

COMPOSTAJE

UNA VISIÓN SISTÉMICA



COMPOSTAJE

Una visión sistémica

COMPOSTAJE

Una visión sistémica

Autores

Beatriz Juárez Robles

Isaías de la Rosa Gómez

María del Consuelo Hernández Berriel

María del Carmen Carreño de León

María del Consuelo Mañón Salas

Compostaje: Una visión Sistémica

Revisoras: Dra. Abigail Zamora Hernández

Dra. Gloria Inés González López

Diseño y Edición: Dra. María del Consuelo Mañón Salas

Primera Edición 2017

(C) 2017

Derechos reservados conforme a la ley

ISBN: 978-607-96258-1-8

Queda prohibida la reproducción parcial o total, directa o indirecta del contenido de la presente obra, sin contar previamente con la autorización expresa y por escrito del editor, en términos de la Ley federal del Derecho de Autor y en su caso, de los tratados internacionales aplicables.

Hecho en México

Un agradecimiento especial por el apoyo financiero a CONACYT, a través de la Estancia posdoctoral con el convenio 291028-ITTOL.

ACERCA DE LOS AUTORES

BEATRIZ JUÁREZ ROBLES

Estudiante del Doctorado en Ciencias Ambientales, en el Instituto Tecnológico de Toluca. Con experiencia en el área de Control de calidad en la empresa Organización de Aguas de México S.A de C.V. Auditor interno en Sistemas de Gestión Ambiental ISO 14001:2004.

Su línea de Investigación se ha dirigido al “Tratamiento de contaminantes y gestión ambiental”, que le ha permitido desarrollar proyectos en la obtención de composta a partir de biosólidos y residuos sólidos orgánicos con una relación carbono nitrógeno entre 4 y 8 y en tiempo menor a tres meses. Con presentaciones en el VI Simposio iberoamericano en ingeniería de residuos sólidos hacia la neutralidad 2021. Tema: “Compostaje de biosólidos municipales con la incorporación de suelo arcilloso y estiércol fermentado” en Cartago, Costa Rica. Y VII Simposio iberoamericano en ingeniería de residuos: hacia una economía circular 2017. Tema: “Cambios Morfo-fisiológicos de la especie *Zea mays* L. por la aplicación de composta de biosólidos y biosólidos granulados en suelo agrícola”.

ISAÍAS DE LA ROSA GÓMEZ

Doctor en Ciencias en Ingeniería Ambiental, con experiencia profesional en trabajos de control de calidad y seguridad radilógica en Celanese Mexicana, durante ocho años y tres años en control de calidad en Farmacéuticos Lakeside.

Con experiencia docente de más de veinte años en la Facultad de Química y de Odontología de la UAEM y en el Instituto Tecnológico de Toluca (ITT).

Su actividad de investigación en estos últimos diez años se ha dirigido a desarrollar proyectos de investigación sobre desinfección de aguas y bioremediación en la División de Estudios de Posgrado e Investigación del ITT. Además de proyectos ambientales, vinculados con la iniciativa privada, academias, gobierno y sociedad.

Con respecto a actividades ambientales, durante dieciocho años estuvo a cargo de actividades mitigación y solución de problemas en el nevado de Toluca, zona alpina; en el parque sierra Morelos de la ciudad de Toluca, acopio de pila alcalina en el valle de Toluca en vinculación con la dirección de Medio Ambiente del Municipio de Toluca y en mitigación de residuos sólidos urbanos en la región del valle de Toluca.

En relación a las actividades de difusión, cuenta con más de 10 artículos científicos, más de 50 tesis de licenciatura, maestría y doctorado. Con cincuenta presentaciones en congresos foros y simposiums y cursos impartidos.

Integrante del equipo de trabajo en el proyecto 263315 SEMARNAT-CONACYT “Ubicación de Rellenos Sanitarios Intermunicipales futuros en el Estado de México y Estados aledaños.” Cuenta con seis publicaciones en revistas indizadas y arbitradas, nacionales e internacionales.

Miembro de la Sociedad Mexicana de Ciencia y Tecnología Aplicada a Residuos Sólidos (SOMERS A.C.) desde el 2014.

MARÍA DEL CONSUELO HERNÁNDEZ BERRIEL

Doctora en Ciencias Biológicas por la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Docente desde 1991 en el SNEST y Profesora Investigadora desde 1993 a la fecha en el Tecnológico Nacional de México (TecNM), en las carreras de Ingenierías Química, Industrial y Mecatrónica, así como en los posgrados de la Maestría en Ciencias en Ingeniería Ambiental y del Doctorado en Ciencias Ambientales, donde ha sido asesora y coasesora de múltiples trabajos para obtención de título de licenciatura o posgrado.

Líder desde 2013 de la línea de investigación “Tratamiento de contaminantes y gestión ambiental” en el posgrado del Instituto Tecnológico de Toluca y del Cuerpo Académico en Consolidación “Ingeniería Ambiental, clave ITTOL-CA-3” reconocido por PRODEP.

Su actividad investigadora se basa en la revalorización de los residuos sólidos urbanos, residuos agrícolas, biosólidos y lixiviados, así como en el aprovechamiento energético de biometano y biohidrógeno. Ha sido responsable en Proyectos de Investigación básica y aplicada financiados por CRODE, CONACYT, DGEST y TecNM; entre ellos: 5648.15-P, 5440.14-P, 4627.12-P, 642.03-P, 631.02-P; y colaborado en: 00-06-009-V, 430.063-P, AS-2-006/2006, 62100, FECYT-2009-CO2-01, 4381.11-P, 4427.11-P, SIP13-72, F-PROMEP-39/REV-03 SEP-23-005, 5443.14-P, 5887.16-P y 247699.

Funge como Responsable Técnico del Proyecto de Investigación “Ubicación de rellenos sanitarios intermunicipales futuros en el Estado de México y Estados aledaños”. Financiado por el Fondo Sectorial de Investigación Ambiental, SEMARNAT-CONACYT 2015 con clave 263315, para realizarse de Julio 2016 a Diciembre 2019.

Cuenta con publicaciones en revistas indizadas y arbitradas, nacionales e internacionales. Es Candidato a Investigador Nacional por el CONACyT, miembro fundador de la Sociedad Mexicana de Ciencia y Tecnología Aplicada a Residuos Sólidos (SOMERS), miembro desde 2010 de la Red Iberoamericana en gestión y aprovechamiento de residuos (REDISIA) y miembro de la Asociación Latinoamericana para la gestión integral de los residuos (ALAGIR A.C.).

MARIA DEL CARMEN CARREÑO DE LEON

Doctora en Ingeniería por la Universidad Autónoma del Estado de México, realizó Tesis de Licenciatura, Maestría y Doctorado en el Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares.

Experiencia en la Docencia en el Instituto Tecnológico de Toluca desde Enero de 2007, Profesora con Candidato a SNI de 2010 a 2013. Profesora con Perfil Deseable por parte del Programa de Mejoramiento del Profesorado desde Junio de 2012. Profesora Investigadora desde Junio de 2013.

Su área de investigación es la caracterización de cuerpos de agua contaminados y recientemente la biorremediación de estos cuerpos de agua, mediante la aplicación de biomateriales con compositos de alginato.

Integrante del equipo de trabajo en el proyecto 263315 SEMARNAT-CONACYT “Ubicación de Rellenos Sanitarios Intermunicipales futuros en el Estado de México y Estados aledaños.” Cuenta con ocho publicaciones en revistas arbitradas internacionales.

MARIA DEL CONSUELO MAÑON SALAS

Doctora en Ingeniería, con experiencia laboral en la Secretaria de Comunicaciones y Transportes, Estado de México (SCT). Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares (ININ), en las empresa Consejeros Comerciales S.A de C.V.

Con experiencia docente en la facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma del Estado de México (UAEM), en el Centro de Estudios Superiores Universitarios (CESU), en la Universidad Politécnica del Valle de Toluca (UPVT), actualmente es profesora de asignatura en el Instituto Tecnológico de Toluca.

Su área de investigación se ha dirigido a la modelación ambiental, con el desarrollo de modelos para estimar lixiviados y biogás mediante herramientas de Softcomputing. Implementación de un sistema multiagente para simular el proceso de compostaje acelerado de biosólidos y residuos orgánicos.

Lider del proyecto de investigación sobre el impacto de los residuos Electrónicos en el Valle de Toluca. Integrante del equipo de trabajo en el proyecto 263315 SEMARNAT-CONACYT “Ubicación de Rellenos Sanitarios Intermunicipales futuros en el Estado de México y Estados aledaños.”

Cuenta con seis publicaciones en revistas indizadas y arbitradas, nacionales e internacionales. Participó con el capítulo 20, “Diseño de modelos de residuos sólidos y sus productos“, del Libro: RESIDUOS SÓLIDOS: UNA VISIÓN MULTIDISCIPLINARIA. ISBN 978-1-59754-584-6. Editores: Red de Ingeniería en Saneamiento Ambiental (REDISA) Editorial: Libros en Red.

Miembro fundador de la Sociedad Mexicana de Ciencia y Tecnología Aplicada a Residuos Sólidos (SOMERS A.C.) y miembro desde 2010 de la Red Iberoamericana en gestión y aprovechamiento de residuos (REDISA).

ACERCA DE LOS REVISORES

ABIGAIL ZAMORA HERNÁNDEZ

Su formación académica comprende el doctorado en ingeniería por la Universidad Autónoma de Baja California, una maestría en ciencias de la computación y la licenciatura en informática, ambas en la Universidad Veracruzana.

Es investigadora en el Instituto de Ingeniería y catedrático de la Facultad de ingeniería informática en la Universidad Veracruzana, de la región Veracruz. Participa en los cuerpos académicos CA-159: “Gestión y Control de la Calidad Ambiental” como miembro, y en el CA-239: “Comportamiento de suelos y vulnerabilidad estructural, como colaborador. Sus áreas de interés son: la Ingeniería de Software, las Bases de datos y el Desarrollo Back-End.

GLORIA INÉS GONZÁLEZ LÓPEZ

Dra en Ingeniería Ambiental por la Universidad Autónoma de Baja California. Ha trabajado en iniciativa privada, dependencias municipales e instituciones de educación. A partir de 1998 se incorporó como Investigadora de la Universidad Veracruzana. Es Candidato a Investigador Nacional, de enero 2016 a diciembre 2018. Perfil PRODEP vigente.

Integrante del Cuerpo Académico Consolidado CAC-159, Gestión y control de la contaminación ambiental. Dentro de la Universidad Veracruzana ha participado en 9 proyectos patrocinados, como directora y colaboradora. Ha desarrollado diversos proyectos en vinculación con los municipios de: Veracruz, Boca del Río, Coatzacoalcos, Alvarado, Metepec, Izúcar de Matamoros, Puebla, Orizaba, entre otros. Ha efectuado trabajos conjuntos con: Tecnológico de Toluca, CIMAV de Chihuahua, Gerencia de Centrales Nucleoeléctricas, Universidad de Guanajuato y la Universidad Autónoma Metropolitana.

CONTENIDO

	Indice de Tablas	IV
	Indice de Figuras	VI
1.	EL COMPOSTAJE	1
1.1	Historia del compostaje	2
1.1.1	Definición y descripción general	4
1.1.2	Factores de control en el proceso de compostaje	5
1.1.3	Sistemas Abiertos	9
1.1.4	Sistemas Cerrados	17
1.2	Costos de operación y mantenimiento	24
1.3	Comparación y elección del sistema de compostaje	26
	Referencias	27
2.	MICROBIOLOGÍA BÁSICA Y CINÉTICA	30
2.1	Microorganismos	31
2.1.1	Bacterias	32
2.1.2	Hongos	41
2.1.3	Actinomicetos	46
2.1.4	Protozoarios	49
2.2	Macroorganismos	50
2.2.1	Requerimientos de crecimiento	53
2.2.2	Fases del desarrollo de una población bacteriana	59
2.2.3	Expresión matemática del crecimiento bacteriano	59
2.2.4	Cinética del crecimiento celular	61
2.2.5	Curva de crecimiento de población bacteriana	63
2.3	Actividad de agua	67
2.4	Microorganismos en el proceso de compostaje	68
2.5	El compostaje	72
	Referencias	77

3	<i>FACTORES FISICOS Y QUIMICOS DEL COMPOSTAJE</i>	78
3.1	Física del compostaje	79
3.1.1	Tamaño de partícula	79
3.1.2	Tamaño de la pila	81
3.1.3	Temperatura y mecanismos de pérdida de calor	82
3.2	Química del compostaje	86
3.2.1	Contenido de oxígeno	86
3.2.2	Contenido humedad	88
3.2.3	Potencial de hidrógeno	89
3.2.4	Carbono, nitrógeno y fósforo	91
3.3	Factores de control	94
3.3.1	Control retroalimentado del proceso de compostaje	94
3.3.2	Variables controladas	97
3.3.3	Variables manipuladas	105
3.3.4	Aireación	107
3.3.5	Humidificación	109
3.3.6	Control de pH	111
3.3.7	Control de problemas	113
	Referencias	116
4	TÉCNICAS DE MODELADO Y SIMULACIÓN	120
4.1	El método científico y la teoría de sistemas.	121
4.1.1	Definiciones generales	122
4.1.2	Conceptos básicos de la Teoría General de Sistemas.	126
4.1.3	Clasificación de sistemas	131
4.2	Modelado	141
4.2.1	Definición de un modelo	142
4.2.2	Tipos de modelos	143
4.2.3	Modelado basado en agentes	147
4.2.4	Subtipos del modelo orientado a Agentes	148
4.2.5	Clasificación de los agentes	150

4.2.6	Sistemas Multiagentes	153
4.2.7	Fases de la modelación	155
4.3	Simulación	158
4.3.1	Definición de simulación	158
4.3.2	Simulación por computadora	161
4.3.3	Modelos de simulación con respecto al tiempo	165
4.3.4	Etapas de la simulación por computadora	167
4.3.5	Ventajas y desventajas de los modelos de simulación	170
4.4	Herramientas de análisis	170
4.4.1	Diagramas de Flujo de datos	171
4.4.2	Diccionario de datos	173
4.4.3	Mapa Conceptual	175
4.5	Herramientas de diseño	177
4.5.1	Casos de uso	177
4.5.2	Diagramas de Secuencia	181
4.5.3	Diagramas de estados	182
4.5.4	Diagrama de Clases	184
4.6.	Herramientas de desarrollo	187
4.6.1	Simuladores	188
4.6.2	Lenguajes de Simulación	189
4.7	Modelando el proceso del compostaje	193
4.7.1	Conceptualización del proceso de compostaje	194
4.7.2	Diseño del modelo	195
4.7.3	Construcción del modelo	197
4.7.4	Verificación y validación	203
4.7.5	Experimentar con el modelo	204
	Referencias	206

