLUJO DEL COMPOSTAJE.....	85
16.2.1 Fase 0: Entrada y almacenamiento de materias primas.....	86
16.2.2 Fase I: Mezclado de todas las entradas que van a ser utilizadas durante el proceso de compostaje.....	87
16.2.3 Fase II: Llenado de los túneles y creación de la pila de compost.....	88
16.2.4 Fase III: Proceso de compostaje en el interior del túnel.....	89
16.2.5 Fase IV: Proceso de pasteurización.....	90
16.2.6 Fase V: Empaquetado y transporte de los paquetes de compost a los productores y cultivadores.....	91
16.2.7 Fase VI: Recogida de lixiviados.....	92
16.2.1 Diagrama de flujo del proceso completo.....	93
16.3 ANALÍTICA DE LABORATORIO DURANTE EL PROCESO DE COMPOSTAJE DE UNA BOLA DE COMPOST.....	94
16.3.1 Entrada de materias primas.....	94
16.3.2 Fase II: Llenado de los túneles y creación de la pila de compost.....	96

16.3.3 Fase III: Proceso de compostaje en el interior del túnel.....	97
16.3.4 Fase IV: Proceso de pasteurización.....	97
16.3.5 Fase V: Empaquetado y transporte de los paquetes de compost a los productores y cultivadores.	97
16.3.6 Fase VI: Recogida de lixiviados.	98
16.4 OTROS RECURSOS NECESARIOS PARA EL PROCESO DE COMPOSTAJE	99
16.4.1 Área.....	99
16.4.2 Energía	99
16.4.3 Agua.....	99
16.5 RESIDUOS DEL PROCESO DE COMPOSTAJE	100
16.5.1 Emisiones de aire.....	100
16.5.2 Lixiviados.....	102
16.5.3 Residuos.....	102
16.6 DIFICULTADES EN EL COMPOSTAJE DE LA PAJA	102
16.7 LOS COSTES ECONÓMICOS DEL COMPOSTAJE EN PILAS.	103
17 REFERENCIAS.	106
18 BIBLIOGRAFÍA.	113

ÍNDICE DE FIGURAS E ILUSTRACIONES:

FIGURA 1: COMPOSTAJE EN TÚNELES.	10
FIGURA 2: DESARROLLO DE MICELIO	11
FIGURA 3: CULTIVO TRADICIONAL.	11
FIGURA 4: CULTIVO CLIMATIZADO.....	12
FIGURA 5: METODOLOGÍA DEL ACV.	14
FIGURA 6: EJEMPLAR JOVEN DE UN AGARICUS BISPORUS.	25
FIGURA 7: AMANITA PHALLOIDES.....	29
FIGURA 8: XANTHODERMA AGARICUS.....	29
FIGURA 9: ENTOLOMA SINUATUM.	30
FIGURA 10: PROCESO DE COMPOSTAJE (RYNK, 1992).	38
FIGURA 11: DISEÑO DE LAS PILAS DE COMPOST.	43
FIGURA 12: PILAS DE COMPOST CON AIREACIÓN FORZADA.	44
FIGURA 13: DISEÑO DEL SISTEMA DE AIREACIÓN.	44
FIGURA 14: VOLTEO DE LAS PILAS.....	45
FIGURA 15: VOLTEADORA DE PILAS (HAUG, 1993).	45
FIGURA 16: DIMENSIONES CARACTERÍSTICAS PARA SISTEMAS DE PILAS ESTÁTICAS (HAUG, 1993).	46
FIGURA 17: ECUACIÓN PARA CALCULAR LA ALTURA CRÍTICA DE UNA PILA (HAUG, 1993).	46
FIGURA 18: DISTRIBUCIÓN DE LA TEMPERATURA DEL COMPOST EN LA PILA.....	52
FIGURA 19: TÚNEL CON AIREACIÓN FORZADA.	75
FIGURA 20: SISTEMA DE AIREACIÓN DEL COMPOST EN EL INTERIOR DEL TÚNEL.	76
FIGURA 21: DETALLE DEL SISTEMA DE AIREACIÓN.	76
FIGURA 22: ALMACENAJE DE LA PAJA DE HILERAS.....	77
FIGURA 23: ALMACENAMIENTO DE GALLINAZA EN MONTONES.....	77

FIGURA 24: SILOS PARA EL YESO.	78
FIGURA 25: ALMACENAMIENTO DE LOS PRODUCTOS QUÍMICOS.	78
FIGURA 26: FASE DE PREMOJADO DE LA PAJA.	79
FIGURA 27: MEZCLADO DE LA GALLINAZA CON LOS PRODUCTOS QUÍMICOS.	79
FIGURA 28: LÍNEA DE MEZCLADO DE LAS ENTRADAS.	80
FIGURA 29: LLENADO DE LOS TÚNELES DE COMPOSTAJE.	80
FIGURA 30: EJEMPLO DE UN SOFTWARE PARA EL CONTROL DE LA TEMPERATURA DE LA PILA DE COMPOST.	81
FIGURA 31: VOLTEO DE LA PILA DE COMPOSTAJE.	81
FIGURA 32: CÁMARAS DE PASTEURIZACIÓN.	82
FIGURA 33: CREACIÓN DE PAQUETES DE COMPOST.	83
FIGURA 34: PALETIZADO DE LOS PAQUETES DE COMPOST.	83
FIGURA 35: Balsa de Lixiviados.	84
FIGURA 36: SISTEMA DE RECOGIDA DE LIXIVIADOS.	84
FIGURA 37: LEYENDA DE LOS DIAGRAMAS DE FLUJO.	85
FIGURA 38: DIAGRAMA DE FLUJO ENTRADA Y ALMACENAMIENTO DE MATERIAS PRIMAS.	86
FIGURA 39: DIAGRAMA DE FLUJO FASE I – PERMOJADO DE LA PAJA, PREMEZCLADO Y MEZCLADO DE LAS ENTRADAS.	87
FIGURA 40: DIAGRAMA DE FLUJO FASE II – LLENADO DE LOS TÚNELES Y CREACIÓN DE LA PILA DE COMPOST.	88
FIGURA 41: DIAGRAMA DE FLUJO FASE III – PROCESO DE COMPOSTAJE EN EL INTERIOR DEL TÚNEL. .	89
FIGURA 42: DIAGRAMA DE FLUJO FASE IV – PROCESO DE PASTEURIZACIÓN.	90
FIGURA 43: DIAGRAMA DE FLUJO FASE V – EMPAQUETADO Y TRANSPORTE DE LOS PAQUETES DE COMPOST.	91
FIGURA 44: DIAGRAMA DE FLUJO FASE VI – RECOGIDA DE LIXIVIADOS.	92
FIGURA 45: DIAGRAMA DE FLUJO TOTAL.	93
FIGURA 46: RUEDA DE RAKE.	103

ÍNDICE DE GRÁFICOS:

GRÁFICO 1: CAMBIOS DE TEMPERATURA EN UNA PILA DE COMPOST (COOPERBAND, 2002).	52
GRÁFICO 2: EVOLUCIÓN DEL PH DURANTE EL PROCESO DE COMPOSTAJE TRADICIONAL.	53
GRÁFICO 3: RELACIÓN ENTRE POROSIDAD, ESPACIO LIBRE Y DENSIDAD DE LA MATERIA (BROUILLETE ET AL., 1996).	55
GRÁFICO 4: EVOLUCIÓN DE LA TEMPERATURA PARA PROCESOS EN CONDICIONES ÓPTIMAS (CURVA 1) Y PROCESOS EN CONDICIONES NO ÓPTIMAS (CURVA 2).	57
GRÁFICO 5: EVOLUCIÓN DE LA RELACIÓN C/N DURANTE EL PROCESO DE COMPOSTAJE (RYCKEBOER ET AL., 2003).	61
GRÁFICO 6: EVOLUCIÓN CARACTERÍSTICA DE LA RELACIÓN C/N DURANTE EL PROCESO DE COMPOSTAJE.	63
GRÁFICO 7: FASES DEL PROCESO DE COMPOSTAJE EN PILAS SIN COBERTURA Y CON VENTILACIÓN NATURAL.	70

ÍNDICE DE TABLAS:

TABLA 1: PRINCIPALES CATEGORÍAS DE IMPACTO AMBIENTAL	19
TABLA 2: GASES DE EFECTO INVERNADERO Y CARACTERÍSTICAS (EPA, 1998).	20
TABLA 3: POTENCIALES DE EUTROFIZACIÓN (CML LEIDEN UNIVERSITY, 2001)	21
TABLA 4: FACTORES DE EQUIVALENCIA EN GR EQ. DE SO ₂ PARA EL CÁLCULO DE LA ACIDIFICACIÓN (HUIJBREGTS, 1999).	22
TABLA 5: FACTORES DE EQUIVALENCIA POCP, GR EQ., DE ETILENO EN FUNCIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE NOX EN EL AIRE (CML LEIDEN UNIEVRSITY, 2001).	23
TABLA 6: CARACTERÍSTICAS DEL AGARICUS BISPORUS.	27
TABLA 7: VALORES NUTRICIONALES DEL AGARICUS BISPORUS.....	28
TABLA 8: CONDICIONES AMBIENTALES DE LOS LOCALES PARA EL CULTIVO DEL CHAMPIÑÓN (HERNÁNDEZ, 1977).....	36
TABLA 9: CARACTERÍSTICAS DE LA GALLINAZA.....	39
TABLA 10: COMPOSICIÓN Y NUTRIENTES DE LA GALLINAZA	40
TABLA 11: PARÁMETROS DE SALIDA DEL COMPOST	41
TABLA 12: CLASIFICACIÓN GENERAL DE SISTEMAS DE COMPOSTAJE. (DE BERTOLDI ET AL., 1985)	41
TABLA 13: COMPARACIÓN DE LOS SISTEMAS DE COMPOSTAJE TRADICIONALES (HAUG, 1993).	48
TABLA 14: CONTENIDO MÁXIMO DE HUMEDAD DE LOS PRINCIPALES MATERIALES USADOS PARA COMPOST (HAUG, 1993).....	50
TABLA 15: RELACIÓN C/N DE ALGUNOS MATERIALES USADOS PARA COMPOST.	61
TABLA 16: BIODEGRADABILIDAD DE LOS PRINCIPALES COMPONENTES ORGÁNICOS DE LOS SUSTRATOS (HAUG, 1993)	63
TABLA 17: POBLACIÓN DE BACTERIAS DURANTE LAS ETAPAS DEL COMPOSTAJE (POINCELET, 1977)...	65
TABLA 18: LÍMITES TÉRMICOS LETALES PARA ALGUNOS TIPOS DE PATÓGENOS Y PARÁSITOS (BUFORD, 1994; FINSTEIN AND MORRIS, 1974; GOTASS, 1956; HAUG, 1993; POLPRASERT, 1989).	66
TABLA 19: COMPARACIÓN DE LOS SISTEMAS DE COMPOSTAJE TRADICIONALES.....	74
TABLA 20: ANALÍTICA DE LA PAJA EN LABORATORIO.....	94
TABLA 21: ANALÍTICA DE LA GALLINAZA EN LABORATORIO.....	94
TABLA 22: DATOS PROPORCIONADOS POR EL FABRICANTE.....	95
TABLA 23: DATOS PROPORCIONADOS POR EL FABRICANTE.....	95
TABLA 24: DATOS PROPORCIONADOS POR EL FABRICANTE.....	96
TABLA 25: DATOS PROPORCIONADOS POR EL FABRICANTE.....	96
TABLA 26: ANALÍTICA DEL COMPOST EN LABORATORIO.....	96
TABLA 27: ANALÍTICA DEL COMPOST EN LABORATORIO.....	97
TABLA 28: ANALÍTICA DEL COMPOST EN LABORATORIO.....	98
TABLA 29: ANALÍTICA DE LIXIVIADOS EN LABORATORIO QUÍMICO.....	98
TABLA 30: INVERSIÓN MEDIA DE UN SISTEMA DE COMPOSTAJE (KOMILIS AND HAM, 2004).	105
TABLA 31: COSTE MEDIO DE MANTENIMIENTO DE UN SISTEMA DE COMPOSTAJE (KOMILIS AND HAM, 2004).	105



1 ABREVIATURAS

ACV	Análisis del ciclo de vida.
ICV	Desarrollo del Inventario de Ciclo de Vida.
EICV	Evaluación del Impacto del Ciclo de Vida.
ISO	International Organization for Standardization.
kWh	Kilovatios-hora.
MJ	Megajulios.
GEI	Gases de efecto invernadero.
PCG	Potencial de calentamiento global.
PAO	Potencial de agotamiento de la capa de ozono.
PE	Potencial de eutrofización.
PA	Potencial de Acidificación.
COV	Compuestos orgánicos volátiles.
HTP	Human toxicity potential (Potencial de toxicidad en humanos).
ETP	Ecotoxicity potential (Potencial de ecotoxicidad).
POPC	Photochemical Ozone Creation Potential (Potencial fotoquímico de creación de ozono).
USDA	U.S. Department of Agriculture (Departamento de agricultura de Estados Unidos).
Ppm	Partes por millón.
RSU	Residuos sólidos urbanos.
FAS	Free Air Space (Espacio libre).
CE	Conductividad eléctrica.
CIC	Capacidad de intercambio catiónico.



2 INTRODUCCIÓN.

El presente trabajo ha sido redactado para cumplir con los requisitos especificados para la superación de la asignatura Trabajo de Investigación dentro del Programa de Doctorado en Innovación en Ingeniería de Producto y Proceso de la Universidad de la Rioja. El presente trabajo de investigación y la futura tesis doctoral están dirigidos por el Dr. Julio Blanco Fernández y el Dr. Emilio Jiménez Macías.

Este trabajo de investigación es el inicio de la futura Tesis Doctoral sobre el Análisis del Ciclo de vida en el sector del champiñón centrándose particularmente en el análisis del ciclo de vida de una parte fundamental del cultivo del champiñón, el compostaje.

Puesto que el trabajo trata del análisis del ciclo de vida del compostaje se ha investigado sobre las características de este análisis, obteniendo información sobre el origen, la metodología utilizada para productos agrícolas, que resultados se obtienen, etc.

Dentro del análisis del ciclo de vida nos interesa calcular los problemas ambientales que producen cambios climáticos, en definitiva, obtener la huella de carbono del cultivo. El valor de la huella de carbono una vez obtenido los datos del análisis de ciclo de vida son relativamente sencillos de calcular puesto que para determinar la HC solo se tiene en cuenta los aspectos que influyen en la producción de cambio climático. Con este valor las empresas podrán establecer políticas de reducción que le aportaran beneficios económicos y podrán mejorar la imagen del sector. Si bien la Tesis aportará una serie de opciones de mejorar que podrán ser desarrollados en otros estudios o bien implantados. A parte dispondrán de la metodología de cálculo para futuros cálculos. Será posible, si se desea, obtener otra información ambiental a partir del ACV como son la eutrofización, la toxicidad, etc.

La futura tesis doctoral sobre el ACV del champiñón, dará como resultado unos valores a los aspectos medioambientales que va a permitir establecer medidas futuras para la reducción o resolución de los problemas ambientales del sector del Champiñón en La Rioja.

3 OBJETIVOS.

El principal objetivo de este trabajo es cumplir las especificaciones de la asignatura Trabajo Investigación pero a la vez pretende ser el inicio de la Tesis Doctoral. Para lo cual, este documento pretende conseguir los siguientes objetivos:



- Conocer las características de la preparación del compost para el cultivo del Champiñón, detallando las diferentes fases del proceso.
- Conseguir información sobre los diferentes ciclos de compostaje realizados en la zona de cultivo, sus ventajas e inconvenientes para la elección del mejor método.
- Determinar las características de los Análisis de Ciclo de Vida para establecer las prioridades o fases que se deben seguir antes de comenzar con la Tesis Doctoral.
- Realizar el Estado del Arte del proceso de compostaje como forma de obtener información para la elaboración de propuesta sobre acciones de mejora tras la realización del ACV.

4 ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA DEL CHAMPIÑÓN.

La futura Tesis Doctoral está basada en el ACV del sector del Champiñón en La Rioja y englobará todas las partes del sector, desde el cultivo del micelio hasta la recogida del producto final (champiñón) y su posterior distribución.

El estudio completo será dividido en tres partes principales:

- Cultivo del micelio.
- Creación y elaboración del compostaje y la tierra de cobertura.
- Cultivo tradicional y climatizado del champiñón.

Cada una de las partes del análisis del ciclo de vida que son objeto de estudio, son profundamente analizadas y estudiadas de forma independiente, como proyectos individuales, aunque cada uno de ellos tenga una correlación directa con el proceso anterior y posterior. Una vez estudiada cada una de las partes, serán englobadas en un proyecto final para poder realizar un análisis del conjunto del análisis del ciclo de vida del champiñón.

En estos estudios se analizarán las entradas y salidas de los diferentes sistemas, tratando de que la mayoría de datos obtenidos sean datos primarios, es decir, datos medidos por la propia empresa o el doctorando en los puntos adecuados.

Como complemento al cálculo del ACV y la huella de carbono en cada uno de los procesos, se crearán una serie de alternativas o medidas correctoras para disminuir el impacto de cada proceso en el ciclo de vida o disminuir la emisión de gases de efecto invernadero a la atmósfera. Dichas medidas serán estudiadas y contrastadas con estudios previamente realizados, para su posterior evaluación y viabilidad de las mismas.

El proyecto global está siendo realizado en colaboración con cuatro empresas riojanas del sector, dentro de un proyecto ADER en colaboración con la universidad de La Rioja. Las empresas participantes en el proyecto proporcionan datos e información necesaria para el desarrollo del mismo. Las empresas participantes se detallan a continuación:

- Hongo's biofactory.
- Champra S.A.T.
- Mispaj Micelios.
- Carmelo Lorente Arenzana y otra SC.

4.1 HONGO'S BIOFACTORY



HONGO'S BIOFACTORY es una empresa española de reciente creación (Octubre 2008), innovadora y de base biotecnológica. Aunque es una empresa joven, está avalada por la sólida experiencia combinada de sus dos socias, que cuentan con más de 30 años de andadura profesional y reconocida en el sector de los hongos cultivados comestibles y medicinales.

La mayor parte de las empresas del Vivero de Empresas están ubicadas en el Centro Tecnológico de La Rioja, situado en Logroño. Hongos Biofactory sin embargo tiene su ubicación en Calahorra, debido a que las empresas relacionadas con el Sector de los hongos cultivados, centran su actividad en La Rioja baja.

Hongo's Biofactory proporciona asesoramiento técnico, soluciones biotecnológicas y gestión de ayudas financieras para el sector de los hongos cultivados. Actuando en todas las fases de la cadena de producción: elaboración del micelio, desarrollo de sustratos, cultivo de los hongos y obtención de productos derivados de los hongos con alto valor añadido.

El equipo de Hongo's Biofactory posee una fuerte base científica e investigadora. Le ayudamos y asesoramos en las acciones de Investigación y Desarrollo de su empresa.

- Gestión y coordinación de Proyectos de investigación nacionales e internacionales.
- Desarrollo de memorias técnicas y económicas para la presentación de propuestas de proyectos de investigación a diferentes programas de ayudas.

- Realización de proyectos de investigación aplicada, para centrales de compostaje, laboratorios de micelio, elaboradores de suplementos, instalaciones de cultivo de hongos, empresas comercializadoras, etc.

Hongos Biofactory está especializada en los hongos exóticos y desarrolla junto a las empresas Biotecnología específica encaminada a la diversificación del cultivo en nuevas especies de hongos comestibles y medicinales. Ofrecemos soporte integral para el desarrollo de nuevas especies.

4.2 CHAMPRA S.A.T.

Champra S.A.T. es una sociedad constituida en 1976 principalmente compuesta por cultivadores de la región como socios principales, cuya actividad se engloba principalmente a la creación de compost y tierras de cultivo que serán utilizadas por los cultivadores de la zona durante el proceso de cultivo del champiñón. La sociedad está afincada en la localidad de Pradejón.

La empresa cuenta con un proceso de compostaje recientemente modificado mediante la introducción del compostaje en túneles con ventilación forzada, con un mayor control sobre la temperatura del compost. Dicho proceso fue introducido con un estudio realizado previamente por la empresa Hongo's Biofactory, como resultado de una mayor calidad y eficiencia de los cultivos que utilizan compost realizado mediante este sistema.



Figura 1: Compostaje en túneles.

El ámbito comercial de la empresa a efectos de venta de champiñón en fresco abarca todo el norte de España, dirigiéndose principalmente a mercados centrales (Madrid, Barcelona, Bilbao, Zaragoza, ect...) y grandes aéreas comerciales (Eroski, etc).

4.3 MISPAJ MICELIOS

La empresa MISPAJ SL., fue fundada en el año 1965 con afincamiento en Pamplona. En el año 1993 la empresa se traslada a Pradejón y cambia su

denominación social pasándose a llamar MISPAJ, S.L. y formando parte de esta nueva sociedad cuatro socios.

Actualmente, la empresa se ha convertido en un referente dentro del sector del champiñón y la seta. En los últimos años ha conseguido ser líderes del sector a nivel nacional.



Figura 2: Desarrollo de micelio

Poseen una amplia variedad en micelios de champiñones y setas que ofrecen en el mercado micológico, tanto de setas como de champiñones y hongos exóticos extensamente utilizados por los cultivadores de la zona. Aunque el producto insignia de la empresa sigue siendo el micelio del champiñón común.

4.4 CARMELO LORENTE ARENZANA Y OTRA SC.

Carmelo es un cultivador de champiñón afincado en la localidad de Pradejón. Su larga experiencia en el cultivo del champiñón, hace que sea uno de los cultivadores más reconocidos en la región y en el ámbito regional.

El principal sistema de cultivo de la empresa es el tradicional, aunque en el año 2009, evolucionaron otro sistema de cultivo climatizado, en el que el control constante de la temperatura y humedad, hizo que dicho cultivo haya tenido una gran acogida entre los cultivadores de la zona.



Figura 3: Cultivo tradicional.



Figura 4: Cultivo climatizado.

5 ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA (ACV).

5.1 ANTECEDENTES.

El análisis del ciclo de vida (ACV) ofrece un marco y métodos para analizar y evaluar los aspectos ambientales y el impacto potencial de un material, producto o servicio durante todo el período de su ciclo de vida. El alcance de la evaluación abarca la extracción y transformación de materias primas, procesos de fabricación y montaje, la distribución del producto, uso, reutilización, mantenimiento, reciclaje y disposición final (Nash and Stoughton, 1994). Es un enfoque "de la cuna a la tumba" que revisa el efecto ambiental de los procesos antes mencionados de una manera holística (Barton, 1996).

El origen de la metodología de un ACV se remonta a finales del 1960 (Miettinen and Hamalainen, 1997). Los estudios iniciales eran simples y generalmente restringidos a calcular los requerimientos de energía y los residuos sólidos, con poca atención a la evaluación de los efectos ambientales potenciales. El marco general de la metodología de un ACV ha cambiado en los últimos años. Desde 1990, se han hecho intentos para desarrollar y estandarizar la metodología del ACV, bajo la coordinación de la Sociedad de Toxicología y Química Ambiental (siglas en inglés SETAC) (Udo de Haes, 1993). En 1993, la SETAC publicó un 'Código de buenas prácticas', en el que se presentan los principios generales y un marco para la realización, revisión, presentación y utilización de los resultados del ACV (SETAC, 1993). Un estándar internacional para el ACV elaborado por la Organización Internacional de Normalización (ISO) ha surgido recientemente y está en fase de evaluación y revisión (Burgess and Brennan, 2001). El marco metodología para la normativa ISO es similar a la de SETAC con algunas diferencias para la fase de interpretación, donde las normas ISO han incluido su posterior análisis y estudios de sensibilidad.

- UNE-EN ISO 14040. Gestión Medioambiental. Análisis de Ciclo de Vida. Principios y Estructura.
- UNE-EN ISO 14041. Gestión Medioambiental. Análisis de Ciclo de Vida. Definición de Objetivos y Alcance y análisis de inventario..
- UNE-EN ISO 14042. Gestión Medioambiental. Análisis de Ciclo de Vida. Evaluación de Impacto de Ciclo de Vida
- UNE-EN ISO 14043. Gestión Medioambiental. Análisis de Ciclo de Vida. Interpretación de Ciclo de Vida.
- UNE-EN ISO 14047. Gestión Medioambiental. Análisis de Ciclo de Vida. Ejemplos de la aplicación de iso14042-
- UNE-EN ISO 14048 Gestión Medioambiental. Análisis de Ciclo de Vida Formato de documentación de datos del análisis)

Ejemplos de los impactos ambientales que pueden ser cubiertos por un ACV:

- El cambio climático
- La acidificación
- La eutrofización
- La toxicidad de los Ecosistemas
- El agotamiento del ozono
- La formación de humo
- La alteración del hábitat
- La disminución de la Biodiversidad
- El agotamiento de los recursos
- El consumo de agua
- El uso de la tierra.
- El cambio de uso del suelo

5.2 METODOLOGÍA.

De acuerdo a la estandarización realizada, se distinguen cuatro fases en un estudio de ACV:

- **Definición de Objetivos y Alcance:** Define el objetivo y el uso previsto del estudio, así como el alcance de acuerdo con los límites del sistema, la unidad funcional y los flujos dentro del ciclo de vida, la calidad exigida a los datos, y los parámetros tecnológicos y de evaluación.
- **Desarrollo del Inventario de Ciclo de Vida (ICV):** Es la fase del ACV en la que se recogen los datos correspondientes a las entradas y salidas para todos los procesos del sistema de producto.
- **Evaluación del Impacto del Ciclo de Vida (EICV):** Es la fase del ACV en la que el inventario de entradas y salidas es traspasado a indicadores de potenciales impactos ambientales al medio ambiente, a la salud humana y a la disponibilidad de recursos naturales.
- **Interpretación:** Es la fase del ACV en la que los resultados del ICV y el EICV son interpretados de acuerdo al objetivo y alcance marcados inicialmente. En esta fase se realiza un análisis de los resultados y se marcan las conclusiones.

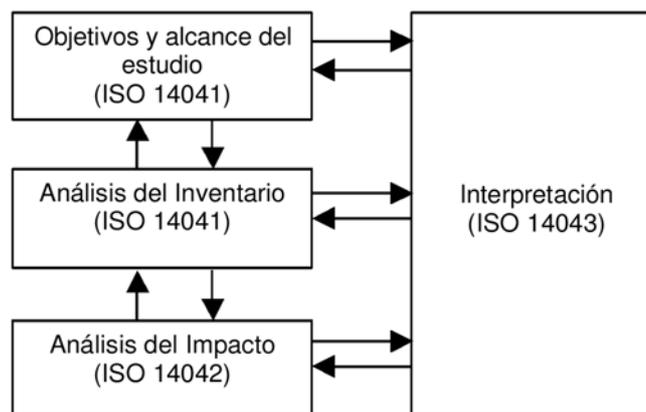


Figura 5: Metodología del ACV.

5.2.1 Definición de Objetivos y Alcance

El desarrollo de un objetivo y ámbito de aplicación es la primera fase de un ACV. Es necesario que la aplicación prevista del estudio y las razones para llevar a cabo el estudio deben ser fijadas de antemano. Durante esta fase, se identifica el contexto y la profundidad de la evaluación del estudio. Este paso inicial también determina el límite del estudio. Una descripción precisa de los límites del sistema, es muy importante porque la recolección de datos depende de la adecuada comprensión de donde comienza y termina cada etapa del análisis del ciclo de vida. Por otra parte, una unidad de referencia, a la que todos los impactos ambientales están relacionados, se debe determinar inicialmente. De acuerdo con la terminología de un ACV, esta unidad de referencia se denomina unidad funcional. Una unidad funcional es la función o el servicio que ofrece un sistema, para ser utilizado como un punto de referencia para hacer comparaciones de los impactos ambientales. Una unidad funcional apropiada para procesos de compostaje es el tratamiento de una determinada cantidad de materia orgánica en abono durante un período determinado.

El objetivo de un ACV, es cuantificar y evaluar el impacto, en este caso en concreto, de los sistemas de compostaje. La recepción, el procesamiento, el transporte y la aplicación de productos compostados son las funciones del proceso considerados.

Una comprensión clara de los siguientes aspectos es muy importante en la fase de definición del objetivo y el alcance de un ACV:

- Las funciones del sistema de producto (recepción, procesamiento y aplicación).
- La unidad funcional (medida usada durante el proceso).
- El sistema de producto a ser estudiado (el resumen del sistema como un proceso global).
- Los límites del sistema producto (lo que está incluido y excluido).

- Los procedimientos de asignación (métodos de asignación de datos para diferentes procesos en el sistema).
- Los tipos de impacto y la metodología de evaluación de impacto (los principales impactos ambientales considerados en el estudio y la forma en que se evalúan).
- Las necesidades de datos (qué datos son necesarios para identificar los impactos del sistema).
- Las hipótesis (suposiciones hechas al crear los límites del sistema, el uso de fuentes de datos / tipos, etc.),.
- Limitaciones (cualquier limitación asociada con el enfoque general utilizado para identificar el impacto ambiental total de un sistema).

5.2.2 Desarrollo del Inventario de Ciclo de Vida (ICV)

El desarrollo del inventario del ciclo de vida (ICV) es un proceso técnico que identifica y cuantifica la energía y el consumo de recursos y emisiones ambientales al aire, agua y tierra en todo el ciclo de vida de un producto o sistema.

En un ACV, la energía, el uso de recursos y las emisiones se consideran para varios procesos en un sistema, incluyendo:

- Adquisición de materia prima.
- Elaboración y transformación de las materias primas hasta los productos finales.
- La producción y consumo de productos intermedios,
- El transporte de materias primas y productos terminados.
- La disposición final de los residuos producidos durante el período de tratamiento como en el final de la vida útil del producto.

En todo el ACV se utiliza un proceso iterativo, lo que permite el refinamiento de los límites del sistema y las etapas del ciclo de vida o procesos unitarios. Esto limitará aún más el manejo de datos a los datos significativos sólo (aumentando la eficiencia). Hay varias fases en el proceso ICV:

- La preparación inicial.
- La recopilación de datos.
- Procedimientos de cálculo.

La fase inicial de preparación requiere que se establezca un entendimiento muy claro del sistema estudiado. A los efectos de la recopilación de datos, es apropiado para ver el sistema como un conjunto de subsistemas o procesos unitarios. Cada proceso tiene requerimientos de energía y de recursos. Del mismo modo cada proceso contribuye a las emisiones ambientales a través de diferentes actividades. Estos deben ser claramente identificados y documentados. Una vez se han identificado los componentes en el sistema, es necesario para describir las técnicas de recogida de datos para cada unidad de proceso. En este punto, las



cuestiones particulares o irregularidades en los requisitos de datos están documentados. Los datos de inventario para el sistema se pueden obtener a partir de un número de fuentes, incluyendo:

- Literatura.
- Estudios específicos o informes.
- Las investigaciones de laboratorio.
- Las organizaciones de la industria.
- Los organismos gubernamentales.

Dependiendo de los requisitos de datos de estudio y la accesibilidad de la información adecuada, la recolección de datos comprende una parte importante del proceso de ICV. Los pasos necesarios para la recopilación de datos puede variar debido a las diferencias entre los procesos individuales. Por lo tanto, un ICV exige una documentación clara de los procedimientos utilizados y las razones asociadas a su uso.

La manipulación de datos es un paso necesario utilizado para crear los datos de inventario en la fase de un ICV. A menudo, los datos para los diferentes componentes o procesos unitarios se obtienen a partir de una variedad de fuentes que pueden no ser compatibles con la unidad o el proceso de estudio, pero que pueden aportar información útil. Por ello, los datos necesitan ser modificados para adaptarse a la finalidad del estudio. Un ejemplo sencillo sería tener que cambiar las unidades de medida de los datos, si los datos son facilitados en kg, puede ser necesario convertirlos en la unidad utilizada durante el proceso de estudio, toneladas. Del mismo modo, las medidas de la electricidad pueden tener que ser convertido a partir de kWh a MJ o viceversa dependiendo de las medidas estándar que se utilizan durante todo el estudio.

5.2.3 Evaluación del Impacto del Ciclo de Vida (EICV)

La evaluación del impacto del ciclo de vida (EICV) se utiliza para caracterizar y evaluar los efectos del consumo de recursos y cargas ambientales identificadas en la etapa de inventario.

- Clasificación.
- Caracterización.
- Valoración.

5.2.3.1 Clasificación

La fase de clasificación requiere la asignación de la entrada de recursos y emisiones ambientales para una amplia gama de categorías de impacto. Generalmente incluyen el calentamiento global, el agotamiento de la capa de ozono, la formación fotooxidantes, ecotoxicidad, la eutrofización, la energía, la acidificación

y la toxicidad humana. Cuando sea posible, las categorías de impacto también se basan en los indicadores de salud ambiental. Los indicadores ambientales son medidas químicas, físicas, biológicas o socioeconómicas, que mejor representan a los elementos clave de los ecosistemas complejos o problemas ambientales". El uso de indicadores medioambientales y la terminología asociada facilitarán la comprensión de los problemas que se presentan en el ACV.

Los procedimientos de asignación se deben corresponder con los objetivos y el alcance del estudio. En algunos casos, los datos de emisiones de un ACV se pueden asignar a más de una categoría de impacto, si es requerido por el objetivo y el alcance del estudio. Por ejemplo, el óxido nitroso contribuye al calentamiento global, así como la acidificación y la eutrofización de un proceso.

5.2.3.2 Caracterización.

La fase de caracterización es un proceso cuantitativo en el que se determina la contribución de cada tipo de emisiones y consumo de recursos a diferentes categorías de impacto. El cálculo consiste en la conversión de los resultados del ICV a las unidades comunes y al conjunto de los resultados convertidos dentro de la categoría de impacto. Esta conversión utiliza factores de caracterización o equivalencia. Dichos factores se han desarrollado en el marco del ACV para identificar la cantidad de una sustancia que contribuye a una categoría de impacto ambiental en comparación con una sustancia de referencia. Por ejemplo, el óxido nitroso contribuye 310 veces más al calentamiento global que el dióxido de carbono. Por lo tanto la cantidad de óxido nitroso liberado por un sistema se multiplica por 310 para obtener una figura calentamiento global equivalente de dióxido de carbono.

El dióxido de carbono se utiliza como sustancia de referencia para la emisión de gases de efecto invernadero. En algunos casos, estos resultados son "normalizados" para comprender mejor su magnitud relativa e impacto. La normalización de estos resultados implica la transformación de un resultado dividiéndolo o multiplicándolo por un valor de referencia seleccionado. Por ejemplo, las emisiones totales o el uso de recursos para un área determinada, las emisiones totales (mundiales, regionales o locales) o el uso de recursos para una zona determinada sobre una base per cápita, entre otros.

5.2.3.3 Valoración.

La valoración o ponderación es la última etapa de la fase EICV. Implica la conversión de los resultados utilizando los factores numéricos basados en juicios de valor.



La ponderación se utiliza para facilitar los procesos de toma de decisiones, ayudando con las comparaciones de los efectos globales de los productos o sistemas estudiados. El proceso de ponderación, sin embargo, no se utiliza ampliamente en la metodología del ACV debido a problemas asociados con factores de ponderación. La asignación de los factores de ponderación es un proceso subjetivo y varía según la ubicación geográfica y el grado y tipo de problema ambiental.

5.2.4 Fase de interpretación.

Los objetivos de la fase de interpretación son para analizar los resultados, llegar a conclusiones, explicar las limitaciones, proporcionar recomendaciones basadas en los resultados de las fases anteriores y que informe de los resultados de la interpretación del ciclo de vida de una manera transparente.

Por lo general se toman los siguientes pasos para determinar y mejorar la confianza y la fiabilidad de los resultados del estudio que incluye las cuestiones significativas identificadas:

- Asegurar de que toda la información y datos necesarios para la interpretación relevante están disponibles y completa.
- Evaluar la fiabilidad de los resultados y conclusiones finales por determinar si están afectados por la incertidumbre en los datos, los métodos de asignación o cálculos de impacto categoría resultados.
- Determinar si las suposiciones, métodos y datos son coherentes con el objetivo y el alcance del estudio

Al abordar la calidad de datos y otras cuestiones, a través de las comprobaciones anteriores, se logra:

- Identificar los problemas importantes.
- Obtener conclusiones y comprobar que sean compatibles con las exigencias del objetivo y alcance del estudio.
- Hacer recomendaciones basadas en las conclusiones del estudio.

5.3 CATEGORÍAS DE IMPACTO SELECCIONADAS, INDICADORES Y MODELOS

Hay una serie de categorías de impacto asociados a los sistemas de compostaje en pilas que incluyen:

- El calentamiento global.
- El agotamiento de recursos.
- La eutrofización.
- La acidificación.
- La formación de foto-oxidantes químicos.
- El uso de la tierra.



Categoría de impacto	Unidad de referencia	Factor de caracterización
Calentamiento global	Kg equivalente de CO ₂	Potencial de calentamiento global (PCG)
Consumo de recursos energéticos	MJ	Cantidad consumida
Reducción de la capa de ozono	Kg equivalente CFC-11	Potencial de agotamiento de la capa de ozono (PAO)
Eutrofización	Kg equivalente de NO ₃	Potencial de eutrofización (PE)
Acidificación	Kg equivalente de SO ₂	Potencial de acidificación (PA)
Consumo de materias primas	Tm	Cantidad consumida

Tabla 1: Principales categorías de impacto ambiental.

5.3.1.1 Calentamiento global

El calentamiento global se refiere al aumento de la temperatura media de la superficie de la Tierra, debido a un incremento del calentamiento global, causado por las emisiones de gases de calentamiento global (dióxido de carbono, metano, óxido nitroso, fluorocarbonos y otros gases).

Una acumulación de gases de efecto invernadero (GEI), principalmente dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) y óxido nitroso (N₂O), en la atmósfera está causando la temperatura en aumento.

El protocolo internacional ha establecido el dióxido de carbono como gas de referencia para la medición del potencial de calentamiento global (PCG) que atrapa el calor de los gases de efecto invernadero. El potencial de calentamiento global se expresa como equivalente de CO₂ (en relación con el PCA de unidad de masa de CO₂). El PCG del dióxido de carbono, metano y óxido nitroso se resumen en la Tabla 1. Las emisiones de estos gases también se convierten en sus "equivalentes de carbono" sobre la base de la fracción de carbono en dióxido de carbono (C = 12/44 CO₂).

El PCG de las emisiones de gases puede ser expresada en términos de tiempo de retardo (20, 100 o 500 años) después de la emisión inicial. En la mayoría de los casos el impacto del gas disminuye a medida que se proyecta el tiempo con un menor impacto en el futuro. La absorción de carbono es el proceso contrario a las emisiones de gases contaminantes. Específicamente, el carbono se elimina del ciclo de carbono o de la atmósfera incorporándose a un sumidero de carbono, donde se almacena de carbono durante un largo periodo de tiempo. No existe impacto sobre el efecto



invernadero para el período de tiempo de almacenamiento. Los ejemplos característicos más representativos de los sumideros de carbono son los suelos, los bosques y los océanos (Sharma and Campbell 2003).

Gases de efecto invernadero	CO ₂ equivalente	Equivalente de Carbono (Kg de carbono)
Dióxido de Carbono	1	0,27
Metano	21	5,67
Óxido nitroso	310	83,7

Tabla 2: Gases de efecto invernadero y características (EPA, 1998).

5.3.1.2 Agotamiento de recursos

La mayoría de las crisis ambientales que se enfrentan hoy en día son consecuencias directas por el uso y el agotamiento de los recursos. Durante el último siglo, la explotación de los recursos materiales ha crecido enormemente en paralelo al crecimiento de las actividades económicas, lo que resulta en el agotamiento de las reservas limitadas de recursos disponibles. Además, la extracción de otros minerales se traduce en el agotamiento de otros recursos como la tierra, la vegetación, etc., haciendo que la contaminación del medio ambiente aumente. El agotamiento de los recursos es un tema importante en los estudios de evaluación del impacto del ciclo de vida para comparar los diferentes sistemas de producción.

El agotamiento de los recursos es una de las categorías de impacto más frecuentemente discutidas. Existe una amplia variedad de métodos disponibles para la caracterización de la contribución a esta categoría. La agregación y la evaluación de los efectos asociados por el agotamiento de los recursos se miden en términos de su contenido de exergía (Ayres et al., 1996).

5.3.1.3 Eutrofización

La eutrofización es un proceso mediante el cual las masas de agua, como lagos o ríos, reciben los nutrientes químicos en exceso, con nitrógeno o fósforo, que estimulan el crecimiento excesivo de plantas. Este consumo de oxígeno puede conducir a alcanzar unas condiciones anaerobias que provocarán la descomposición causada por bacterias anaeróbicas que liberarán CH₄, H₂S y NH₃. En último término desaparece cualquier tipo de vida aeróbica. El proceso de eutrofización aumenta en verano. Las fuentes de nutrientes son las siguientes:

- Fertilizantes aplicados a los campos agrícolas.
- Deposición de nitrógeno de la atmósfera.
- Erosión del suelo que contiene.

- Descargas de plantas de tratamiento de aguas residuales.

Las actividades humanas que resultan en el enriquecimiento de nutrientes antropogénicos engloban las aportaciones de fuentes puntuales (plantas de aguas residuales o de la industria) y de fuentes difusas (la agricultura, los hogares no conectados al alcantarillado o aportes atmosféricos).

La categoría de impacto de eutrofización se estima a partir de la demanda de oxígeno de las emisiones sobre el agua. Esta categoría de impacto contiene el impacto de las emisiones de agua en el consumo total de oxígeno en las aguas receptoras. Los potenciales de eutrofización, EP, son utilizados como factor de caracterización para calcular el indicador total para dicha categoría.

Sustancia	EP (kg PO ₄ ³⁻ eq/kg)
Amoniaco	0,35
Amonio	0,33
Nitrato	0,1
Ácido nítrico	0,1
Nitrógeno	0,42
Dióxido de nitrógeno	0,13
Monóxido de nitrógeno	0,2
Óxidos de nitrógeno	0,13
Fosfato	1
Ácido fosfórico	0,97

Tabla 3: Potenciales de eutrofización (CML Leiden University, 2001)

5.3.1.4 La acidificación.

La acidificación consiste en la acumulación de sustancias acidificantes (ácido sulfúrico, ácido clorhídrico) en las partículas de agua en suspensión en el ambiente. Depositado en el suelo por las lluvias, los contaminantes acidificantes tienen una amplia variedad de impactos sobre los suelos, las aguas subterráneas, las aguas superficiales, los organismos biológicos, los ecosistemas y los materiales.

Acidificación es una de las categorías de impacto en que la escala geográfica adquiere importancia. Procesos o circunstancias locales influirán a la contribución de una sustancia a la acidificación. Una alta mineralización y un elevado ratio de desnitrificación, reducirá la contribución de los compuestos acidificantes. También



la contribución de una sustancia se verá reducida si los aniones que acompañan a los protones están limitados en el sistema o eliminados por la biomasa. Este es el caso principalmente de NO_x y NH_3 . La contribución de estos componentes puede variar de 0 a 100%.

Sustancia	Potencial de acidificación
NH_3	0,94
NO_x	0,27
SO_2	1

Tabla 4: Factores de equivalencia en gr eq. De SO_2 para el cálculo de la acidificación (Huijbregts, 1999).

5.3.1.5 Oxidantes fotoquímicos

Los oxidantes fotoquímicos se forman durante la fotooxidación de compuestos orgánicos volátiles (COV), monóxido de carbono (CO) y óxidos de nitrógeno (NO_x), como son el ozono (O_3), peróxido de hidrógeno (H_2O_2) y peroxiacetilnitrato (PAN) (Kley et al., 1999), siendo el ozono el más relevante de todos ellos (McKee, 1994). El ozono se produce fotoquímicamente en la troposfera través de la oxidación del CO y compuestos orgánicos volátiles en presencia de NO_x (Kley et al., 1999).

Bajo la influencia de la radiación solar, los óxidos de nitrógeno, NO_x , reaccionan con los compuestos orgánicos volátiles (VOCs) para producir ozono troposférico, este fenómeno tiene lugar principalmente durante los meses de verano. La presencia de monóxido de carbono puede igualmente contribuir a la formación de ozono.

El predominio de los oxidantes fotoquímicos de la troposfera es de gran preocupación internacional, debido a sus efectos adversos sobre la salud humana y el medio ambiente. Estos oxidantes fotoquímicos, pueden resultar perjudiciales para la salud humana, los ecosistemas y la agricultura. Afectando por tanto a las cuatro áreas de protección (Udo de Haes et al., 1999) salud humana, recursos naturales y entornos natural y modificado por el hombre. Son irritantes respiratorios que causan efectos fisiológicos, la inflamación pulmonar y la interrupción o la muerte de las células a lo largo del tracto respiratorio (Kley et al., 1999). También reducen el crecimiento de la planta y la productividad (Kley et al., 1999).

Para cuantificar la contribución de cada oxidante fotoquímico para la formación de ozono, se usa el concepto de potencial fotoquímico de creación de



ozono (POCP) (Andersson-Skold et al., 1992). Los POCP se define como la relación entre el cambio en la concentración de ozono debido a un cambio en la emisión de un VOC y el cambio en la concentración de ozono debido a un cambio en la emisión de etileno.

Sustancia	POCP alto
Monóxido de carbon	0,027
Dióxido de nitrógeno	0,028
Dióxido de sulfuro	0,048
Etileno	1
Metano	0,006

Tabla5: Factores de equivalencia POCP, gr eq., de etileno en función de la concentración de NOx en el aire (CML Leiden Unievrsty, 2001).

5.3.1.6 Ecotoxicidad

La ecotoxicidad se refiere a las sustancias tóxicas liberadas durante un proceso, que afectan al medio ambiente, tanto a seres humanos como a plantas o animales. La exposición humana a estas sustancias químicas a través de los alimentos, el aire, el agua y el suelo hace que aparezcan problemas de salud. Existen dos indicadores utilizados para la cuantificación de este impacto. El primero es el de la toxicidad potencial en seres humanos (HTP) y el segundo es el potencial de ecotoxicidad (ETP). Estos indicadores se basan generalmente en el impacto de una sustancia de referencia sobre los ecosistemas y los seres humanos.

Las sustancias tóxicas liberadas durante un proceso pueden ser tóxicas para los seres humanos y el medio ambiente. Las sustancias liberadas pueden ser gaseosas, líquidas o sólidas. La exposición humana a estas sustancias químicas a través de los alimentos, el aire, el agua y el suelo hace que los problemas de salud. Estos productos químicos también tienen impactos ecotoxicológicos sobre los ecosistemas aéreos, acuáticos y terrestres, amenazando la biodiversidad de los mismos.

5.3.1.7 Uso del suelo

El uso del suelo ha recibido una atención creciente en los estudios de ACV. El impacto del uso del suelo es un tema relativamente nuevo en la Evaluación del Impacto del Ciclo de Vida (EICV). A pesar de que ésta es una de las categorías que más importancia puede tener para establecer la sostenibilidad de una actividad, no existe todavía hoy en día un consenso sobre que indicadores usar. Quizás,



precisamente, a causa de su propia complejidad. Hay muchos estudios en que se muestra que la extinción de las especies es precisamente debida a la pérdida de hábitat. La conversión de hábitats naturales para la práctica agrícola y forestal, la expansión de las áreas urbanas e industriales han desplazado los ecosistemas naturales.

Por esta razón los indicadores más desarrollados hasta el momento guardan relación con la biodiversidad. Igualmente se ha visto la necesidad de establecer indicadores que evalúen los cambios en la calidad del suelo, que afectará aquellas funciones de sostén a la vida, fertilidad del suelo, ciclos hidrológicos, etc. (Weidema and Lindeijer, 2001). Los cambios asociados en la calidad de la tierra (transformación) por lo general se expresa en la diversidad biológica y / o funciones de soporte vital y la duración de la ocupación del suelo (Guinée et al., 2001).

5.4 SOFTWARES USADOS EN ACV.

En los últimos años y basados en la metodología del ACV se han desarrollado numerosos programas para facilitar su cálculo. La mayoría de estos programas incluyen bases de datos que pueden variar en extensión y calidad de dichos datos y por lo tanto en el precio. Las bases de datos de inventarios públicos vienen incorporadas en la mayoría de los programas comerciales.

En ellos se introducen los datos que configuran el inventario para posteriormente realizar los cálculos propios de la fase del AICV, obteniéndose los resultados para las diferentes categorías de impacto elegidas. Algunos de estos programas realizan también análisis de sensibilidad e incertidumbre.

Como ejemplos de software presentes en el mercado se pueden citar GaBi (IKP), LCAiT (Chalmers), Simapro (Pré Consultants), uno de los más extendidos por su facilidad en el manejo, TEAM (ecobilan group), Umberto (IFEU),... La tabla 3.1 presenta alguno de las herramientas existentes en el mercado actualmente. En esta tesis se utiliza el programa TEAM 3.0 acrónimo de "Tools for Environmental Analysis and Management". Este viene acompañado de la base de datos DEAM, "Data for Environmental Analysis and Management".

6 EL CHAMPIÑÓN.

El *Agaricus Bisporus* (Lange, 1946), conocido más comúnmente como el champiñón común, es una especie de hongo basidiomiceto de la familia Agaricaceae nativo de Europa y América del norte. Cultivado extensamente por todo el mundo, el principal uso de este hongo es en la

gastronomía. El *Agaricus Bisporus* se cultiva en más de setenta países, (Cappelli, 1984) y es una de las setas más consumidas en el mundo.

En la estructura física de cualquier hongo, se distinguen cuatro partes fundamentalmente:

- Sombrero
- Anillo
- Pie o estipe
- Himenio

Estas partes son la principal manera de diferenciación entre las distintas especies de hongos, además del color, forma y tamaño de alguna de las partes.

El *Agaricus Bisporus* tiene un sombrero redondeado completamente liso y de un color blanquecino. Durante su crecimiento este sombrero está unido al pie por un anillo simple, que se irá abriendo conforme el ejemplar crezca o madure. Hacia el final de su desarrollo el anillo se abre por completo, exponiendo unas laminillas típicas de la familia de las Agaricáceas. Estas laminillas cambian gradualmente de un color rosado a pardo oscuro conforme el hongo crece y se desarrolla. El sombrero puede alcanzar los 18 cm de diámetro si se deja desarrollar por completo, y el pie hasta 8 cm de largo y 3 cm de diámetro. Especialmente en la gastronomía, el sombrero no se deja crecer más de 5-6 cm de diámetro, ya que por encima de ese tamaño, el hongo comienza a abrirse demasiado no haciendo atractivo su uso para el consumo.



Figura 6: Ejemplar joven de un *Agaricus Bisporus*.

El rasgo distintivo de *Agaricus Bisporus* es microscópico: sus esporas (que miden de 5,5 a 8,5 μm por 4 a 6,5 μm , de forma elíptica, se presentan dos por cada basidio, en lugar de cuatro como es habitual en otros *Agaricus*.



El micelio de este hongo es blanco por lo que a menudo se le conoce como "blanco", aunque posee una gran variedad de nombres. Destacan las variedades Blanchocamp BL-40, para producción en primavera, otoño e invierno, Claron A.5.1., Fungisem (H-10, H-12), Gurelan (15, 35), para cosechas invernales, etc. También se ha extendido el cultivo estival de *Agaricus bitorquis* (Quel.) Sacc., con líneas o variedades como Gurelam ABK, Gurelan ABC, Fungisem (B-10)... Esta variedad ha desplazado virtualmente del mercado, debido a su mejor adaptación a la conservación, a la original *Agaricus Bisporus* var *Brunnescens*. Dependiendo del punto de maduración con el que se comercializa, esta última se vende bajo el nombre de Portobello —más grande y desarrollado— o Crimini —en etapa juvenil—; suelen presentar un mayor tamaño que el mutante blanco, y con su sombrero es más ancho y aplanado, destinándose sobre todo al consumo inmediato.

El *Agaricus Bisporus* posee las siguientes características:

- Color blanco, crema claro, crema oscuro, color pardo claro y pardo oscuro.
- Sombrero liso ligreamente escamoso.
- Asiento más o menos estable sobre la tierra de cobertura.
- Productividad, desarrollo y aspecto de las oleadas.
- Resistencia a enfermedades.
- Necesidades nutritivas.
- Aptitud y calidad para conservación.
- Condiciones climáticas deseables.

El *Agaricus Bisporus* es una especie saprofita al igual que otras especies de la familia Agaricaceae. Se cultiva por lo general sobre compost al que se inocula el micelio previamente de forma masiva y aleatoria, lo que hace que la producción por metro cuadrado sea muy elevada.

Ambas especies se diferencian entre sí por:

- Forma y color. Existen champiñones blancos, crema claro y crema oscuro, color pardo claro y pardo oscuro.
- Sombrero: liso o escamoso.
- Asiento más o menos estable sobre la tierra de cobertura.
- Productividad, desarrollo y aspecto de las oleadas.
- Resistencia a enfermedades.
- Necesidades nutritivas.
- Aptitud y calidad para conservación.
- Condiciones climáticas deseables.

Fue descrito por primera vez por el botánico Inglés Mordecai Cubitt Cooke (Cooke, 1825), como una variedad de *Agaricus campestris* (Cooke, 1871). El micólogo danés Jakob Emanuel Lange más tarde revisó una muestra de cultivos, y la denominó



Psalliota hortensis var. *bispora* en 1926 (Lange, 1926). En 1938, fue considerado como una especie y se renombró como *Psalliota bispora* (Schäffer and Møller, 1939). Emil Imbach lo bautizó el nombre científico actual de la especie, *Agaricus Bisporus*, después de que el género *Psalliota* fuera renombrado como *Agaricus* en 1946 (Cappelli, 1984).

Reino	Fungi
División	Basidiomycota
Clase	Agaricomycetes
Subclase	Agaricomycetidae
Orden	Agaricales
Familia	Agaricaceae
Género	<i>Agaricus</i>

Tabla 6: Características del *Agaricus Bisporus*.

El sombrero de la especie silvestre original es de un color gris-marrón pálido. En primer lugar, el sombrero es de forma semiesférica antes de que se produzca un aplanamiento conforme va madurando. Posee un diámetro de 5-10 cm. La parte interior del sombrero es inicialmente de color rosa, tornándose a continuación, de color marrón rojizo y finalmente un color marrón oscuro con un borde de color blanquecino. El estipe cilíndrico es de hasta 6 cm de alto por 2.1 cm de ancho y tiene un anillo grueso y estrecho, que puede tener forma rayada en la parte superior. La carne del champiñón es de color blanquecino en el que pueden aparecer pequeñas manchas de un color rojo-rosa pálido (Zeitlmayr, 1976); Carluccio, 2003). Las esporas son de un color marrón oscuro con forma ovalada y redondeada con un tamaño aproximado de 4.5 a 5.5 x 5-7,5 micras. Los basidios generalmente poseen dos esporas, aunque existen variedades tetraspóricas en el desierto de Mojave y el Mediterráneo, con estilos de vida predominantemente heterotálica y homotálicos, respectivamente (Callac et al., 1993; Callac et al., 2000).

El hongo es generalmente cultivado en empresas con unas condiciones adecuadas, aunque es comúnmente hallado en los campos de todo el mundo y sobre todo en áreas de elevada humedad, especialmente después de épocas de lluvia, a partir de finales de la primavera hasta el otoño. Es fácilmente reconocible y diferenciado del resto de hongos, lo que hace que hasta los recolectores menos experimentados no tengan una gran dificultad a la hora de identificarlo (Carluccio, 2003).



6.1 VALORES NUTRICIONALES

El champiñón común es un hongo especialmente utilizado en la alimentación. Posee valiosos valores nutricionales ideales para el consumo. Son principalmente considerados verduras con importantes vitaminas, minerales y fibras necesarias para nuestra alimentación diaria. Proporciona muchos nutrientes, como vitamina B, C y D.

Valores nutricionales por 100 g	
Energía	93 kJ (22 kcal)
Carbohidratos	3.26 g
Azúcares	1.98 g
Fibra	1 g
Grasas	0.34 g
Proteínas	3.09 g
Vitaminas	
B1	(7%) 0.081 mg
B2	(34%) 0.402 mg
B3	(24%) 3.607 mg
B5	(30%) 1.497 mg
B6	(8%) 0.104 mg
B9	(4%) 17 µg
B12	(2%) 0.04 µg
C	(3%) 2.1 mg
D	(1%) 0.2 µg
Información complementaria	
Hierro	(4%) 0.5 mg
Magnesio	(3%) 9 mg
Fósforo	(12%) 86 mg
Potasio	(7%) 318 mg
Sodio	(0%) 3 mg
Zinc	(5%) 0.52 mg
Agua	92.45 g

Tabla 7: Valores nutricionales del Agaricus Bisporus.

6.2 ESPECIES SIMILARES AL AGARICUS BISPORUS

El hongo común podría ser confundido con ejemplares jóvenes de la variedad Amanita, altamente venenosa. Se puede distinguir por su volva o taza en la base del hongo y por los anillos blancos contraste con los rosados o marrones de la variedad Agaricus Bisporus. Su olor es agradable y muy marcado a champiñón, a diferencia de otras especies que poseen olores anisados y poco característicos del champiñón (Keshri et al., 2002).



Figura 7: Amanita Phalloides.

Un error más común y menos peligroso es confundir el Agaricus Bisporus con el Agaricus Xanthodermus, un hongo no comestible encontrado en todo el mundo. Posee un olor que recuerda a fenol. Este hongo puede causar calambres abdominales, náuseas y diarrea, los síntomas menos comunes incluyen dolor de cabeza, mareos, sudoración y somnolencia.



Figura 8: Xanthoderma Agaricus.

La especie europea venenosa, Entoloma sinuatum, tiene un gran parecido con el champiñón común, pero tiene agallas amarillentas y carece de anillo. Este hongo

es tóxico, y es una de las setas con más registros de envenenamiento por su consumo. Es muy fácil de confundir con otro tipo de hongos comestibles pues es muy parecido a otros miembros de su familia.

El cuerpo fructífero de este hongo tiene una forma clásica de un hongo de campo, y puede llegar a medir hasta 19 cm de alto. Se constituye por un tronco semigrueso que sostiene el sombrerillo cuya cutícula presenta un color gris claro cremoso, aunque puede presentar coloraciones que van desde el marfil hasta el ocre. Un poco menos legible se pueden apreciar pequeñas fibrillas radiales. En los hongos jóvenes la estructura del cuerpo es incurvada —con el borde plegado hacia adentro—, pero después será plana y ondulada. Las láminas son de color blanco con tonos amarillentos o salmón, escotadas, libres y tupidas. Su carne es consistente y de color blanquecino, con una textura fibrosa. Tiene un olor harinoso (Grünert and Grünert, 1984) y agradable.



Figura 9: *Entoloma sinuatum*.

6.3 FISIOPATÍAS, PLAGAS Y ENFERMEDADES.

6.3.1 Fisiopatías.

Destaca la llamada piel de cocodrilo. Consiste en la aparición de protuberancias sobre los sombrerillos de los hongos afectados. Se debe a diversas causas, como excesiva sequedad ambiental, aplicación excesiva de determinados pesticidas, vapores de formol, etc.

6.3.2 Plagas.

Las plagas más conocidas del champiñón son ciertos ácaros, algunos nematodos y varios insectos. Los ácaros que más destacan son:

- Araña blanquecina (*Tyroglyphus sp.*), que producen cavidades irregulares en el pie y sombrerillo, de consistencia húmeda.

- Araña rubia (*Linopodes sp.*), que provoca el desdoblamiento de las raíces del hongo.
- Araña roja (*Tarsonemus sp.*). Produce irritaciones a los obreros.
- Araña negra (*Ceratophylla sp.*).

Estas arañas se pueden combatir con acaricidas como dicofol, tetradifón, fensón, sulfotep, diazinón, etc.

Los dípteros constituyen una plaga cuyas larvas estropean el micelio del hongo, causando fallos durante el estado de fructificación del hongo dañando los hongos ya formados, labrando túneles o galerías en el pie y en el sombrero de los champiñones. Además de una adecuada desinfección del compost, pueden emplearse aplicaciones de insecticidas como el Diazinon, Malation, Lindano, Clorfenvinfos, etc.

En cuanto a los escarabajos, producen pequeños orificios ovales, de aspecto reseco, sobre el sombrerillo. Los tratamientos con Lindano y Malatión son los más efectivos.

Los nematodos son una de las plagas más dañinas de los cultivos de champiñón. Destacan *Aphelenchus*, *Ditylenchus*, *Aphelenchoides*, etc. Los nematodos destruyen el micelio del hongo. El estiércol toma un color rojizo y al tacto da la sensación de una pasta jabonosa. Su olor se hace acre. Una adecuada esterilización del compost junto al empleo de nematicidas y el control del ambiente del cultivo, son las mejores armas contra esta plaga.

6.3.3 Enfermedades.

6.3.3.1 Enfermedades producidas por bacterias.

La más grave de todas es la mancha bacteriana, producida por *Pseudomonas toolasi* Planie. Debe su nombre a que, cuando la padece, el champiñón presenta unas manchas amarillentas en el sombrerillo, de aspecto pegajoso y en forma de gotitas. En la presentación de esta enfermedad influye sobre todo la mala preparación del estiércol, la mala ventilación de las instalaciones y el riego excesivo.

Pseudomonas sp., también provoca la llamada momificación. Consiste en una serie de hinchamientos del pie del hongo, que provocan la apertura prematura de los sombrerillos. Se recomiendan las mismas medidas que en el caso anterior, junto a una limpieza más adecuada de la explotación y un control más riguroso de la tierra de cobertura.



6.3.3.2 Enfermedades producidas por hongos.

Destaca la temida burbuja seca o mole, provocada por el hongo *Verticillium malthousei*. Provoca la aparición de deformaciones, el champiñón se recubre de un moho o pelusilla blanco-rosácea y termina pudriéndose con desprendimiento de un olor muy desagradable.

El empleo de tierras de revoco insanas o utilizadas con anterioridad, contribuyen a su presencia. Para su control se recomienda desinfectar la tierra de cobertura con formol, vapor de agua, mezclas de zineb o mancozeb, con benomilo, iprodiona, etc.