ÍNDICE DE TABLAS

1.1 Diferencias entre sistemas de compostaje.	25
1.2 Comparación entre sistemas de compostaje.	26
2.1 Constituyentes químicos de paredes celulares de bacterias Gram positivas y Gram negativas.	37
2.2 Tiempo de generación de algunas bacterias en condiciones óptimas de cultivo.	62
2.3 Tiempos de duplicación característicos.	65
2.4 Temperaturas de crecimiento para los diferentes tipos de microorganismos.	67
2.5 Población bacteriana en las etapas del compostaje.	77
3.1 Relación de temperatura y tiempo para garantizar la inocuidad del producto final	85
3.2 Relación carbono a nitrógeno de material usado en el compostaje.	93
3.3 Planilla de control del proceso de composteo.	95
3.4 Cambios en los valores los factores químicos y físicos durante el proceso de compostaje.	100
3.5 Rangos ideales de factores para el proceso de composteo.	101
3.6 Requisitos para mejoradores de suelos según NTEA-006-SMA-RS-2006.	102
3.7 Características a cumplir por tipos de composta según NADF-020-AMBT-2011	103
3.8 Grados de calidad para el humus de lombriz según NMX-FF-109-SCFI-2007.	104
3.9 Características de diferentes tipos de enmiendas orgánicas.	105
3.10 Variables a monitorear para el control del proceso de composteo	106
3.11 Variables manipuladas y controladas en el proceso de compostaje.	107
3.12 Parámetros operacionales para varios niveles tecnológicos	109
3.13 Compuestos de olores desagradables.	114

3. 14 Problemas, causas y soluciones comunes en el proceso de compostaje.	115
3. 15 Clasificación de residuos orgánicos para el compostaje doméstico.	116
4. 1 Elementos que componen a un sistema de compostaje abierto	125
4. 2 Enfoque CESM para un sistema de compostaje abierto.	127
4. 3 Componentes del Sistema de Compostaje	163
4. 4 Componentes de un diagrama de flujo	173
4. 5 Diccionario de datos del Sistema multiagente para el proceso de compostaje	176
4. 6 Caso de uso Configurar Simulación	182
4. 7 Elementos de un diagrama de estados	185
4. 8 Propiedades de los materiales a compostar	203
4. 9 Relación de entre las entidades	204

ÍNDICE DE FIGURAS

1.1 Reacciones bioquímicas en el compostaje.	5
1.2 Fases del compostaje.	7
1.3 Dinámica de temperatura en el compostaje.	7
1.4 Dinámica de humedad durante el compostaje de bagazo de agave con biosólidos.	8
1.5 Clasificación de los sistemas de compostaje.	9
1.6 Sección transversal de montículos de composta e hilera apiladas.	10
1.7 Proceso en una planta de compostaje.	12
1.8 Formas de suministrar aire a los sistemas de compostaje.	14
1.9 Pila estática con aireación pasiva.	14
1.10 Pila con aireación forzada.	15
1.11 Reactores de compostaje agitados: A) Circular B) Rectangular.	19
1.12 Reactores de flujo pistón para el compostaje In-vessel.	21
1.13 Reactor horizontal.	23
1.14 Reactor Rotatorio.	24
2.1 Morfología microscópica de bacterias.	33
2.2 Estructura de una célula bacteriana.	35
2.3 Membrana citoplásmica de una bacteria.	38
2.4 Propagación y reproducción los hongos.	42
2.5 Estructura de un <i>Aspergillus</i> sp y un <i>Penicillium</i> sp.	43
2.6 Cadenas de conidios producidas por <i>Streptomyces</i> .	47

2.7 Estructura de un protozario ciliado. Balantidium coli..	50
2.8 Fases del crecimiento de una población de bacterias.	65
3.1 Efecto del tamaño de partícula en el proceso de composteo.	80
3.2 Dimensiones para pilas de compostaje	82
3.3 Dimensiones de pilas de composta.	82
3.4 Rango de temperaturas típico de compostaje.	83
3.5 Perfil de temperatura en capas.	85
3.6 Necesidades de O ₂ durante el proceso de compostaje.	87
3.7 Oxímetro para composta con sonda de aspiración.	87
3.8 Efecto de la frecuencia de aireación en la temperatura durante el composteo.	88
3.9 Rangos típicos de pH y temperaras durante el compostaje.	91
3.10 Efecto de la relación C:N en el tiempo de compostaje.	93
3.11 Control retroalimentado del proceso de compostaje.	95
3. 12 Gráficas con datos de Hoja de Proceso de compostaje	98
3. 13 Puntos de muestreo y medición para temperatura, humedad y pH	106
3. 14 Ejemplos de equipo para airear pilas durante el composteo.	109
3. 15 Medidores de humedad en suelos y compostas.	110
3. 16 Máquina volteadora de material con adición de agua.	111
3.17 Medidores directos de pH para suelos y compostas.	112
4.1 Estructura de un sistema de compostaje.	126
4.2 Fases del proceso de compostaje	129
4.3 Elementos del sistema pila de compostaje aerobio.	133
4.4 Clasificación de los Sistemas	133

4. 5 Clasificación de sistemas desde la perspectiva TGS.	134
4. 6 Clasificación de sistemas de acuerdo a su origen.	134
4. 7 Ejemplo de sistema abierto	135
4. 8 Proceso de aireación en una pila con volteo	136
4. 9 Compostera horizontal o discontinua.	137
4. 10 Ejemplos de sistemas complejos.	138
4.11 Dinámicas de una pila de composta.	140
4.12 Elementos de un sistema basado en agentes.	141
4.13 Esquema de un sistema cibernético	142
4.14 Modelo de caja negra.	144
4.15 Proceso básico de generación de composta.	145
4.16 Clasificación de los modelos	146
4.17 Balance de calor en una pila de composta.	147
4.18 Diagrama esquemático de un reactor.	147
4.19 Comparativo de temperatura de dos pilas de composta.	148
4.20 Clasificación de los modelos orientados a Agentes	151
4.21 Esquema de una agente reactivo	153
4.22 Esquema de un agente deliberativo.	154
4.23 Esquema de un agente híbrido.	155
4.24 Elementos que integran a la simulación	161
4.25 Etapas de un Estudio de Simulación	171
4.26 Diagrama de flujo del sistema multiagente para el proceso de compostaje	174
4.27 Modelo conceptual del proceso de compostaje	178

4.28 Caso de uso del simulador del proceso de compostaje en el Nivel 0	180
4.29 Caso de uso del simulador del proceso de composaje nivel 1	181
4.30 Diagrama de secuencia para el caso de uso Configurar Simulación	184
4.31 Diagrama de estados para el método crecimiento bacteriano.	186
4.32 Secciones que integran una Clase	187
4.33 Diagrama de clases para un sistema de compostaje.	189
4. 34 Tipos de tortugas en Netlogo	194
4. 35 Elementos de entrada en el simulador.	201
4. 36 Elementos de salida en el simulador.	203
4. 37 Descripción del mundo en el simulador	204

EL COMPOSTAJE

Por Beatriz Juárez Robles

Actualmente, el desarrollo económico, tecnológico y demográfico han permitido a la especie humana evolucionar, sin embargo, también han provocado un nivel de desequilibrio en los ecosistemas; por motivar a la explotación de manera indiscriminada de los recursos naturales; por situar una gran cantidad de productos industrializados que son introducidos a los ecosistemas por suelo, agua y aire. La conciencia ciudadana en torno a la problemática ambiental está incrementado, y propicia que continuamente se generen estrategias para disminuir el impacto de las actividades humanas sobre el entorno natural. El empleo de las técnicas de compostaje es de gran relevancia, ya que promueve el reciclaje, además de que el producto resultante puede emplearse para el mejoramiento de los suelos.

El compostaje es una opción de tratamiento que ha sido estudiada, es simple y permite estabilizar y mineralizar los residuos convirtiéndolos en una fuente de nutrientes para el suelo (Liang, Das y McClendon, 2003; Moreno-Casco y Moral-Herrero, 2007). Es por ello, que el objetivo de este capítulo es presentar los lineamientos generales sobre los métodos de compostaje existentes, su diseño y la ejecución del proceso, con el fin de reducir los costos de disposición final, promover la degradación de la materia orgánica y su reintegración al suelo.

Para el cumplimiento del objetivo, se presenta en primera instancia: el origen, definiciones y descripción general del proceso de compostaje, en el cual se incluyen los factores de importancia para control. Posteriormente, se incluyen las técnicas de compostaje en sistemas abiertos y

cerrados, comúnmente empleadas así como sus características generales. Además una breve comparación entre los métodos; con esta información se pretende que el lector conozca y elija de manera adecuada la técnica que más se apegue a sus requerimientos, ya sea como un pequeño o gran productor de composta, o bien para la persona que no es experta en esta área.

1.1 Historia del compostaje

La naturaleza es un enorme sistema que degrada la materia orgánica para crear un compuesto estable y reutilizable. Su origen como técnica data de la antigüedad, cuando las personas empezaron a definir su entorno, manteniendo sus viviendas limpias y creando mediante la conformación de montículos pequeñas pilas de compostaje. La más antigua referencia son los sumerios (3500 a.C.), que construían vertederos para enterrar los desechos; referencias menos antiguas son China, Japón e India (Rasapoor, Nasrabadi, Kamali y Hoveidi 2009).

La técnica de compostaje a gran escala se originó en la India, entre los años de 1924 y 1931, cuando el inglés Albert Howard desarrolló el “método Indore”, el cual consistía en fermentar una mezcla de desechos vegetales y estiércol animal, los cuales eran humedecidos periódicamente. En el año de 1925 en Europa surgió la posibilidad de degradar los residuos a gran escala empleando el método Indore. En el año 1932 en Hanmer Holanda, se instaló la primera planta de composta. Posteriormente, en los años cincuenta Ehrenfreund Pfeiffer, por medio de largas investigaciones en microbiología consiguió preparar un iniciador conocido como “starter”, descubrió la especificidad de algunos microorganismos respecto a la degradación de materiales concretos, descubriendo también con ello los medios para activar su multiplicación (Trillas-Gay, Avilés, Francisca y Moreno, 2014).

En la década de los sesenta, en Europa había 37 plantas, destacando Francia y España, además de ciudades como E.U., Japón y Taiwán. A partir de los setentas la técnica tuvo un declive, por

una deficiente calidad de la composta, así como un escaso interés de los agricultores en utilizarlo. Aunque para los años noventa nuevamente cobra auge con la instalación de diversas plantas de compostaje.

La industria del compostaje en Estados Unidos se incrementó enormemente durante los últimos 40 años, por ello estableció regulaciones y herramientas que permitan la medición de los índices de calidad y de factibilidad económica. Para el caso de la Unión Europea (UE), en donde al menos se contabilizan 2,500 plantas de compostaje en 18 países, su mayor preocupación es la calidad del producto y que cumpla con la normatividad de la UE. La composta obtenida es vendida tanto a los grandes consumidores, como a los pequeños, y son verificados con estándares de calidad bien establecidos y avalados con sellos de garantía de calidad (Tech Tetra, 2013).

América Latina cuenta con un inventario importante de plantas de composta, de las cuales la gran mayoría no está en operación y de las activas, la mayoría está enfocada al composteo de residuos de poda, y la composta es para uso interno del estado.

México cuenta con plantas activas y en operación, sin embargo muchas son aún a nivel experimental y para prácticas escolares, más que para resolver un problema real o aprovechar un recurso en forma sustentable. En el año 2012, en el diagnóstico básico para la gestión integral de los residuos publicado, por el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC) y el Centro Nacional de Investigación y Capacitación Ambiental, se registraron en el país 21 plantas de compostaje, sin embargo, se estima que existen otras 55 a lo largo del país de las cuales no se cuenta con información sobre su ubicación (INECC y SEMARNAT, 2012; Tech Tetra, 2013).

El caso de la planta del Bordo Poniente, que es la planta de composta más grande del país, la capacidad instalada es de 73000 ton/año y sin embargo, solo se procesan 32120 ton/año de los residuos sólidos orgánicos de la Ciudad de México, además de no contar con la capacidad suficiente para procesar los residuos con calidad certificada bajo estándares internacionales. La

planta ubicada en ciudad universitaria en la Universidad Nacional Autónoma de México (CU-UNAM) en el Distrito Federal cuenta con una capacidad instalada de 24 m³/día y en la cual únicamente se composta ramas, pastos y hojas (INECC y SEMARNAT, 2012; Rodríguez, Cordoba y Vasquez, 2006). Así como estas plantas muchas otras instaladas en el país no cuentan con la infraestructura adecuada para poder procesar lo que deriva de las casas habitación y que va directamente a los rellenos sanitarios o tiraderos a cielo abierto.

1.1.1 Definición y descripción general

El compostaje es una de las técnicas más prometedoras para el tratamiento de los residuos sólidos orgánicos, ya que es barato y se puede obtener un producto final valioso. Su uso para la agricultura y enmienda de suelos es una opción cada vez más utilizada y viable para la gestión de residuos urbanos, que tiene beneficios ambientales al desviar los residuos de los rellenos sanitarios y tiraderos, sin considerar las ventajas para la salud humana mediante la reducción y propagación de agentes patógenos (Getahun, Nigusie, Entele, Van Gerven y Van der Bruggen, 2012).

Es una forma ancestral de reducir la masa y volumen de los desechos y reutilizar la materia orgánica, consiste en la transformación biológica controlada de los residuos orgánicos en condiciones aerobias, es un proceso termofílico que requiere oxígeno para estabilizar los residuos orgánicos y el contenido de humedad óptimo para el desarrollo de los microorganismos tales como bacterias, hongos y protozoos implicados en el proceso de descomposición biológica (Vigneswaran, Kandasamy y Johir, 2016). La degradación de la materia orgánica conduce a la liberación de CO₂, H₂O y calor, para la producción de minerales disponible para las plantas, biomasa y humus. La calidad del producto final depende en gran medida de la mezcla inicial.

El proceso comprende dos etapas de transformaciones bioquímicas, la mineralización y humificación; las cuales se realizan durante la fase activa y la de curado; en la primera se desarrollan principalmente reacciones de degradación: la materia orgánica disuelta se utiliza como fuente de carbono y energía para el metabolismo de los microorganismos, las sustancias orgánicas fácilmente degradables como los hidratos de carbono y los aminoácidos son usados por la actividad metabólica de los microorganismos, la producción de calor, generando como subproductos dióxido de carbono y agua. Durante la fase de curado las macromoléculas orgánicas se sintetizan como ácidos húmicos (Tremier, De Guardia, Massiani, Paul y Martel, 2005) (Figura 1.1).



Figura 1.1 Reacciones bioquímicas en el compostaje.

1.1.2 Factores de control en el proceso de compostaje

En general, las características físicas de calidad y estabilidad de la composta varían en función de la naturaleza de la materia orgánica, las condiciones bajo las que se lleva a cabo el compostaje y el alcance de la descomposición (Hamoda, Abu y Newham, 1998; Rasapoor et al., 2009). Los factores que más influyen en el proceso de compostaje son la temperatura, humedad, tasa de aireación, pH, relación C/N y control de los materiales de partida.

Los parámetros biológico y químico más utilizados para evaluar la calidad y madurez de la composta incluyen la relación C/N en el producto final, CO₂ desprendido, CO disuelto, índice de

germinación IG, la capacidad de intercambio catiónico CIC, la producción de sustancias húmicas, entre otros, siendo el más utilizado la relación C/N. Sin embargo, no hay parámetro universal que pueda utilizarse como indicador de madurez. La relación C/N disminuye con el tiempo durante el proceso de compostaje debido a las pérdidas de C como CO₂. Las relaciones C/N inferiores a 20 son un indicativo de la madurez de la composta (Goyal, Dhull y Kapoor, 2005).

En el proceso, inicialmente la alta actividad microbiana produce calor que aumenta la temperatura dentro del material compostable, dependiendo del tamaño del sistema y de la composición de las materias primas. Después, los componentes de fácil degradación se consumen y por lo tanto, la generación de calor disminuye gradualmente durante la etapa de maduración. De acuerdo con los patrones de temperatura el compostaje ocurre en cuatro fases distintas, la fase mesofílica, termofílica, estabilización y la fase de maduración (Figura 1.2).