Otras enfermedades del champiñón menos importantes son la enfermedad de la telaraña (*Dactylium dendroides*) y la mole húmeda (*Mycogone pernicioso*).

7 CULTIVO DEL CHAMPIÑÓN

Algunos hongos crecen sobre sustratos que deben descomponerse en parte para que desaparezcan los azúcares solubles favorecedores de los mohos y bacterias (García Rollán, 1998).

7.1 HISTORIA DEL CULTIVO

La descripción más antigua del cultivo comercial de *Agaricus Bisporus* fue hecha por el botánico francés Joseph Pitton de Tournefort en 1707 (Spencer, 1985). El agrónomo francés Olivier de Serresnoted descubrió que el trasplante de micelios de hongos llevaría a más setas.

Originalmente, el cultivo no era fiable ya que los productores de hongos esperarían a tener buenas cosechas de hongos en los campos antes de desenterrar el micelio y replantarlo en lechos de estiércol compostado o mediante inoculación en "ladrillos" de basura comprimida o estiércol. Como resultado, el hongo recogido contenía una gran cantidad de patógenos y los cultivos eran comúnmente infectados o sin crecimiento [Genders, 1969a]. En 1893, el cultivo puro o esterilizado fue descubierto y producido por el Instituto Pasteur de París, para el cultivo en el estiércol de caballo compostado (Genders, 1969b).

En 1926, un agricultor de setas Pennsylvania encontró un grupo de hongos comunes con sombrero blanco en su lecho de setas. Para la gastronomía era visto

como un alimento mucho más atractivo aumentando de esta forma su popularidad (Genders, 1969c).

El *Agaricus Bisporus* se cultiva actualmente en la mayoría de los países con una gran actividad en el mundo gastronómico (Cappelli, 1984). En la actualidad el cultivo del champiñón ha crecido de forma abrumadora, convirtiéndose en el producto micológico más consumido y cultivado.

7.1.1 Obtención del micelio

El primer paso lo constituye la obtención del micelio de la especie a cultivar. Una vez logrado el cultivo puro del hongo, se lo repica en semillas esterilizadas, por ejemplo sorgo o trigo (García Rollán, 1998).

Los granos deben cocinarse durante unos veinte minutos (1 kg en 1,5 L agua), se escurren y mezclan con carbonato de calcio y yeso (3,5 g y 13 g respectivamente, por cada kg de grano cocido). Luego se llenan los frascos y se esterilizan en autoclave.

Una vez repicado el micelio del hongo en los granos, se incuba a unos 25°C hasta que todo el contenido del frasco haya sido invadido por el mismo. Para mantener los granos separados se debe agitar con frecuencia los frascos. Luego se los puede mantener en el refrigerador a menos de 4°C, no más de un mes (García Rollán, 1998).

7.1.2 Preparación del compost

La obtención de un sustrato adecuado es una fase crítica en la producción de champiñones. Tradicionalmente se lo preparaba de paja de trigo y estiércol de caballo, pero se pueden usar otros residuos (Pacioni, 1995). Se agrega un suplemento para obtener un 2- 2,5% de nitrógeno. Como la paja de trigo es deficiente en potasio se añade cloruro o sulfato de potasio. El yeso mejora la textura final del compost y evita la compactación, además de neutralizarlo (Hudson, 1986).

El objetivo del compostado es transformar un sustrato no específico en uno altamente selectivo conveniente para la proliferación de *Agaricus Bisporus* y otros agáricos. El proceso se divide en dos fases. La primera ocurre al aire libre, o bajo un tinglado para evitar las lluvias, en largas pilas de aproximadamente un metro de alto y dos de ancho.



Durante esta fase que dura entre 7 y 10 días, se produce la termogénesis microbiana alcanzando una temperatura interna de hasta 70 - 80°C. Las condiciones aeróbicas se mantienen volteando el compost a intervalos regulares. La importancia de esta primera fase es lograr que el substrato sea inadecuado para los mohos que podrían afectar a la producción del champiñón (Hudson, 1986). La cantidad de agua añadida debe ser tal que humedezca el material en compostaje, pero que no escurra líquido al tomarlo con las manos (Toovey, 1976).

La segunda fase ocurre dentro de un galpón aislado. El compost es colocado en cajones, en capas de 15 a 20 cm de altura. Estos que se apilan dejando huecos entre ellos para permitir el pasaje de los gases. Aquí continúa la actividad microbiana elevando la temperatura a 50-60°C, con una adecuada ventilación. Esta fase dura 3 a 7 días. Se producen nutrientes por la actividad microbiana, especialmente proteínas, y se eliminan los restos de amonio o aminas producidos durante la primera fase (Hudson, 1986).

Durante el compostado se pasteuriza el interior del compost matando esporos fúngicos, ácaros, insectos y nematodos. Se suele acelerar el proceso introduciendo vapor de agua a 60 - 70°C. La temperatura del compost en la segunda fase no debe pasar los 60°C (Toovey, 1976).

7.1.3 Siembra del inóculo.

Se obtiene el inóculo haciendo crecer el micelio del champiñón sobre granos esterilizados adicionados de tiza (carbonato de calcio) para mantener el pH. Estos granos invadidos por el hongo se mezclan con el compost (Hudson, 1986).

7.1.4 Producción

Durante el primer período o de crecimiento del inóculo la temperatura de los locales está entre 21 y 28°C. Cuando el micelio coloniza todo el substrato, unos 10-12 días después de la siembra, éste se cubre con una capa delgada de turba sin esterilizar mezclada con tiza (pH 7 - 8) para evitar la desecación (Hudson, 1986) y la temperatura ambiente se reduce a 18°C. Cuando aparecen los primeros botones de *Agaricus Bisporus* se baja a 15°C. *A. bitorquis* crece a mayor temperatura (Pacioni, 1995). La humedad del ambiente se mantiene por encima del 70% (Toovey, 1976). Las bacterias de la turba liberan iones ferrosos esenciales para el desarrollo de los basidiomas (Hudson, 1986).

Durante el período de crecimiento del micelio se requiere cambiar el aire una o dos veces al día, pero después de colocar la cobertura se aumenta la ventilación



haciendo 2 a 3 renovaciones del aire por hora, pues una concentración de 1% de CO₂ provoca la deformación de los champiñones (Toovey, 1976). El aire pasa sobre los cajones a 100 - 250 mm³/min. El micelio que está creciendo produce metabolitos volátiles tales como etanol, aldehído acético, acetato de etilo y dióxido de carbono (Hudson, 1986). Para mantener la humedad se riega con frecuencia mediante un rociador de niebla sin empapar la cobertura.

Los primeros basidiomas se recogen a los 15-25 días después de colocar la cobertura. La producción depende de numerosos factores y oscila de 5 a 8 kg por m² y la conversión biológica es del orden de 50 kg de champiñones frescos por 100 kg de paja seca (Andrade, 1996). El período de cosecha es de unas seis semanas, al final del cual se vacían las bandejas y el compost usado se aleja del local de producción para usarlo como abono (Toovey, 1976).

En este proceso complicado hay tres hechos principales: la provisión del substrato conveniente, la producción de un inóculo adecuado para incorporarlo al compost y la inducción de la formación de los basidiomas por la cobertura y la temperatura. El compost debe contener fuentes adecuadas de carbono y de nitrógeno así como de minerales, vitaminas y acetato. La fuente carbonada es provista por la paja en forma de celulosa, hemicelulosa y lignina. El compostado remueve a los carbohidratos simples que podrían ser usados por mohos competidores, permitiendo el desarrollo de hongos celulolíticos como los agárlicos. También el *Agaricus Bisporus* necesita acetato para formar algunas macromoléculas esenciales (Hudson, 1986). Éste es formado por la actividad microbiana que además origina grasas y aceites que constituyen un reservorio de acetato.

El *Agaricus Bisporus* requiere proteínas como fuente de nitrógeno (Hudson, 1986). Los compuestos simples, como la urea, presentes en la mezcla inicial son convertidos a proteína microbiana. Los compuestos minerales de potasio, fósforo, magnesio, calcio, hierro y microelementos se encuentran en la paja, el estiércol y los aditivos o bien son añadidos. Además requiere algunas vitaminas, como biotina y tiamina, que son formadas por otros organismos durante el compostado.

El micelio del hongo produce metabolitos volátiles que estimulan el crecimiento de bacterias en la capa de recubrimiento (*Arthrobacter*, *Bacillus*, *Rhizobium*), particularmente especies de *Pseudomonas* como *P. putida* que parece ser esencial para la producción de champiñones. Además, la capa de recubrimiento realiza otras funciones como la de proporcionar un medio pobre en nutrientes donde se desarrollan los cordones miceliales (Webster, 1980).



FASE DE CULTIVO	TEMPERATURA	HUMEDAD	VENTILACIÓN
Desde la siembra hasta el revoco	21-24º C	70-85%	Escasa
Desde el revoco hasta que aparecen los primeros botones	18º C	70-85%	Media
Desde los primeros botones y resto de la producción	13-15º C	70-85%	Intensa

Tabla 8: Condiciones ambientales de los locales para el cultivo del champiñón (Hernández, 1977).

8 HISTORIA DEL COMPOSTAJE

Es difícil atribuir el nacimiento de compostaje a un individuo específico o incluso una sociedad. El antiguo Imperio acadio en el valle de Mesopotamia se refirió al uso de estiércol en la agricultura en tablillas de arcilla hace miles de años. Hay evidencia de que los romanos, los griegos y las Tribus de Israel utilizaban el compost como nutriente para los cultivos. Existen numerosas referencias al uso de la paja del estiércol podrido, en los escritos árabes del siglo décimo y duodécimo. En los textos de la Iglesia medieval y la literatura renacentista, también hacen referencia al uso del compost como nutriente utilizado en los cultivos. Escritores notables como William Shakespeare, Sir Francis Bacon, Sir Walter Raleigh, mencionaron la utilización de compost.

En el continente de América del Norte, los beneficios del compost fueron disfrutados tanto por los nativos americanos y los primeros colonos europeos. Muchos granjeros de Nueva Inglaterra hicieron compost como una receta de 10 partes lodo por 1 parte de restos de animales, pescado, convirtiendo periódicamente sus montones de compost hasta que el pescado se descompuso creando un rico nutriente para cultivos y plantas.

El siglo 20 vio el desarrollo de un nuevo método "científico" de la agricultura. El trabajo realizado en 1840 por un científico alemán muy conocido, Justus von Liebig, demostró que las plantas obtienen nutrientes de ciertos productos químicos en soluciones. Después de ese descubrimiento, las prácticas agrícolas empezaron a utilizar productos químicos como suplemento o fórmula para mejorar los cultivos. La combinación de estiércol y peces descompuestos, previamente realizado como compost, no se veía muy eficaz al lado de una bolsa de fertilizante químico. A partir de la introducción del fertilizante químico, los agricultores de muchas partes del mundo reemplazaron el tradicional compost.



El proceso de degradación biológica de residuos orgánicos está documentado desde el siglo I d.C. (Holgado, 1988). Desde entonces, los agricultores han seguido esta práctica (degradación natural) utilizando el producto resultante como abono. Los productos así obtenidos no siempre conservaban su potencial nutritivo debido a la falta de control sobre el proceso. Actualmente (Helynen, 2004; Fitzpatrick, et al. 2005), el control, tanto del proceso de producción como del producto final se hace necesario para asegurar una óptima calidad y mínimos costes.

El compostaje se basa en la acción de diversos microorganismos aerobios (Haug, 1993), que actúan de manera sucesiva, sobre la materia orgánica original, en función de la influencia de determinados factores, produciendo elevadas temperaturas, reduciendo el volumen y el peso de los residuos y provocando su humificación y oscurecimiento (Nakasaki et al., 2005). Durante este proceso se han de controlar los distintos factores que aseguren una correcta proliferación microbiana y, por consiguiente, una adecuada mineralización de la materia orgánica (Cronje et al., 2003). El hecho de que el compostaje sea biooxidativo exige una condición biológica que lo hace diferente de procesos físicos y químicos, así como de aquellos que no se realicen de forma aeróbica. También se ha de diferenciar entre el compostaje, como proceso controlado, de los procesos naturales no controlados que suelen desembocar en anaerobiosis más o menos acusadas. Al estar regidas estas reacciones por los ciclos biológicos de los microorganismos que intervienen en ellas, el compostaje requiere un tiempo mínimo. Por tanto, un compostaje que pretenda la obtención de un producto final útil como fertilizante (material orgánico estabilizado) no se puede dejar transcurrir espontáneamente, sino que en él han de controlarse las variables necesarias para garantizar la total terminación del proceso en un tiempo corto y con unos costes mínimos (Hedegaard and Krüger, 1996; De Bertoldi et al., 1985; Körner et al., 2003).

El compost es el producto que se obtiene de compuestos que forman o formaron parte de seres vivos en un conjunto de productos de origen animal y vegetal. El compostaje se forma de desechos orgánicos como: restos de comida, frutas y verduras, aserrín, cáscaras de huevo, restos de café, trozos de madera, desechos de jardinería y agricultura o excrementos ganaderos entre otros muchos elementos principales. Es un tratamiento aeróbico para residuos orgánicos en el que la materia orgánica se descompone mediante la acción de bacterias aeróbicas termófilas que están presentes de forma natural en cualquier lugar. El compost resultante puede ser utilizado como fertilizante y enmienda del suelo en jardines, aplicaciones de jardinería, horticultura y agricultura. Específicamente sobre el proceso de descomposición, microorganismos tales como bacterias, hongos y actinomicetos representan la mayor parte de la descomposición que tiene lugar en una pila. Durante el proceso de descomposición se trata de evitar la putrefacción de los residuos orgánicos, como el exceso de agua, que impide la aireación-oxigenación

y crea condiciones biológicas anaeróbicas malolientes o el control de la temperatura del compost para que las bacterias realicen el proceso de compostaje de forma óptima.

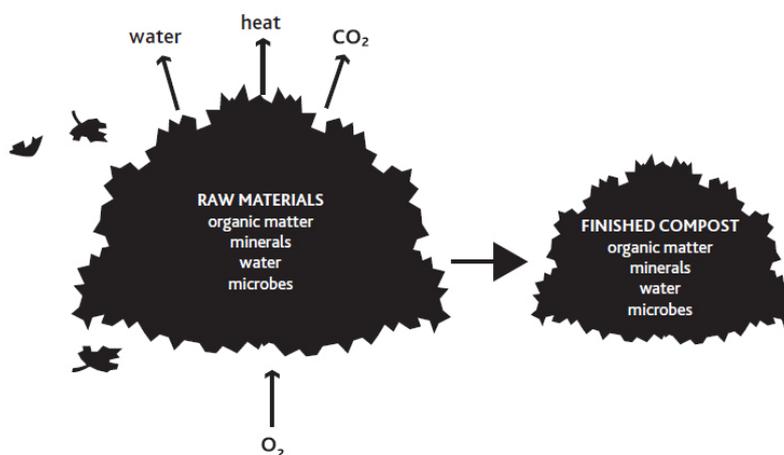


Figura 10: Proceso de compostaje (Rynk, 1992).

9 EL COMPOSTAJE PARA MEJORAR LA CALIDAD Y LA UTILIZACIÓN DE RESIDUOS ORGÁNICOS

El compostaje es un medio viable de transformación de diversos residuos orgánicos en los productos que se pueden utilizar de forma segura y beneficiosa como biofertilizantes y acondicionadores del suelo. Algunos de los problemas asociados con el uso de residuos orgánicos crudos e inestables como enmiendas del suelo, pueden ser resueltos a través del compostaje, como los malos olores, patógenos humanos y las propiedades físicas y químicas indeseables. Durante el proceso de compostaje, los residuos orgánicos se descomponen, los nutrientes vegetales son mineralizados para las plantas, los patógenos son destruidos y los malos olores son eliminados (Parr and Hornick, 1992).

El compostaje es una práctica que los agricultores han utilizado durante siglos para convertir los desechos orgánicos en biofertilizantes útiles para el suelo. Más específicamente, el compostaje es un proceso microbiológico que depende del crecimiento y la actividad de poblaciones mixtas de bacterias, actinomicetos y hongos en los residuos que se compostan. El compostaje puede ser realizado bien por los métodos aeróbicos o anaeróbicos. Sin embargo, el modo aeróbico se prefiere generalmente, ya que es mucho más rápido y proporciona una mayor reducción de patógenos por las mayores temperaturas que se logran. Un ejemplo de un método de compostaje aeróbico es el desarrollado por científicos del USDA en el Centro de Investigación Agrícola de Beltsville en Maryland, EE.UU. El método es ampliamente conocido como el Método en hileras de Beltsville con aireación que utiliza una pila



estática con aireación forzada para mantener condiciones aerobias termófilas (Willion et al., 1980).

La descomposición aeróbica y termófila de desechos orgánicos por poblaciones mixtas de microorganismos en condiciones controladas que produce un material orgánico residual parcialmente estabilizado que se descompone muy lentamente cuando las condiciones para la actividad microbiológica eran favorables (Parr et al., 1978).

Algunos desechos orgánicos pueden tener propiedades químicas, físicas o microbiológicas que limitarían considerablemente la medida en que puedan ser únicamente compostados. Algunos residuos pueden tener un pH extremadamente ácido o alcalino, otros pueden tener una inusualmente alta o baja relación C/N y otros pueden variar ampliamente en su contenido de sólidos. En tales casos, un co-compostaje selectivo de los residuos en una depuradora, de una fosa de desechos con excrementos, residuos sólidos urbanos, residuos de cosechas, estiércol animal, desechos alimentarios y algunos residuos industriales, puede aliviar estas deficiencias y proporcionar una mezcla fácilmente compostables y una mayor calidad en el producto final.

Por ejemplo, la paja de arroz tiene una muy alta relación C/N y con un proceso de compostaje muy lento. Si se combina con una baja relación C/N con otro material tal como el estiércol de aves de corral o gallinaza, que posee una relación C/N más favorable, se logra mejorar la velocidad de compostaje obteniéndose un compost con un mayor contenido de nutrientes (Parr and Colacicco, 1987; Willson, 1989; Rynk, 1992).

Materia seca	79,5 %
Peso específico	0,5 g/cm ³
pH (H₂O)	5-8
Materia orgánica	80 %
N. orgánico	3 %
Relación C/N	15,5
P. total	1,85 %
Relación C/P	25,5

Tabla 9: Características de la gallinaza.



Nutriente	Contenido (%)	Solubilidad (% del total)
N	3	30-34
K	1,27	31-50
Ca	1,55	5-17
Mg	0,57	5-12
P	1,82	20-30
Contenido (ppm)		
Fe	2830	0,006
Mn	196	11-23
Cu	32	12-50
Zn	135	11-12

Tabla 10: Composición y nutrientes de la gallinaza

Propiedad	Parámetro	Informa sobre
Propiedades físicas	Densidad aparente	Transporte, manejo y aplicación
	Color	Aceptación del producto final
	Olor	Aceptación, higiene e impacto ambiental
	Humedad	Transporte y manejo
	Capacidad de retención de agua	Manejo, aceptación y efectos sobre el suelo/sustrato
	Contaminantes inertes	Aceptación, impacto ambiental y seguridad
Propiedades químicas	Contenido y estabilidad de la materia orgánica	Efectos sobre el suelo/sustrato, vegetales y aceptación
	Nutrientes minerales	Efectos sobre el suelo/sustrato y vegetales
	Contaminantes	Saluda, efectos sobre el suelo/sustrato, vegetales e impacto ambiental
	Sales solubles	Efectos sobre el suelo/sustrato, vegetales e impacto ambiental



	pH	Disponibilidad de nutrientes
	Patógenos	Salud e impacto ambiental
Propiedades biológicas	Semillas de malas hierbas	Efectos sobre el suelo/sustrato y producción

Tabla 11: Parámetros de salida del compost

10 SISTEMAS Y TÉCNICAS DE COMPOSTAJE

En general, hay tres métodos para el proceso de compostaje:

- En pilas de compostaje con el torneado.
- En pila estática aireada.
- En recipientes (Haaren, 2009).

Sistemas abiertos		
	Pilas con volteo	
	Pilas estáticas	con succión de aire
		aire insuflado
		ventilación alterna (succión e insuflado)
		insuflado vinculado al control de la temperatura
Sistemas cerrados		
	Reactores verticales	Continuos
		discontinuos
	Reactores horizontales	estáticos
		Con movimiento del material

Tabla 12: Clasificación general de sistemas de compostaje. (De Bertoldi et al., 1985)

10.1 SISTEMAS ABIERTOS.

El compostaje en pila ha sido una práctica común para el compostaje a gran escala a nivel mundial. Se lleva a cabo en pilas con las siguientes dimensiones: 5.3 metros de ancho, 3.2 metros de altura y hasta un centenar de metros de longitud. Estas pilas mantienen a alta temperatura, mientras que permiten el flujo de oxígeno al núcleo central. El volteado periódico de las pilas, mediante el uso de maquinaria,



es un factor importante que incide en la liberación de calor y la exposición de los volúmenes anaeróbicos al oxígeno (Díaz et al., 1993; Stofella and Kahn, 2001). Por lo general, estas volteadoras están equipadas con accesorios de riego, que se utilizan para ajustar el nivel de humedad. La ventaja de la pila de compostaje es el bajo costo de inversión en comparación con otra tecnología. La principal desventaja es el hecho de que no es fácil de controlar este proceso específico y como resultados las emisiones y olores no controlados y no deseados.

10.1.1 Pilas estáticas.

La tecnología para el compostaje en pilas es relativamente simple, y es el sistema más económico y el más utilizado. Los materiales se amontonan sobre el suelo o pavimento, sin comprimirlos en exceso, siendo muy importante la forma y medida de la pila.

10.1.1.1 Pilas estáticas con aireación pasiva.

Se considera que este sistema es muy apropiado realizando un análisis coste/eficacia de dicho sistema comparado con otros como aireación forzada o pilas con volteo. Para favorecer la ventilación natural de la pila, se emplean estructuras como la que se puede observar en la figura que permiten un mejor flujo de la masa de aire desde la parte inferior hacia la zona superior de la pila. Las pilas son ventiladas por convección natural. El aire caliente que sube desde el centro de la pila crea un vacío parcial que aspira el aire de los lados. La forma y tamaño óptimo de la pila depende del tamaño de partícula, contenido de humedad, porosidad y nivel de descomposición, todo lo cual afecta el movimiento del aire hacia el centro de la pila.

El compostaje en pilas simples es un proceso muy versátil y con escasas complicaciones. Se ha usado con éxito para compostar estiércol, restos de poda, fangos y residuos sólidos urbanos. El proceso logra buenos resultados de una amplia variedad de residuos orgánicos y funciona satisfactoriamente mientras se mantienen las condiciones aerobias y el contenido de humedad. Las operaciones de compostaje pueden continuar durante el invierno, pero se ralentizan como resultado del frío.

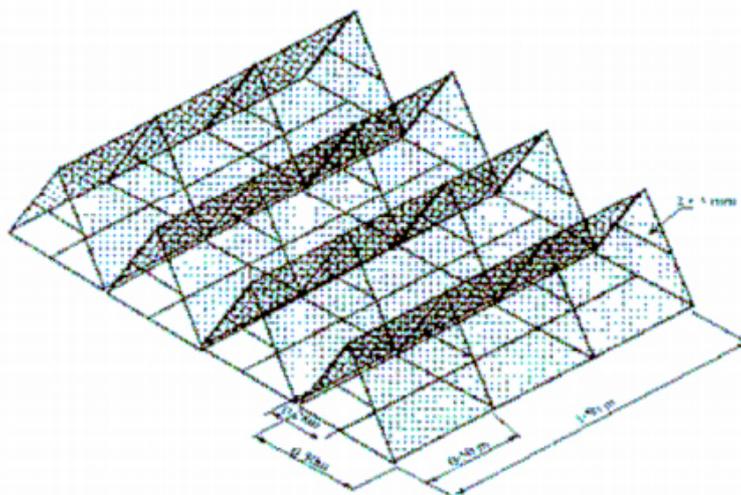


Figura 11: Diseño de las pilas de compost.

10.1.1.2 Pilas estáticas con aireación forzada

El segundo método de compostaje es la tecnología de pila aireada. Esta tecnología en contraste de la anterior, consiste en una base de hormigón con tubos de aireación horizontales en su superficie a través del cual el aire fluye hacia arriba en la pila de residuos. La basura orgánica es triturada y luego depositada en la zona de compostaje, de forma similar al compostaje en pilas. Las pilas a continuación son cubiertas con una membrana especial. Mediante el uso de este recubrimiento, los vapores orgánicos y la humedad se mantienen en la pila y los gases como el nitrógeno, el dióxido de carbono y el oxígeno no utilizado pase a través de la pila. El recubrimiento se mantiene en su lugar ya sea mediante bolsas de arena, mangueras de agua o sujetos por cuerdas de caucho. Los niveles de humedad y de oxígeno se mantienen en un nivel óptimo para la degradación de la materia orgánica. El proceso de biodegradación consiste generalmente en tres partes y una duración de 9 semanas:

- 1-4 semanas biodegradación bajo cubierta
- 2-4 semanas después de la podredumbre bajo cubierta
- 2-3 semanas de curado

Estos sistemas permiten tener un mayor control de la concentración de oxígeno y mantenerla en un intervalo apropiado (15-20 %) para favorecer la actividad metabólica de los microorganismos aerobios que desarrollan el proceso. Este método es el más empleado hoy en día por la efectividad del mismo, ya que mantener un proceso aeróbico reduce considerablemente el número de patógenos en el compost (Willion et al., 1980).

El aporte de oxígeno se realiza por varias vías, succión o insuflado así como las variantes que incluyen a los dos tipos. El aporte de oxígeno puede realizarse de

forma continua, a intervalos o ligados a un termostato que, llegada una determinada temperatura (aprox. 60°C) acciona el mecanismo de inyección de aire hasta que la temperatura desciende hasta el valor deseado.



Figura 12: Pilas de compost con aireación forzada.

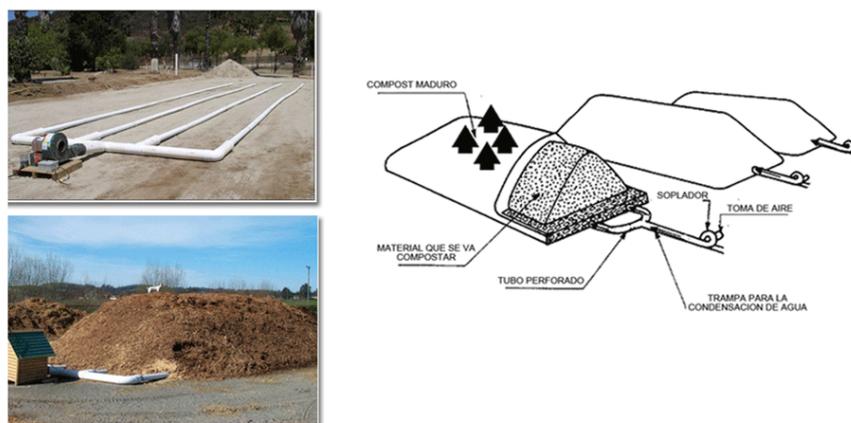


Figura 13: Diseño del sistema de aireación.

10.1.2 Pilas con volteo.

Es uno de los sistemas más sencillos y más económicos. Esta técnica de compostaje se caracteriza por el hecho de que la pila se remueve periódicamente para homogeneizar la mezcla y su temperatura, a fin de eliminar el excesivo calor, controlar la humedad y aumentar la porosidad de la pila para mejorar la ventilación. Después de cada volteo, la temperatura desciende del orden de 5 o 10 °C, subiendo de nuevo en caso que el proceso no haya terminado.

La frecuencia del volteo depende del tipo de material, de la humedad y de la rapidez con que deseamos realizar el proceso, siendo habitual realizar un volteo cada 6 - 10 días.

Normalmente se realizan controles automáticos de temperatura, humedad y oxígeno para determinar el momento óptimo para efectuar el volteo. Es muy usual que los volteos se lleven a cabo con una simple pala cargadora, recogiendo y soltando del material para posteriormente reconstruir la pila, tal y como se muestra en la figura. Sin embargo, para materializar esta técnica de compostaje, existe maquinaria específicamente diseñada para conseguir un mezclado del compost de máxima eficiencia llamada volteadora.



Figura 14: Volteo de las pilas.

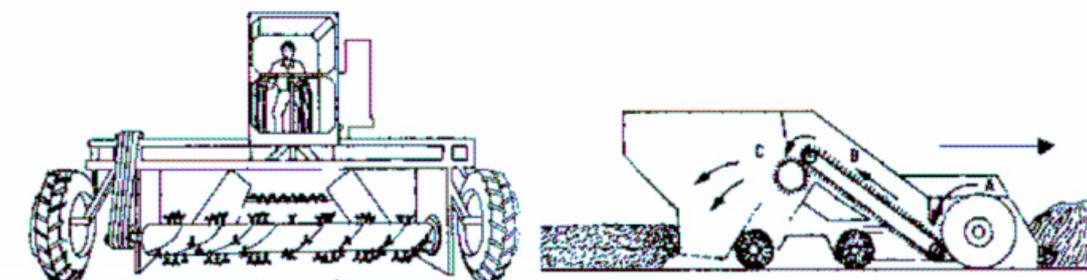


Figura 15: Volteadora de pilas (Haug, 1993).

En las pilas estáticas, ya sea con volteos o sin ellos cobra gran importancia el tamaño de las pilas, por un lado para permitir una correcta aireación y por otro para que no haya excesivas pérdidas de calor.

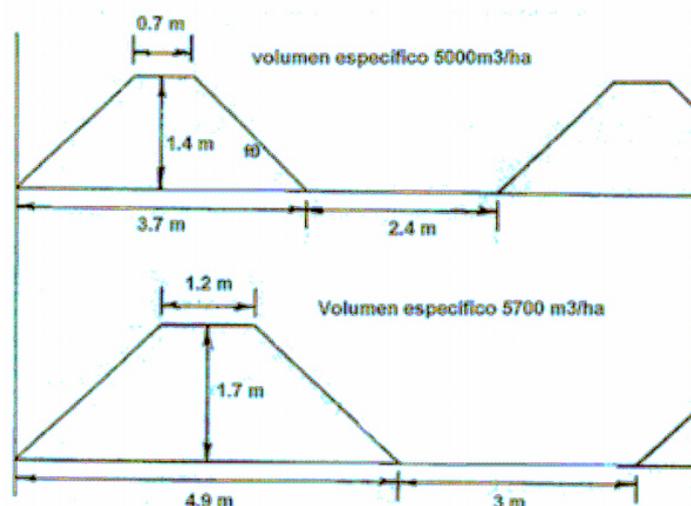


Figura 16: Dimensiones características para sistemas de pilas estáticas (Haug, 1993).

Existe una ecuación para calcular la altura crítica de una pila, teniendo en cuenta un contenido mínimo de la fracción de poros rellenos de aire de un 30%.

$$z_{crt} = \frac{E \cdot d_s}{g} \ln \left(\frac{\gamma \gamma_l \cdot (1 - \theta_{g \min})}{\{d_s \gamma_l + (1 - d_s) \gamma_s\} \rho_u} \right)$$

E ≡ resistencia a la deformación [$L^2 T^{-2}$]; ρ_u ≡ densidad aparente inicial [$M L^{-3}$];

d_s ≡ contenido gravimétrico de materia seca [$M M^{-1}$]; $\theta_{g \min}$ ≡ fracción mínima de poros rellenos de aire [$L^3 L^{-3}$]; γ_s, γ_l ≡ densidad real de las fracciones sólida y líquida [$M L^{-3}$]

Figura 17: Ecuación para calcular la altura crítica de una pila (Haug, 1993).

10.2 SISTEMAS CERRADOS.

El tercer método es el compostaje de compuestos orgánicos en un recipiente cerrado. Este método es apropiado tanto para desechos de jardín o residuos de alimentos. En comparación con los dos métodos anteriores, el compostaje en recipiente cerrado permite un control casi total de las condiciones de compostaje, en función de las emisiones y olores. Se asemeja a un reactor químico, cuando todos los parámetros (niveles de oxígeno y humedad) pueden ser optimizados para las tasas de conversión más altas.

Estos sistemas permiten un mejor control de los distintos parámetros del proceso en la mayor parte de los casos, así como un menor tiempo de residencia y la posibilidad de realizar un proceso continuo. Se caracterizan por llevar a cabo la

el compostaje en reactores cerrados, siendo el principal inconveniente que generan el elevado coste de inversión de las instalaciones.

Su principal división se da entre reactores de flujo horizontal y vertical.

10.2.1 Reactores de flujo vertical

Los reactores de flujo vertical suelen tener alturas superiores a los 4 m. Y pueden ser continuos o discontinuos. Los reactores discontinuos contienen, a diferentes alturas pilas de 2-3 m con un sistema de aireación forzada o volteo hacia pisos inferiores. Su principal inconveniente es el elevado coste de construcción, no obstante aunque la inversión inicial es más elevada que en el sistema de pilas estáticas, tiene una baja relación coste por unidad de volumen de trabajo.

10.2.2 Reactores de flujo horizontal

Los reactores de flujo horizontal se dividen entre aquellos que poseen un depósito rotatorio, los que poseen un depósito de geometría variable con un dispositivo de agitación o los que no poseen un sistema de agitación y permanecen estáticos. En una instalación típica, el sistema consta de un tambor giratorio, un soplador de aire y un sistema de filtración de aire que consiste en un depurador húmedo y un biofiltro. El tambor gira a 1-10 revoluciones por minuto. Las dimensiones típicas de tambor son: 3 metros de diámetro y 56 metros de longitud.

	En montón	En pila	En pila estática aireada	En caseta	En reactor vertical	En túnel
Control de olores	Bajo	Bajo	Bajo/Medio	Medio	Variable	Alto
Control de temperatura	Bajo	Medio	Medio	Medio/Alto	Variable	Alto
Eliminación de patógenos	Bajo	Bajo	Medio	Medio/Alto	Variable	Alto
Dificultad del proceso	Medio	Medio	Medio	Medio	Medio/Bajo	Medio/Bajo
Costes de personal	Medio	Medio	Medio	Medio/Bajo	Medio/Bajo	Bajo
Reacondicionamiento	Bajo	Medio	Alto	Medio	Alto	Bajo
Costes de mantenimiento	Medio	Medio	Medio	Medio	Medio/Bajo	Medio/Bajo
Costes capitales	Bajo	Bajo	Medio/Alto	Alto	Alto	Alto
Ruido	Alto	Alto	Medio/Alto	Medio	Bajo	Bajo



Fiabilidad del proceso	Bajo	Medio	Bajo	Medio/Alto	Bajo	Alto
Tolerancia	Bajo	Bajo	Bajo	Medio/Alto	Medio/Alto	Alto
Versatilidad con materias primas	Bajo	Medio	Medio	Medio/Alto	Bajo	Alto
Fiabilidad del producto resultante	Bajo	Medio	Medio	Medio/Alto	Medio/Alto	Alto

Tabla 13: Comparación de los sistemas de compostaje tradicionales (Haug, 1993).

Dependiendo del clima del lugar en que se realice el proceso, del tipo de material que estemos tratando, de la disponibilidad de terreno o de la necesidad de abreviar el proceso, se manejan unos u otros sistemas.

Los sistemas abiertos comportan un menor coste y tienen un manejo e instalación más sencilla, mientras que los sistemas cerrados conllevan una infraestructura más complicada y costosa, al tener que realizar una instalación cerrada y emplear una maquinaria quizá más compleja.

11 PARÁMETROS DEL PROCESO DE COMPOSTAJE

Durante el proceso del compostaje es necesario controlar una serie de parámetros de vital importancia ya que se deben dar las condiciones idóneas de temperatura, humedad, pH, etc., para que el proceso de compostaje sea lo más eficiente posible (Parr and Willson, 1980; Willson, 1989).

Las variables más importantes que afectan a los sistemas de compostaje pueden ser clasificados en dos tipos de parámetros en los que hay que establecer un control: parámetros de seguimiento que son aquellos que han de ser medidos, seguidos durante todo el proceso y adecuados, en caso de ser necesario, para que sus valores se encuentren en los intervalos considerados correctos para cada fase del proceso (Jeris and Regan, 1973) y parámetros relativos a la naturaleza del sustrato (aquellos que han de ser medidos y adecuados a su valores correctos fundamentalmente al inicio del proceso (Madejón et al., 2001). Entre los parámetros de seguimiento se encuentran: temperatura, humedad, pH, aireación y espacio de aire libre. Entre los relativos a la naturaleza del sustrato: tamaño de partícula, relaciones C/N y C/P, nutrientes, materia orgánica y conductividad eléctrica.

Los valores o intervalos óptimos están influenciados por las condiciones ambientales, el tipo de residuo a tratar y el sistema de compostaje elegido.

11.1 HUMEDAD.

Una pila de compost efectiva debe tener una humedad entre el 40 y el 60%. Ese grado de humedad es suficiente para que exista vida en la pila de compost y las bacterias puedan realizar su función. Las bacterias y otros microorganismos se clasifican en grupos en función de cuál es su temperatura ideal y cuánto calor generan en su metabolismo. Las bacterias mesófilas requieren temperaturas moderadas, entre 20 y 40 °C. Conforme descomponen la materia orgánica generan calor. Lógicamente, es la zona interna de la pila la que más se calienta. Las pilas de compost deben tener, al menos, 1 m de ancho por 1 m de alto y la longitud que sea posible. Así se consigue que el propio material aisle el calor generado. Hay sistemas que permiten pilas mucho más anchas y más altas. Así se puede hacer compost de una tonelada de residuos en un metro cuadrado. La aireación pasiva se ejecuta por medio de un piso falso.

Siendo el compostaje un proceso biológico de descomposición de la materia orgánica, la presencia de agua es imprescindible para las necesidades fisiológicas de los microorganismos, ya que es el medio de transporte de las sustancias solubles que sirven de alimento a las células y de los productos de deshecho de las reacciones que tienen lugar durante dicho proceso. Algunos autores ([Haug, 1993](#); [Madejón et al., 2002](#); [Jeris and Regan, 1973](#)) consideran que la humedad de los materiales es la variable más importante en el compostaje y ha sido calificada como un importante criterio para la optimización del compostaje.

A partir de la variación de la cantidad de oxígeno consumido por una masa inicial durante el compostaje, en un reactor cerrado a una temperatura constante, en función de la humedad, se demostró que pequeñas variaciones de humedad provocaban grandes cambios en la temperatura ([Schulze, 1962](#)).

La humedad de la masa de compostaje debe ser tal que el agua no llegue a ocupar totalmente los poros de dicha masa ([Miyatake and Iwabuchi, 2006](#)), para que permita la circulación tanto del oxígeno, como la de otros gases producidos en la reacción.

La humedad óptima para el crecimiento microbiano está entre el 50-70%; la actividad biológica decrece mucho cuando la humedad está por debajo del 30%; por encima del 70% el agua desplaza al aire en los espacios libres existentes entre las partículas, reduciendo la transferencia de oxígeno y produciéndose una anaerobiosis. Cuando las condiciones se hacen anaerobias se originan malos olores y disminuye la velocidad del proceso.



El exceso de humedad puede ser reducido con una mayor aireación (Haug, 1993). A su vez, con un buen control de la humedad y de la aireación, puede llevarse a cabo el control de la temperatura. Esto es debido a que durante el proceso de compostaje se debe llegar a un equilibrio entre los huecos entre partículas (de tamaño variable) que pueden llenarse de aire o de agua. Por lo tanto, la humedad óptima depende del tipo de residuo; así se ha encontrado que, para la paja de cereales está entre 75 y 85%, para astillas de madera entre 75 y 90% y para residuos sólidos urbano (RSU) entre 50 y 55% (Haug, 1993).

Material	Humedad %
Paja	75-85
Madera	75-90
Vainas de arroz	75-85
Residuos orgánicos humanos	55-65
Estiércol	55-65
Lodo	55-60
Residuos húmedos	50-55

Tabla 14: Contenido máximo de humedad de los principales materiales usados para compost (Haug, 1993).

11.2 TEMPERATURA.

Al disponerse el material que se va a comportar en pilas, en un reactor, etc., si las condiciones son las adecuadas, comienza la actividad microbiana. Inicialmente todo el material está a la misma temperatura, pero al crecer los microorganismos se genera calor aumentando la temperatura. El síntoma más claro de la actividad microbiana es el incremento de la temperatura de la masa que está compostando, por lo que la temperatura ha sido considerada tradicionalmente como una variable fundamental en el control del compostaje (Liang et al., 2003). La evolución de la temperatura representa muy bien el proceso de compostaje, pues se ha comprobado que pequeñas variaciones de temperatura afectan más a la actividad microbiana que pequeños cambios de la humedad, pH o C/N.

Por la evolución de la temperatura se puede juzgar la eficiencia y el grado de estabilización a que ha llegado el proceso, ya que existe una relación directa entre la temperatura y la magnitud de la degradación de la materia orgánica. Asimismo, existe una relación directa entre la degradación y el tiempo durante el cual la temperatura ha sido alta. A veces la temperatura puede llegar a ser tan alta que inhibe el crecimiento de los propios microorganismos.



Se observan tres fases en el proceso de descomposición aeróbica: fase mesófila inicial ($T < 40^{\circ}\text{C}$), al final de la cual se producen ácidos orgánicos; fase termófila ($T > 40^{\circ}\text{C}$); y fase mesófila final, considerándose finalizado el proceso cuando se alcanza de nuevo la temperatura inicial.

Cada especie de microorganismo tiene un intervalo de temperatura óptima en el que su actividad es mayor y más efectiva: $15-40^{\circ}\text{C}$ para los microorganismos mesófilos y $40-70^{\circ}\text{C}$ para los termófilos (Suler and Finstein, 1977). Los microorganismos que resulten beneficiados a una temperatura concreta son los que principalmente descompondrán la materia orgánica del residuo, produciéndose un desprendimiento de calor. Este calor provoca una variación de la temperatura de la pila que dependerá de la adecuación de los demás factores a los intervalos óptimos, del tamaño de la pila (el calor generado es proporcional al volumen o masa de la pila, pero la pérdida es proporcional a la superficie), de las condiciones ambientales y del tipo de adición de aire a la pila, ya sea con volteos o con aire a presión (Ekinci et al., 2004).

La temperatura ideal está alrededor de los 60°C . Así la mayoría de patógenos y semillas indeseadas mueren a la par que se genera un ambiente ideal para las bacterias termófilas, que son los agentes más rápidos de la descomposición. La temperatura base de las bacterias es de 40°C , actuando las bacterias mesófilas cuando sea inferior a 40°C y las termófilas si la temperatura es mayor a 40°C .

Dependiendo del ritmo de producción de compost deseado, la pila puede ser volteada más veces para llevar a la zona interna el material de las capas externas y viceversa, a la vez que se airea la mezcla. La adición de agua puede hacerse en ese mismo momento, contribuyendo a mantener un nivel correcto de humedad. Un indicador de que ha llegado el momento del volteo es el descenso de la temperatura debido a que las bacterias del centro de la pila han consumido toda su fuente de alimentación. Llega un momento en que la temperatura deja de subir incluso inmediatamente después de que la pila haya sido removida. Eso indica que ya no es necesario voltearla más. Finalmente todo el material será homogéneo, de un color oscuro y sin ningún parecido con el producto inicial.

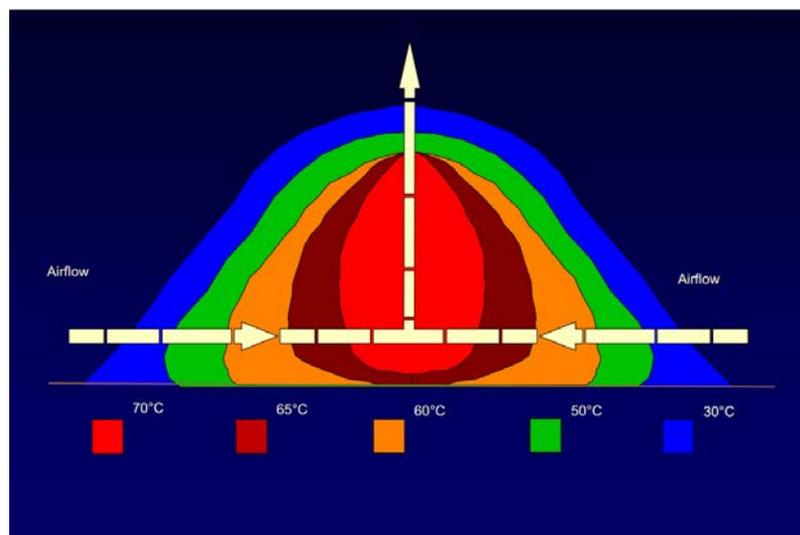


Figura 18: Distribución de la temperatura del compost en la pila.

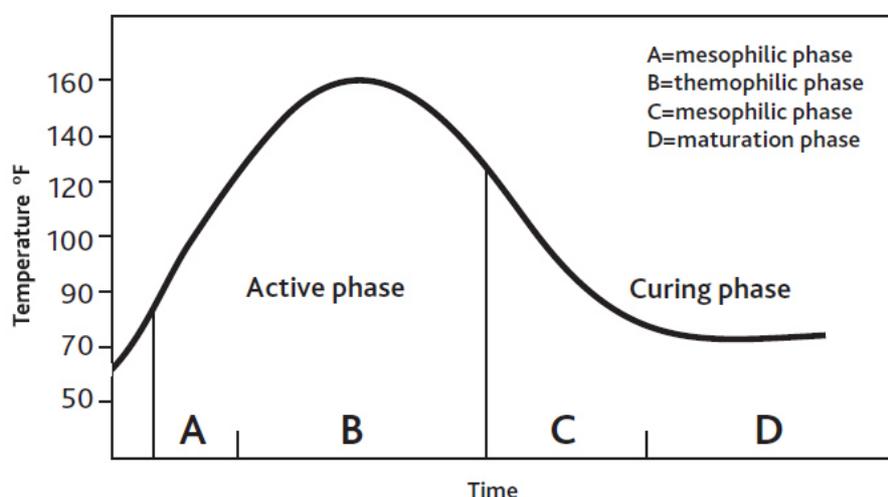


Gráfico 1: Cambios de temperatura en una pila de compost (Cooperband, 2002).

11.3 PH.

El pH tiene una influencia directa en el compostaje debido a su acción sobre la dinámica de los procesos microbianos. En muchos trabajos se usa esta variable para estudiar la evolución del compostaje. Sin embargo, su medida, que se realiza en el laboratorio sobre el extracto acuoso de las muestras tomadas en las pilas, es sólo una aproximación del pH “in situ” (Sundberg et al., 2004). Mediante el seguimiento del pH se puede obtener una medida indirecta del control de la aireación de la mezcla, ya que si en algún momento se crean condiciones anaeróbicas se liberan ácidos orgánicos que provocan el descenso del pH.

La evolución del pH en el compostaje presenta tres fases. Durante la fase mesófila inicial se observa una disminución del pH debido a la acción de los microorganismos sobre la materia orgánica más lábil, produciéndose una liberación de ácidos orgánicos. Eventualmente, esta bajada inicial del pH puede ser muy

pronunciada si existen condiciones anaeróbicas, pues se formarán aún más cantidad de ácidos orgánicos. En una segunda fase se produce una progresiva alcalinización del medio, debido a la pérdida de los ácidos orgánicos y la generación de amoníaco procedente de la descomposición de las proteínas (Sánchez-Monedero et al., 2001). Y en la tercera fase el pH tiende a la neutralidad debido a la formación de compuestos húmicos que tienen propiedades tampón.

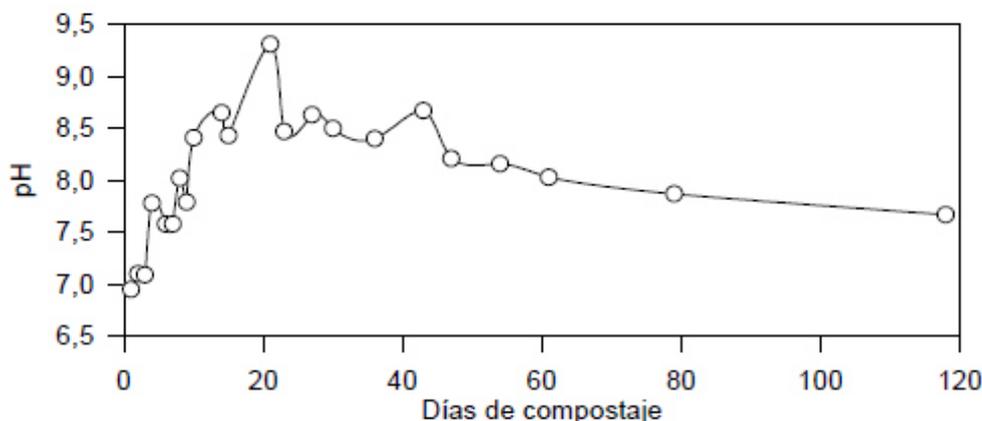


Gráfico 2: Evolución del pH durante el proceso de compostaje tradicional.

Existe una relación entre los cambios de pH y la aireación de la mezcla. Un compostaje con la aireación adecuada conduce a productos finales con un pH entre 7 y 8; valores más bajos del pH son indicativos de fenómenos anaeróbicos y de que el material aún no está maduro. Posteriormente estos mismos autores estudiaron la relación pH - aireación- microorganismos existentes en el proceso, y dedujeron que la degradación orgánica se inhibe a pH bajos, por lo que si el pH se mantiene por encima de 7,5 durante el proceso es síntoma de una buena descomposición (Suler and Finstein, 1977).

11.4 AIREACIÓN.

Para el correcto desarrollo del compostaje es necesario asegurar la presencia de oxígeno, ya que los microorganismos que en él intervienen son aerobios. Las pilas de compostaje presentan porcentajes variables de oxígeno en el aire de sus espacios libres: la parte más externa contiene casi tanto oxígeno como el aire (18-20%); hacia el interior el contenido de oxígeno va disminuyendo, mientras que el de dióxido de carbono va aumentando, hasta el punto de que a una profundidad mayor de 60 cm el contenido de oxígeno puede estar entre 0,5 y 2% (Ekinci et al., 2004).

Una aireación insuficiente provoca una sustitución de los microorganismos aerobios por microorganismos anaerobios, con el consiguiente retardo en la descomposición, la aparición de sulfuro de hidrógeno y la producción de malos olores (Bidlemaier, 1996). El exceso de ventilación podría provocar el



enfriamiento de la masa y una alta desecación con la consiguiente reducción de la actividad metabólica de los microorganismos (Zhu, 2006).

La aireación es una variable de operación muy importante y la que más incide en los costes de operación, ya que suponen el 32-46% de los costes totales. La medida de la concentración de oxígeno requiere equipos costosos, pero puede también realizarse de una manera indirecta mediante las medidas de temperatura y humedad (Kulcu and Yaldiz, 2004).

Durante el proceso de maduración no deben hacerse aportaciones adicionales de oxígeno, ya que una excesiva aireación podría dar lugar a un consumo de los compuestos húmicos formados y a una rápida mineralización de los mismos (Tomati et al., 2000).

Es importante determinar del Grado de Aerobiosis en los materiales de compostaje.

- Se debe mantener la concentración de oxígeno por encima del 13% evitando así la creación de bolsas con concentración baja de oxígeno, que pueda dar lugar a la aparición de procesos anaerobios.
- Una tasa de consumo de oxígeno de más de 4.5 a 8.4 mg O₂/hora, hace que los residuos sólidos volátiles no se reduzcan de forma efectiva. Superando estos límites la reducción de sólidos volátiles es menor que en procesos con una concentración de oxígeno inferior al 13% (Papadimitriu, 2002).
- La tasa de flujo de aire para una pila de 3 metros o más, debe ser de 35-40 m³/h/m² de superficie construida, durante el período de mayor demanda de oxígeno en el proceso de compostaje en los primeros 3 a 5 días. Esto proporciona una refrigeración adecuada manteniendo el compost a una temperatura adecuada y con los niveles de oxígeno por encima del 13% para una máxima reducción de los sólidos volátiles.

11.5 ESPACIO LIBRE.

Siendo el compostaje un proceso biológico de descomposición de la materia orgánica, la presencia de agua es imprescindible para satisfacer las necesidades fisiológicas de los microorganismos, ya que el agua es el medio de transporte tanto de las sustancias que sirven de alimento a las células, como de los productos de deshecho de la reacción (Hoitink et al., 1995). La humedad (contenido en agua) de la masa de compostaje debe ser tal que el agua no llegue a ocupar totalmente los poros de dicha masa y permita la circulación tanto del oxígeno (ya que el proceso debe desarrollarse en condiciones aeróbicas), como de otros gases producidos en la reacción.

En 1962 (Schulze, 1962) se utiliza por primera vez el concepto de Espacio de Aire Libre (Free Air Space, FAS), adoptado de la ciencia del suelo, que relaciona los contenidos de humedad (H), la densidad aparente (Da), la densidad real (Dr) y la porosidad (P), es decir, que tiene en cuenta la estructura física de los residuos. El espacio de aire libre (FAS) da idea de las cantidades relativas de agua y aire existentes en la masa en compostaje.

$$FAS = P \left(1 - \frac{H}{100} \right) \quad (\text{Ecuación 4.1}), \text{ donde } P = 100 \left(1 - \frac{Da}{Dr} \right) \quad (\text{Ecuación 4.2}), \text{ por tanto}$$

$$FAS = 100 \left(1 - \frac{Da}{Dr} \right) \left(1 - \frac{H}{100} \right) \quad (\text{Ecuación 4.3})$$

En ambas expresiones FAS, P y H se expresan en % y Dr y Da en g cm^{-3} .

Posteriormente se demostró que el proceso de compostaje ocurría con mayor rapidez (mayor consumo de oxígeno) cuando el valor de FAS era 30- 35%, independientemente de la naturaleza del residuo (Jeris and Regan, 1973).

Por lo tanto, conocidos los valores de Da y Dr puede ser encontrada la humedad óptima para el residuo estudiado. La densidad real es una constante para cada producto. Por otro lado, en una pila de compostaje, la Da puede aumentar o disminuir dependiendo del grado de humedad de la mezcla. Cuando la humedad es alta, disminuye el FAS y el producto se compacta, mientras que a valores bajos de humedad los espacios intersticiales están ocupados por aire, y la densidad aparente aumenta. Con objeto de reproducir en lo posible las condiciones de las pilas de compostaje y calcular la humedad idónea, se ha de determinar Da a distintos grados de humedad.

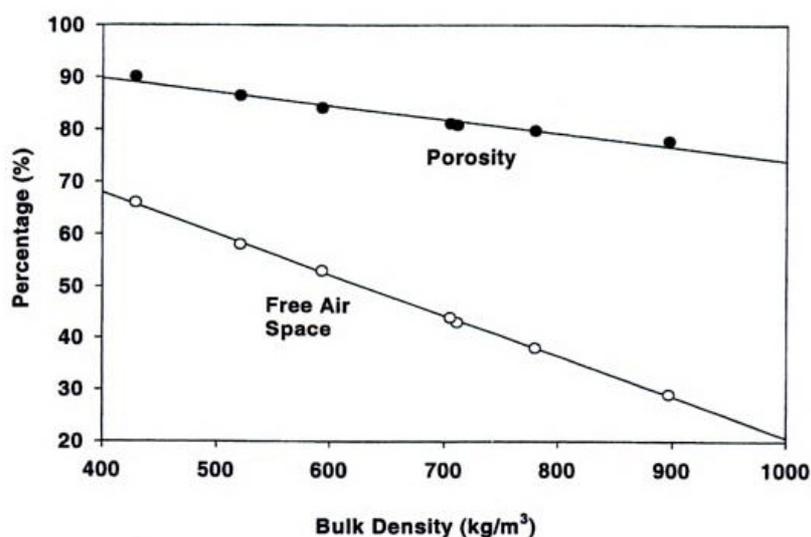


Gráfico 3: Relación entre porosidad, espacio libre y densidad de la materia (Brouillette et al., 1996).



11.6 NIVEL DE OXÍGENO

La cantidad de oxígeno en una pila determina cómo el proceso de biodegradación aeróbica tiene lugar, el tipo y concentración de los productos resultantes de ella.

Durante el metabolismo, los microorganismos consumen oxígeno para descomponer residuos orgánicos. Sin embargo, cuanto mayor sea la diferencia entre el nivel de oxígeno de la pila de compost y el del aire ambiente, mayor es la producción de compuestos odoríferos.

En las fases iniciales del proceso de compostaje óptimo se alcanza con el 30% - 36% del espacio de los poros en la masa de compost.

La velocidad a la que el oxígeno se transfiere desde el espacio de los poros a los microorganismos determina la rapidez del proceso de biodegradación aeróbica. De los diversos tipos de gas presentes, el consumo de oxígeno es el único parámetro fiable para determinar la rapidez con que se está desarrollando una masa de compostaje.

Además, la cantidad de oxígeno en una pila también determina el tipo y la concentración de los productos resultantes de ella.

Es vital para medir y monitorear la concentración de oxígeno con el fin de actuar en el momento adecuado para asegurar la aireación de la hilera de compost antes de que comience a decrecer.

Las condiciones aeróbicas son importantes para el compostaje adecuado y control de olores. Si se permiten las condiciones para un proceso anaerobio, daría como resultado la aparición de malos olores. Proporcionar una ventilación adecuada así como la adición de agentes de carga tales como virutas de madera, paja y heno para aumentar los espacios de aire entre el material rico en carbono y los desechos humanos, es la mejor manera de mantener el nivel de oxígeno adecuado para el proceso aerobio. Formas más eficaces de mejorar el nivel de oxígeno requieren electricidad para abastecer pequeños ventiladores que aspiran aire hasta alcanzar las bóvedas de compost.

Si todos estos factores son óptimas, el proceso de compostaje se realiza de forma satisfactoria ya que los microorganismos comienzan a utilizar los materiales orgánicos de carbono, nitrógeno y otros nutrientes. Conforme el proceso continúa, la temperatura comienza a aumentar ya que el calor se genera a través de oxidaciones microbianas. Una relación de tiempo-temperatura típica para el compostaje de residuos orgánicos, bajo condiciones aerobias termófilas se muestra en el gráfico 4 (curva 1). Si alguno de estos factores no se encuentran en o cerca de sus niveles óptimos, entonces es probable que resulte compostaje incompleto (curva 2).

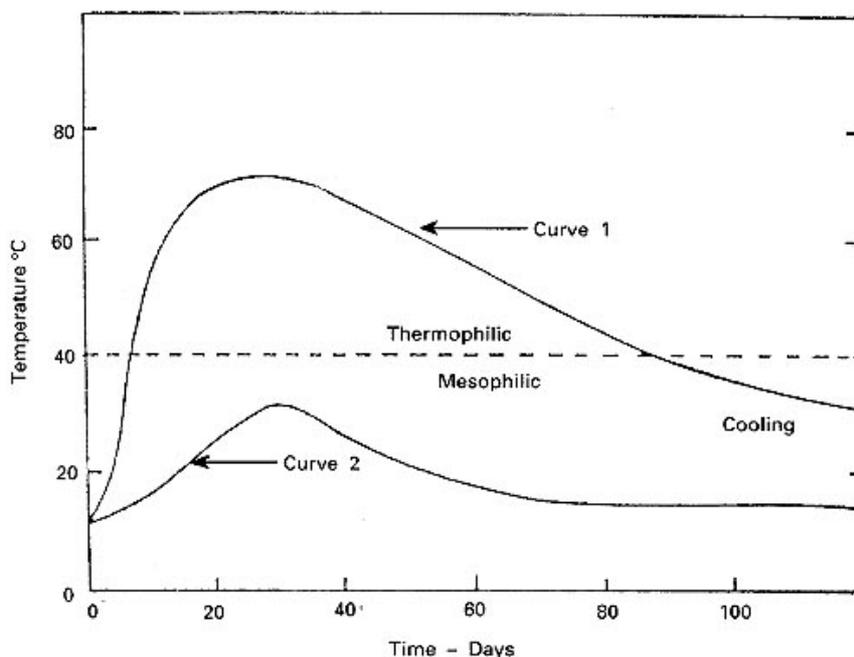


Gráfico 4: Evolución de la temperatura para procesos en condiciones óptimas (Curva 1) y procesos en condiciones no óptimas (Curva 2).

11.7 PARÁMETROS RELATIVOS A LA NATURALEZA DEL SUSTRATO

Además de los ya mencionados anteriormente, existen otros factores a tener en cuenta durante el proceso del compostaje.

11.7.1 Relaciones C/N y C/P

Para un correcto compostaje en el que se aproveche y retenga la mayor parte del C y del N, la relación C/N del material de partida debe ser la adecuada. Los microorganismos utilizan generalmente 30 partes de C por cada una de N; por esta razón se considera que el intervalo de C/N teóricamente óptimo para el compostaje de un producto es de 25-35 (Jhorar et al., 1991).

La relación C/N es un importante factor que influye en la velocidad del proceso y en la pérdida de amonio durante el compostaje; si la relación C/N es mayor que 40



la actividad biológica disminuye y los microorganismos deben oxidar el exceso de carbono con la consiguiente ralentización del proceso, debido a la deficiente disponibilidad de N para la síntesis proteica de los microorganismos. Para eliminar el exceso de carbono es necesaria la aparición sucesiva de diversas especies microbianas. Al morir estos microorganismos el nitrógeno contenido en su biomasa se recicla y la relación C/N tiende a disminuir. Si el residuo tiene una alta relación C/N, pero la materia orgánica es poco biodegradable, la relación C/N disponible realmente para los microorganismos es menor y el proceso evolucionará rápidamente, pero afectará sólo a una proporción de la masa total. Si la relación C/N es muy baja el compostaje es más rápido pero el exceso de nitrógeno se desprende en forma amoniacal, produciéndose una autorregulación de la relación C/N del proceso.