En el proceso el pH sufre cambios derivados de la degradación de la materia orgánica (MO), diferenciando tres etapas importantes, inicialmente es neutro, aunque depende en gran medida del origen de los residuos; en la fase mesófila, al liberar ácidos orgánicos por la descomposición de las proteínas, desciende a valores ácidos; en la etapa termofílica (cuando las proteínas se convierten en NH₄ y NH₃), el pH se eleva a valores de 8.0 a 9.5 y finalmente en la maduración se acerca a la neutralidad (Lei y Vandergheynst, 2000) (Figura 1.3).

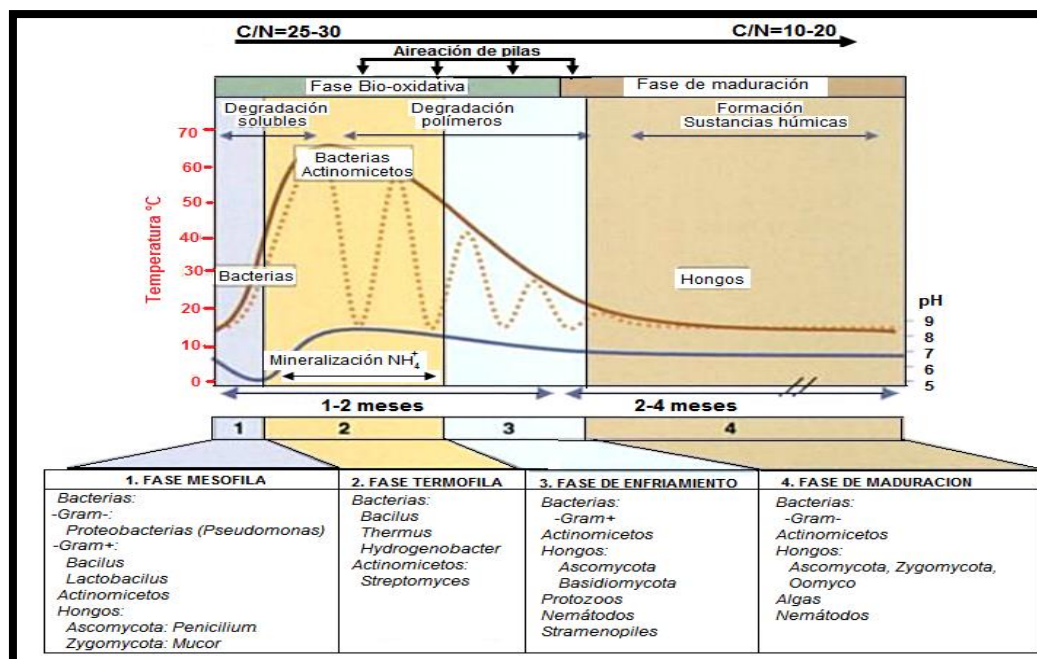


Figura 1.2 Fases del compostaje. Fuente:Moreno y Morál, 2007

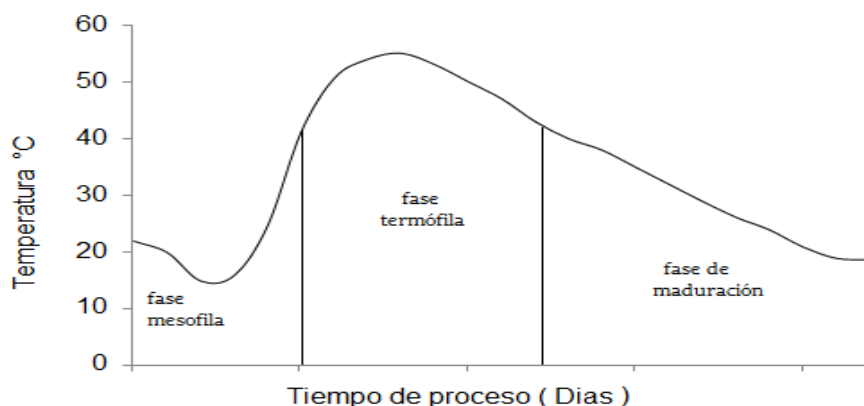


Figura 1. 3 Dinámica de temperatura en el compostaje.

Otro factor importante es la relación C/N inicial, la cual va de 25-30:1 y que disminuye al final del compostaje a valores de 10-20:1, dependiendo de la facilidad y velocidad de degradación de los materiales (Jiang, Schuchardt, Li, Guo y Zhao, 2011). El aporte de agua en la matriz de compostaje también es un factor clave que afecta la cinética de biodegradación, ya que los consorcios microbianos que se desarrollan en la pila requieren de un medio acuoso para acceder a

sus nutrientes. El contenido de humedad óptimo para la biodegradación puede variar ampliamente para diferentes mezclas de sustratos y van desde los 45 al 70 %, en base húmeda. A porcentaje menores puede haber una reducción en la velocidad de biodegradación, sin embargo, esto puede mitigarse a través de la manipulación de la densidad de sustrato y tamaño de partícula (Richard, Hamelers, Veeken y Silva, 2002) (Figura 1.4).

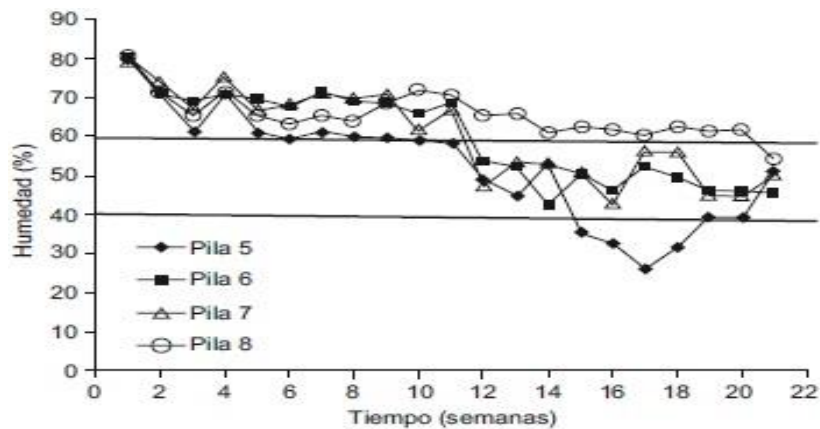


Figura 1.4 Dinámica de humedad durante el compostaje de bagazo de agave con biosólidos. Fuente: Rodríguez et al., 2013.

Las propiedades físicas de los sustratos dependen en gran medida del tamaño de partículas, por lo que modificando o seleccionando adecuadamente éste, pueden conseguirse las propiedades óptimas para la degradación, ya que se puede variar el comportamiento hídrico y el flujo de aire a causa de la porosidad externa de cada partícula (Agnew y Leonard, 2003). La aireación o suministro de oxígeno a la matriz de compostaje determina la velocidad de degradación y las variaciones en el perfil de temperatura. Poca aireación conduce a condiciones anaerobias y un exceso produce enfriamiento de la pila. Para una adecuada transformación microbiana se requiere oxígeno en abundancia al inicio del proceso, y condiciones menos aerobias durante la formación de humus, para evitar la mineralización excesiva de las sustancias orgánicas (Tiquia y Tam, 2002; Vigneswaran et al., 2016).

Existe una relación entre la aireación y algunos parámetros fisicoquímicos como el contenido de humedad, materia seca, pH, carbono total, nitrógeno total, relación C/N y la temperatura de las pilas de compostaje continuo (métodos dinámicos). Los sistemas de compostaje pueden ser abiertos o cerrados, en pequeña y gran escala (Figura 1.5). El objetivo de estos sistemas es básicamente recrear las mejores condiciones de proceso, las cuales influyen directamente en el crecimiento y metabolismo de los microorganismos que degradan la materia orgánica. Estos sistemas pueden ser relativamente simples o muy complejos.

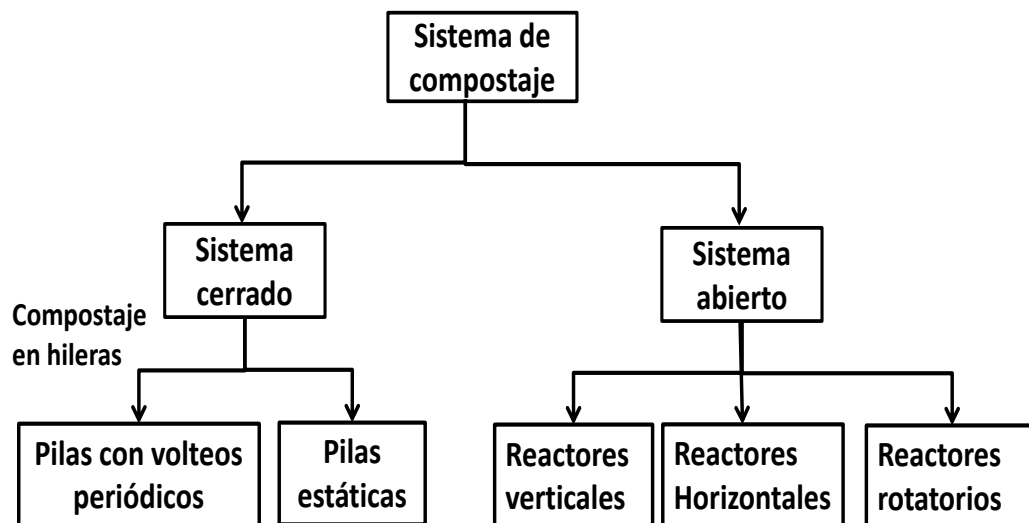


Figura 1.5 Clasificación de los sistemas de compostaje.

1.1.3 Sistemas Abiertos

Los sistemas abiertos son los ideales para proporcionar oxígeno al material de compostaje pueden airearse de forma manual o mecánica, o pueden ser pilas estáticas a través de las cuales se sopla el aire (aireación forzada).

a) Compostaje en hileras (Windrow compost)

Es un término general para una pila alargada de materia prima. Este sistema es ampliamente usado, en especial por los bajos costos, además de ser adecuado para grandes volúmenes. Consisten en la conformación de hileras sobre grandes superficies de tierra a la intemperie. Tiene variantes las cuales están en función de cómo se suministra el aire: de forma natural o forzada, con y sin mezclado mecánico. En este sistema las hileras se apilan a lo largo y en forma paralela. La sección transversal de las hileras puede ser trapezoidal o triangular (Figura 1.6), el ancho de una hilera típica es de 4.5 m y 1-2 m de alto. El oxígeno se suministra principalmente por la ventilación natural o por el intercambio de gases durante el giro del material (Shammas, Wang, Pereira y Hung, 2008).

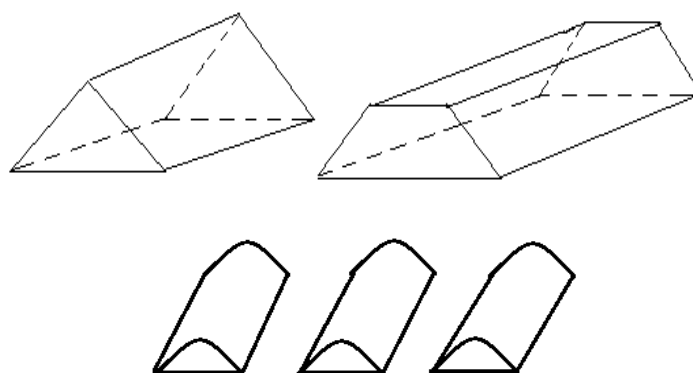


Figura 1. 6 Sección transversal de montículos de composta e hileras apiladas.

En los sistemas de compostaje en hileras de bajo volumen, los materiales orgánicos son transportados y procesados a mano y las hileras se pueden crear manualmente. En las operaciones a gran escala, se realiza de forma mecanizada. Los residuos pueden ser transportados al sitio por un camión carguero (para grandes volúmenes) o en contenedores roll-off (para pequeños volúmenes). Se emplea un cargador frontal para añadir nuevos residuos orgánicos, que dan forma y dan vuelta a las hileras. En las operaciones de mayor escala el tamaño del equipo se magnifica,

por lo que requiere maquinaria especializada que pueda girar grandes volúmenes (Vigneswaran et al., 2016).

b) Compostaje en pilas con volteo periódico (semi-dinámicos)

Este método es simple pero limitado, ya que las pilas son aireadas solo en ciertos periodos, por lo que si el contenido de oxígeno no es constante la oxidación biológica se restringe. Si el periodo de volteos no es realizado adecuadamente no permite el correcto control de los agentes patógenos, además de que al ser heterogéneo el suministro de aire influye negativamente en la elevación de las temperaturas por los volteos periódicos.

Con este sistema el proceso requiere de 30 a 180 días, dependiendo del tipo de residuos que se mezclen para obtener una relación C:N inicial de 30; es necesario que la materia prima se triture para reducir el tamaño de partícula (se recomiendan tamaños de 5 a 25 mm). La granulometría de los sustratos es variable, dependiendo de la naturaleza y condiciones de trituración y tamizado; una excesiva reducción del tamaño de partícula, limita la aireación del sustrato debido a la reducción de los poros por donde fluye el oxígeno (Handreck, 1983).

El área de compostaje debe estar bien diseñada y dimensionada, de no ser así crearía problemas de altos costos de operación si funciona por debajo de sus capacidad. Para el diseño se debe de considerar la duración del compostaje, la producción esperada, la capacidad de almacenamiento, el sitio de curado, las dimensiones y espacios entre las hileras. También es de gran importancia considerar la recolección y tratamiento de los escurrimientos por lixiviados y por lluvias (Vigneswaran et al., 2016) (Figura 1.7).

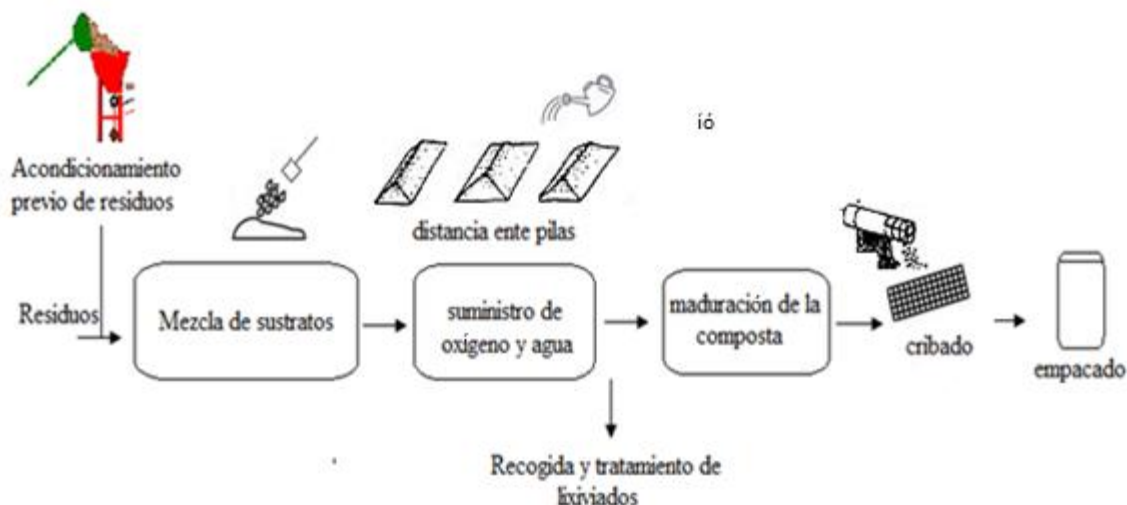


Figura 1. 7 Proceso en una planta de compostaje.

c) Compostaje en pilas estáticas

Es uno de los sistemas más sencillos de realizar y quizá uno de los mejores ya que permite un suministro constante de oxígeno, además de controlar parámetros como son la humedad y la temperatura. La ventilación de las pilas se puede realizar de forma pasiva o forzada mediante sopladores.