La relación C/N ideal para un compost totalmente maduro es cercana a 10, similar a la del humus. En la práctica, se suele considerar que un compost es suficientemente estable o maduro cuando $C/N < 20$ aunque esta es una condición necesaria pero no suficiente. Si los productos que se compostan poseen una relación C/N baja (inferior a 18-19), el compostaje se lleva a cabo con mayor rapidez (Golueke and Díaz, 1987; Zhu, 2006), pero se desprende como amoníaco el exceso de N, produciéndose una autorregulación de la relación C/N (Jhorar et al., 1991). Estas pérdidas, si bien no afectan negativamente al compostaje, suponen un derroche, porque el N es el nutriente fundamental para los cultivos, así como un problema medioambiental (Hedegaard and Krüger, 1996) ya que el amoníaco es un gas con un considerable efecto invernadero. Al tener la relación C/N una gran dependencia de la riqueza inicial de N, un valor concreto de C/N no refleja el estado de madurez de un compost, por lo que es más indicado seguir la evolución de C/N del proceso o calcular la diferencia entre los valores iniciales y finales. En la Figura 4.3 se muestra la evolución característica de la relación C/N durante y después del compostaje (Kiehl, 1985).

Por otra parte, el fósforo es el nutriente más importante, tras el C y el N, por lo que también debe estar presente en unas cantidades mínimas para que el proceso se lleve a cabo correctamente. Una buena relación entre los principales nutrientes provoca una adecuada capacidad para la proliferación microbiana, al tener todos los nutrientes principales en unas cantidades óptimas y en la forma más disponible para la síntesis microbiana. Cuando se compostaba paja de trigo en presencia de roca fosfática, la descomposición de la paja aumentaba al hacerlo la cantidad de fósforo añadido (Singh and Amberger, 1990). La relación C/P para el compostaje es óptima entre 75 y 150, mientras que la relación N/P debe estar entre 5 y 20.

El equilibrio adecuado de nutrientes es vital para el proceso de compostaje. Una buena carbono / nitrógeno (C / N) para un proceso de compostaje adecuado es



de 20/1 a 35/1. Esto significa la concentración de carbono presente en el proceso de compostaje debe ser mucho mayor que la de Nitrógeno. Debido a la composición de las heces y la orina, una gran cantidad de carbono en forma de heno, paja, virutas de madera, serrín y tiene que ser añadido al compost para equilibrar la relación C/N.

La siguiente tabla describe el porcentaje de nitrógeno y relación C / N presente en ciertos materiales orgánicos considerados para el compostaje.

Material	%N	Relación C/N
Lodo activado	5-6	6
Amaranto	3.6	11
Pulpa de manzana	1.1	13
Sangre	10-14	3
Pan	2.10	---
Repollo	3.6	12
Cartón	0.10	400-563
Granos de Café	---	20
Estiércol de vaca	2.4	19
Mazorcas de maíz	0.6	56-123
Tallos de maíz	0.6-0.8	60-73
Harina de semilla de algodón	7.7	7
Planta de arándano	0.9	61
Estiércol	2.25	14
Helecho	1.15	43
Desechos de pescado	10.6	3.6
Fruta	1.4	40
Basura sin tratar	2.15	15-25
Restos de césped	2.4	12-19
Corteza de árbol	0.241	223
Madera dura	0.09	560
Heno	2.10	---
Leguminosas	2.5	16



Gallinaza	8	6-15
Estiércol de caballo	1.6	25-30
Deshechos humanos orgánicos	5-7	5-10
Hojas	0.9	54
Lechuga	3.7	---
Recortes de carne	5.1	---
Residuos de mejillones	3.6	2.2
Mostaza	1.5	26
Papel de periódico	0.06-0.14	398-852
Paja de Avena	1.05	48
Cáscara de oliva	1.2-1.5	30-35
Cebolla	2.65	15
Papel	---	100-800
Pimienta	2.6	15
Estiércol de cerdo	3.1	14
Patata	1.5	25
Restos orgánicos de aves de corral	2.4	5
Verdolaga	4.5	8
Serrín	0.11	511
Trébol rojo	1.8	27
Cáscara de arroz	0.3	121
Serrín podrido	0.25	200-500
Alga	1.9	19
Lodos de depuradora	2-6.9	5-16
Estiércol de oveja	2.7	16
Residuos de marisco	9.5	3.4
Residuos de matanza	7-10	2-4
Corteza de madera	0.14	496
Maderas blandas	0.09	641

Harina de soja	7.2-7.6	4-6
Paja en general	0.7	80
Paja de avena	0.9	60
Tomate	3.3	12
Orina	15-18	0.8
Productos vegetales	2.7	19
Paja de trigo	0.3	128-150
Zanahoria	1.6	27
Nabo	1.0	44

Tabla 15: Relación C/N de algunos materiales usados para compost.

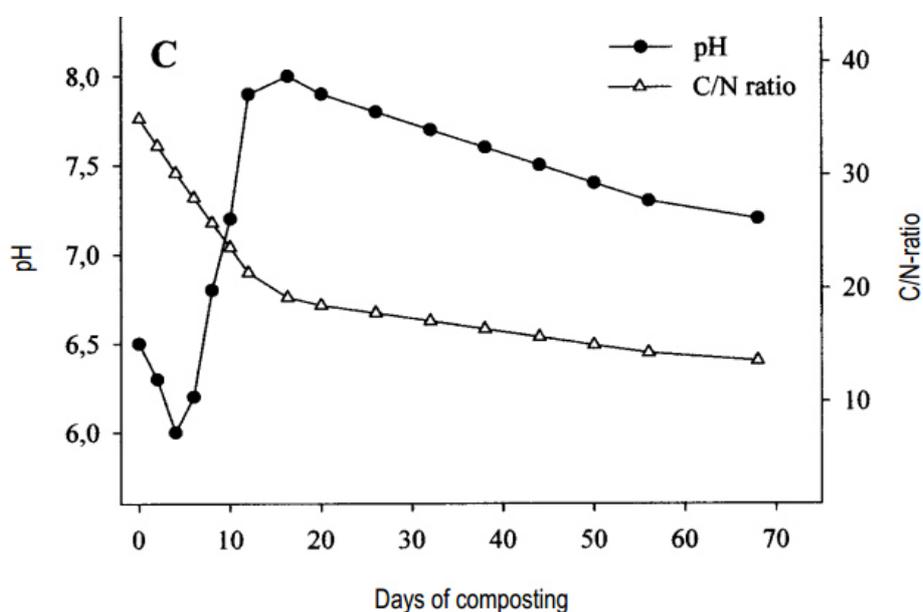


Gráfico 5: Evolución de la relación C/N durante el proceso de compostaje (Ryckeboer et al., 2003).

Si la relación C/N es alta, los microorganismos necesitan la generación de muchas células (varios ciclos de vida para poder consumir el exceso de carbono en forma de CO₂, por lo que se alarga el proceso.

Si la relación C/N es baja, habrá un exceso de nitrógeno que no puede acoplarse a la estructura bacteriana, produciéndose una pérdida de nitrógeno normalmente en forma de amoníaco (volatilización del nitrógeno), se producen malos olores. Por eso conviene la mezcla de productos de forma que la pila final tenga una relación C/N de 30.



11.7.2 Tamaño de partícula

El tamaño inicial de las partículas que componen la masa a compostar es una importante variable para la optimización del proceso, ya que cuanto mayor sea la superficie expuesta al ataque microbiano por unidad de masa, más rápida y completa será la reacción. Por lo tanto, el desmenuzamiento del material facilita el ataque de los microorganismos y aumenta la velocidad del proceso. Se ha descrito en una experiencia con residuos agroindustriales que la velocidad del proceso se duplicaba al moler el material. Pero aunque un pequeño tamaño de partícula provoca una gran superficie de contacto para el ataque microbiano, también se reduce el espacio entre partículas y aumenta las fuerzas de fricción, esto limita la difusión de oxígeno hacia el interior y de dióxido de carbono hacia el exterior, lo cual restringe la proliferación microbiana y puede dar lugar a un colapso microbiano al ser imposible la aireación por convección natural. Por otra parte, un producto muy fino no es aconsejable por riesgos de compactación.

Las dimensiones consideradas óptimas son distintas según los criterios de distintos autores, variando entre 1 y 5 cm (Haug, 1993), entre 2 y 5 cm (Kiehl, 1985) o entre 2,5 y 2,7 cm (Tchobanogolus et al., 1994).

11.7.3 Nutrientes

La característica química más importante de los sustratos es su composición elemental. La utilidad agronómica de los residuos con posibilidad de ser compostados está en función de la disponibilidad de los elementos nutritivos que posean (Kiehl, 1985). Los microorganismos sólo pueden aprovechar compuestos simples, por lo que las moléculas más complejas se rompen en otras más sencillas (por ejemplo las proteínas en aminoácidos y estos en amoníaco) para poder ser asimiladas (Castaldi et al., 2005).

Entre los elementos que componen el sustrato destacan el C, N, y P, que son macronutrientes fundamentales para el desarrollo microbiano. El carbono es necesario en la síntesis celular para la formación del protoplasma, así como la de los lípidos, grasas y carbohidratos; durante el metabolismo se oxida para producir energía y anhídrido carbónico; es el elemento que debe estar presente en mayor cantidad puesto que constituye el 50% de las células de los microorganismos y el 25% del anhídrido carbónico que se desprende en la respiración. El nitrógeno es un elemento esencial para la reproducción celular debido a la naturaleza proteica del protoplasma; se ha demostrado que la calidad de un compost como fertilizante está directamente relacionada con su contenido de N. El fósforo desempeña un papel fundamental en la formación de compuestos celulares ricos en energía, siendo necesario para el metabolismo microbiano.

Se comprueba que, en general, entre el inicio y el final de la incubación se produce un aumento de las concentraciones de los distintos nutrientes, debido a la pérdida de materia orgánica de la masa a compostar (Díaz, 2004; Michel et al., 2004).

Además de C, N y P existen otros nutrientes presentes en menor cantidad (micronutrientes). Estos tienen un importante papel en la síntesis de las enzimas, en el metabolismo de los microorganismos y en los mecanismos de transporte intra y extracelular (Miyatake and Iwabuchi, 2006).

Material	Degradabilidad
Celulosas	70
Hemicelulosas	70
Otros Azúcares	70
Ligninas	0
Lípidos	50
Proteínas	50

Tabla 16: Biodegradabilidad de los principales componentes orgánicos de los sustratos (Haug, 1993)

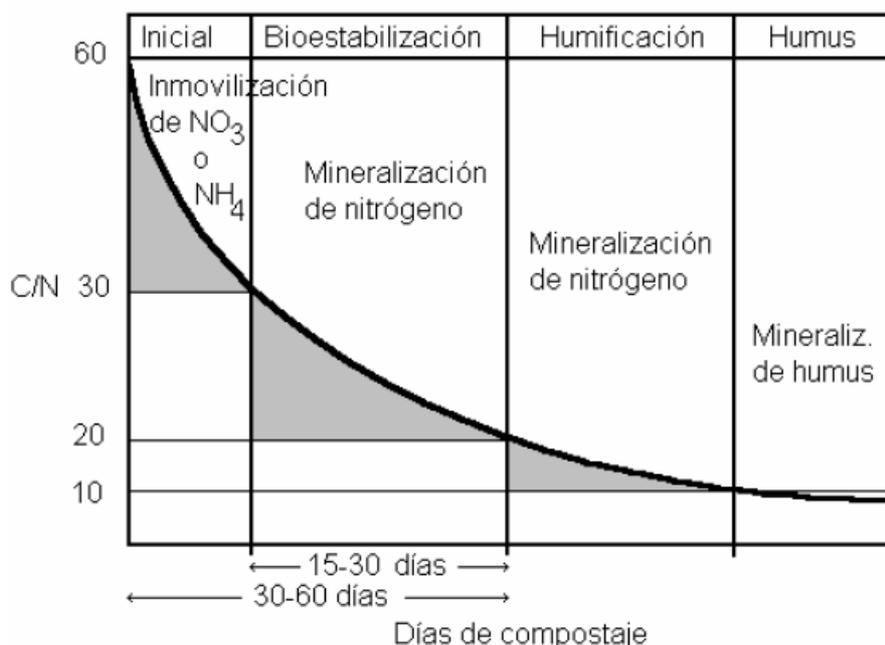


Gráfico 6: Evolución característica de la relación C/N durante el proceso de compostaje.



11.7.4 Conductividad Eléctrica (CE)

La conductividad eléctrica de un compost está determinada por la naturaleza y composición del material de partida, fundamentalmente por su concentración de sales y en menor grado por la presencia de iones amonio o nitrato formados durante el proceso (Sánchez-Monedero et al., 2001).

La CE tiende generalmente a aumentar durante el proceso de compostaje debido a la mineralización de la materia orgánica, hecho que produce un aumento de la concentración de nutrientes. Ocurre a veces un descenso de la CE durante el proceso, lo que puede deberse a fenómenos de lixiviación en la masa, provocados por una humectación excesiva de la misma. La dosis de compost que puede añadirse a un suelo debe ser proporcional a la CE del compost. Un exceso de salinidad en la solución del suelo dificulta la absorción de agua por las raíces de las plantas, de modo que en algunos casos, en esas condiciones, sólo prosperan las especies resistentes.

11.7.5 Materia orgánica

El conocimiento del contenido de los composts en materia orgánica es fundamental, pues se considera como el principal factor para determinar su calidad agronómica (Kiehl, 1985). Durante el compostaje la materia orgánica tiende a descender debido a su mineralización y a la consiguiente pérdida de carbono en forma de anhídrido carbónico; estas pérdidas pueden llegar a representar casi el 20% en peso de la masa compostada (Zucconi and De Bertoldi, 1987). Este descenso de materia orgánica transcurre en dos etapas fundamentalmente. En la primera se produce un rápido decrecimiento de los carbohidratos, transformándose las cadenas carbonadas largas en otras más cortas con la producción de compuestos simples; algunos de los cuales se reagrupan para formar moléculas complejas dando lugar a los compuestos húmicos. En la segunda etapa, una vez consumidos los compuestos lábiles, otros materiales más resistentes como las ligninas se van degradando lentamente y/o transformando en compuestos húmicos (Tomati et al., 2000; Castaldi, 2005); generalmente este último cambio no finaliza durante el tiempo que dura el compostaje. Algunos compuestos procedentes de la materia orgánica son utilizados por los microorganismos para formar sus tejidos y otros son transformados en anhídrido carbónico y agua. Los nuevos materiales formados poseen unas propiedades distintas a las de los materiales originales, confiriéndole a la masa unas características físicas y químicas distintas (Haug, 1993). La velocidad de transformación de materia orgánica depende de su naturaleza física y química, de los microorganismos que intervienen y de las condiciones fisico-químicas del proceso (humedad, aireación, temperatura y pH) (Michel, 2004).

12 AGENTES DE DESCOMPOSICIÓN

La construcción de pilas o silos para el compostaje tiene como objetivo la generación de un entorno apropiado para el ecosistema de descomposición. El entorno no solo mantiene a los agentes de la descomposición, sino también a otros que se alimentan de ellos. Los residuos de todos ellos pasan a formar parte del compost.

La basura orgánica en descomposición produce metano (gas que atrapa la energía solar provocando junto con otros gases el aumento de la temperatura global); una molécula absorbe veinte veces más calor que una de CO₂, por eso es el peor gas para el aire.

Microbio	<40 °C	40-70 °C	70 °C a T ^a ambiente	Nº de especies identificadas
Bacterias mesófilas	10 ⁸	10 ⁶	10 ⁸	6
Bacterias termófilas	10 ⁴	10 ⁹	10 ⁸	1
Actinobacterias termófilas	10 ⁴	10 ⁸	10 ⁸	14
Hongos mesófilos	10 ⁶	10 ³	10 ⁸	18
Hongos termófilos	10 ³	10 ⁷	10 ⁸	16

Tabla 17: Población de bacterias durante las etapas del compostaje (Poincelet, 1977).

12.1 MICROSCÓPICOS

Los agentes más efectivos de la descomposición son las bacterias y otros microorganismos. Los microorganismos eficientes son un conjunto de bacterias (caldo microbiano) que unidas producen a temperaturas favorables un aprovechamiento de los componentes de la materia a compostar para optimizar el proceso de compostaje.

También desempeñan un importante papel los hongos, protozoos y actinobacterias (actinomycetes, aquellas que se observan en forma de filamentos blancos en la materia en descomposición).



12.2 MACROSCÓPICOS

Ya a nivel macroscópico se encuentran las lombrices de tierra, hormigas, caracoles, babosas, milpiés, cochinillas, etc., que consumen y degradan la materia orgánica.

12.3 BASURA ORGÁNICA EN VERTEDEROS

En cielo abierto resulta ser un foco de infecciones, gusanos y malos olores. Una buena política encaminada a reciclar los materiales orgánicos reduce la contaminación y fomenta la producción, reconstruyendo la estructura de la tierra y devolviendo a la naturaleza los nutrientes que la actividad del hombre ha tomado prestados previamente.

Organismo	50 °C	55 °C	60 °C
Salmonella thyphosa	-	30 min	20 min
Salmonella sp.	-	60 min	15-20 min
Shigella sp.	-	60 min	-
Escherichia coli	-	60 min	15-20 min
Streptococcus pyogens	-	10 min	-
Mycobacterium diptheriae	-	45 min	-
Brucellus abortus o suis	-	60 min	3 min
Endamoeba hitolytica	-	1 seg	-
Trichinella sprialis	-	-	1 seg
Necator americanus	50 min	-	-
Ascaris lumbrigoides	-	60 min	-

Tabla 18: Límites térmicos letales para algunos tipos de patógenos y parásitos (Buford, 1994; Finstein and Morris, 1974; Gotass, 1956; Haug, 1993; Polprasert, 1989).

13 LIXIVIADOS

Durante el proceso de compostaje, se producen pérdidas de líquido que son recogidas en forma de lixiviados. El problema de los lixiviados es su alto nivel de contaminación en el caso de que lleguen finalmente a las fuentes de agua y al subsuelo, provocando la contaminación del entorno.

Los lixiviados pueden definirse como la producción de líquidos percolados, que se deben principalmente al paso del agua a través de los estratos de residuos sólidos que se hallan en plena fase de descomposición, arrastrando a su paso

componentes disueltos, en suspensión, fijos o volátiles (Tchobanoglous et al., 1994). Los lixiviados son el líquido resultante que se desprende de la pila de la composta expuesta al agua, cuando la capacidad de retención de humedad de la pila es excedida (Granatstein et al., 2002).

Uno de los principales problemas en los rellenos sanitarios es la descarga de lixiviados que se producen cuando el agua pasa a través del vertedero, y por lo tanto empieza a contaminarse con varios compuestos orgánicos e inorgánicos. Subsecuentemente si los lixiviados llegan al suelo circundante o a las aguas subterráneas o superficiales pueden ocasionar graves problemas de contaminación (Crawford and Smith, 1985).

Las características de los lixiviados dependen principalmente de los residuos de los que provienen. Es por ello que resulta muy complejo establecer una composición específica de los lixiviados. A pesar de esto la composición puede ser medida por parámetros físicos, químicos inorgánicos, químicos orgánicos y toxicidad (Crawford and Smith, 1985). De acuerdo con algunos autores de la literatura consultada en este trabajo; los lixiviados de composta tienen potencial como fuente de nutrientes, sin embargo ninguno de estos autores detalla claramente su composición y forma de uso. Simultáneamente, la constitución química de los lixiviados de un Relleno sanitario variará con el tiempo, debido a la biodegradabilidad que se produce en ellos por diferentes factores. Como resultado de esto, los lixiviados se pueden clasificar en Jóvenes y Maduros.

Durante los 2 primeros años, los lixiviados jóvenes de un relleno sanitario contienen la materia orgánica fácilmente biodegradable. Así estos tienden a ser ácidos con un pH que va de 6 a 7. Al mismo tiempo su DBO5 va de 20,000 a 40,000 mg/kg, el amonio fluctúa entre 1,000 y 2,000 mg/kg y los nitratos se encuentran en muy bajas cantidades). Por el contrario los lixiviados Maduros, después de transcurrido varios años, el pH se incrementa a un intervalo de 7 a 8, con una disminución de DBO5 de 500 -3000 mg/kg, al igual que una baja en el contenido total de nutrientes (Crawford and Smith, 1985).

En relación a los antes mencionado, los abonos líquidos como podrían ser los lixiviados de composta, presentan por lo general un desagradable olor y un color café oscuro (Flowerdew, 1993). Esto puede ser generado por el material orgánico formado por ácido húmicos y fúlvicos contenido en ellos.

Desde otro punto de vista, los lixiviados de composta a diferencia del té de composta pueden contener sustancias y microorganismos perjudiciales para las



plantas y el hombre, dependiendo principalmente en la fase de composteo en la que se hayan recolectado, por tal motivo es recomendable un tratamiento previo a su uso. Es importante subrayar desde una perspectiva ambiental, que las sustancias contenidas en los lixiviados se mueven dentro del suelo, de acuerdo como se mueve el agua de escurrimiento, obedeciendo a los fenómenos de infiltración, percolación, evaporación, difusión y advección. Así es que al instalar una composta es conveniente considerar el suelo, la pendiente y la cercanía a cuerpos de agua.

14 ETAPAS DEL COMPOSTAJE

Hay cuatro etapas principales en el proceso de compostaje.

- **Etapas 1:** Aumento del contenido de humedad.
- **Etapas 2:** La fase en la que la paja se consume más fácilmente. El material se biodegrada en un periodo de "cocinado".
- **Etapas 3:** Las partes más duraderas de la paja (lignocelulosa) se descomponen. En este punto, se producen cambios en la textura del material oscureciéndose y reduciendo rápidamente el volumen con el voleado del compost.
- **Etapas 4:** "curado", el compost se estabiliza con un coeficiente mínimo de carbono-nitrógeno.

La forma más común para juzgar el estado de degradación de compuesto es por la relación carbono-nitrógeno.

14.1 FASES DEL PROCESO DE COMPOSTAJE

14.1.1 Fase mesófila 15 - 40°C

Al comenzar el proceso, la masa es atacada por microorganismos mesófilos (fundamentalmente bacterias y algunos hongos). Éstos atacan el material orgánico más simple (azúcares solubles, ácidos orgánicos, grasas, proteínas etc.), hasta que la temperatura de la masa alcanza los 40°C. Las bacterias se acostumbran al nuevo medio y comienzan a experimentar crecimientos exponenciales para dar lugar a una masa de microorganismos que puedan iniciar la transformación de toda esta materia orgánica. Esta fase puede durar entre 4 y 8 días.

14.1.2 Fase termófila 40-70 °C.

Necesaria para matar patógenos para animales y plantas, malas semillas, etc. A partir de los 40 °C comienza la actividad de los microorganismos termófilos (hongos, bacterias...) y comienzan a aparecer actinomicetos. Éstos atacan estructuras más complejas (almidones, pectinas, celulosas y finalmente ligninas). Esos primeros microorganismos o cepas bacterianas que iniciaron el proceso de descomposición deben ser sustituidos por otros que profundicen y continúen con el



mismo. Concretamente, los primeros son sustituidos precisamente por otros que puedan desarrollar sus ciclos biológicos en presencia de temperaturas altas (entre 50 y 75°). Durante esta fase además, se dan una serie de cuestiones necesarias como que, gracias a estas altas temperaturas los posibles patógenos existentes en la mezcla desaparezcan o sean reducidos al máximo. Además, las semillas de malas hierbas son destruidas puesto que, en la mayor parte de los casos, dichos embriones no pueden soportar las mencionadas temperaturas. Esta es la fase más prolongada en el tiempo, puede durar, dependiendo de los sistemas, desde 2 semanas a varios meses (2 a 3) y también es la etapa que mayor y mejor control de la pila requiere.

A partir de 70°C decrece la actividad microbiana por lo que se produce un enfriamiento de la masa.

14.1.3 Enfriamiento de la masa

En esta fase todavía no ha finalizado el proceso de compostaje. Abunda su contenido en lignina y por todo ello se denomina compost joven.

14.1.4 Maduración de la masa

Es un proceso más o menos largo, en el cual el componente más indigestible de la fibra, la lignina, es modificada mediante reacciones secundarias complejas (de condensación y polimerización), dando lugar a moléculas orgánicas menos biodegradables o más estables.

A partir de los componentes orgánicos dejados por la anterior fase, ahora se generan coloides húmicos, hormonas, vitaminas, antibióticos y otros elementos que favorecerán considerablemente el desarrollo y crecimiento vegetal.

En esta fase se producen fenómenos de humificación y mineralización. El mayor problema es definir cuándo se da por finalizado el proceso, pudiéndose categorizar la madurez desde un sentido:

- **Biológico:** Cuando ya no presenta sustancias fitotóxicas para las plantas. Se utilizan ensayos de germinación para su determinación.
- **Químico:** A demás de no ser fitotóxico debe de estar suficientemente estabilizado.

Parámetros para su cuantificación: Relación C/N, CIC (capacidad de intercambio catiónico), Incremento del N nítrico/N amoniacal, grado de descomposición de la materia orgánica, el color, pH etc.

En función de estos parámetros se puede hablar de:

- **Compost fresco:** Aquel que ha finalizado la fase termófila, habiéndose eliminado los patógenos. Se ha producido descomposición de la materia pero no humificación. Se puede utilizar en la preparación del suelo entre cosechas, pero no directamente sobre cultivos.
- **Compost:** Ha experimentado una fase de maduración, pudiéndose utilizar sobre cultivos. No se recomienda como sustrato de crecimiento por estar en contacto directo con las raíces.
- **Compost curado:** Tras un periodo prolongado de humificación y mineralización, el producto está altamente estabilizado. Puede utilizarse para cualquier uso agronómico, incluso como sustrato.

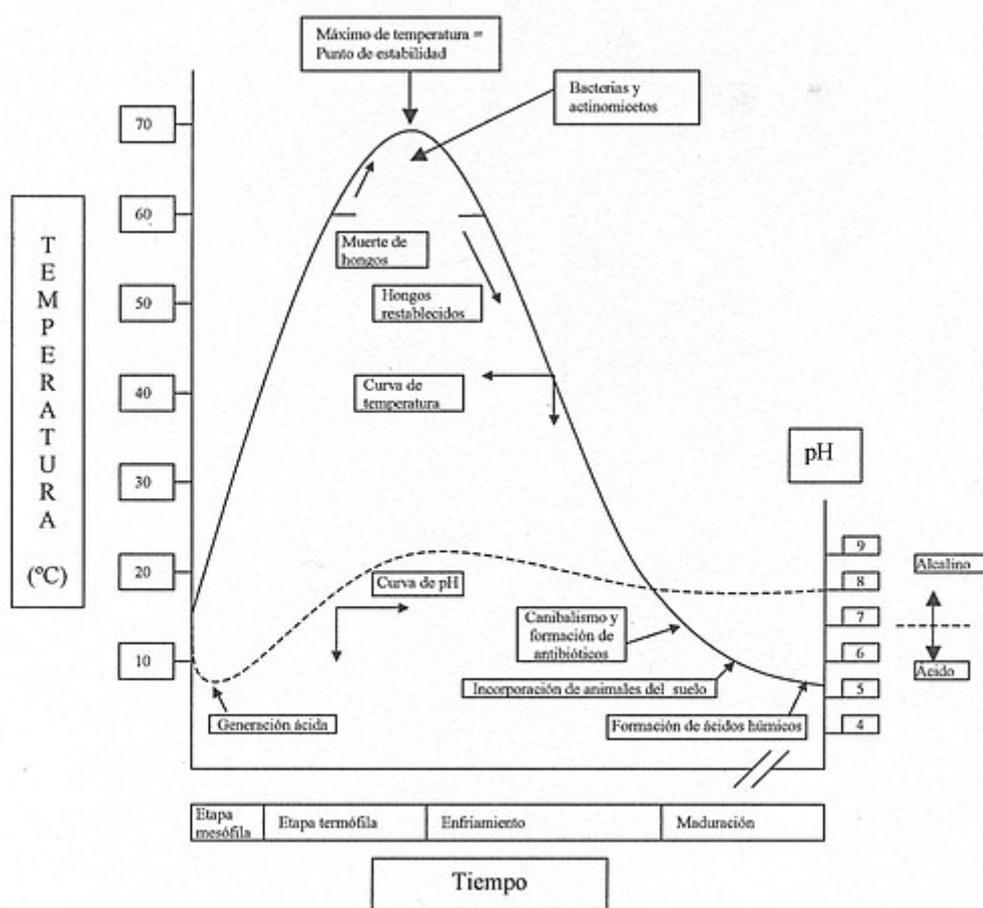


Gráfico 7: Fases del proceso de compostaje en pilas sin cobertura y con ventilación natural.

15 BENEFICIOS DEL COMPOST.

El compostaje presenta numerosas ventajas, tanto el realizado en planta industrial, como el realizado a nivel doméstico.

- El compost contiene un espectro completo de nutrientes esenciales para las plantas. Contiene macro y micronutrientes a menudo ausentes en los fertilizantes sintéticos.

- Libera los nutrientes lentamente, a diferencia de los fertilizantes sintéticos que los liberan de forma rápida y en muchos casos ineficaz.
- Estabiliza el pH del suelo creando un ambiente óptimo para la disponibilidad de nutrientes para las plantas.

El compost ayuda a la unión de las partículas del suelo, llamados agregados, para proporcionar una buena estructura del suelo. Esta tierra está llena de pequeños canales y poros de aire que mantienen el aire, la humedad y los nutrientes.

- El compost ayuda retiene el agua y los nutrientes en suelos arenosos y con dificultad de retención de la humedad.
- Compost permite que las partículas, fuertemente unidas, en suelos arcillosos para que las raíces pueden extenderse, escurrir el agua y permitir la penetración del aire, aumentando la oxigenación de las plantas.
- El compost altera la estructura del suelo, por lo que es menos probable que se erosione, y evita la propagación de enfermedades en las plantas.
- El compost contiene múltiples nutrientes que se liberan de forma gradual, conforme las necesidades de las plantas.
- Hace que trabajar la tierra de cultivo sea más fácil trabajar para cualquier tipo de suelo.

El compost es una fuente de vida microscópica. Con multitud de hongos y bacterias, beneficiosas para el entorno vegetal, ayuda al crecimiento y desarrollo de las plantas.

- Las bacterias descomponen las sustancias orgánicas presentes en el suelo, liberando los nutrientes disponibles para las plantas. Algunas bacterias convierten el nitrógeno del aire en una disposición de nutrientes para las plantas.
- El compost enriquece el suelo con una gran cantidad de insectos, gusanos y otros organismos muy beneficiosos manteniendo el suelo bien aireado.
- El compost puede suprimir enfermedades y plagas comúnmente presentes en las tierras de cultivo.

El compost aumenta la capacidad del suelo para retener el agua y reduce la escorrentía.

- Fomenta los sistemas de raíces saludables, que disminuyen la escorrentía.
- Reducir considerablemente el uso de fertilizantes sintéticos y el uso de pesticidas químicos ya que contiene microorganismos beneficiosos que pueden proteger las plantas de enfermedades y plagas.
- Sólo un 5% de incremento en la materia orgánica cuadruplica la capacidad de retención de agua del suelo.



Aunque la principal ventaja medioambiental del proceso de compostaje, es el cierre de ciclo de un producto. Con el compostaje se aprovechan residuos orgánicos en forma de fertilizantes y abonos naturales, que de no ser tratados se acumularían en vertederos y plantas de almacenaje de residuos. Con ello, se reduce de forma drástica el impacto ambiental de dichos productos.

16 ESTUDIO DEL PROCESO DE COMPOSTAJE EN TÚNELES CON AIREACIÓN FORZADA.

El sistema de compostaje en túneles se basa en un sistema de compostaje en pilas en un recipiente cerrado. Generalmente suele ser un túnel de hormigón rectangular de 30 metros de largo, 6 metros de ancho y 5 metros de altura, con una sola puerta en la parte frontal para la carga y descarga del compost. En el suelo, el túnel tiene un sistema de aireación, con una gran cantidad de agujeros sopladores por los que inyecta aire al compost. El sistema está compuesto principalmente por turbinas y motores eléctricos controlados por un autómata y un software que registra constantemente los parámetros seleccionados y regula la aireación para que el compost esté permanentemente a una temperatura ideal y constante durante todo el proceso.

Cada túnel se maneja como una unidad separada, con su propio sistema de control y de tratamiento de aire. Los túneles de compostaje funcionan con respecto a la temperatura, la humedad y el oxígeno para satisfacer los objetivos del proceso y alcanzar la reducción de patógenos.

La aireación es el factor clave para lograr que el proceso de compostaje funcione correctamente. La aireación asegura un cierto nivel de oxígeno para que los microorganismos que descomponen los residuos. La aireación regular la temperatura del proceso a un nivel óptimo. La temperatura es uno de los principales factores individuales que influyen en la velocidad de descomposición. Es bien sabido que el control de proceso basado en mantener una temperatura óptima determina las necesidades de aire.

Cuando el túnel se llena con los residuos orgánicos, la puerta del túnel se cierra y el programa de control climático se inicializa. Un ventilador empieza a funcionar y empuja el aire a partir de una serie de tubos dispuestos en paralelo en el suelo de hormigón a través de boquillas de plástico. El aire se toma desde el exterior, ya que es un aire limpio y con las condiciones ambientales, y se recircula a través de una red de conductos externos hasta el soplador.



El suministro de aire está controlado en base a la temperatura de la pila de modo que la temperatura se mantiene a un nivel que garantice la velocidad de descomposición más alta. Cuando la temperatura excede el punto de ajuste el flujo de aire aumenta y viceversa. El proceso de descomposición tiene una duración de 7 a 14 días, con el objetivo de maximizar la descomposición del material y al mismo tiempo lograr la higienización o pasteurización.

Al volver a hacer circular el aire, la capacidad de aireación por área en el túnel es muy alta, más de veinte veces mayor que en otros sistemas de compostaje en pilas. El alto flujo de aire garantiza condiciones aeróbicas en toda la pila de compost y también minimiza la temperatura y las diferencias de concentración de oxígeno en todo el montón. Debido a la re-circulación del aire, la necesidad de entrada de aire fresco y por lo tanto la necesidad de agotar el aire de proceso utilizado puede ser limitado, a pesar del alta flujo de aire. La recirculación de aire, también promueve la captura y el desglose de las sustancias volátiles producidas. Durante el proceso de compostaje se crea un entorno muy agresivo y corrosivo, debido a las altas temperaturas, alta humedad y los niveles elevados de CO_2 y NH_3 .

Los lixiviados producidos durante el proceso de compostaje también se aprovechan y se vuelven a circular en algunos puntos donde se necesite humedecer la mezcla de compost, como es el caso del premojado de la paja.

La tecnología de los túneles de compostaje es un sistema modular. Tienen un rango de capacidad de 50 a 75 toneladas por semana, dependiendo de la duración del proceso de compostaje en el interior y la cantidad introducida. Al igual que los túneles, las cámaras de pasterización poseen la misma capacidad de carga, ya que es el siguiente paso del proceso de compostaje y por consiguiente, deben albergar la misma cantidad utilizada en los túneles.



	En montón	En pila	En pila estática aireada	En caseta	En reactor vertical	En túnel
Control de olores	Bajo	Bajo	Bajo/Medio	Medio	Variable	Alto
Control de temperatura	Bajo	Medio	Medio	Medio/Alto	Variable	Alto
Eliminación de patógenos	Bajo	Bajo	Medio	Medio/Alto	Variable	Alto
Dificultad del proceso	Medio	Medio	Medio	Medio	Medio/Bajo	Medio/Bajo
Costes de personal	Medio	Medio	Medio	Medio/Bajo	Medio/Bajo	Bajo
Reacondicionamiento	Bajo	Medio	Alto	Medio	Alto	Bajo
Costes de mantenimiento	Medio	Medio	Medio	Medio	Medio/Bajo	Medio/Bajo
Costes capitales	Bajo	Bajo	Medio/Alto	Alto	Alto	Alto
Ruido	Alto	Alto	Medio/Alto	Medio	Bajo	Bajo
Fiabilidad del proceso	Bajo	Medio	Bajo	Medio/Alto	Bajo	Alto
Tolerancia	Bajo	Bajo	Bajo	Medio/Alto	Medio/Alto	Alto
Versatilidad con materias primas	Bajo	Medio	Medio	Medio/Alto	Bajo	Alto
Fiabilidad del producto resultante	Bajo	Medio	Medio	Medio/Alto	Medio/Alto	Alto

Tabla 19: Comparación de los sistemas de compostaje tradicionales.

En el presente trabajo se estudia el proceso de compostaje en túneles con aireación. Las hileras de compost son introducidas en los túneles de compostaje, parcialmente abiertos, con un sistema de aireación del compost. La aireación del compost se produce gracias a un sistema de ventilación dispuesta en cada túnel, que empuja el aire desde la parte inferior del túnel. Con este sistema permite una aireación efectiva de la parte inferior e interior de la pila de compost, que, como se ha visto anteriormente, posee la mayor temperatura. La aireación controlada del compost, permite tener un control de la temperatura de la pila, permitiendo una aireación continua para evitar la aparición de los procesos anaerobios.

El proceso de compostaje en túneles es un método de alta eficiencia ya que permite un control total sobre el proceso, ya que permite controlar los parámetros clave para que el compostaje se realice de forma eficiente, como es la temperatura de la pila de compost.

Se ha demostrado que este proceso de compostaje es altamente eficiente, reduciendo de forma considerable los tiempos de compostaje, de varios meses, a varias semanas, dependiendo de las características de las entradas.

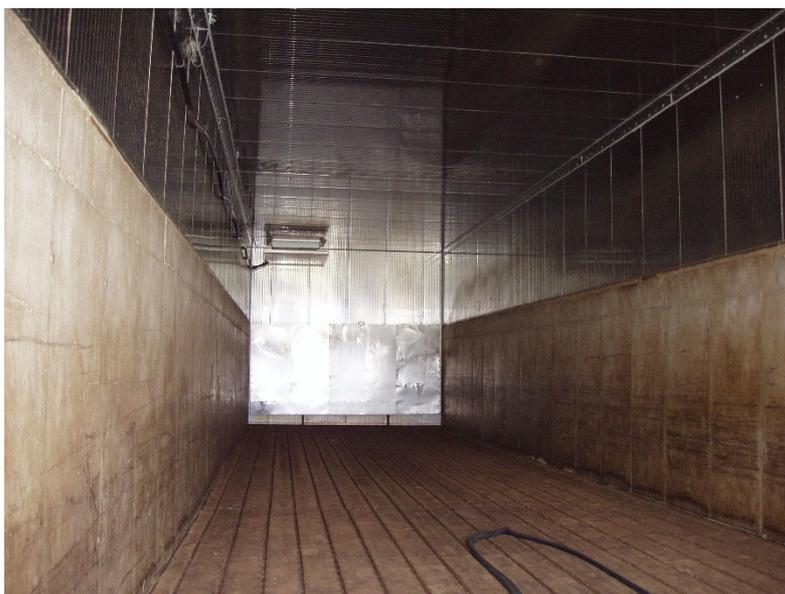


Figura 19: Túnel con aireación forzada.

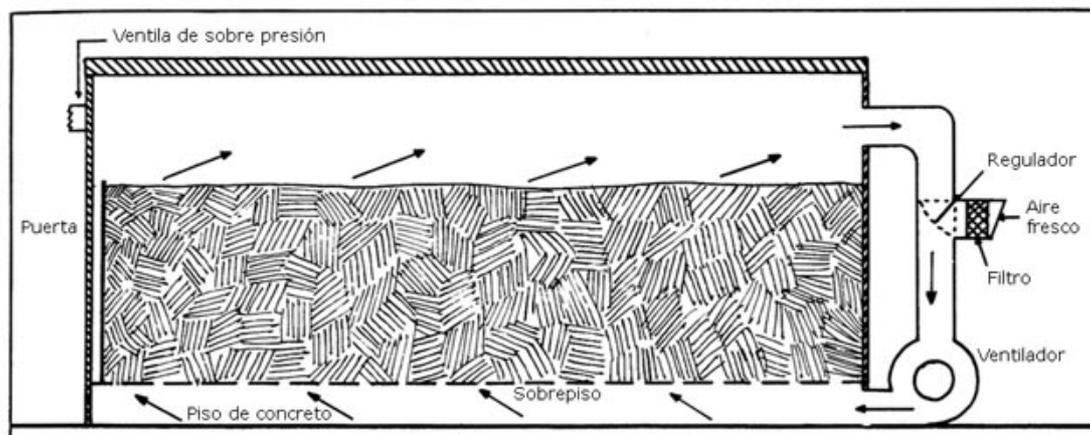


Figura 20: Sistema de aireación del compost en el interior del túnel.



Figura 21: Detalle del sistema de aireación.

16.1 FASES DEL PROCESO DE COMPOSTAJE EN TÚNEL.

Las fases principales del proceso de compostaje en túneles son las siguientes:

- **Fase 0:** Entrada y almacenamiento de materias primas.
- **Fase I:** Mezclado de todas las entradas que van a ser utilizadas durante el proceso de compostaje.
- **Fase II:** Llenado de los túneles y creación de la pila de compost.
- **Fase III:** Proceso de compostaje en el interior del túnel.
- **Fase IV:** Proceso de pasteurización.
- **Fase V:** Empaquetado y transporte de los paquetes de compost a los productores y cultivadores.
- **Fase VI:** Recogida de lixiviados.

16.1.1 Entrada de materias primas.

Como fase inicial del proceso, las entradas son etiquetadas y almacenadas en los almacenes habilitados para ello.

Los productos agrícolas como la paja son almacenados en pajeras dispuestas en filas.



Figura 22: Almacenaje de la paja de hileras.

La gallinaza es almacenada en montones dispuesta en grandes montones.



Figura 23: Almacenamiento de gallinaza en montones.

Los productos químicos y el resto de productos químicos, se almacenan por separado en los almacenes cubiertos, a excepción del yeso que se almacena en los silos dispuestos en la empresa.



Figura 24: Silos para el yeso.



Figura 25: Almacenamiento de los productos químicos.

16.1.2 Mezclado de materias primas.

La fase del compostaje se inicia con el mezclado de los productos utilizados en el proceso del compostaje. Existen dos fases dentro del mezclado:

16.1.3 Fase de premojado de la paja:

Antes de ser mezclada con el resto de materias, la paja debe ser premojada para aumentar el contenido de humedad hasta el valor deseado. Este paso es indispensable, ya que si no se alcanza la humedad deseada, el proceso de compostaje no podrá realizarse de forma correcta. Como se ha visto con anterioridad, el valor de la humedad del compost, durante su fase de compostaje, debe estar comprendido entre el 40-60%.



Figura 26: Fase de premojado de la paja.

16.1.4 Fase de premezclado.

Antes de ser introducidos en la línea principal de mezclado, se hace un mezclado previo de los materiales utilizados en el compost.



Figura 27: Mezclado de la gallinaza con los productos químicos.

16.1.5 Fase de mezclado.

Una vez todos los productos están disponibles para el proceso de compostaje, se introducen en la línea principal de mezclado. En la línea de mezclado



Figura 28: Línea de mezclado de las entradas.

16.1.6 Llenado de los túneles y creación de la pila de compost.

Una vez se ha completado el proceso de mezclado, se procederá a llenar los túneles donde se realizará el proceso de compostaje, creando así la pila de compost.



Figura 29: Llenado de los túneles de compostaje.

16.1.7 Proceso de compostaje en el interior del túnel.

Una vez creadas las pilas de compost en el interior de los túneles, se procede al inicio del proceso de compostaje.

Durante el proceso de compostaje se controlará de forma constante los parámetros del compostaje, principalmente la temperatura, para permitir que el proceso se desarrolle de forma satisfactoria. Para ello se monitorizarán los parámetros de la pila a controlar.

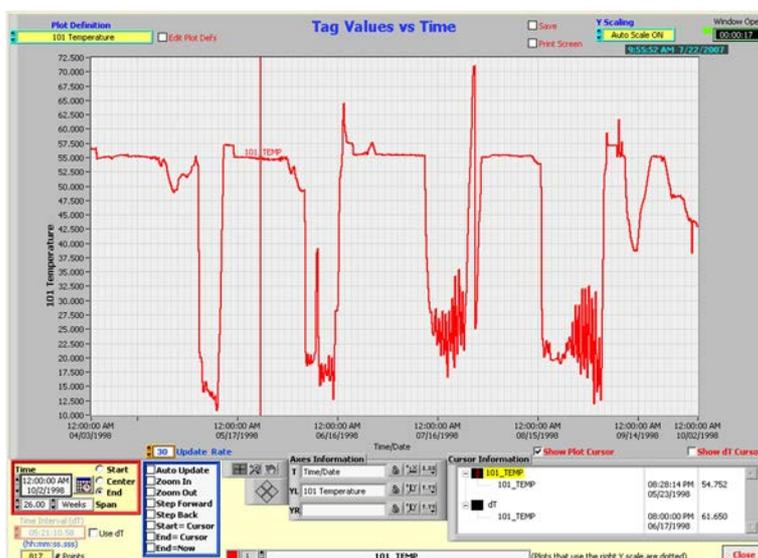


Figura 30: Ejemplo de un software para el control de la temperatura de la pila de compost.

El volteo de la pila de compost se realizará de forma constante para mantener una temperatura entre los límites establecidos para el compost, permitiendo una ayuda en la aireación de las zonas interiores de la pila y controlar los procesos anaerobios.



Figura 31: Volteo de la pila de compostaje.

16.1.8 Proceso de pasteurización.

Finalizado el proceso de compostaje en el interior del túnel, se procede a llevar la pila de compost a unas cámaras de pasteurización. Con el proceso de pasteurización, se eliminarán la mayoría de los patógenos que puedan aparecer durante el proceso de compostaje.

Este es un paso importante ya que durante el proceso de compostaje se crea un ambiente muy propicio para la aparición de microorganismos que pueden ser perjudiciales debido a las altas temperaturas y a la alta humedad, no sólo para la salud, sino para el cultivo del hongo, afectando de forma directa al crecimiento y desarrollo del mismo.

En este proceso se elimina gran cantidad de el amoniaco que se haya creado o haya permanecido durante el proceso de compostaje y que no haya podido ser eliminado.



Figura 32: Cámaras de pasteurización.

16.1.9 Empaquetado y transporte de los paquetes de compost a los productores y cultivadores.

Una vez terminado el proceso total de compostaje, se procede a empaquetar el compost en paquetes más pequeños y manejables para el posterior cultivo. Dependiendo del tipo de cultivo a realizar, el empaquetado de la pila de compost se omite y se sustituye por llenado de tractores y camiones, ya que ciertos tipos de cultivos no precisan de la disposición de paquetes. Aunque en la actualidad, el cultivo por medio de paquetes es un proceso cómodo y usado por la mayoría de los cultivadores.

Una vez terminado el proceso de compostaje, se procede al transporte del producto resultante a las zonas de cultivo.



Figura 33: Creación de paquetes de compost.



Figura 34: Paletizado de los paquetes de compost.

16.1.10 Recogida de lixiviados.

Durante el proceso de compostaje, se producen pérdidas de líquido que son recogidas en forma de lixiviados. El problema de los lixiviados es su alto nivel de contaminación en el caso de que lleguen finalmente a las fuentes de agua y al subsuelo, provocando la contaminación del entorno.



Figura 35: Balsa de lixiviados.

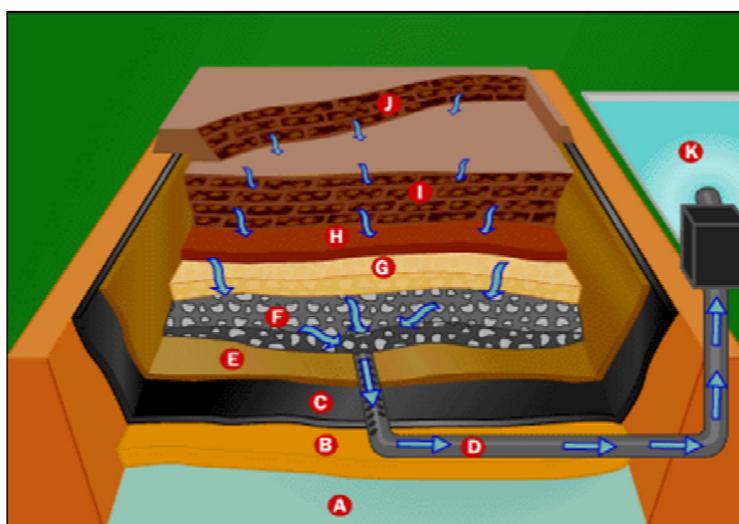


Figura 36: Sistema de recogida de lixiviados.

Los lixiviados son utilizados durante el proceso de compostaje, como en la fase de premojado y mezclado, ya que los lixiviados son en mayor medida agua y restos de procesos de compostaje anteriores. La utilización de lixiviados para la fase de premojado, ahorra la utilización de agua, ya que posteriormente serán eliminados durante un nuevo proceso de compostaje.

Finalmente los lixiviados que no se puedan reutilizar, serán recogidos y utilizados en otros procesos ajenos al compostaje, ya que por sus características, no pueden ser reutilizados.

16.2 DIAGRAMA DE FLUJO DEL COMPOSTAJE.

En este apartado se disponen de los diagramas de flujo del proceso de compostaje. Se ha dividido el diagrama de flujo global en diagramas simplificados para cada una de las fases anteriormente descrita.

Dispuestos los diagramas por separado de cada una de las fases, se dispondrá el diagrama del proceso global, en el que se unificarán todos los diagramas, creando un único diagrama de flujo para el proceso global.

A continuación se dispone una leyenda para interpretar cada uno de los diagramas de flujo, para ayudar a la comprensión e interpretación de los mismos.

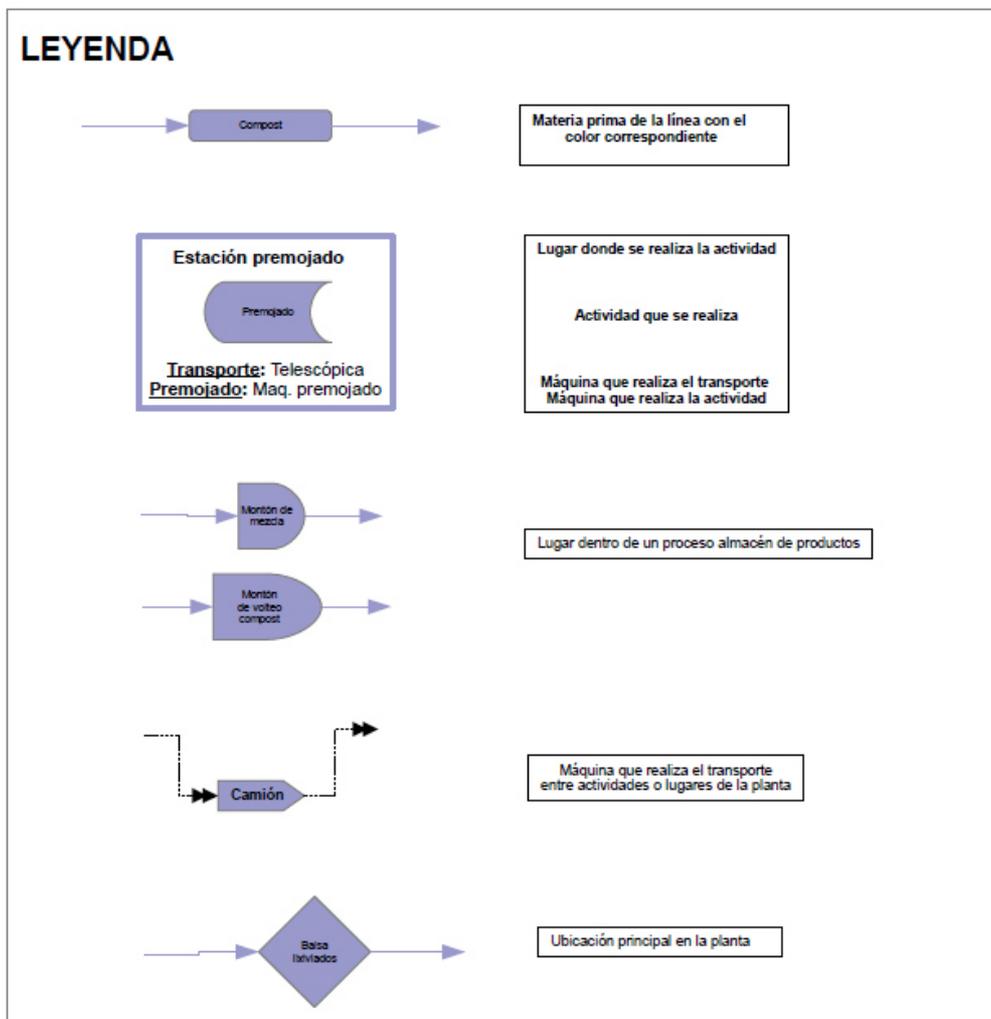


Figura 37: Leyenda de los diagramas de flujo.

16.2.1 Fase 0: Entrada y almacenamiento de materias primas.

El proceso de compostaje comienza con la entrada y almacenamiento de las entradas a la empresa o compostadora. Las entradas se producen de forma gradual a lo largo de una campaña, desde Julio hasta Mayo debido a la demanda de los cultivadores.

Las entradas a la empresa se realizan mediante camiones o tractores, en función de la distancia a recorrer hasta el punto de entrega. Una vez pesadas y etiquetadas las entradas, se procede al almacenamiento de las mismas en los puntos de almacenamiento.

- La paja se almacena en las pajas.
- La gallinaza se almacena en el almacén de la gallinaza donde se mezcla con el material existente.
- Las semillas se almacenan en la cámara de frío, donde se mantienen a una temperatura de 3 °C para que el micelio no se desarrolle, ya que con temperaturas más altas empezaría la fase de desarrollo y crecimiento.
- El yeso se almacena en el silo de yeso.
- El resto de materiales (Carbocal, plástico, palés, urea y sulfato) se almacenan en los almacenes o cocheras, ya que vienen en paquetes o en rollos.

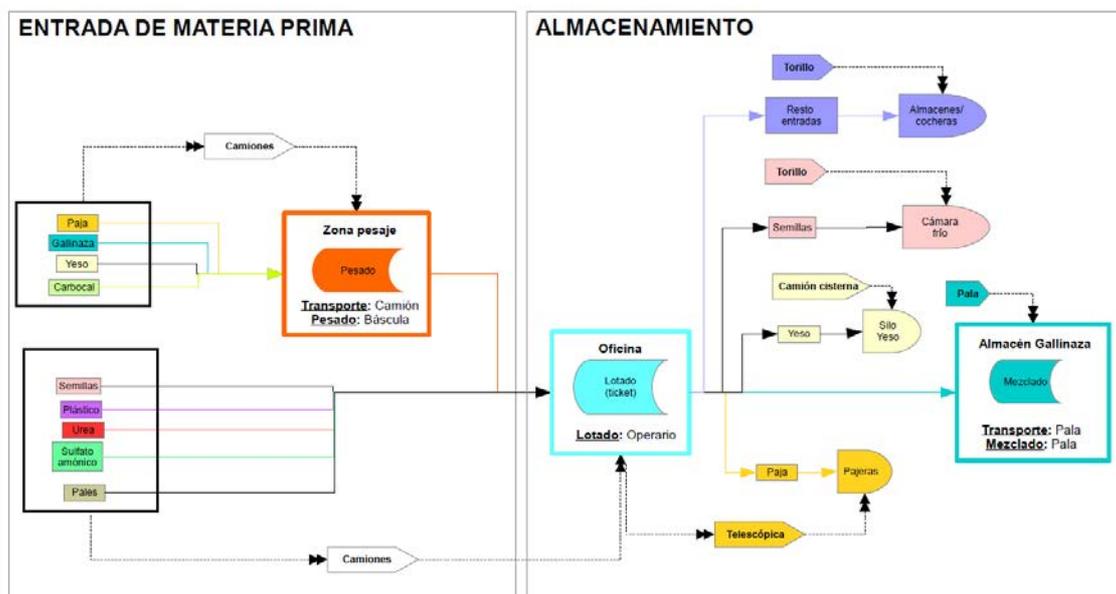


Figura 38: Diagrama de flujo entrada y almacenamiento de materias primas.

16.2.2 Fase I: Mezclado de todas las entradas que van a ser utilizadas durante el proceso de compostaje.

La siguiente fase comienza con el premojado de la paja. La paja se moja durante 8-9 horas para alcanzar la humedad requerida para que el proceso de compostaje se realice correctamente. Este paso es importante ya que la paja apenas llega al 12% de humedad y el compost necesita una humedad entre 60-70%. Por otro lado, se realiza el premezclado de la gallinaza, el yeso, el carbocal, la urea y el sulfato. Este paso se realiza antes de introducir la mezcla en la línea de mezclado principal con la paja premojada, para una mezcla más homogénea.

A continuación se procede a introducir todos los materiales a la línea de mezclado, donde la paja se reducirá de tamaño en una trituradora y el resto de la premezcla se mezclará con la paja mojada y triturada.

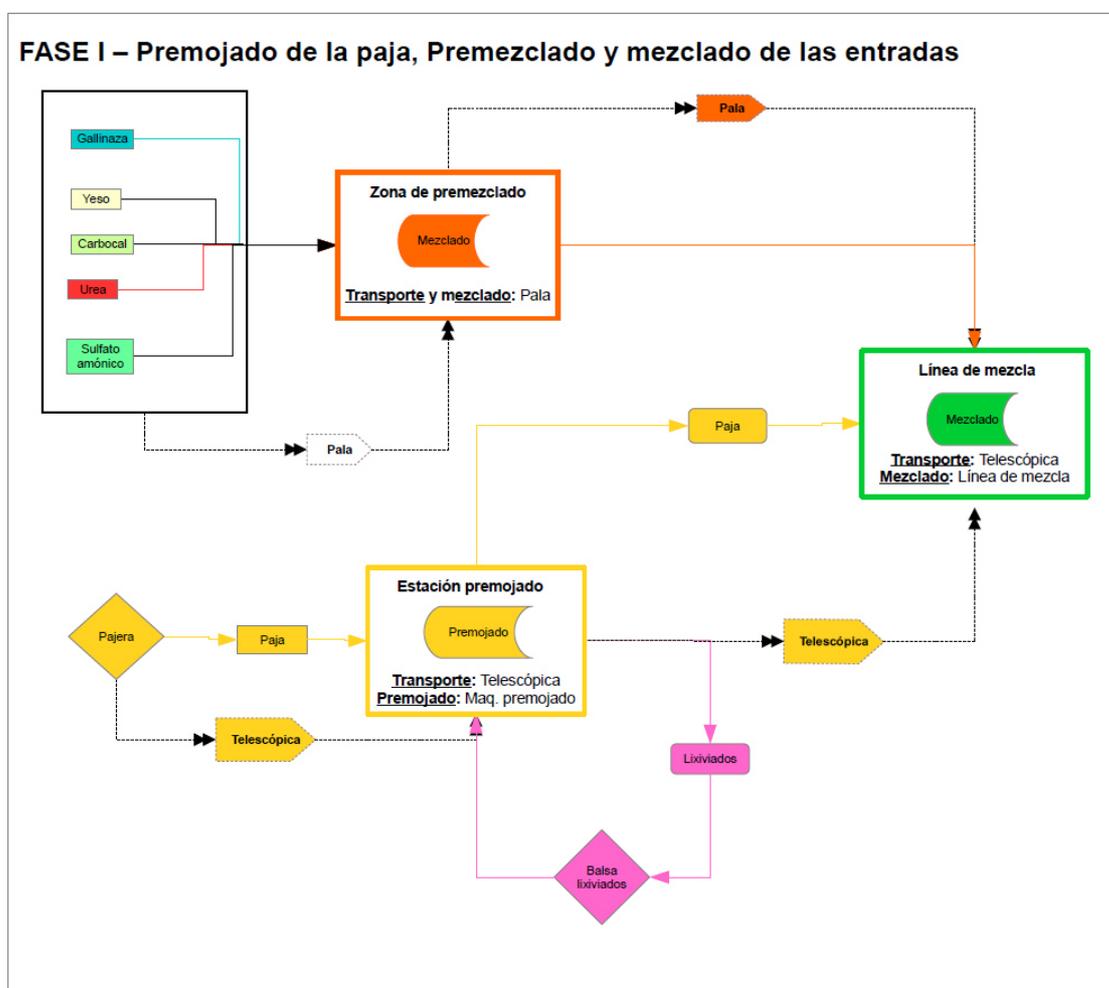


Figura 39: Diagrama de flujo Fase I – Premojado de la paja, premezclado y mezclado de las entradas.

16.2.3 Fase II: Llenado de los túneles y creación de la pila de compost.

Una vez realizada la fase de mezclado, se deposita la mezcla en el montón inicial. Una pala carga la mezcla en la tolva de la mezcladora que será la encargada de llenar los túneles y de crear la pila de compost en el interior del túnel.

Durante el proceso de llenado se introduce agua a la mezcla para aumentar el contenido de humedad en caso de necesitarlo.

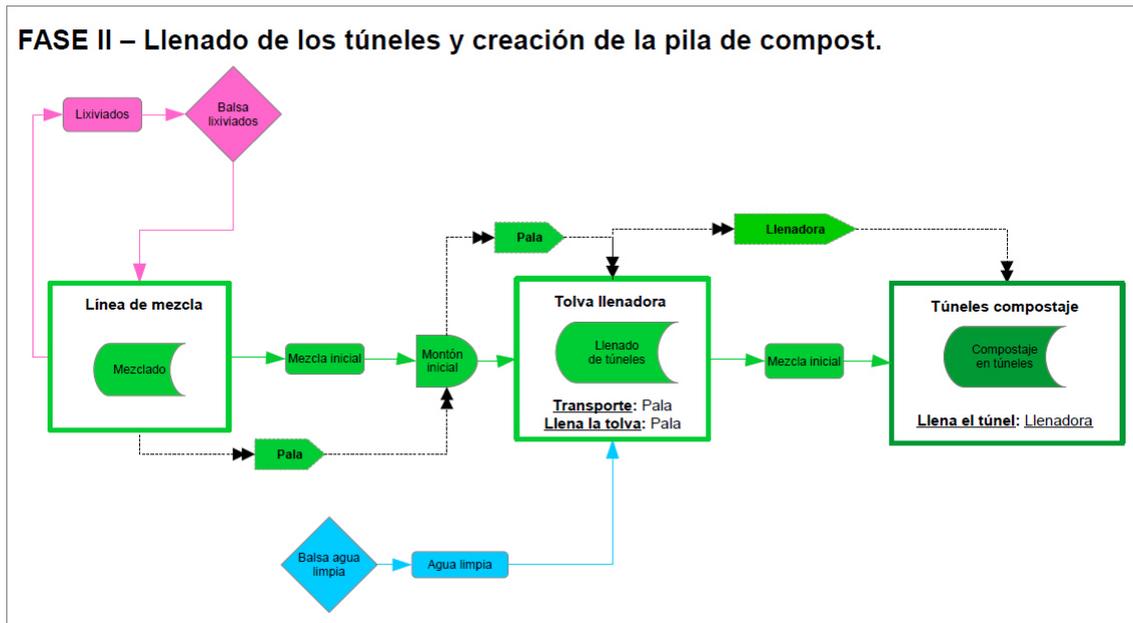


Figura 40: Diagrama de flujo Fase II – Llenado de los túneles y creación de la pila de compost.