Es un método con bajos costos de inversión y un bajo nivel de control de proceso. Los residuos se conforman en montículos o pilas para mejorar la aireación y homogeneización. Se pueden instalar tuberías debajo de la pila para suministrar aire de forma pasiva aunque puede ser insuficiente. Las pilas pueden ser colocadas al aire libre o en una zona cerrada; la altura, ancho y forma de las pilas varía dependiendo de la naturaleza de los materiales alimentados y el tipo de equipo empleado para mover el material, pueden ser de hasta tres metros de alto y seis metros de ancho, con una sección transversal o trapezoidal.

En los sistemas abiertos puede hacerse a pequeña y a gran escala. Una vez realizada es muy difícil ajustar la humedad, por lo general son anaerobias en el centro de la pila, las condiciones

aerobias se alcanzan si la porosidad inicial de la pila es alta, por ejemplo, mayor de 60% (Cooperband, 2002).

Algunas de las desventajas de estos sistemas es que requieren de grandes extensiones de superficie, grandes equipos, y mano de obra calificada para operar. Los cambios de clima en las diferentes regiones requieren de cuidados específicos. Debe tenerse especial cuidado en los lixiviados que se generan, ya que pueden contaminar el suelo y agua subterránea, así como el control de los olores.

d) Métodos de compostaje con aireación

Los principales métodos de aireación que proporcionan oxígeno durante el proceso de compostaje son: mezcla física de la masa, la convección natural y el método de aireación forzada. La principal preocupación en el último método es la velocidad de aireación. Si la velocidad de aireación es insuficiente, disminuirá el oxígeno y se crearán condiciones anaeróbicas. Por otro lado, si la velocidad de aireación es demasiado alta, se enfría la pila de composta (Rasapoor et al., 2009).

La distribución del aire dentro de los diferentes sistemas de compostaje ocurre como se muestra en la figura 1.8. En las pilas con volteos frecuentes el aire se suministra durante los volteos, en las hileras estáticas se da por flujo natural, en el sistema de hileras con aireación forzada el flujo es más homogéneo sobre la masa de residuos. En los sistemas cerrados en contenedores existe la posibilidad de recircular el aire o incluso reutilizarse en otros procesos (Griineeklee, 2016).

El factor físico principal que afecta a la distribución de oxígeno en la matriz orgánica a compostar es su porosidad. La porosidad depende del tamaño de las partículas, la estructura de la partícula y la disponibilidad de agua. El tamaño y la porosidad de la pila deben ser adecuados para permitir la aireación (Agnew y Leonard, 2003).

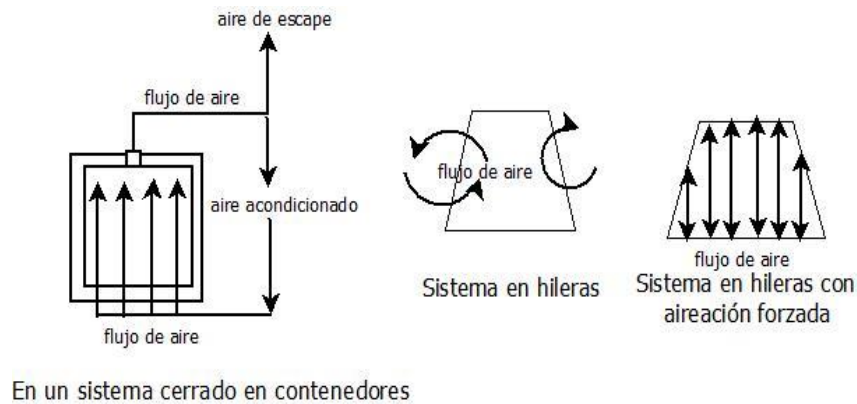


Figura 1. 8 Formas de suministrar aire a los sistemas de compostaje.

e) Compostaje en pilas estáticas aireadas en forma pasiva

En el método de aireación pasiva el oxígeno es suministrado por medio del movimiento de convección natural del aire a través de la pila, en el cual el aire caliente sale y entra el frío. También suele colocarse una serie de tuberías perforadas por donde fluye el aire de la atmósfera. Entre todos los métodos disponibles de compostaje, los sistemas de pila estáticas al aire libre son los más simples y requieren la menor inversión (Figura 1.9).



Figura 1.9 Pila estática con aireación pasiva.

Es empleado en mayor medida para sustratos con alto contenido de humedad que son mezclados con agentes de carga como virutas de madera, pellets, paja, entre otros, que proporcionan estructura, estabilidad y porosidad en la pila en sustitución de los volteos (Jiang et al., 2011). La clave para que el sistema funcione radica en una buena premezcla de los materiales

durante la conformación de la pila, también puede ser mezclada con composta terminada para asegurar que se alcancen las temperaturas termofílicas en la parte externa de la pila.

f) Compostaje en pilas estáticas con aireación forzada

En el compostaje con aireación forzada, el suministro de aire es provisto o inducido, a través de los conductos de aire, y la aireación se proporciona mediante soplado o succión de aire a través del material de compostaje (Ruggieri, Gea, Mompeó, Sayara y Sánchez, 2008), el flujo de aire se ajusta cambiando la frecuencia y duración del soplado, generalmente se usa con mayor intensidad al inicio del proceso para elevar las temperaturas mediante la actividad microbiana (Figura 1.10). Este tipo de sistemas, no es recomendado para el compostaje de residuos de la industria de alimentos, especialmente cárnicos (EPA, 1998).

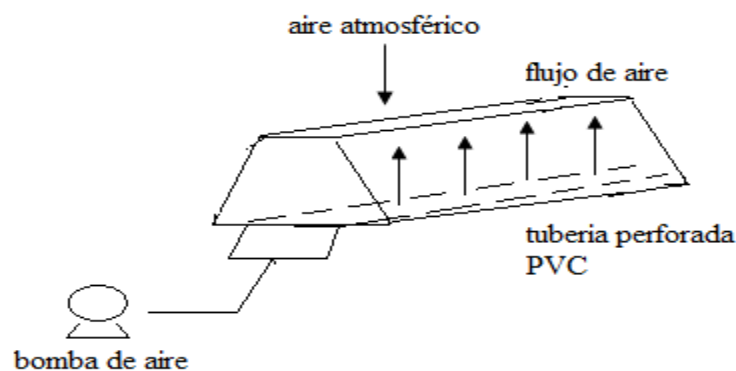


Figura 1.10 Pila con aireación forzada.

El sistema de aireación forzada es utilizado para mejorar el proceso, ya que el período de descomposición activa puede reducirse en casi un 50% en el sistema de pila estática aireada, en comparación con un sistema de volteos periódicos. Esta reducción en el tiempo de compostaje activo no es sólo debido al método de aireación utilizado, también depende de otros factores que controlan el proceso de compostaje (Ruggieri et al., 2008).

En términos generales, el proceso de compostaje por este método es más rápido y la composta es de mayor calidad. Este método permite reducir la pérdida de nitrógeno por volatilización. Sin embargo, una desventaja es la homogeneización limitada de la pila y la formación de gradientes de temperaturas (Kulcu y Yaldiz, 2008).

Las aportaciones más significativas de este sistema se relacionan con la capacidad de control del proceso, fundamentalmente en lo referido a los parámetros: contenido en oxígeno y temperatura de la masa, en este sentido la aireación puede ser de presión positiva o negativa.

En la aireación de presión positiva o *Método de Rutgers* se sopla aire desde la parte inferior del contenedor, y se difumina hacia arriba para mantener un entorno favorable, reduciendo el compostaje a alrededor de 28 a 35 días. Este sistema también tiene la ventaja de controlar la temperatura, una desventaja importante de este método es la emisión de gases; el problema del olor se puede controlar si al equipo se le adjunta un suplemento para recoger y tratar las emisiones gaseosas como ácidos orgánicos volátiles, amoníaco, metilamina, mercaptanos, entre otros, los cuales son recolectados en un lecho de filtro o elución en torres biológicas.

El diseño y/o el funcionamiento del sistema de aire forzado indebido, hará que el contenido de humedad en el material de compostaje en la parte inferior del reactor sea demasiado baja para apoyar el crecimiento microbiano. Sus principales diferencias con el método Beltsville están centradas en el sistema de control de temperatura de la masa que impide que sobrepase los 60°C, con el ventilador actuando en sobrepresión o soplado, primero de manera temporizada y cuando la temperatura del material es superior a 60°C conectándose según demanda. Algunos sistemas incluyen una fase inicial de succión de aire, que permite elevar la temperatura en pocos días, después la corriente de aire se invierte y se introduce en la masa (Chen, Liao y Tsai, 2005).

La aireación de presión negativa o método Beltsville se diferencia de la primera por realizarse con aire a presión, consiste en utilizar tubos perforados conectado a un soplador y colocados en

la parte inferior de las pilas sobre el suelo, las cuales se cubren con una capa de triturado vegetal, cuando el soplador se enciende toma aire del exterior y por las tuberías extrae aire (succión). Al emplear este método en el compostaje de lodos residuales con residuo de madera, el flujo de aire es suficiente para obtener concentraciones de oxígeno del 15% (Chen et al., 2005; Lin, 2008).

En los sistemas de flujo de aire con recirculación, el material se mantiene uniforme, minimizando los gradientes de temperatura, oxígeno y humedad en todo el lecho de descomposición, acorta el tiempo de procesamiento para el compostaje, mantiene mejor control del proceso, produce sustratos libres de patógenos y proporciona el control de olores por medio de biofiltración (Ekinci, Keener y Akbolat, 2006).

Dado que no hay volteos, se requiere un control cuidadoso para asegurar que el exterior de la pila se caliente al igual que el material interior, y así lograr que los microorganismos patógenos, parásitos y bacterianos se eliminen. Este tipo de sistemas requiere de costos elevados y asistencia técnica, instalación y mantenimiento de equipos (tuberías, ventiladores, sensores, entre otros).

1.1.4 Sistemas Cerrados

Los sistemas cerrados son modernos y tienen ventajas de rapidez y limpieza, pero su elevado costo económico y los problemas derivados de la diversidad de subproductos hacen difícil su difusión. 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 porque el material no está nunca en contacto directo con el exterior, y todas las entradas y salidas de gases y líquidos se realiza a través de un sistema de conductos y turbinas. Sus dos principales ventajas respecto a los anteriores son el excelente control de emisiones al medio y el afinado dominio de los parámetros del proceso, pero también ahorran espacio pues

presentan una inmejorable relación entre el volumen de residuo tratado y la superficie ocupada. El sistema de compostaje cerrado más utilizado es el compostaje en reactores. Este tratamiento consiste en una fermentación aerobia controlada dentro de un contenedor cerrado totalmente, que cuenta con mecanismos de volteo, mezclado, aireación forzada.

El compostaje cerrado se realiza en reactores y las condiciones ambientales son controladas. Requieren de infraestructura compleja y costosa en comparación con los sistemas abiertos, por lo que permite un adecuado control de los parámetros de proceso, posibilidad de manejar adecuadamente los lixiviados y gases emitidos, el proceso se realiza en menor tiempo. Se clasifican de acuerdo a la forma en que los sólidos son movidos en: reactores de flujo vertical, horizontal y agitado (Figuras 1.10, 1.11, 1.12, 1.13).

También se diferencian por la forma en que se airean y dispone la carga y descarga (Shammas y col., 2008). Se emplea principalmente para comercializar la composta de alta calidad, donde se necesita un mayor control del proceso. Aunque también existen equipos pequeños y menos costosos, puede ser desde un simple contenedor cerrado como un tambo de plástico hasta un edificio completo.

En estos reactores los residuos orgánicos sigue un curso helicoidal de entrada hasta su salida, de forma continua girado y mezclado por las revoluciones de los tambores. Esto es una ventaja, ya que permite el procesamiento compostaje de materias primas de todas las fuentes, con constantes variaciones en el tipo y composición. En el tambor el movimiento es controlado y se consideran diferentes tiempos de residencia (Figura 1.11).

En los reactores se pueden procesar volúmenes considerables sin ocupar grandes espacios como el método de hileras, además de usarse para cualquier tipo de residuos. Permite un buen control de las condiciones ambientales: temperatura, humedad y flujo de aire, con la posibilidad de recircular el aire. Este método produce composta en pocas semanas debido a que propicia las

condiciones adecuadas para que los consorcios microbianos se reproduzcan y degraden la materia orgánica (MO).

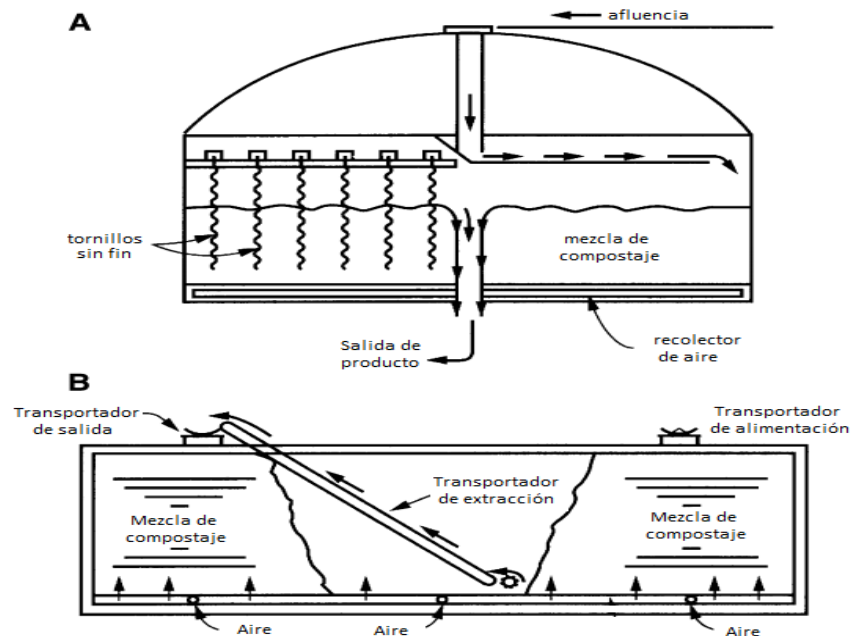


Figura 1.11 Reactores de compostaje agitados: A) Circular B) Rectangular. Fuente: Shamma et al., 2008

Dentro de las ventajas se encuentra que los tiempos de retención son más cortos en comparación con los sistemas abiertos, es controlado y los efectos del clima se ven disminuidos, requieren en la mayoría de los casos de agentes de carga, menor mano de obra para operar el sistema, así el personal está menos expuesto a los residuos. Se reducen los olores además de poder dar tratamiento a los lixiviados generados, se requiere menor superficie de tierra por lo que puede ser utilizados en zonas urbanas.

Entre las desventajas se encuentra el alto costo, así como requerir conocimientos técnicos, por ser altamente mecanizado requiere con más frecuencia mantenimiento de los equipos.

a) Reactores in-vessel

En esta variante de los reactores, son diseñados para minimizar el olor y el tiempo de proceso mediante el control de las condiciones ambientales, principalmente la temperatura y el oxígeno. El material se alimenta y almacena en contenedores o silos que pueden ser modulares e individuales, los módulos se van añadiendo a medida que aumenta el volumen de residuos, son sistemas estáticos. El flujo de aire puede ser positivo o negativo, se introduce el aire por la parte superior de los contenedores y puede ser tratado con biofiltros, además de tener la posibilidad de tratar los lixiviados.

Con el tiempo estos sistemas se optimizaron con controles informáticos para una vigilancia más estrecha de los parámetros del proceso en comparación con los sistemas abiertos (Shammas et al., 2008). Los materiales se almacenan por tres a cuatro semanas y posteriormente es curado en pilas estáticas aireadas, por lo que los contenedores solo se utilizan durante la fase activa.

Existen también contenedores con agitación mecánica, en estos los residuos se depositan en camas o canales abiertos en la parte superior hecho de hormigón o concreto, con una máquina de torneado instalada en la parte superior de las camas se mueve el material, para impedir la disipación de olores algunos sistemas implementan cortinas de plástico alrededor del perímetro de las camas, lo que reduce los niveles de amoníaco en las instalaciones que deterioran y corrompen las tuberías. La operación en estos sistemas consiste en alimentar y mezclar los residuos los cuales se cargan en el extremo delantero de la cama o canal, después con cada pasada del tornel el material se desplaza cierta distancia hacia la parte posterior del canal hasta que los materiales son eventualmente descargados como composta.

Dependiendo del tornel o mezcladora, el material se desplaza de 2 a 4 m con cada giro. La longitud del canal y la frecuencia de giro determinan el período de compostaje en el canal (por lo general 10 a 28 días). Las dimensiones de los canales individuales varían entre los sistemas

comerciales con profundidades que van de 1m a 2.4m de ancho y 1.9m a 3.8m. La longitud del canal varía típicamente de 60 a 90m aproximadamente. La mayoría de aplicaciones utilizan múltiples canales y una sola máquina de inflexión. Hay algunas tecnologías que utilizan una cama individual amplia, por ejemplo, 7.4m y 12m de ancho y 30m de largo (CCC, 2010; Haug, 1993). Un diagrama típico para el compostaje *in-vessel* se muestra en la figura 1.12.

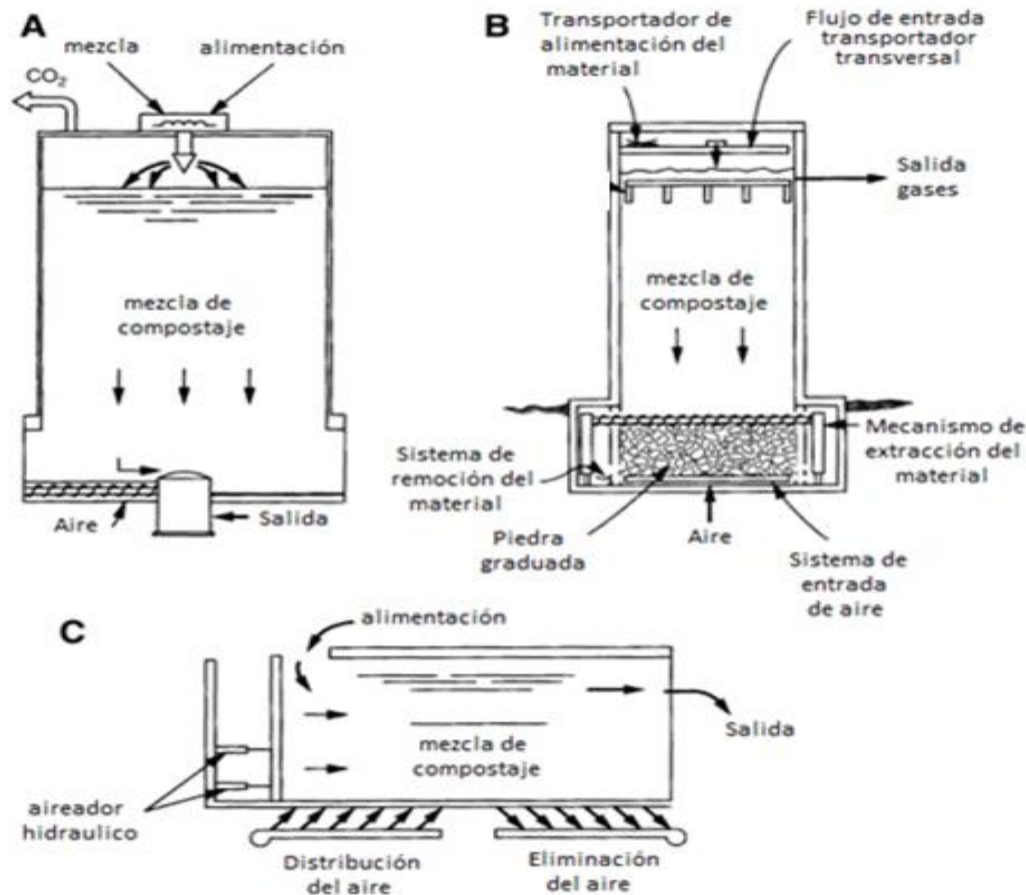


Figura 1. 12 Reactores de flujo pistón para el compostaje In-vessel. Fuente: Shamma et al., 2008

b) Reactores verticales (dinámicos y continuos)

Se caracterizan por un flujo vertical de los sólidos, además de que también se clasifican de acuerdo a las condiciones de lecho en el reactor. Algunos reactores permiten la agitación de los sólidos durante su tránsito por el reactor y se denominan reactores de lecho móvil agitado. Estos

pueden ser alimentados de forma continua o intermitente. En el primer caso el material a compostar se encuentra en forma de masa única, mientras que en el intermitente la masa se sitúa en distintos niveles

En los silos verticales la mezcla de sustratos ocupa todo el volumen del lecho y no se agita durante su paso por el mismo, permiten la transferencia periódica de los sólidos de la parte inferior a la parte superior del reactor y después permanecen estáticos hasta la próxima transferencia. Este tipo de reactores es ampliamente utilizado en el compostaje de materiales orgánicos municipales y para lodos residuales con agentes estructurantes como el aserrín.

Son ampliamente usados ya que su costo es relativamente bajo por unidad de volumen trabajado. Generalmente no hay aireación forzada, en lugar de ello pueden contenerse en jaulas de malla de alambre que permiten el flujo del aire en forma natural a través de la masa. Las jaulas pueden medir de 3.7 m hasta 4.3 m de altura pero generalmente son poco anchos.

Otras tecnologías desarrolladas consisten en silos de acero que son cargados en la parte superior mediante transportadores, el aire es suministrado a través de la masa de compostaje. También los hay aquellos que mediante tubos plásticos rígidos que se pasan a través del silo suministran el aire.

Algunas instalaciones utilizan dos silos, uno para la parte activa y otro para el curado, transfiriendo la masa de un silo a otro mediante una masa transportadora. El principal problema con estos sistemas es la falta de aire y estática de la masa que puede generar malos olores además que se reduce la velocidad de degradación (CCC, 2010).

c) Reactores horizontales

Los reactores horizontales se dividen en aquellos que emplean un tambor rotativo o giratorio y los que tienen una estructura con diferentes geometrías y que sirve como cama de sólidos estática. Estos reactores pueden estar ligeramente inclinados respecto a la horizontal para permitir

el flujo de los sustratos. La agitacion cumple la funcion de aireación y mezcla de los materiales, en los que no se cuenta con agitaci3n el aire es suministrado mediante tuberias. Es un sistema por lotes en la que la materia prima se incorpora y puede ser cubierto con material textil, plastico o aluminio, el tiempo de retencion de los residuos puede ser de dias a semanas (Figura 1.13) (Watson, Taylor, Worth y Robinson, 2003).

d) Tambores Rotativos o digestores

Las diferencias entre los tambores rotativos se deben al patr3n de flujo, puede ser disperso y de entrada y salida del material. Pueden trabajar en continuo o por cargas, la mezcla es mas homoganeo que en otros sistemas. Los tambores giratorios no son en si mismos una tecnologia de compostaje por lo que son usados en conjunto con otros metodos de compostaje, pero son populares ya que sirven para varios propositos: homogenizar, triturar, reducir y cribar.

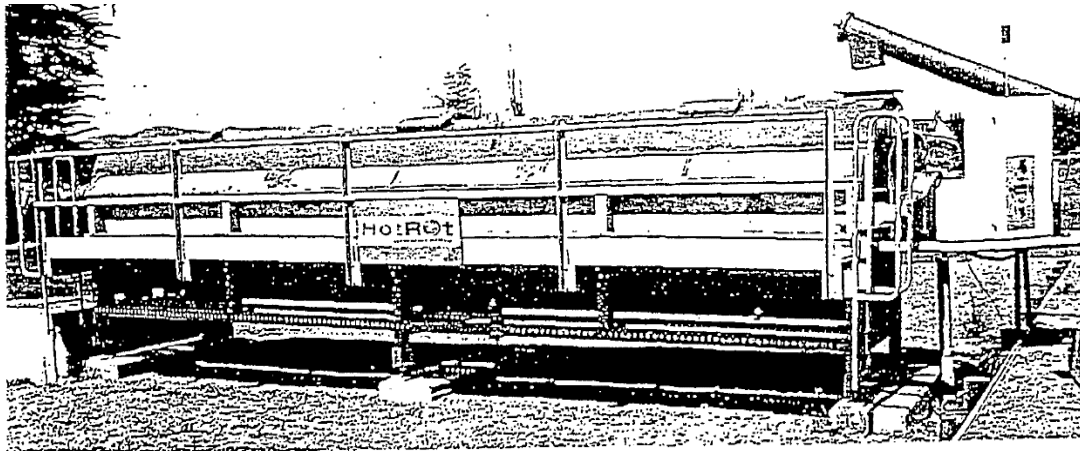


Figura 1.13 Reactor horizontal. Fuente:Watson et al., 2003.

Los residuos se suministran en el digestor en el cual se inicia el proceso de degradacion, durante un tiempo de retenci3n de tres dias, el aire es suministrado y tambi3n es tratado a trav3s de un biofiltro (Figura 1.14). Una distinci3n importante entre este sistema y el de contenedores (in-vessel) es que estos 3ltimos pueden ser utilizados para todo el proceso de compostaje,

mientras que los biodigestores solo se pueden utilizar en la parte inicial del proceso, cuando el control de los parámetros de proceso es crítico; su uso durante todo el proceso sería muy costoso (Griineklee, 2016).

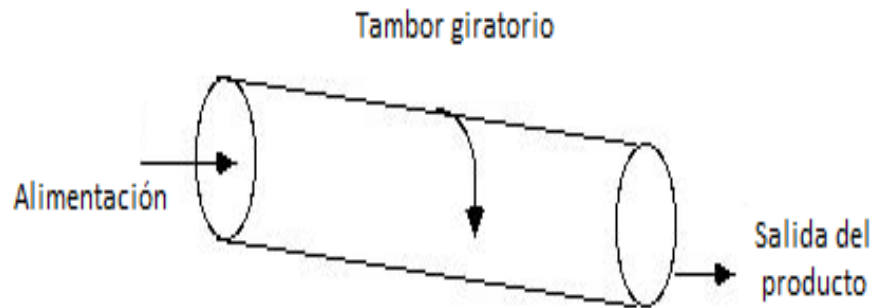


Figura 1.14 Reactor Rotatorio.

1.2 Costos de operación y mantenimiento

Los costos del compostaje son una función del número de operaciones realizadas, tipo de aparatos, número de empleados y el rendimiento de operación, mantenimiento y reparación del equipo. El costo de operación reportado en la literatura varía en función de la escala de operación, el tipo de materia prima y tipo de tecnología utilizada. Una operación comercial bien diseñada tiene siete pasos definidos: materia prima (residuos sólidos) de recuperación, preparación de materia prima, compostaje, estabilización, curado, refinación y almacenamiento.

Los rangos de los costos de capital que se muestran abajo son por tonelada/rendimiento de producto terminado suponiendo un mínimo de 50,000 toneladas por año de rendimiento (en dólares) (CCC, 2010).

- En hileras: \$40 - \$60 por tonelada de rendimiento
- En hileras cerrado: \$100 - \$150 por tonelada a lo largo
- Dentro de una nave de compostaje aeróbico: \$300 - \$500 por tonelada de rendimiento
- La digestión anaeróbica: \$500 - \$700 por tonelada de rendimiento

En la Tabla 1.1 se relacionan algunas diferencias que presentan los sistemas de compostaje de pilas estáticas, aireadas e hileras en reactores, para una elección adecuada del sistema es necesario considerar las necesidades y a los recursos disponibles.

Tabla 1.1 *Diferencias entre sistemas de compostaje.*

PILAS ESTÁTICAS AIREADAS	HILERAS	EN REACTORES
El proceso es afectado por el ambiente externo al sistema	El proceso es afectado por el ambiente externo al sistema	Poco afectados por el ambiente externo
Aplicado a pequeña y gran escala	Aplicado a pequeña y gran escala	A pequeña escala, en sistemas continuos a mediana escala
Se requiere incorporar agentes de carga, lo que aumenta el volumen de material a manejar en cada etapa	Se requiere incorporar agentes de carga, lo que aumenta el volumen de material a manejar en cada etapa	Mayor manejo de biosólidos, con menor requerimiento de agentes de carga, por lo que el volumen a manejar en cada etapa es menor
Se puede adaptar fácilmente a las características de los residuos a compostar, así como al tipo de agente de carga	Se puede adaptar fácilmente a las características de los residuos a compostar, así como al tipo de agente de carga	Sensible a los cambios en las características de los residuos
Grandes costos de capital	Bajo costo de capital	Bajo costo de capital
Actividad laboral moderada	Actividad laboral intensiva	Actividad laboral reducida, pero especializada
Gran superficie de tierra requerida	Gran superficie de tierra requerida	Se requieren pequeñas áreas de proceso, dependiendo de la cantidad de reactores a utilizar
Se generan malos olores si no son aireadas adecuadamente, requieren tratamiento del aire a la salida	Generación de olores en los volteos de las hileras	Pocos problemas por generación de olores, generalmente son tratados a la salida del reactor
Poco dependiente de equipo mecanizado	Mínimamente dependiente de equipo mecanizado	Altamente dependiente del equipo mecanizado
De moderados a altos requerimientos de energía	Bajos requerimientos de energía	Moderados requerimientos de energía

Fuente: Adaptada de Shammas y col. 2008.

1.3 Comparación y elección del sistema de compostaje

El mejor sistema o método de compostaje se debe elegir con base en las necesidades, si es para pequeña o gran escala, la calidad que se desea obtener en la composta, los costos, la capacidad del sitio, el impacto ambiental y posibles molestias de olores, ruido y polvos a los alrededores (Tabla 1.2), por ejemplo que no se infiltren lixiviados en las aguas superficiales y subterráneas (Cooperband, 2002; Jiang, Liu, Huang y Huang; 2015).

Tabla 1. 2 Comparación entre sistemas de compostaje.

ELEMENTO DE COMPARACIÓN	TAMAÑO EN SISTEMAS ABIERTOS	TAMAÑO EN SISTEMAS CERRADOS
Superficie	Grande	Reducida
Clima	Temperaturas no extremas	Variable y frío
Sustrato	Todos, pero con agentes estructurantes	Principalmente aquellos con elevada humedad
Tecnología	Sencilla	Sofisticada
Sistema	Discontinuo a semi-continuo	Semicontinuo a continuo
Inversión	Baja a moderada	Elevada a muy elevada
Consumo energético	Bajo medio	Medio elevado
Mano de obra	Variable: mano de obra no especializada+formación+técnico	Obrero especializado+técnico
Duración	Fermentación: semanas Maduración: meses	Fermentación: 3 a 15 días Maduración: meses
Tamaño de producción	<12 t día >300 Tms/día	Limitado: 70 Tms/día 73 Tms/día

Fuente: Adaptada Mustin, 1987.