16.2.4 Fase III: Proceso de compostaje en el interior del túnel.

Llenado el túnel, comienza el proceso de compostaje. Cada fase de compostaje tiene una duración de 2 a 3 días, tiempo que el compost permanece en el interior del túnel. Terminada cada fase se procede al volteado de la pila. Se extrae el compost del interior del túnel y se deposita en un montón, donde se voltea. Una vez volteado, se procede nuevamente al llenado del túnel. Se procede de la misma forma anteriormente mencionada utilizando la llenadora y creando de nuevo la pila de compost en el interior del túnel.

Acabada la fase de compostaje, habiendo volteado de 3 a 5 veces la pila de compost, se vacía el túnel acumulando la bola de compost en otro montón para proceder con la fase de pasteurización.

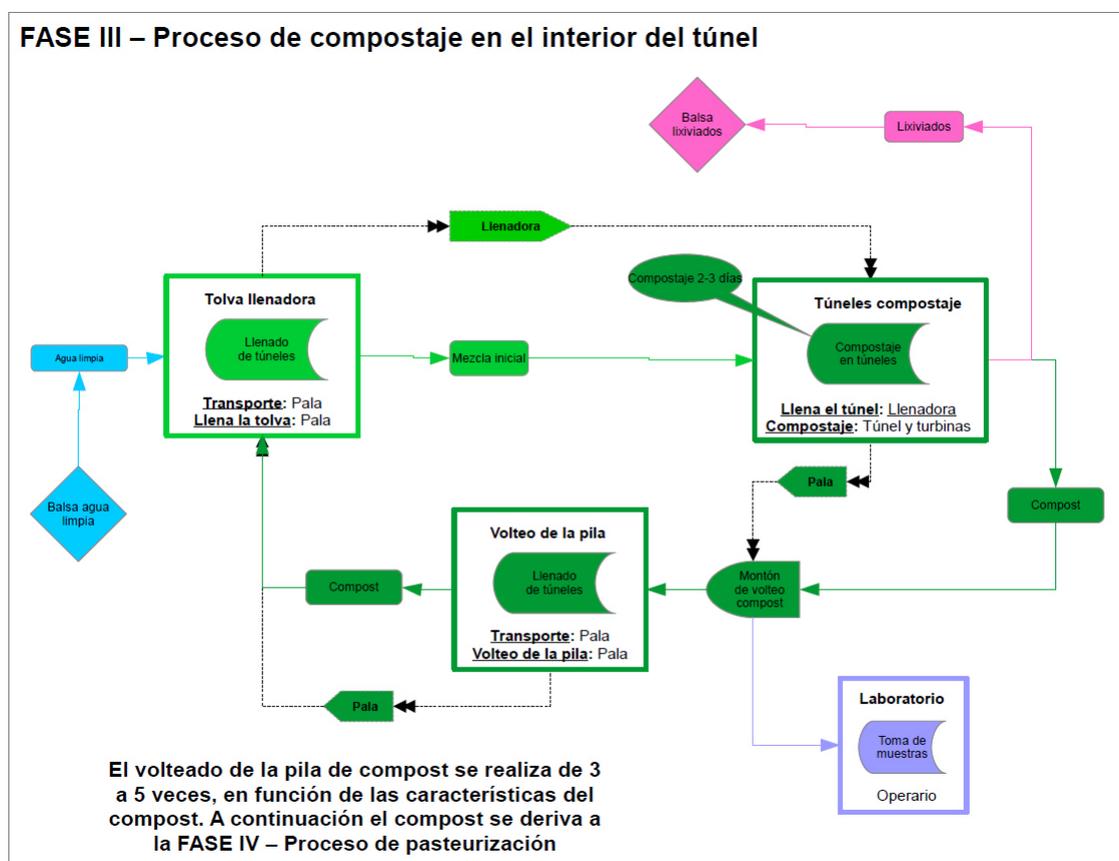


Figura 41: Diagrama de flujo Fase III – Proceso de compostaje en el interior del túnel.

16.2.5 Fase IV: Proceso de pasteurización.

Acabada la fase de compostaje, la bola se introduce en la cámara de pasteurización utilizando nuevamente una llenadora. La llenadora creará una pila en el interior de la cámara.

En este proceso no se realizará volteo de la pila, por lo que permanecerá en el interior de la cámara durante todo el proceso de pasteurización.

La duración de este proceso depende de la eliminación del amoníaco, aunque una duración de 7 días es suficiente para eliminarlo casi por completo.

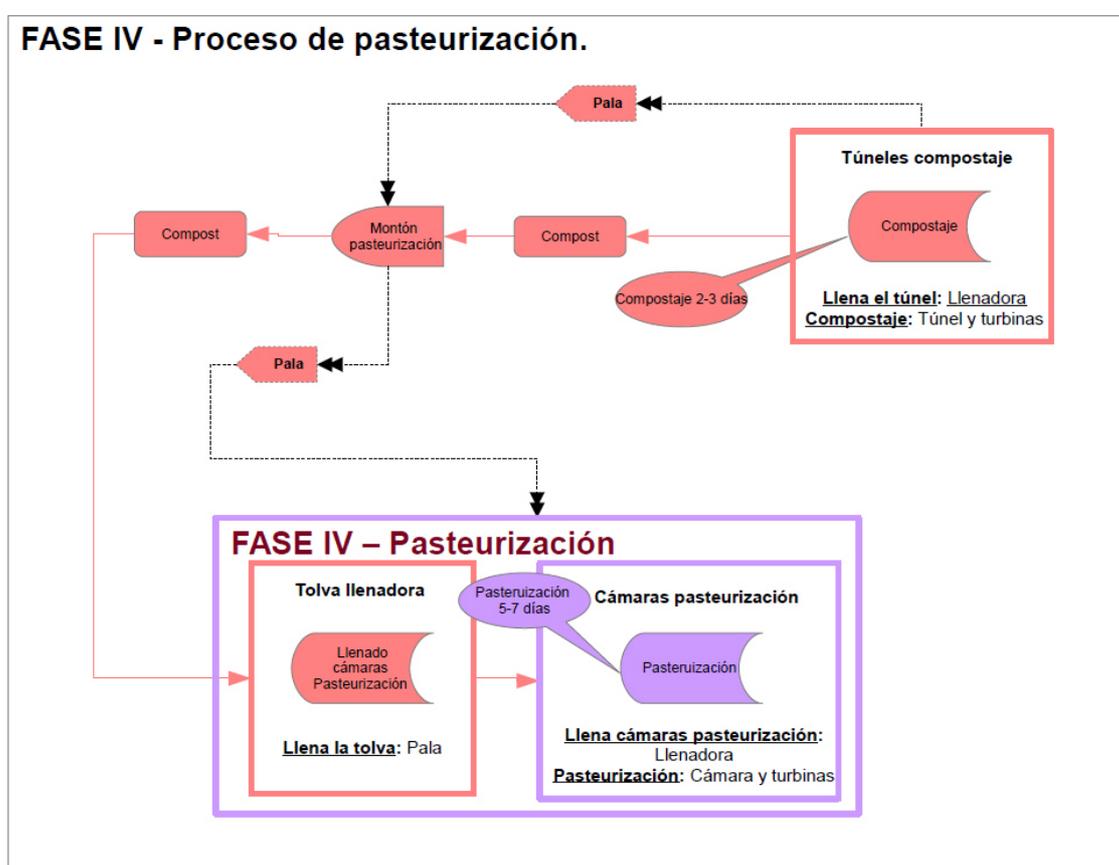


Figura 42: Diagrama de flujo Fase IV – Proceso de pasteurización.

16.2.6 Fase V: Empaquetado y transporte de los paquetes de compost a los productores y cultivadores.

Finalizada la fase de pasteurización, se procede a llevar el compost pasteurizado hasta la zona de empaquetado. El producto final se introduce en una empaquetadora, que junto con el micelio, se crearán los paquetes de compost que serán paletizados y transportados hasta las zonas de cultivo.

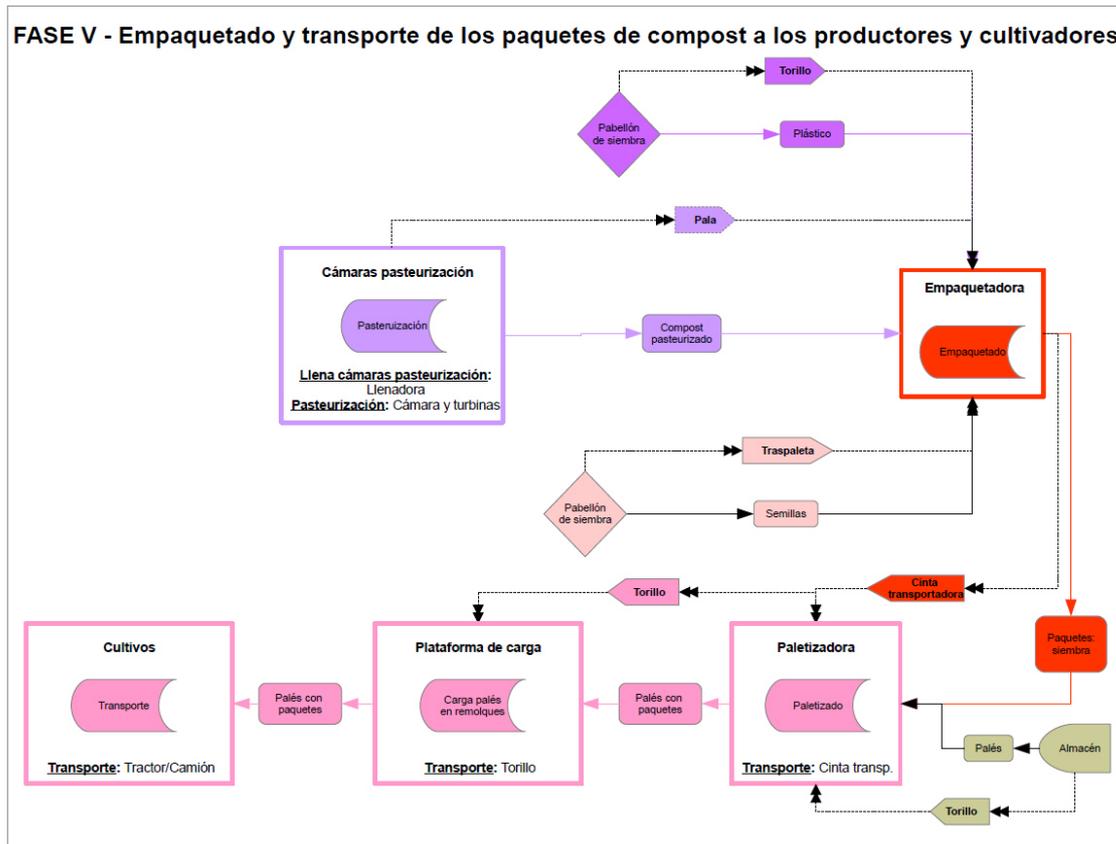


Figura 43: Diagrama de flujo Fase V – Empaquetado y transporte de los paquetes de compost.

16.2.7 Fase VI: Recogida de lixiviados.

A lo largo de todo el proceso se producen pérdidas de líquidos, conocidos como lixiviados, que deben ser recogidos y almacenados en una balsa para su final recogida.

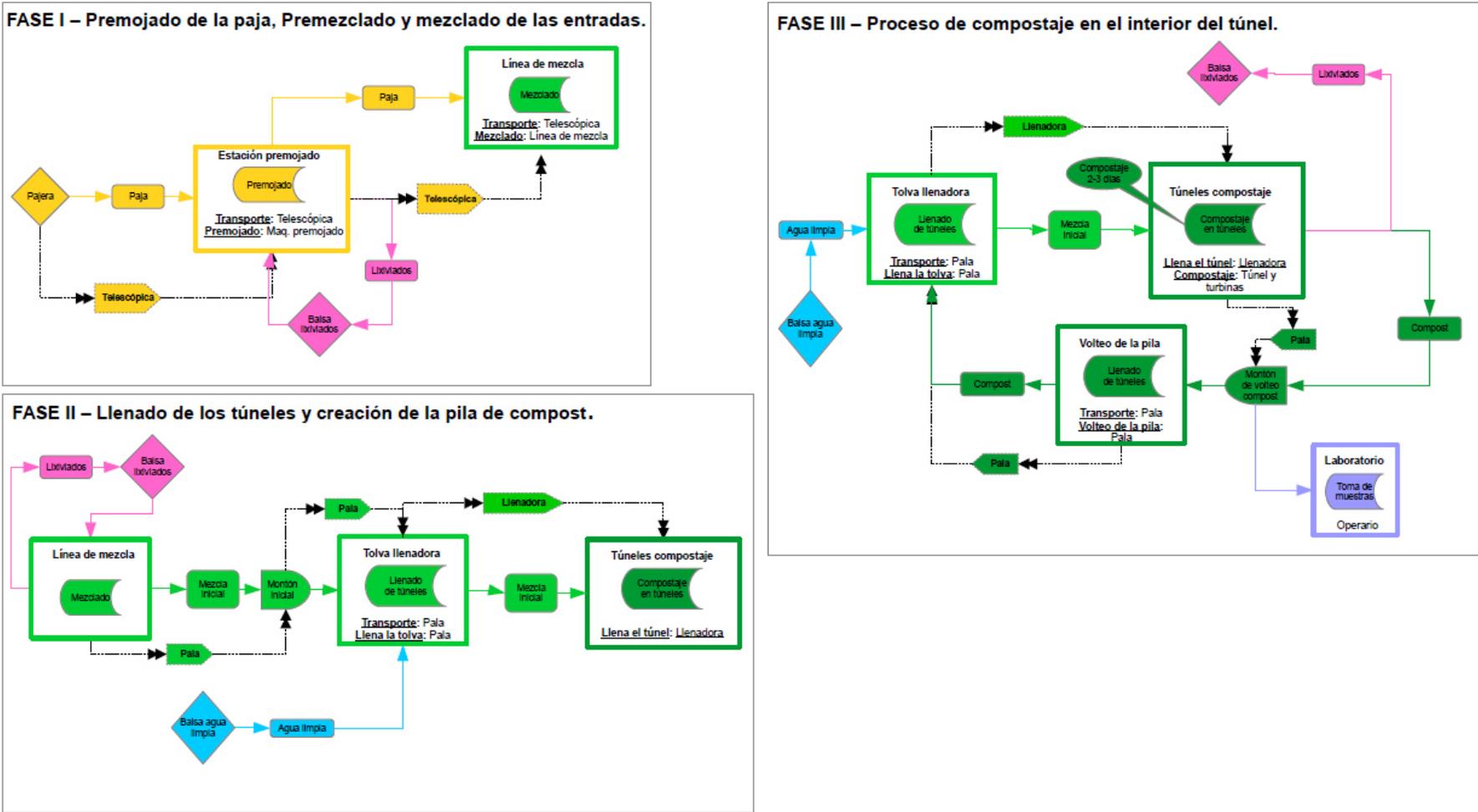


Figura 44: Diagrama de flujo Fase VI – Recogida de lixiviados.

16.2.1 Diagrama de flujo del proceso completo.

A continuación se muestra el diagrama de flujo del proceso de compostaje completo, con todas las fases claramente identificadas y los colores que identifica cada proceso del anterior.

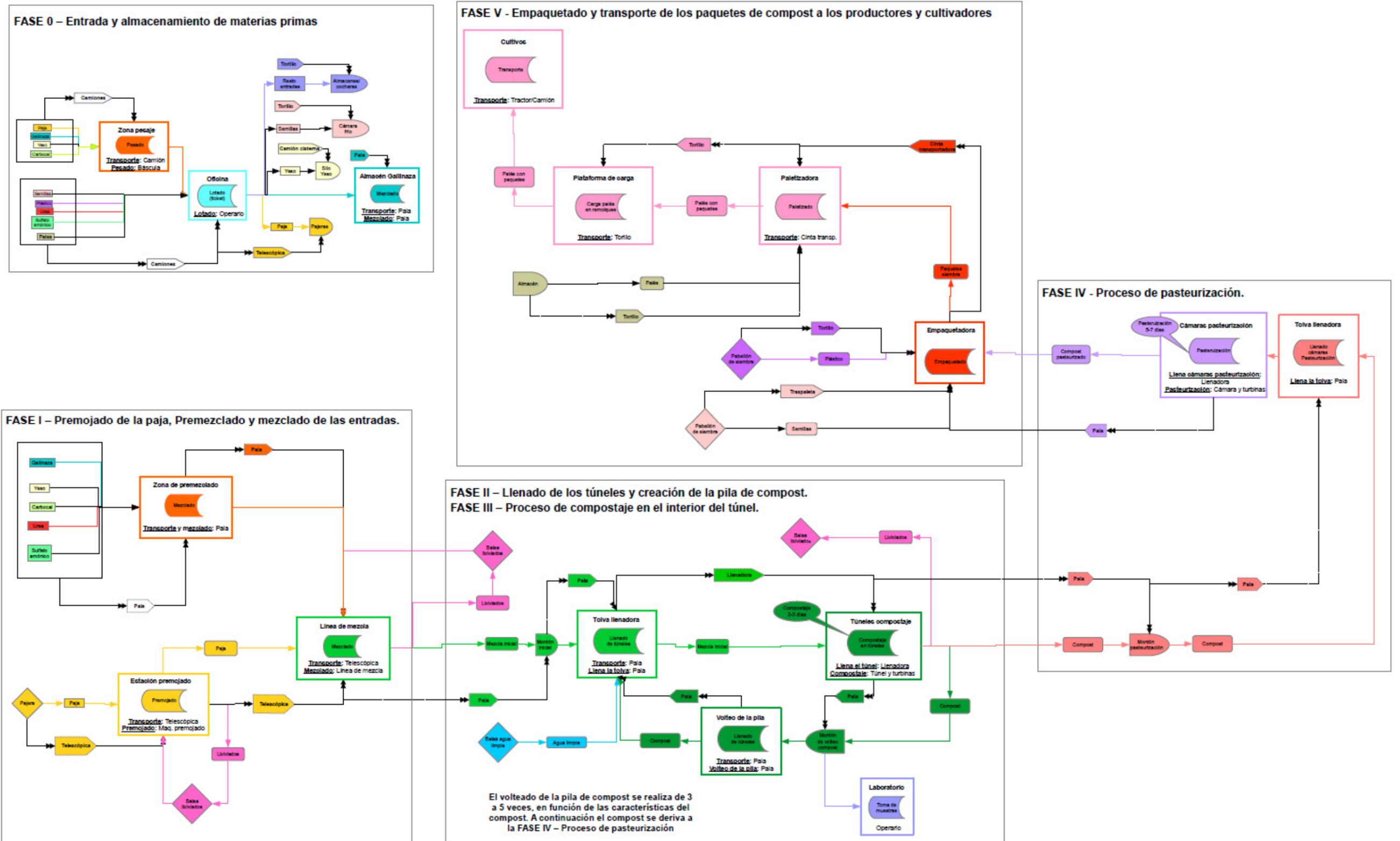


Figura 45: Diagrama de flujo total.

16.3 ANALÍTICA DE LABORATORIO DURANTE EL PROCESO DE COMPOSTAJE DE UNA BOLA DE COMPOST.

Durante todo el proceso de compostaje se realizan una serie de analíticas para el control de los productos que se utilizarán en el proceso de compostaje y de las bolas de compost en cada una de las fases. Dichas analíticas, son realizadas en laboratorio y permiten un mayor control del compost durante todo su proceso.

16.3.1 Entrada de materias primas.

A la entrada de las materias primas, se realizan una serie de ensayos en el laboratorio para comprobar las propiedades de los mismos. Para los productos químicos, se tomarán las características y propiedades proporcionadas por el fabricante.

Paja:

Humedad	12,38 %
pH	7,3
Sólidos volátiles	90,9 %
Nitrógeno	0,78 mg/kg
Carbono	58,47 mg/kg
Cenizas	19,82 mg/kg
Materia orgánica	112,18 mg/kg
Relación C/N	74,96

Tabla 20: Analítica de la paja en laboratorio.

Gallinaza:

Humedad	32,47 %
Nitrógeno	3,73 mg/kg
Carbono	46,92 mg/kg
Cenizas	19,82 mg/kg
Materia orgánica	80,18 mg/kg
Amoniaco	0,89 mg/kg
Relación C/N	12,58

Tabla 21: Analítica de la gallinaza en laboratorio.

Urea:

Apariencia	Polvo blanco
Densidad	1340 kg/m ³ ; 1,34g/cm ³
Masa molar	60,06 g/mol
Punto de fusión	405,8 K (133 °C)
Propiedades químicas	
Acidez	0.18 pK _a
Solubilidad en agua	En agua: 108 g/100 ml (20 °C) 167 g/100 ml (40 °C) 251 g/100 ml (60 °C) 400 g/100 ml (80 °C) 733 g/100 ml (100 °C)

Tabla 22: Datos proporcionados por el fabricante.

Carbonato de Calcio:

Apariencia	Polvo blanco inodoro
Densidad	2711 kg/m ³ ; 2,711 g/cm ³
Masa molar	100.0869 g/mol
Punto de fusión	1172 K (899 °C)
Punto de ebullición	1612 K (1339 °C)
Propiedades químicas	
Solubilidad en agua	0.00015 g/100 ml (25 °C)

Tabla 23: Datos proporcionados por el fabricante.

Sulfato de Calcio (Yeso):

Apariencia	Polvo blanco
Punto de fusión	100°C -150°C (Ver Notas)
Densidad	2.32 g/cm ³
Calcio	30.9 %
Sílice	5 % máx.
Humedad	30.0 % máx.
Nitrógeno	0.4 % máx.



Fósforo	0.5 % máx.
Propiedades químicas	
Solubilidad en agua	g/100 ml a 20°C: 0.2 (muy escasa) Azufre (SO ₃) 41.0 % mín.

Tabla 24: Datos proporcionados por el fabricante.

Sulfato de Amonio:

Apariencia	Sólido blanco higroscópico y cristalino
Densidad	1769 (20 °C) kg/m ³ ; 1.769 (20 °C) g/cm ³
Masa molar	132.14 g/mol
Punto de fusión	530,5 K (257 °C)
Propiedades químicas	
Solubilidad en agua	70.6 g/100 ml (0 °C)
	74.4 g/100 ml (20 °C)
	103.8 g/100 ml (100 °C)
	Insoluble en acetona, etanol y éter

Tabla 25: Datos proporcionados por el fabricante.

16.3.2 Fase II: Llenado de los túneles y creación de la pila de compost.

Antes del llenado de los túneles con la bola de compost, se realiza un ensayo en el laboratorio para determinar el proceso a seguir. En este ensayo se medirá principalmente la humedad del compost, el pH y la relación C/N. Con estos parámetros y observando el estado del compost, se decidirá sobre el proceso de compostaje, variando la ventilación del mismo y la estancia en el interior del túnel.

Humedad	62 %
pH	8,2
Nitrógeno	1,1 mg/kg
Carbono	44,7 mg/kg
Cenizas	19,7 mg/kg
Materia orgánica	81,4 mg/kg
Relación C/N	40,63
Amoniaco	71 ppm

Tabla 26: Analítica del compost en laboratorio.

16.3.3 Fase III: Proceso de compostaje en el interior del túnel.

Durante el proceso de compostaje en el interior del túnel no se realizarán analíticas del compost, ya que el proceso se desarrollará conforme a la apariencia visual: color, olor, estado de la paja en el compost, humedad...

16.3.4 Fase IV: Proceso de pasteurización.

Antes de que la bola de compost pase al siguiente proceso, la pasteurización, se realiza otra analítica cuya función es similar a la realizada antes de meter la bola en el túnel. En esta analítica se medirá principalmente el contenido en amoníaco y la humedad. Durante el proceso de pasteurización, se reducirá el contenido en amoníaco todo lo posible hasta dejarlo en una cantidad mínima.

Humedad relativa	75,65%
pH	8,09
Nitrógeno	1,99 mg/kg
Carbono	34,23 mg/kg
Cenizas	22,3 mg/kg
Materia Orgánica	77,7 mg/kg
Amonio	0,61 mg/kg
Relación C/N	17,2
Amoníaco	400 ppm

Tabla 27: Analítica del compost en laboratorio.

16.3.5 Fase V: Empaquetado y transporte de los paquetes de compost a los productores y cultivadores.

Una vez que el compost se ha pasteurizado, se procede a realizar una analítica final en el laboratorio para comprobar la reducción de amoníaco antes de que sea empaquetado. En este análisis se comprobará también el pH y el contenido de humedad, que suele estar entre el 60% y 70%.

Humedad relativa	68,2 %
pH	7,61
Nitrógeno	2,84 mg/kg
Carbono	41.46 mg/kg



Cenizas	26,5 mg/kg
Materia Orgánica	73,5 mg/kg
Amonio	0,06 mg/kg
Relación C/N	14,6
Amoniaco	Primera medida: 30 ppm Segunda medida: 18 ppm

Tabla 28: Analítica del compost en laboratorio.

16.3.6 Fase VI: Recogida de lixiviados.

Como se ha mencionado anteriormente, durante el proceso de compostaje se crean residuos líquido en forma de lixiviados. Es necesario llevar un control del contenido de los lixiviados para evitar daños medioambientales y en caso de contener algún residuo potencialmente peligroso, tratarlo adecuadamente. Por ello, el análisis debe realizarse periódicamente y mediante una empresa especializada en ello.

Ratio de adsorción de Sodio	11,88
pH	4,9
Conductividad eléctrica	33,55 dS/m
Cloro (Cl⁻)	295 meq/l
HCO₃	695 meq/l
Sodio (Na⁺)	225 meq/l
Calcio (Ca²⁺)	416 meq/l
Magnesio (Mg²⁺)	301 meq/l
Sólidos secos	58400 mg/kg
Sólidos en suspensión	9026 mg/kg
Cromo (Cr³⁺)	0,74 mg/kg
Cadmio (Cd²⁺)	1,24 mg/kg
Plomo (Pb²⁺)	4,28 mg/kg
Níquel (Ni²⁺)	4,43 mg/kg

Tabla 29: Analítica de lixiviados en laboratorio químico.

16.4 OTROS RECURSOS NECESARIOS PARA EL PROCESO DE COMPOSTAJE

16.4.1 Área

Los sistemas de compostaje cerrados requieren generalmente 0,50 m² por tonelada de materia prima por año (McDougall et al., 2002). Teniendo en cuenta el espacio adecuado para la recepción de materia prima, almacenamiento de productos y servicios del área total es de hasta 200 m² por tonelada de materia prima por día.

16.4.2 Energía

El combustible se utiliza para la operación de volteado de las pilas, para la carga de los materiales y el transporte de los mismos entre los diferentes procesos y fases, mientras que la electricidad se consume en la operación de la maquinaria utilizada para las operaciones de pre y post-tratamiento, así como de ventilación durante el proceso de compostaje o de pasteurización.

Las necesidades totales de energía para las instalaciones de compostaje en recintos cerrados son aproximadamente de 55 kWh por tonelada de materia prima (van Haaren et al., 2009). Para los residuos sólidos urbanos las necesidades de energía son de 34,4 kWh por tonelada de materia prima (Diaz et al., 1982). Los valores medidos incluyen la energía consumida directamente dentro de las instalaciones, incluyendo una amplia pre-procesamiento antes de compostaje (por ejemplo, reducción de tamaño, cribado).

16.4.3 Agua

Aunque se produce agua durante la descomposición de sólidos volátiles, el calor y el flujo de aire generado durante el compostaje se evaporan cantidades significativas de agua y el material a compostar tiende a secarse rápidamente. Esta eliminación de agua juega un papel central en la eliminación de calor y control de temperatura. Por ello es necesario introducir la cantidad adecuada de humedad en la mezcla inicial antes de proceder con el compostaje, ya que una evaporación total del agua del compost, por debajo de los mínimos necesarios, conduciría a que el proceso de compostaje no se realice de forma correcta ya que los microorganismos morirían, no realizando sus funciones correctamente. Durante el control periódico del compost en cada uno de los volteos de la pila, se debe controlar la humedad de la pila, añadiendo más agua si fuera necesario. Un claro indicador de la falta de humedad es la presencia de bajas temperaturas en la pila de compost.



El consumo de agua durante el proceso de compostaje es de alrededor de 0,14 a 0,33 m³ por tonelada de materia prima (Cadena et al., 2009).

16.5 RESIDUOS DEL PROCESO DE COMPOSTAJE

16.5.1 Emisiones de aire

Durante el proceso de compostaje más de 100 tipos de compuestos gaseosos pueden ser emitidos (Chang et al., 2007), como es el caso del N₂O, NH₃, CH₄ o los compuestos orgánicos volátiles (COV) que junto con el CO₂ representan el 99% de las emisiones totales (Beck-Friis et al., 2001; Amlinger et al., 2008).

Las emisiones durante el proceso de compostaje no son fáciles de medir, ya que dependerán de un número de factores relacionados entre sí:

- De la naturaleza de los residuos de entrada, en particular, la cantidad de carbono orgánico en los componentes, y la naturaleza de cualquiera de los compuestos orgánicos en los residuos de entrada que puedan ser liberados conforme aumente la temperatura del material.
- De la naturaleza del proceso y de la duración del proceso completo.
- De la eficacia de los sistemas de volteado, del flujo de aire de ventilación de las pilas de compost y de la frecuencia de volteado de las pilas.
- Del control de la humedad en la materia.
- Del control de la temperatura del compost.
- De la relación C/N proporción en los materiales.
- Del control de emisiones que se disponga durante el proceso, tales como filtros que reduzcan considerablemente las emisiones durante el proceso.

El CO₂ emitido por el compostaje no se considera como una emisión de gases de efecto invernadero (Amlinger et al., 2008) ya que su índice GWP (Global-warming potential) es cero (Christensen et al., 2009).

Durante el almacenamiento de los residuos, el proceso de compostaje y cuando se termina el proceso, se liberan emisiones de N₂O. Durante el proceso de compostaje hay una pérdida total de 42 mg de N₂O-N por kg de materia seca de compost (de las cuales 26.9 mg son de N₂O).

Las emisiones de N₂O van desde 0,012 hasta 0,114 kg de N₂O-N por tonelada de masa seca básico en función del contenido en Nitrógeno en la materia prima y de las condiciones de compostaje (Hellmann et al., 1997). Posteriormente se propone

un valor de 0.101 kg de N₂O por tonelada de materia prima orgánica, mientras estiman 0.150 kg de N₂O por tonelada de residuos.

Las emisiones de amoníaco se determinan por la cantidad de iones de amonio, urea y nitrógeno. El valor del pH, la temperatura, la ventilación y la relación C/N constituyen otros factores que influyen en la creación de amoniaco. Un aumento del valor del pH, un aumento de la temperatura y una mayor ventilación producen mayores emisiones. Por otro lado, si la mezcla de compost tiene una relación de C/N elevada, se reducen considerablemente las emisiones de NH₃.

Por cada tonelada de residuo, se emiten 371 g de NH₃. Alrededor del 12% de nitrógeno total se escapa del material en forma de amoníaco, 0,53 kg por tonelada de residuo, mientras que la cifra se reduce a 0,0264 kg por tonelada de residuo (95% de reducción) cuando el aire se hace pasar a través de un biofiltro.

Durante el proceso de compostaje en todas las partes de la pila de compost se va a poder lograr unas condiciones aerobias. En dichas zonas se producen procesos anaerobios, debida a la ausencia de oxígeno, siendo fuentes potenciales de emisiones de metano (CH₄). Los procesos aerobios son reemplazados por procesos de compostaje anaerobios si el contenido de oxígeno en el compost es inferior al 5% - 7,5% (Heeres et al., 2001). Las emisiones de CH₄ a la atmósfera varían entre 816 y 1132 gr por tonelada de material a procesar (Amlinger et al., 2008). La adición de un filtro para la retención de dichas emisiones, reduciría ligeramente la cantidad de gas emitido.

El olor es un impacto significativo de las instalaciones de compostaje. Los olores son emitidos desde todas las fases del compostaje, desde las pilas de compost, pilas de maduración, almacenamiento de materias primas, almacenamiento del producto final y de los residuos de la fase de compostaje. Los compuestos que más olores desagradables generan en las instalaciones de compostaje incluyen amoníaco, sulfuro de hidrógeno, metano, etc. Estos compuestos están presentes en muchos materiales de los que se compone el compost o se forman durante el proceso a través de acciones aeróbicas o anaeróbicas. La reducción de los olores es posible evitando que procesos anaerobios aparezcan, mediante el control durante la fase de compostaje, el procesamiento de materias primas entrantes tan pronto como sea posible, la gestión del proceso correctamente o siguiendo las buenas prácticas de limpieza y desinfección de las instalaciones, pueden ayudar a controlar la formación de olores.



16.5.2 Lixiviados

Los lixiviados se producen durante todo el proceso de compostaje, desde la entrada de materias primas, hasta la salida del producto final. Las cantidades de lixiviados son variables, estando en un rango desde 0 a 0,49 m³ por tonelada de materia prima (Komilis and Ham, 2004), dependiendo del proceso llevado a cabo y de los materiales que se utilicen. Para compostajes en pilas con volteo se pueden lograr 0.030 m³ por tonelada de materia orgánica (Krogmann and Woyczehowski, 2000).

16.5.3 Residuos

Los residuos sólidos de las instalaciones de compostaje incluyen principalmente materiales no compostables, inertes y no ferrosos, extraídos durante las etapas de pre-tratamiento y post-procesamiento, que se eliminan finalmente en vertederos, creándose hasta 0,4 toneladas por tonelada de materia prima.

16.6 DIFICULTADES EN EL COMPOSTAJE DE LA PAJA

La paja es un material muy bueno para el compostaje con materiales ricos en nitrógeno y con alto grado de humedad, tales como estiércol y lodos municipales, ya que sirve como un agente de carga y fuente de carbono. Por otro lado, el compostaje únicamente con paja plantea grandes problemas.

La paja puede tardar años en descomponerse de forma natural. Incluso después de estar sometida al calor y la humedad acumulada en una pila, la degradación de la paja es muy baja.

Las dos razones principales por las que la velocidad de descomposición es lenta son su capacidad para perder agua en lugar de absorberla y su inicial alta relación C/N. Ambas propiedades son en gran parte debido al alto contenido de lignocelulosa. La lignina y la celulosa son materiales que forman las paredes celulares leñosas de las plantas y una fuerte unión en las paredes. Por ello, estos materiales no se descomponen con facilidad.

Aunque muchas bacterias generan calor, los hongos y las bacterias llamadas actinomicetos son más decisivo en la descomposición de la lignina.

Sólo después de estos microorganismos se vuelven activos comienza la paja para cambiar la apariencia. Eventualmente, la proporción de materia orgánica a sólidos totales disminuye de forma constante.

Realizar el compostaje de toda la cantidad de paja de un campo completo plantea un reto a la hora de manejar el material. La forma más eficiente para recoger la paja es el uso de una gran rueda de Rake para formar hileras, y luego de empujar las hileras en una gran hilera o pila con un rastrillo. Sin embargo, las pilas presentan grandes dificultades en la velocidad de compostaje. La paja larga posee una mala absorción de la humedad debido al tamaño de las partículas y el exceso de espacio de aire libre.



Figura 46: Rueda de Rake.

La mejor solución es cortar o moler la paja para reducir el tamaño de las partículas. Con ello se reduce el tamaño de la paja facilitando de ese modo el proceso de compostaje, ya que la absorción de humedad es mayor en paja corta que en paja larga.

La reducción de tamaño de la paja es muy importante, ya que cuanto mayor sea la reducción el compost resultante será de mayor calidad. Este sistema tiene varias ventajas. La paja descompuesta en partículas más pequeñas, permite exponer a las superficies interiores, obteniendo un material que absorbe mucho mejor el agua.

16.7 LOS COSTES ECONÓMICOS DEL COMPOSTAJE EN PILAS.

Las pilas son menos costosas que otras tecnologías de compostaje, como el compostaje en sistemas cerrados (van Haaren, 2009). Sin embargo, es más difícil de



controlar las emisiones y olores indeseables. Por esta razón, y también para evitar la atracción de pájaros e insectos, la materia prima generalmente no incluye residuos alimentarios. Sin embargo, pequeñas porciones de desechos de alimentos se encuentran en los residuos de jardinería o agricultura, debido a la inadecuada separación y tratamiento previo al compostaje. Generalmente, los olores liberados por estas impurezas causan grandes problemas con la población cercana a algunas instalaciones de compostaje en pilas (van Haaren, 2009).

En la práctica de compostaje en pilas, el oxígeno no puede penetrar a través del cuerpo de la pila. Por lo tanto, algunas reacciones anaeróbica puede tener lugar, dando lugar a la formación de metano y de olores muy desagradables. Sin embargo, con la práctica del volteo de las pilas de compost, la cantidad de metano generado en hileras es muy pequeña ya que permite la recirculación del aire a zonas donde el acceso sea muy difícil, (Komilis and Ham, 2004). Como resultado, toda la pila de compost tiene una cantidad de oxígeno adecuada y tengan lugar únicamente los procesos aerobios deseados.

El compostaje en pilas es una práctica muy común en la actualidad debido a la simplicidad del proceso y a sus bajos costes económicos. Sin embargo, algunas plantas son más sofisticados que otros y por lo tanto los costes de inversión varían considerablemente.

La preparación del emplazamiento, que incluye la pavimentación, es una parte importante de la inversión total, pero no es una necesidad para una planta de compostaje. El coste medio de pavimentación es de 132.000 € por hectárea para una planta de compostaje de 100 Tm/día (Komilis and Ham, 2004).

La planta de compostaje estudiada tiene una extensión de 5.5 hectáreas, lo que supone un coste de pavimentación de 735.000 €, equivalente a una tercera parte del costo total. Este coste es necesario ya que la pavimentación y la contención de efluentes, reducen de forma considerable el impacto ambiental de la instalación, evitando la contaminación del suelo por los productos resultantes o lixiviados, altamente contaminantes. A continuación, se muestran las diferentes categorías de costes adaptados a una instalación de 110 Tm/día (o aproximadamente 40,000 toneladas métricas por año).

Categoría	Coste capital
Pavimento	809.000 €



Nivelación	61.000 €
Vallado	16.000 €
Construcción	405.000 €
Sistema de lixiviados	81.000 €
Diseño e ingeniería	405.000 €
Trituradora	202.000 €
Volteadora	202.000 €
Monitorización	162.000 €
Línea de carga de túneles	146.000 €
TOTAL	2.489.000 €

Tabla 30: Inversión media de un sistema de compostaje (Komilis and Ham, 2004).

En el costo total de una planta de 40.000 Tm/año se asumió que la vida de los equipos e instalaciones es de 15 años y a un interés medio del 6%. Esto dio lugar a un flujo de efectivo total de 4.000.000 €, dando como resultado un coste por tonelada de compost de 6,6 €.

Los costes de operación y mantenimiento suman aproximadamente 348.000 € al año, con un coste de aproximadamente 8,3 €/Tm. Los trabajadores, incluidos los gastos generales, y el arrendamiento son de los mayores costos de operación con cantidades de 195.000 € y 81.000 €, respectivamente. A continuación se muestran los costos de operación y mantenimiento de este tipo de instalaciones.

Categoría	Coste capital
Operarios	138.000 €
Gastos generales	57.000 €
Volteadora	20.000 €
Trituradora	40.000 €
Monitorización	4.000 €
Línea de carga	4.000 €
Edificación	4.000 €
Renta	81.000 €
TOTAL	348.000€

Tabla 31: Coste medio de mantenimiento de un sistema de compostaje (Komilis and Ham, 2004).



A todo esto, deben sumarse costes de suministro como agua, luz y gasoil, que dependerá en gran medida de las dimensiones de la planta, de las máquinas utilizadas y sobre todo de la carga de trabajo que soporte la planta. Los costes para una planta que opera 40.000 Tm/año de compost, no serán los mismos que para plantas más pequeñas. También dependerá de los sistemas de ventilación de que dispongan, ya que plantas con sistemas de aireación de las pilas de compost variará con respecto a plantas que utilicen el sistema tradicional de pilas.

17 REFERENCIAS.

Amlinger F., Peyr S., Cuhls C. 2008. Greenhouse gas emissions from composting and mechanical biological treatment. *Waste Management*; Res. 26:47–60.

Andersson-Skold Y., Grennfelt P., Pleijel K. 1992. Photochemical ozone creation potentials: a study of different concepts. *J. Air Waste Management*; Ass. 42:1152-1158.

Andrade R.L. 1996. Taller de Producción de Hongos Comestibles.

Ayres R.U., Martinàs K., Ayres L.W. 1996. Eco-thermodynamics. Exergy and life cycle analysis. Working paper (96/04/EPS), INSEAD, Fontainebleau, France.

Barton J.R. 1996. Life cycle assessment for waste management. *Waste Management*; 16:35-50.

Beck-Friis B., Smårs S., Jönsson H., Kirchmann H. 2001. Gaseous emissions of carbon dioxide, ammonia, nitrous oxide from organic household waste in a compost reactor under different temperature regimes; *J. Agric. Eng. Res.* 78:423–430.

Bidlingmaier, W. 1996. Odour emission from composting plants. In: De Bertoldi M., Sequi P., Lemmes B. and Papi T. (Eds.). *The Science of Composting*. Vol. I. Blackie Academic and Professional, London. 71-79 p.

Brouillete M., Trepanier L., Gallichand J. and Beauchamp G. 1996. Composting paper mill deinking sludge with forced aeration. *Canadian Agricultural Engineering* 38 (2): 115-122.

Burford C. 1994. The microbiology of composting, p.10-19. In: A. Lamont (ed.) *Down to Earth Composting*. Institute of Waste Management, Northampton. United Kingdom.

Burgess A.A., Brennan D.J. 2001. Application of life cycle assessment to chemical processes. *Chemical engineering Science* 56: 2589-2604.

Cadena E., Colón J., Sánchez A., Font A., Artola A. 2009. A methodology to determine gaseous emissions in a composting plant. *Waste Manage*; 29: 2799–807.

Callac P., Billette C., Imbernon M., Kerrigan R.W. 1993. "Morphological, genetic, and interfertility analyses reveal a novel, tetrasporic variety of *Agaricus*

Bisporus from the Sonoran Desert of California". *Mycologia* 85 (5): 835–851. doi:10.2307/3760617. JSTOR 3760617.

Callac P., Imbernon M., Guinberteau J., Pirobe L., Granit S., Olivier J.M., Theochari I. 2000. "Discovery of a wild Mediterranean population of *Agaricus Bisporus*, and its usefulness for breeding work". *Mushroom Science* 15: 245–252.

Cappelli, A. 1984. *Fungi Europaei: Agaricus*. Saronno, Italy: Giovanna Biella. pp. 123–25

Carluccio A. 2003. *The Complete Mushroom Book*. Quadrille. pp. 21–22. ISBN 1-84400-040-0.

Castaldi P., Alberti G., Merella R., Melis P. 2005. Study of the organic matter evolution during municipal solid waste composting aimed at identifying suitable parameters for the evaluation of compost maturity. *Waste Manag.*, 25: 209-213.

Chang E.H., Chung R.S., Tsai Y.H. 2007. Effect of different application rates of organic fertilizer on soil enzyme activity and microbial population. *Soil Sci. Plant Nutr.* 53: 132-140.

Christensen T.H., Gentil E., Boldrin A., Larsen A.W., Weidema B.P., Hauschild M. 2009. C balance, carbon dioxide emissions and global warming potentials in LCA-modeling of waste management systems. *Waste Manage. Res.* 27:707–715.

CML LCA Operational Guide to ISO Standards. May 2001. CML Leiden University

Cooke M.C. 1871. *Handbook of British Fungi* 1. London: Macmillan and Co. p. 138.

Cooke M.C. (Mordecai Cubitt). 1825. *Handbook of British fungi: with full descriptions of all the species, and illustrations of the genera*.

Cooperband, L. 2002. *The Art and Science of Composting*. Center for Integrated Systems, University of Wisconsin.

Crawford J., Smith P. 1985. *Landfill Technology*. Ed. Butter Worths. England.

Cronje A., Turner C., Williams A. 2003. Composting under controlled conditions. *Environ. Technol.* 24 (10): 1221-1234.

De Bertoldi M., Vallini G., Pera A. 1985. Technological Aspects of composting including Modelling and Microbiology. En: J.K.R. Gasser (Ed.). *Composting of Agricultural and other wastes*, pp: 27-40. Elsevier Applied Science Publishers, Bruselas.

Diaz L.F., Savage G.M., Eggerth L.L., Golueke C.G. 1993. *Composting and recycling municipal solid waste*. Florida: Lewis Publ.

Diaz L.F., Savage G., Golueke G. 1982. *Resource Recovery from Municipal Solid Wastes: Volume 1, Primary Processing*, CRC Press, Inc., Boca Raton.



Díaz M.J., Jiménez L., Cabrera F., De Bertoldi M. 2004. Using a second order polynomials model to determine the optimum vinasse/grape marc ratio for in vessel composting. *Compost Sci. Util.*, 12 (3): 273-279.

Ekinci K., Keener H.M., Elwell D.L. 2004. Effects of aeration strategies on the composting process: Part I. Experimental studies. *Trans. ASAE*, 47 (5): 1697-1708.

Finstein M.S., Morris M.L. 1974. Microbiology of municipal solid waste composting. *Advances in Applied Microbiology*. 19:113-151.

Fitzpatrick, G.E., Worden, E.C., Vendrame, W.A. 2005. Historical development of composting technology during the 20th century. *Horttechnology*, 15 (1): 48-51.

Flowerdew B. 1993. *El jardín orgánico. Una guía práctica para tener éxito en la horticultura orgánica.*

García Rollán M. (1998). *Cultivo de Setas y Trufas*. 3a ed. Mundi-Prensa, Madrid.

Keshri G., Challen M., Elliott T., Magan N. 2002. Differentiation of *Agaricus* species and other homobasidiomycetes based on volatile production patterns using an electronic nose system.

Genders R. 1969a. *Mushroom Growing for Everyone*. London: Faber, p. 121.

Genders R. 1969b. *Mushroom Growing for Everyone*. London: Faber, p. 18.

Genders R. 1969c. *Mushroom Growing for Everyone*. London: Faber, p. 19.

Sharma G., Campbell A. 2003. *Life Cycle Inventory and Life Cycle Assessment for Windrow Composting Systems*. T.U.o.N.S.W.a.N.D.o.E.a. Recycled Organics Unit and Conservation, Editors.

Golueke C.G., Diaz, L.F. 1987. Composting and the Limiting Factors Principle. *Biocycle*, 28 (4): 22-25.

Gotass H.B. 1956. *Composting – Sanitary Disposal and Reclamation of Organic Wastes*. World Health Organisation Monograph Series nº 31.

Gotass Harold B. 1956. *Composting – Sanitary Disposal and Reclamation of Organic Wastes*. World Health Organisation Monograph Series nº 31.

Granatstein D., Grebus M., Rynk B. 2002. *Compost Teas and Liquid Humus; Compost Contaminants: Toxins, Pathogens and Weed Seeds; Obstacles to Composting: Severe Weather and Pests; Enviromental Impacts and Regulations.*

Grünert H., Grünert R., VV.AA. (1984). *Guías de Naturaleza Blume: Setas (t. original: "Pilze")*. Barcelona: Blume. p. 62. ISBN 84-87535-11-9.

Guinée J.B, Gorrée M., Heijungs R, Huppes G., Kleijn R., de Koning A., van Oers L., Wegener Sleeswijk A., Suh S., Udo de Haes H.A., de Bruijn H., van Duin R., Huijbregts M.A.J. 2001. *Life cycle assessment: an operational guide to the ISO standards*, Centre of Environmental Science, CML, Leiden University, Leiden.

Haaren, R.v. 2009. Large scale aerobic composting of source separated organic wastes: A comparative study of environmental impacts, costs, and contextual effects, in *Earth and Environmental Engineering*. Columbia.

Haug R.T. 1993. *The Practical Handbook of Compost Engineering*. Lewis Publishers. Boca Raton. Florida.

Hedegaard M., Krüger I. 1996. Composting of agricultural wastes in Denmark in respect of potential, industrial process technology and environmental considerations. En: De Bertoldi M., Sequi P., Lemmes B., Papi, T. (Eds.). *The Science of Composting*, Vol. I, pp. 691-697. Blackie Academic & Professional, London.

Heeres E., J.G. Bokhorst, C.J. Koopmans. 2001. Compost and manure: a source of value. p. 101-102. In 11th Nitrogen workshop. Reims, France. 9-12 september 2001.

Hellmann B., Zelles L., Palojarv, A., Bai, Q. 1997. Emission of climate-relevant trace gases and succession of microbial communities during open-windrow composting. *Appl. Microbiol.* 63, 1011-1018.

Helynen S. 2004. Overview of European Policies and Directives aimed at promoting energy from wood biomass Future Issues for Forest Industries in Europe, 28 April - 1 May, Dublin, Ireland.

Hernández J.M. 1977. El champiñón. Hoja divulgadora Núm. 21-22-67 HD. Ministerio de Agricultura. Madrid. 28 pp.

Hoitink H.A.J., Tseng D.Y., Chalmers J.J., Tuovinen O.H. 1995. Characterization of a Bench-Scale System for Studying the Biodegradation of Organic Solid Wastes. *Biotechnol. Progress*, 11(4), 443-51.

Holgado A. 1988. Columela, L.J.M. -De los trabajos de campo. Ministerio de Agricultura Pesca y Alimentación. Ed. Siglo XXI de España, Madrid.

Hudson H.J. 1986. *Fungal Biology*. Edward Arnold, London.

Huijbregts M. 1999. Lyfe-cycle impact assessment of acidifying and eutrophying air pollutants. Calculation of equivalency factors with RAINS-LCA.

Imbach E.J. 1946. "Pilzflora des Kantons Luzern und der angrenzen Innerschweiz". *Mitteilungen der naturforschenden Gesellschaft Luzern* (in German) 15: 5-85.

Ryckeboer J., Mergaert J., Vaes K., Klammer S., De clerq D., Coosemans J., Insam H., Swings J. 2003. A survey of bacteria and fungi occurring during composting and self-heating processes.

Jeris J.S., Regan R.W. 1973. Controlling Environmental Parameters for Optimum Composting. Part II, *Compost Sci.* 14 (March-April): 8-15.



Jhorar B.S., Phogat, V., Malik E. 1991. Kinetics of composting rice straw with glue waste at different C/N ratios in a semiarid environment. *Arid Soil Rest. Rehabil.* 5: 297-306.

Journal of Composting and Recycling, July 1998, p.18, 61, 62; and January 1998, p.20.

Keshri G., Challen M., Elliott T., Magan N. 2002. Differentiation of Agaricusspecies and other homobasidiomycetes based on volatile production patterns using an electronic nose system. *Mycol. Res.* 107 (5): 609–613.

Kiehl F.J. 1985. *Fertilizantes orgânicos*. Editora Agronômica Ceres Ltda, São Paulo.

Papadimitriu K. 2002. *ORBIT Bioprocessing of Solid waste and sludge Vol 2 No.1*.

Kley D., Kleinmann M., Sanderman H., Krupa S. 1999. Photochemical oxidant: state of science. *Environmental Pollution* 100: 19-42.

Komilis D., Ham R. 2004. Life-cycle inventory of municipal solid waste and yard waste windrow composting in the United States. *J. Environ. Eng.* 130 (11), 1390–1400.

Körner I., Braukmeier J., Herrenklage J., Leikam K., Ritzkowski M., Schlegelmilch M., Stegmann R. 2003. Investigation and optimization of composting processes-test systems and practical examples. *Waste Manag.*, 23: 17–26

Krogmann U., Woyczehowski H. 2000. Selected Characteristics of Leachate, Condensate and Runoff Released during Composting of Biogenic Waste. *Waste Manage. Res.* Volume 18, No. 3, 235-248.

Kulcu R., Yaldiz O. 2004. Determination of aeration rate and kinetics of composting some agricultural wastes. *Biores. Technol.*, 93 (1): 49-57.

Lange J.E. 1926. "Studies in the agarics of Denmark. Part VI. *Psalliota, Russula*". *Dansk botanisk Arkiv* 4 (12): 1–52.

Lange, J. E. 1946. *Agaricus Bisporus*.

Leake, J.R. 2005. «Plants parasitic on fungi: unearthing the fungi in myco-heterotrophs and debunking the 'saprophytic' plant myth». *Mycologist* (19). pp. 113-122

Liang C., Das K.C., McClendon R.W. 2003. The influence of temperature and moisture contents regimes on the aerobic microbial activity of a biosolids composting blend. *Biores. Technol.*, 86 131–137.

Madejón E., Díaz M.J., López R., Cabrera F. 2001. Co-composting of sugarbeet vinasse: Influence of the organic matter nature of the bulking agents used. *Biores. Technol.*, 76: 275-278.

Madejón E., Díaz M.J., López R., Cabrera F. 2002. New approaches to establish optimum moisture content for compostable materials. *Biores. Technol.*, 85: 73-78.

McDougall F., Thomas B., Dryer, A. (2002) Life Cycle Assessment for sustainable solid waste management -an introduction. *Wastes Management*, May 2002, pp. 43-45.

McKee D.J. 1994. *Tropospheric ozone: Human health and agricultural impacts*. Lewis Publishers, Boca Raton, FL.

Michel F.C., Pecchia J.A., Rigot J. 2004. Mass and nutrient losses during the composting of dairy manure amended with sawdust or straw. *Compost Sci. Util.*, 12 (4): 323-334.

Miettinen P., Hamalainen R.P. 1997. How to benefit from decision analysis in environmental life cycleassessment (LCA). *European J. Operational Research* 102: 279-294.

Miyatake F., Iwabuchi K, 2006. Effect of compost temperature on oxygen uptake rate, specific growth rate and enzymatic activity of microorganisms in dairy cattle manure. *Biores. Technol.*, 97: 961-965.

Nakasaka K., Nag K. Karita S. 2005. Microbial succession associated with organic matter decomposition during thermophilic composting of organic waste. *Waste Manag. Res.* 23 (1): 48-56.

Nash J., Stoughton M.D., 1994. Learning to live with life cycle assessment. *Environmental Scienceand Technology* 28: 236A-237A.

Pacioni G. 1995. *Cultivo del Champiñón*. De Vecchi, Barcelona.

Parr J.F., D. Colacicco. 1987. Organic materials as alternative nutrient sources. p. 81-99. In: *Energy in Plant Nutrition and Pest Control*, Z.R. Helsel (ed.) Elsevier Science Publishers, Amsterdam.

Parr J.F., G.B. Willson. 1980. Recycling organic wastes to improve soil productivity. *HortScience* 15, 2: 162-166.

Parr J.F., S.B. Hornick. 1992. Utilization of municipal wastes. p. 545-559. In: *Soil Microbial Ecology: Applications in Agricultural and Environmental Management*. F.B. Metting (ed.) Marcel Dekker, Inc., New York, U.S.A.

Parr J.F., G.B. Willson R.L. Chaney L.J. Sikora, C.F. Tester. 1978. Effect of certain chemical and physical factors on the composting process and product quality. In: *Proceedings of the National Conference on Design of Municipal Sludge Compost Facilities*. Hazardous Materials Control Research Institute. Silver Spring, Maryland, U.S.A., p. 130-137.

Poincelet R.P. 1977. The biochemistry of composting, p.39 in: *Composting of Municipal Sludges and Wastes*. Proceedings of the National Conference, Rockville.



Polprasert, C. 1989. *Organic Waste Recycling*. John Wiley & Sons Ltd. Chichester, Reino Unido.

Ryckeboer J., Megaert J., Coosemans J., Deprins K., Swings J. 2003. Microbiological aspects of biowaste during composting in a monitored compost bin. – *J. Appl. Microbiol.*, 94 (1): 127-137.

Rynk R. 1992. Editor, *On-Farm Composting Handbook*. Northeast Regional Agricultural Engineering Service (NRAES-54), Cooperative Extension Service, Cornell University, Ithaca, New York, U.S.A.

Sánchez-Monedero M.A., Roig A., Paredes C., Bernal M.P. 2001. Nitrogen transformation during organic waste composting by the Rutgers system and its effects on pH, EC and maturity of the composting mixtures. *Biores. Technol.*, 78 (3): 301-308.

Schäffer J, Møller FH. 1939. "Beitrag zur Psalliota Forschung". *Annales Mycologici* (in German) 36 (1): 64–82.

Schulze K.L. 1962. Continuous Thermophilic Composting. *Appl. Microbiol.*, 10: 108-122.

SETAC. 1993. *Guidelines for Life-Cycle Assessment: A code of Practice*, Society of Environmental Toxicology and Chemistry. Brussels, Belgium.

Singh C.P., Amberger A. 1990. Humic substances in straw compost with rock phosphate. *Biol. Wastes*, 31: 165-174.

Spencer D.M. 1985. "The mushroom—its history and importance". In Flegg PB, Spencer DM, Wood DA. *The Biology and Technology of the Cultivated Mushroom*. New York: John Wiley and Sons. pp. 1–8. ISBN 0-471-90435-X.

Stofella P., Kahn B. 2001. *Compost Utilization in Horticultural Cropping Systems*. CRC Press. Boca Raton, FL.

Suler D.J., Finstein S. 1977. Effect of Temperature, Aeration, and Moisture on CO₂ Formation in Bench-Scale, continuously Thermophilic Composting of Solid Waste. *Appl. Environ. Microbiol.* 33 (2): 345-350.

Sundberg C., Smars S., Jonsson H. 2004. Low pH as an inhibiting factor in the transition from mesophilic to thermophilic phase in composting. *Biores. Technol.*, 95 (2): 145-150.

Tchobanoglous G., Theisen H., Vigil, S. 1994. "Integrated solid waste management". Vol. II. pp. 774-775.

Tomati U., Madejon E., Galli E. 2000. Evolution of humic acid molecular weight as an index of compost stability. *Compost Sci. Util.*, 8 (2): 108-115.

Toovey F.W. 1976. *Cultivo de Champiñón*. Acribia, Zaragoza.

U.S Environmental Protection Agency (EPA), E., Inventory of U.S Greenhouse gas emissions and sinks 1990-2007.

Udo de Haes H.A. 1993. Applications of life cycle assessment: Expectations, drawbacks and perspectives. *J. Cleaner Production* 1:131-137.

Udo de Haes, H.A., Jolliet O., Finnveden G., Hauschild M., Krewitt W., Mueller-Wenk R. 1999. Best available practice regarding impact categories and category indicators in life cycle impact assessment

van Haaren R., 2009. Large Scale Aerobic Composting of Source Separated Organic Wastes: A Comparative Study of Environmental Impacts, Costs, and Contextual Effects. MS Thesis, Columbia University, Unpublished Results

Webster J. 1980 Introduction to Fungi. 2^oed. University Press, Cambridge.

Weidema B.P., Lindeijer E. 2001. Physical impacts of land use in product life cycle assessment.

Willison G.B., Parr J.F., Epstein E., Marsh P.B., Chaney R.L., Colacicco D., Burge W.D., Sikora L.J., Tester C.F., Hornick S.B. 1980. Manual for Composting Sewage Sludge by the Beltsville Aerated Pile Method. EPA-600/8-80-022. U.S. Government Printing Office, Washington, D.C., U.S.A.

Willison G.B. 1989. Combining raw materials for composting. *BioCycle* 30,8: 82-85.

Zeitlmayr L. 1976. Wild Mushrooms:An Illustrated Handbook. Garden City Press, Hertfordshire. pp. 82-83. ISBN 0-584-10324-7.

Zhu N.W. 2006. Composting of high moisture content swine manure with corncob in a pilot-scale aerated static bin system. *Biores. Technol.* 97 (15): 1870-1875.

Zucconi F., De Bertoldi M. 1987. Specifications for solid waste compost. *Biocycle* 28 (5/6): 56-61.

18 BIBLIOGRAFÍA.

Mireno Casco J., Moral Herrero R. 2007. Compostaje.

Vedder P.J.C. 1986. Cultivo moderno del champiñón. Ed. Mundi-Prensa. Madrid. 374 pp.

Bonet J.M. 1986. El cultivo del champiñón. *El Campo.*, 102: pág. 48-54.

Normas Técnicas de producción Integrada del Champiñón. Julio 2009. Consejería de Agricultura del Gobierno de la Rioja.

Chen L., de Haro Marti M., Moore A., Falen C. 2011. The Composting Process, university of IDAHO.



Dimitris K., Robert K. Ham P.I. 2000. Life Cycle Inventory and Cost Model for Mixed Municipal and Yard Waste Composting.

José M Álvarez de la Puente. Manual del compostaje para agricultura ecológica. Publicación de la Junta de Andalucía.

Recycled Organics Unit, The University of New South Wales. 2006. Life cycle inventory and life cycle assessment for windrow composting systems.

ISWM-TINOS. 2012. LCA studies for composting and anaerobic digestion units.

Peter J. Stoffella, Brian A. Kahn. 2000. Compost utilization in horticultural cropping systems.

Roger Tim Haug. 1993. The Practical Handbook of Compost Engineering.

Diaz L.F., de Bertoldi M., Bidlingmaier W., Stentiford E. 2007. Compost Science and Technology.