Como se puede observar, los sistemas de compostaje dependen de diversos factores, sin embargo, no se limitan ya que pueden emplearse en función de las características que el productor requiera, e incluso pueden generarse sistemas combinados con el objetivo de obtener

un material reutilizable y de alta calidad agronómica, que permita un desarrollo sostenible y sustentable.

En conclusión, se puede decir que todo residuo orgánico puede ser aprovechado dado su potencial energético y nutricional; como se indicó en el capítulo anterior, el compostaje sigue siendo un método a considerar para el tratamiento de los residuos, a lo largo del capítulo se explicó el proceso y las técnicas empleadas, con el propósito de introducir al lector en las técnicas de mayor uso y su nivel de eficiencia, con la finalidad de alcanzar un desarrollo sustentable.

Referencias

- Agnew, J.M. y Leonard, J. (2003). The physical properties of compost. *Compost Science & Utilization*. 11(3), 238–264.
- Chen, M.J., Liao, C.Z. y Tsai, Y.F. (2005). *Manual and Case Studies of Composting Technology and Equipment*. Issued by the Taiwan Green Productivity Foundation, Prepared for the Industrial Development Bureau, Ministry of Economic Affairs, Taiwan
- CCC (2010). *Composting processing technologies*. Canada: Alliance de la qualité compost. NRAES-54, N. R. A. E. S. (1792). *Composting Council of Canada (CCC) On-Farm composting handbook*. (R. Rynk, Ed.). Ithaca NY. Recuperado de <http://www.compost.org>
- Cooperband, L. (2002). *The Art and Science of Composting A resource for farmers and compost producers*. University of Wisconsin-Madison, Center for Integrated Agricultural Systems, 1–14. Recuperado de <http://www.cias.wisc.edu/wp-content/uploads/2008/07/artofcompost.pdf>
- EPA. (1998). *An analysis of composting as an environmental remediation technology*. Environmental Protection Agency (EPA). USA.
- Ekinci, K., Keener, H. M. y Akbolat, D. (2006). Effects of feedstock, airflow rate, and recirculation ratio on performance of composting systems with air recirculation. *Bioresource Technology*, 97(7), 922–932. Recuperado de <http://doi.org/10.1016/j.biortech.2005.04.025>
- Getahun, T., Nigusie, A., Entele, T., Van Gerven, T. y Van der Bruggen, B. (2012). Effect of turning frequencies on composting biodegradable municipal solid waste quality. *Resources, Conservation and Recycling*, 65, 79–84. Recuperado de <http://doi.org/10.1016/j.resconrec.2012.05.007>

- Griineeklee, C. E. (2016). Comparing Open versus In-Vessel Composting. In Proceedings of Asian-North American Conference on Solid Waste Management, Los Angeles (pp. 68-79). (2016, 9 de Octubre). Recuperado en <http://www.seas.columbia.edu/earth/wtert/sofos/nawtec/anacon98/anacon98-04.pdf>
- Goyal, S., Dhull, S. K. y Kapoor, K. K. (2005). Chemical and biological changes during composting of different organic wastes and assessment of compost maturity. *Bioresource Technology*, 96(14), 1584–1591. Recuperado de <http://doi.org/10.1016/j.biortech.2004.12.012>
- Handreck, K. A. (1983). Particle size and the physical properties of growing media for containers. *Commun in Soil Science Plant Analysis*, 14(3), 209–222. <http://doi.org/10.1080/00103628309367357>
- Haug, R. T. (1993). *The Practical Handbook of Compost Engineering*. Boca Rato, USA: Lewis Publishers.
- Hamoda, M. F., Abu, Q. A., y Newham, J. (1998). Evaluation of municipal solid waste composting kinetics. *Resources, Conservation and Recycling*, 23(4), 209–223. [http://doi.org/10.1016/S0921-3449\(98\)00021-4](http://doi.org/10.1016/S0921-3449(98)00021-4)
- INECC y SEMARNAT. (2012). Diagnóstico básico para la gestión integral de los residuos, 201. Recuperado de <http://www.semarnat.gob.mx/temas/residuos-solidos-urbanos>.
- Jiang, T., Schuchardt, F., Li G., Guo R. y Zhao, Y. (2011). Effect of C/N ratio, aeration rate and moisture content on ammonia and greenhouse gas emission during the composting. *Journal of Environmental Sciences*. 23 (10), 1754-1760.
- Jiang, J., Liu, X., Huang, Y., y Huang, H. (2015). Inoculation with nitrogen turnover bacterial agent appropriately increasing nitrogen and promoting maturity in pig manure composting. *Waste Management*, 39, 78–85. <http://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.02.025>
- Kulcu, R. y Yaldiz, O. (2008). Effects of air flow directions on composting process temperature profile. *Waste Management*, 28(10), 1766–1772. <http://doi.org/10.1016/j.wasman.2007.06.026>
- Lei, F. y Vandergheynst, J. S. (2000). The effect of microbial inoculation and pH on microbial community structure changes during composting. *Process Biochemistry*, 35(9), 923–929. [http://doi.org/10.1016/S0032-9592\(99\)00155-7](http://doi.org/10.1016/S0032-9592(99)00155-7)
- Liang C., Das K.C. y Mc Clendon R.W. (2003). The influence of temperatura and moisture contents regimes on the aerobic microbial activity of biosolids composting blend. *Bioresource Technology*. 86, 131-137.
- Lin C. (2008). A negative-pressure aeration system for composting food waste. *Bioresource Technology*. 99, 7651-7656.
- Moreno-Casco J. y Moral-Herrero R. (2007). *Compostaje*. (Edit. Cient.). Madrid. España. Ediciones Mundi-Prensa. 530
- Mustin M. (1987). *Le compost. Geestion de la matière organique*. Ed. Francois Dubusc. Paris. 954.

- Rasapoor, M., Nasrabadi, T., Kamali, M. y Hoveidi, H. (2009). The effects of aeration rate on generated compost quality, using aerated static pile method. *Waste Management*, 29(2), 570–573. <http://doi.org/10.1016/j.wasman.2008.04.012>
- Richard, T. L., Hamelers, H. V. M., Veeken, A. y Silva, T. (2002). Moisture relationships in composting processes. *Compost Science & Utilization*, 10(4), 286–302. doi.org/10.1080/1065657X.2002.10702093
- Rodríguez, R., Jiménez, J. F., Ignacio, J., Salcedo, E., Francisco, J. y Íñiguez, G. (2013). Utilización de subproductos de la industria tequilera. Parte II. Compostaje de bagazo de agave y biosólidos provenientes de la planta de tratamiento de vinazas tequileras. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 29(4), 303–313.
- Rodriguez, S. M., Cordoba y Vasquez, A. (2006). Experiencias de la producción de composta en México. In *Manual del Compostaje municipal. Tratamiento de residuos sólidos urbanos*. (primera). México, D.F. Recuperado de <http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones/libros/499/experiencias.html>
- Ruggieri, L., Gea, T., Mompeó, M., Sayara, T. y Sánchez, A. (2008). Performance of different systems for the composting of the source-selected organic fraction of municipal solid waste. Recuperado de <http://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2008.05.014>
- Shammas, N. K., Wang, L. K., Pereira, N. C. y Hung, Y.T. (2008). Biosolids Composting. *Biological Treatment Processes*. Volumen (6), pp.669–710.
- Tech Tetra, I. (2013). Biological Treatment Processes. Emerging Technologies for Wastewater Treatment and In-Plant Wet Weather Management, 1–46. (10 de septiembre). Recuperado de <http://water.epa.gov/scitech/wastetech/upload/Emerging-Technologies-Report-2.pdf>
- Tiquia, S. M., Tam, N. F. Y. (2002). Characterization and composting of poultry litter in forced-aeration piles. *Process Biochemistry*, 37(8), 869–880. [http://doi.org/10.1016/S0032-9592\(01\)00274-6](http://doi.org/10.1016/S0032-9592(01)00274-6)
- Tremier, A., De Guardia, A., Massiani, C., Paul, E. y Martel, J. L. (2005). A respirometric method for characterising the organic composition and biodegradation kinetics and the temperature influence on the biodegradation kinetics, for a mixture of sludge and bulking agent to be co-composted. *Bioresource Technology*, 96(2), 169–180. <http://doi.org/10.1016/j.biortech.2004.05.005>
- Trillas-Gay, I., Avilés, G., Francisca, S., y Moreno, C. (2014). De residuos a recursos. El camino hacia la sostenibilidad. (M. P. Moreno, Joaquín; Moral, R.; García, Morales J.L.; Pascual, J.A; Bernal, Ed.). España: Mundi-Prensa.
- Vigneswaran, S., Kandasamy, J. y Johir, M. A. H. (2016). Sustainable Operation of Composting in Solid Waste Management. *Procedia Environmental Sciences*, 35, 408–415. <http://doi.org/10.1016/j.proenv.2016.07.022>
- Watson, J., Taylor, M., Worth, G., y Robinson, P. (2003). Composting apparatus with internal transport system. (2003, 12 de Octubre). Recuperado de . <https://www.google.com/patents/US20030180940>.

MICROBIOLOGÍA BÁSICA Y CINÉTICA

Por Isaías de la Rosa Gómez

En este capítulo se hace una descripción de las principales características morfo-fisiológicas de los grupos de microorganismos que se estudian tanto en la microbiología como de aquellos que intervienen en el proceso de compostaje. Se describen las condiciones físicas y químicas, así como los nutrientes y medios de cultivo utilizados por los microorganismos en los procesos metabólicos de crecimiento y de reproducción. Se analizan modelos de reproducción para la cinética bacteriana. Finalmente, se describen las fases del proceso de compostaje, indicando variables de control y algunos de los microorganismos que intervienen en las fases mesofílica y termofílica de este proceso.

2.1 Microorganismos

Los microorganismos son un extenso grupo de seres vivos que solo pueden ser observados usando el microscopio óptico o electrónico. Se pueden encontrar formas celulares aisladas, libres e independientes (bacterias, algas unicelulares, hongos unicelulares, protozoos), pero también se pueden encontrar en forma de colonias celulares. Se incluye en esta definición a los virus, priones y los viroides que aunque son microscópicos, son entidades no celulares que necesitan “parasitar” formas de vida más complejas para desarrollar sus ciclos vitales.

El compostaje es una práctica que se realiza desde hace mucho tiempo y consiste en aprovechar la capacidad de autodepuración que proporciona la naturaleza, a través de los microorganismos necesarios para degradar biológicamente la materia orgánica, siendo su única función la de controlar los factores ambientales, que de forma interrelacionada influyen dicho proceso. La pila de residuos a compostar constituye un microhábitat con características muy diferentes a las de su entorno, lo que propicia la aparición de organismos especialmente adaptados a esas condiciones, los cuales se clasifican en consumidores primarios (bacterias, hongos, actinomicetos), cuando consumen directamente materia orgánica muerta. Los secundarios, son macroorganismos que se alimentan con los consumidores anteriores (tijeretas, ácaros de molde, rotíferos, protozoos, escarabajos, nematodos y gusanos planos de tierra); los consumidores terciarios van a alimentarse de materia orgánica viva, tanto de consumidores primarios como de secundarios (arañas, pseudoescorpiones, ácaros predadores, ciempiés, hormigas y escarabajos). A continuación se describen los microorganismos que participan en el proceso de compostaje (Carpenter y Alonso, 2016; De Kruif, 2006; Prescott, 2004).

2.1.1 Bacterias

Las bacterias son microorganismos unicelulares pertenecientes al reino *Procaryotae*. Son los seres vivos más pequeños con capacidad para crecer y multiplicarse por división binaria, suelen ser móviles, estrategia esencial para su supervivencia. A diferencia de las células eucariotas, las bacterias carecen de membrana nuclear y elementos citoplásmicos especializados y tienen una estructura externa rígida, responsable de la morfología celular.

Las tres principales formas de las bacterias son: esféricas (coco), rectas (bacilos) y curvas (espirales). Dependiendo de los planos de división celular y de la mayor o menor capacidad de separación, los cocos pueden aparecer en forma independiente o agrupados en pares (diplococos), cadenas (estreptococos), cúmulos irregulares en forma de racimos de uva (estafilococos) o agrupamientos cúbicos en forma de rectángulos (tétradas o sarcinas), agrupamiento de cuatro y ocho elementos, respectivamente. Los cocos aislados pueden presentar formas diversas: ovoides, achatadas, lanceoladas; llamados comúnmente cocobacilos.

Los bacilos presentan diferentes morfologías y longitudes, desde las formas más pequeñas cocobacilos a las más largas o filamentosas. Las bacterias pueden aparecer como bacilos rectos, curvos (vibrios) o en forma helicoidal (espirilos), además pueden presentar los extremos afilados en forma de aguja (*fusobacterium*). Las formas basilares se pueden encontrar agrupadas, presentando imágenes características como bacilos paralelos o en zigzag (empalizada) y cadena (estreptobacilos).

Una característica de algunas bacterias es que la morfología no siempre es constante, presentando variaciones conocidas como pleomorfismo. Bacterias espirales o helicoidales con varias curvaturas en su distribución espacial se conocen como espiroquetas (Carpenter y Alonzo, 2016). En la figura 2.1, se presenta la morfología bacteriana.

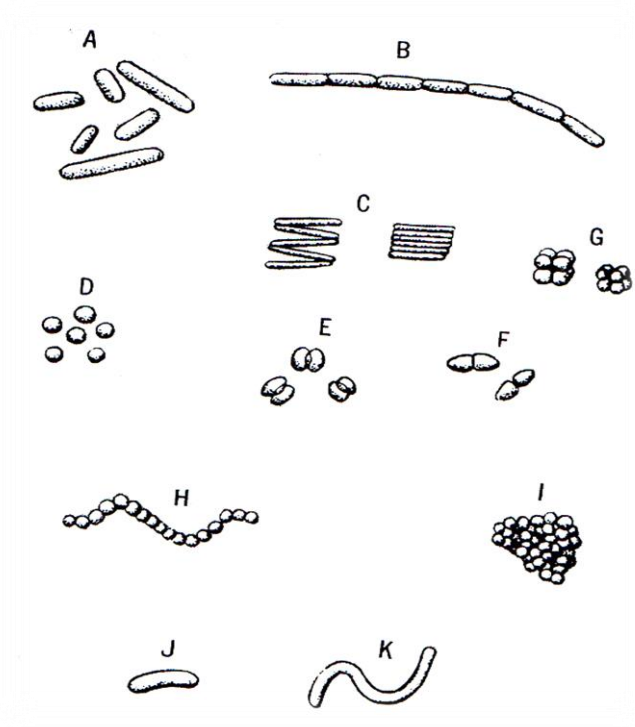


Figura 2.1 Morfología microscópica de bacterias. Fuente: Carpenter y Alonzo, 2016.

a) *Tamaño de las bacterias*

Es difícil definir con exactitud las dimensiones de las bacterias, dado que aparecen en contracción notable durante la preparación de los frotis fijados y teñidos. El tamaño de las células desecadas y teñidas de *Escherichia coli*, por ejemplo, puede ser de 1/3 del tamaño de las células vivas. Las bacterias varían notablemente en tamaño; las variaciones de los límites en las especies que suelen encontrarse son de 20 a 30 veces. Es conveniente indicar que estas variaciones dependen en gran medida de la edad del cultivo y otros factores como temperatura y nutrientes. Las bacterias con crecimiento activo suelen ser más largas que las bacterias viejas, inactivas o muertas que con frecuencia tienen formas esféricas. Antes de identificar un microorganismo desconocido y clasificarlo como bacilo o coco, es necesario hacer un examen en diferentes etapas de crecimiento (cultivos jóvenes y antiguos).

Las bacterias solo son visibles a través de un microscopio, Las unidades de medición utilizadas son la micra (μ) o micrómetro (μm) y el nanómetro (nm), equivalentes a 10^{-3} y 10^{-6} mm, respectivamente. El tamaño de los bacilos está comprendido entre 0.2 a 2 μ de ancho y de 2 a 20 μ de longitud, mientras que el diámetro oscila entre 0.5 y 2 μ . Los cocos normalmente son de 1 μ de diámetro (Liébana, 1997; Prescott, 2004).

b) Estructura de las bacterias

Las bacterias pertenecientes al reino de las procariotas son aparentemente más sencillas que las eucariotas. Su estructura externa está formada por una cápsula, pared celular y membrana citoplásmica, de donde nacen dos tipos de apéndices filamentosos: flagelos y pillis. Algunas bacterias del género *Mycoplasma* no presentan pared celular. La membrana y pared celular son estructuras esenciales en las bacterias; los micoplasmas son el único grupo de bacterias que no contienen pared celular. Las demás estructuras externas pueden o no estar presentes en las bacterias dependiendo del género bacteriano, a estas estructuras se les conoce como elementos facultativos. La pared celular es la estructura más compleja, porque de ella depende el carácter de resistencia a algunos agentes físico que presentan las bacterias.

La composición química de las bacterias es semejante a otros microorganismos, aunque existe notable variación entre especies. La parte interna es granular que corresponde al citoplasma o citosol y otra fibrilar que corresponde al nucleoplasma o cuerpo genóforo o nucleoide, además pueden existir elementos genéticos diferentes al nucleoide conocidos como plásmidos.

Algunas bacterias presentan elementos de resistencia llamados endosporas cuando se encuentran en condiciones de inanición (Carpenter y Alonzo, 2016).

En la figura 2.2, se presentan los elementos que forman la estructura de una célula bacteriana.

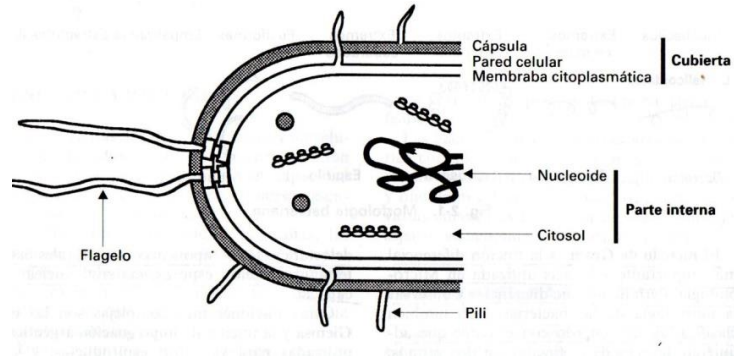


Figura 2.2 Estructura de una célula bacteriana. Fuente: Liébana, 1997

c) *Pared celular*

Para cubrir lo indicado en el título del capítulo y por la importancia biológica que tienen la pared y membrana citoplásmica, se realizará una descripción somera de cada uno de estos elementos.

La pared celular de las bacterias es una estructura fuerte y rígida que protege a las partes más débiles y bioquímicamente activas de la célula y que envuelve a las bacterias por fuera de la membrana citoplasmática. Es la estructura encargada de dar rigidez y forma a la bacteria. Protege a la membrana citoplásmica de la presión osmótica causada por detergente y otros tóxicos. La presión osmótica bacteriana es mucho mayor que la del medio externo, siendo la pared celular la encargada de evitar un estallamiento de la célula.

Bajo las condiciones de diferencia de presión entre la bacteria y el medio se propicia el fenómeno de la distribución facilitada, con beneficios de nutrición para la bacteria.

Un factor muy importante de la pared celular es que se puede teñir con distintos colorantes y permite observar fácilmente los microorganismos al microscopio compuesto. El método de uso universal más utilizado para teñir a los microorganismos fue el desarrollado por el danés Hans Christian Gram, que permite diferenciar a las bacterias como Gram positivas (violetas) y Gram

negativas (rojas); esto es debido a la composición química diferente en su contenido de aminoácidos y lípidos de la pared celular de ambos tipos de bacterias; en la tabla 2.1 se presentan los constituyentes químicos de las paredes celulares de bacterias Gram positivas y Gram negativas.

Tabla 2. 1 *Constituyentes químicos de paredes celulares de bacterias Gram positivas y Gram negativas.*

	Grampositivas	Gramnegativas
Aminoácidos	Tres o cuatro aminoácidos principales que incluyen alanina, ácido glutámico y lisina o ácido diaminopimélico. No se encuentran aminoácidos aromáticos. No se encuentran aminoácidos que contienen azufre.	Se encuentran muchos aminoácidos en las proteínas corrientes, incluido el ácido diaminopimelico.
Ácido murámico	Presente	Presente
Lípidos	0 a 2 por 100	10 a 20 por 100
Polisacáridos	35 a 60 por 100	15 a 20 por 100

Fuente: Adaptada de Carpenter y Alonzo, 2016.

Otra tinción universal para teñir la pared de las bacterias ácido-alcohol resistentes, como el género *Mycobacterium* spp, es la tinción de Ziehl-Neelsen, esta tinción es una variante a la tinción de las bacterias Gram positivas que se tiñen mal con la tinción de Gram; dado su alto contenido de lípidos en pared celular, requiriendo procedimientos especiales como la tinción de Ziehl-Neelsen (Cárpenter y Alonzo, 2016; Liébana, 1997; Prescott, 2004).

A través de la microscopía electrónica se han podido observar algunos detalles de la estructura de la pared. Las bacterias Grampositivas tienen una pared más gruesa y homogénea unida íntimamente a la membrana citoplásmica, mientras que en las Gramnegativas es más delgada y separada de la membrana citoplásmica por un espacio llamado periplásmico.

La rigidez y resistencia de las paredes bacterianas se atribuye a los glucosaminopéptidos; la estructura básica incluye residuos alternos de aminoazúcares, N-acetilglucosamina (glicano) y ácido N-acetilmurámico (péptidos). Este componente es semejante aunque no idéntico, en los distintos grupos bacterianos. Estos polímeros ejercen sus funciones de protección gracias a que sus componentes peptídicos se encuentran entrecruzados. Estas sustancias químicas son propias de las bacterias, no se encuentran en otras células (Cárpenter y Alonzo, 2016).

d) Membrana citoplásmica

La membrana es una estructura obligada de las bacterias, que se encuentra en todas sin excepción. Los componentes principales son fosfolípidos y las proteínas en proporciones aproximadas del 40 y 60 por ciento, respectivamente.

La membrana citoplásmica presenta enzimas llamadas permeasas, que transportan materiales o grupos de éstos al formar complejos fácilmente dissociables. La membrana citoplásmica está unida a las protusiones de la membrana o mesosomas, comprende esencialmente una matriz lipoproteínica en la que están organizados gran parte de los citocromos, la succinoxidasa y enzimas afines a otras enzimas de la bacteria. En la figura 2.3 se presenta un esquema que muestra la membrana citoplásmica de una bacteria, es una capa diferenciada independiente del citoplasma, subyacente a la pared celular, es una membrana del tipo llamada unitaria, esto es una estructura formada de tres capas que incluye una hojilla bimolecular de lípido entre dos capas de proteína y otras capas hidrófilas como fosfatos. Regula el paso de materiales al interior y exterior de la célula. Algunas sustancias de poco peso molecular, por ejemplo urea, glicina y glicerina, fácilmente pasan al interior de las bacterias, en tanto que los electrolitos como NaCl y KCl y moléculas orgánicas mayores como glucosa y sacarosa, atraviesan la membrana con gran lentitud. La membrana es esencialmente impermeable a las sustancias orgánicas polares, dada su gran concentración de lípidos.

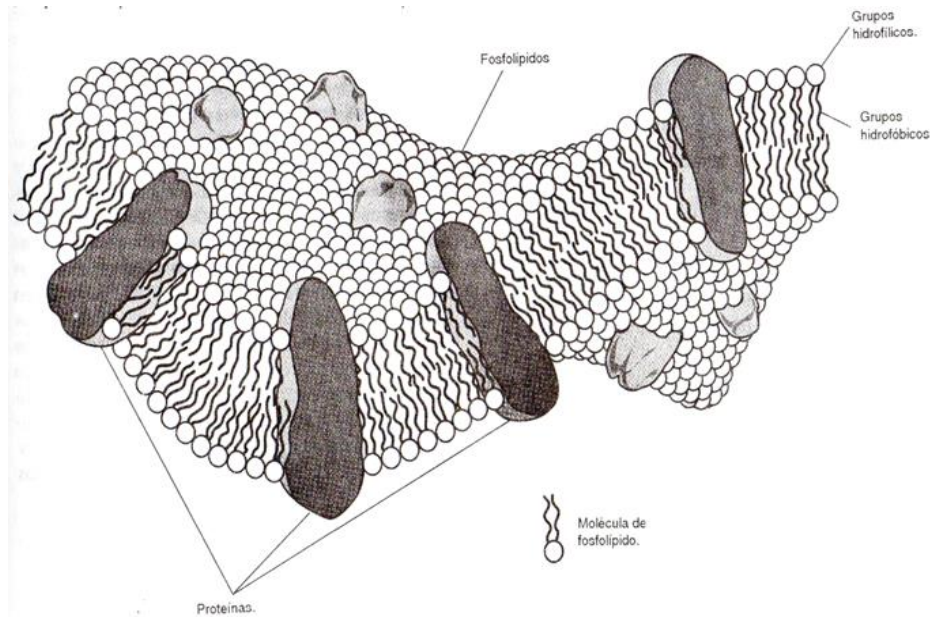


Figura 2. 3 Membrana citoplásmica de una bacteria. Fuente: Brock y Madigan, 1994.

e) *Actividad en los suelos*

Son la fuente primaria del suministro de nitrógeno a las plantas. Son fijadores del nitrógeno atmosférico. Algunas bacterias, actinomicetos y algas verde azules (cianofíceas), reducen el nitrógeno atmosférico a nitrógeno amoniacal y lo incorporan al suelo. Entre los géneros de bacterias aerobias nitrofixadoras están *Azotobacter*, *Azospirillum*, *Beijerinckia*, *Derxia*, *Azomonas* y *Oscillatoria*.

La mayor actividad de las nitrofixadoras se alcanza con una humedad adecuada en el suelo y con una fuente de carbono accesible, como el material vegetal en descomposición (pajas, hojas o subproductos de cosecha). Por esto siempre están acompañadas por bacterias celulolíticas. Necesitan de alcoholes, azúcares o ácidos orgánicos que se los suministran otros microorganismos degradadores. El desarrollo de las nitrofixadoras se estimula con las exudaciones que emite la planta cuando se encuentra bien nutrida.

Los *Rhizobium* son bacterias noduladoras que fijan simbióticamente el nitrógeno en algunas leguminosas. Los actinomiceto *Frankia* y *Actinomyces* nodulan en plantas de porte arbustivo o arbóreo. Los *Rhizobium* son móviles en estados jóvenes y forman esporas cuando se encuentran en condiciones difíciles. Crecen entre 0 y 47 grados centígrados. El crecimiento óptimo entre 20 y 30 grados centígrados. El pH donde se desarrollan mejor está entre 4.5 y 7.5. Son aerobios aunque toleran escasez de oxígeno por un tiempo moderado.

El Nitrógeno del suelo se encuentra presente como diferentes compuestos químicos, pero la mayor parte forma orgánicos (materia orgánica del suelo). Solo del 5 al 10% del nitrógeno total se encuentra como formas inorgánicas: Amonio (NH_4^+), Nitrito (NO_2^-) y Nitrato (NO_3^-). El Nitrito y el Nitrato se encuentran en la solución del suelo, mientras que el amonio (catión) se encuentra como intercambiable o fijado a la estructura de algunos minerales.

El Nitrógeno, bajo las diferentes formas en que se encuentra en el suelo, es el elemento más susceptible de transformación por acción de los microorganismos. Estas transformaciones ocurren simultáneamente y en diverso sentido, formando el ciclo del Nitrógeno, en el cual hay aportes o pérdidas al suelo o cambio de un estado a otro. La nitrificación es un proceso bacteriano y aeróbico.

Las bacterias nitrificantes más importantes son *Nitrosomas europaea* y *Nitrobacter winogradski*. Las primeras oxidan Amonio a Nitrato y las segundas oxidan Nitrito a Nitrato, haciendo disponible el nitrógeno para las plantas. Hay otros microorganismos que también oxidan los substratos nitrogenados a Nitritos y Nitratos. Entre las bacterias están los géneros *Bacillus*, *Pseudomonas* y *Clostridium*. Los actinomicetos nitrificadores son *Streptomyces* y *Nocardia* y los hongos *Aspergillus* y *Penicillium*.

La movilización del fósforo en la naturaleza lo hacen los microorganismos, ya que participan en la disolución y transformación del elemento hasta combinaciones asimilables por las plantas y también en la fijación temporal.

Cuando se incorporan al suelo residuos de cosecha, materiales orgánicos, enmiendas, estiércol, se agregan gran cantidad de compuestos organofosforados. El fosfato orgánico es hidrolizado por la enzima fosfatasa que segregan los microorganismos y libera el fosfato, para que sea asimilado por la planta.

Las bacterias *Bacillus megaterium*, *Bacillus mesentericus* y *Pseudomona putida* solubilizan las formas orgánicas del fósforo (ortofosfato) y las transforman a fosfatos asimilables por las plantas. Los hongos del género *Aspergillus*, *Penicillium* y *Rhizopus* degradan ácidos nucleicos y glicerofosfatos a fosfatos simples. Las levaduras del género *Saccharomyces* y *Rhodotorula* cumplen la misma función que los hongos. El actinomiceto *Streptomyces* destruye las moléculas orgánicas fosfatadas, liberando así el fósforo.

El azufre es esencial en la nutrición de las plantas, pues participa en la formación de aminoácidos y vitaminas. Las plantas lo asimilan como sulfato. La descomposición de la materia orgánica por los microorganismos trae la degradación de aminoácidos hasta obtener sulfatos. También se degradan sulfatos orgánicos. Las bacterias del género *Thiobacillus* oxidan a sulfato el sulfuro que produce en condiciones de anegamiento y que es tóxico para las plantas. Además oxidan a sulfato el azufre elemental, compuestos de azufre como tiosulfato, tetratiónato y sulfito a sulfato. Se desarrollan en medios aerobios con pH ácidos y extremadamente ácidos (2-3), forman ácido sulfúrico en la oxidación para aumentar la acidez.

Las bacterias de los géneros *Bacillus*, *Pseudomonas*, *Artrobacter* convierten el azufre elemental y el tiosulfato a sulfato. Los hongos del género *Aspergillus* oxidan el azufre en polvo (Brock y Madigan, 1994).

2.1.2 Hongos

Las talofitas se subdividen en tres grupos: algas, hongos y líquenes. Los hongos muchas veces son filamentosos, estudiados por la Micología, son seres unicelulares y pluricelulares, con estructura celular típica de los Eucariontes y con núcleo similar al de las plantas y animales; con pared celular a base de quitina, polisacárido constituido por unidades de N-acetil glucosamina.

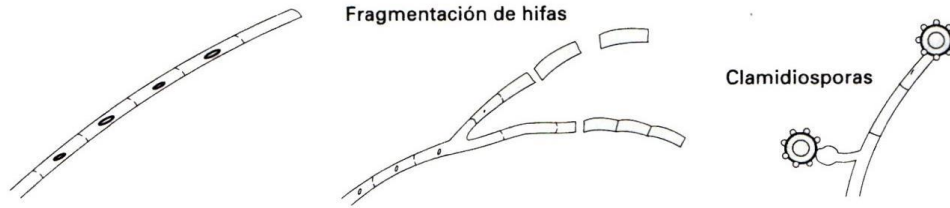
a) Estructura macroscópica

Los hongos pueden presentar dos tipos de organización celular. Filamentosos (mohos) o levaduriformes (unicelular).

En los hongos filamentosos la unidad básica es la hifa, cuyo conjunto da lugar a un micelio. En los hongos levaduriformes, la estructura básica es la levadura organismo unicelular y un conjunto de ellas forman un pseudomicelio, llegando a desarrollar una hifa verdadera.

Los hongos filamentosos son pluricelulares, formados por hifas alargadas de paredes paralelas, subdivididos en compartimentos independientes llamadas hifas tabicadas o septadas. En algunos hongos no existen septas o compartimientos y sus hifas se denominan cenocíticas o continuas y contienen organelos típicos de todas las células eucariotas, en ocasiones con más de un núcleo por compartimento; una característica de este tipo de hifas es que normalmente presentan movimiento browniano, como es el caso de las levaduras. Durante el crecimiento, las hifas se van ramificando y posteriormente se fusionan entre sí por uniones extremo laterales o extremo, dando lugar al micelio o talo, en la figura 2.4, se aprecian diferentes micelios, hifas y formas de reproducción de hongos. Las células del hongo suelen ser cilíndricas y su tamaño es variable. El diámetro de algunas células de hongo va de 2 a 5 μ y pueden ser de dos a cuatro veces más largos que anchos. No se ha observado fácilmente el núcleo de los hongos, se necesita utilizar métodos especiales de coloración (Carpenter y Alonzo, 2016).

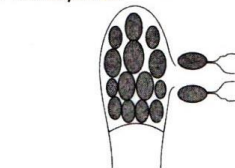
1. Sin células especializadas



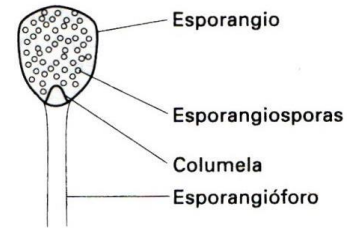
2. Con células especializadas

2.1. Propagación asexual

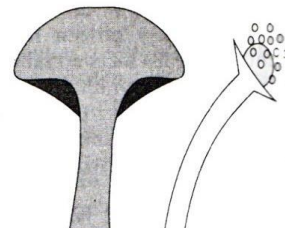
2.1.1. Esporas



Hifa portadora de zoosporas

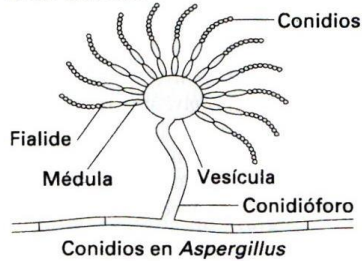


E sporangiosporas

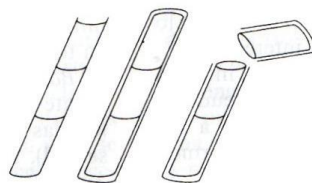


E esporangios rotos

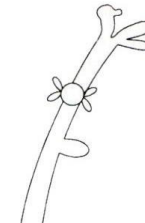
2.1.2. Conidios



Conidios en *Aspergillus*



Arthroconidios (*Geotrichum* spp)



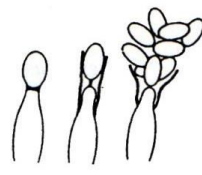
Blastoconidios



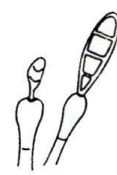
Simpodioconidios



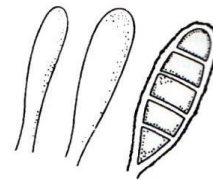
Anneloconidios



Fialoconidios

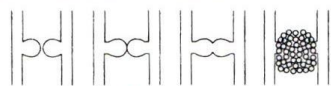


Poroconidios

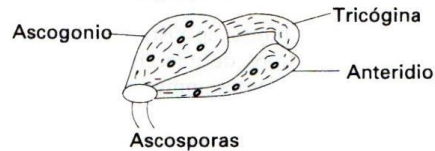


Aleurioconidios (Macroconidias)

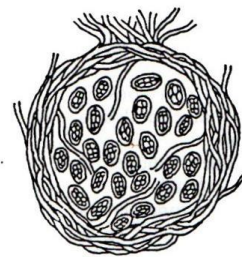
2.2. Reproducción sexual



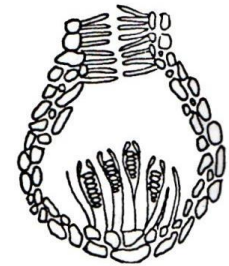
Zigospora



Ascosporas



Ascosporas en cleitotecios



Ascosporas en peritecios

Figura 2.4 Propagación y reproducción de los hongos. Fuente: Liébana, 1997

b) Crecimiento vegetativo de los hongos

El crecimiento de los hongos se inicia con la participación de células especializadas o células no especializadas; la primera se lleva a cabo mediante elementos diferenciados como células masculinas y femeninas que se conjugan (reproducción sexual), esto sucede en los hongos *Phicomycetos*, *Ascomicetos* y *Basidiomicetos*. La segunda puede producirse con esporas para llevar a cabo la germinación o bien con fragmentos de hifas, en las que su pared celular se ha engrosado para aumentar su resistencia al medio adverso, a estas células se les denomina clamidosporas. Estos dos procedimientos forman parte de la reproducción asexual de los hongos; en la figura 2.5 se presenta la morfología y estructura de los hongos *Aspergillus sp.*

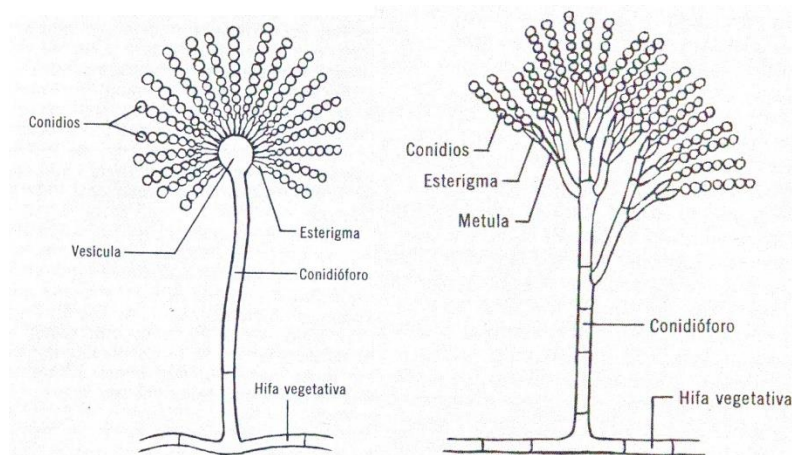


Figura 2.5 Estructura de un *Aspergillus sp.* y un *Penicillium sp.* Fuente: Carpenter y Alonso, 2016

c) Reproducción asexual

Los hongos se reproducen por esporulación mediante esporas sexuales y asexuales. Integrantes de las familias *Phycomycetes* y *Ascomicetes* producen ambos tipos de esporas; en los hongos imperfectos o *Deuteromycetes* se encuentran esporas asexuales. Las esporas se producen mediante elementos internos, llamadas esporas o endoesporas o mediante elementos externos llamadas conidias.

d) Endosporas (esporangiosporas)

Son producidas por una estructura turgente, llamado esporangio, localizado en el extremo de una hifa fecunda de un hongo no tabicado o cenocítico, sobre la cual aparece una hifa especializada denominada esporangióforo, cuyo extremo se dilata para formar el esporangio, dentro del cual se desarrollan las esporangiosporas. La parte del esporangióforo que hace protusión dentro del esporangio, se denomina columela.

Cuando el esporangio se rompe por acción de agentes físicos, liberando miles de esporangiosporas, las cuales son más resistentes a la desecación que las células vegetativas, sobreviven cierto tiempo en su viaje aéreo y germinarán en el medio húmedo adecuado para producir un nuevo hongo (Figura 2.5)

e) Conidios

Los *Ascomycetes* y muchos hongos imperfectos tienen esporas desnudas o no protegidas, llamadas conidios en hifas fecundas llamadas conidióforos. Los extremos de los conidióforos se diferencian en células especializadas llamadas métula y vesícula para géneros de hongos distintos, de los cuales se formará la célula llamada esterigma, la cual exterioriza el producto de la reproducción asexual del hongo, los conidios y repite varias veces el fenómeno impulsando los primeros conidios hacia adelante para formar una cadena, con el conidio más antiguo en el extremo.

f) Fisiología de los hongos y nutrimentos

La fisiología de cualquier organismo depende de la disponibilidad de nutrientes y condiciones ambientales adecuadas. Los hongos son los únicos organismos cuya forma de tomar sus nutrientes del medio, es utilizando la absorción o transporte de sustancias solubles y en consecuencia, los nutrientes son muy sencillos, como glucosa como fuente de carbono; algunos utilizan alcoholes o ácidos orgánicos. También utilizan aminoácidos y péptidos como fuente de

carbono y de nitrógeno, algunas especies utilizan amoníaco y nitratos, otras exclusivamente grasas.

g) Actividad en los suelos

La actividad metabólica de los hongos hace que se genere energía, la cual es empleada para la síntesis de biomoléculas que el hongo utiliza para elaborar las estructuras celulares necesarias en el proceso de reproducción. Algunos hongos especialistas tienen enzimas específicas, que utilizan para degradar compuestos recalcitrantes como la lignina e hidrocarburos de elevado peso molecular. Los hongos metabolizan compuestos carbonados de muy difícil degradación como las celulosas, las hemicelulosas y las ligninas. También degradan azúcares simples, alcoholes, aminoácidos y ácidos nucleicos. Pueden ser parásitos o saprofiticos. Son muy importantes en suelos con desechos de cosecha. Su crecimiento ramificado rápido y la intensa actividad degradadora les permiten mantener un equilibrio en los ecosistemas del suelo.

Las raíces de las plantas están pobladas de hongos que aprovechan las exudaciones radiculares constituidas por azúcares, aminoácidos, ácidos orgánicos, nucleótidos, enzimas, vitaminas y sustancias promotoras de crecimiento. Los hongos movilizan nutrientes minerales hacia las raíces de las plantas, aumentan la capacidad de retener agua en sequía, fijan nitrógeno y fósforo y protegen las raíces de fitopatógenos emitiendo sustancias que los inhiben. Los hongos son muy activos en las plantas y prefieren los azúcares que segregan por las raíces; también toman aminoácidos.

Algunos hongos entran en simbiosis con las raíces llamadas micorrizas. Son más activos en suelos arenosos y pobres en materia orgánica. La simbiosis se ve favorecida por la pobreza mineral del suelo.

Los géneros de hongos más importantes asociados a las raíces de las plantas son *Aspergillus*, *Penicillium*, *Rhizopus* y *Trichoderma*. Los dos primeros movilizan el fósforo y el nitrógeno del suelo. El género *Trichoderma* sostiene la humedad en las raíces en condiciones de sequía.

2.1.3 Actinomicetos

Es un grupo grande y heterogéneo de bacterias; una característica importante es que la forman bacilos Grampositivos no esporulados, muchos de forma irregular y filamentosa. Los *Actinomicetos* son un grupo ubicuo de microorganismos ampliamente distribuidos en ecosistemas naturales y que tienen gran participación en la degradación de la materia orgánica. Estos microorganismos son abundantes en el suelo, también se encuentran en ambientes acuáticos, dulces y marinos. Dentro de sus características particulares presentan un olor típico a suelo húmedo, por la producción de un metabolito llamado geosmina, adicionalmente presenta una actividad metabólica alta, producen terpenoídes, pigmentos y enzimas extracelulares con las que son capaces de degradar la materia orgánica de origen vegetal y animal.

a) Características generales

Los actinomicetos son bacterias ramificadas filamentosas formando micelios; en algunas familias los filamentos pueden ser cortos (*Actinomycetaceae*) o bien desarrollados (*Streptomycetaceae*); son bacterias Gram positivas filamentosas. El orden de los *Actinomycetales* comprende 63 géneros, constituyendo aproximadamente el 20-60% de la población microbiana del suelo. En la Figura 2.6 se presentan diversas formas de cadenas de conidios producidas por varias especies de *Streptomyces* (Carpenter y Alonzo, 2016).

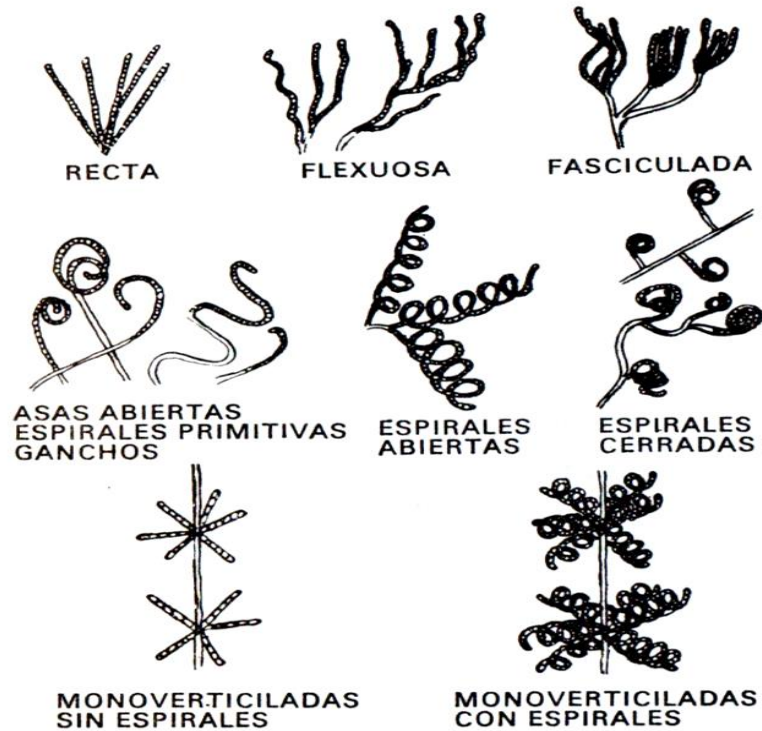


Figura 2.6 Cadenas de conidios producidas por Streptomyces. Fuente: Carpenter y Alonzo, 2016.

Los actinomicetos se encuentran incluidos en el grupo de las bacterias debido a: la pared celular está compuesto por péptido glicano, el diámetro de sus hifas es menor al de los hongos, son sensibles a los antimicrobianos pero resistentes a los antifúngicos y sus genomas son típicamente procariotas, presentando alto contenido de Guanina y Citosina en su ADN.

Los actinomicetos son aerobios y algunos anaerobios, son heterotróficos, pudiendo utilizar fuentes de carbono simples, complejas, así como ácidos, azúcares, polisacáridos, proteínas e hidrocarburos alifáticos. Utilizan como fuente de nitrógeno amonio, nitratos, aminoácidos, peptonas y gran número de proteínas.

b) Condiciones de crecimiento

La materia orgánica de los suelos estimula su crecimiento y multiplicación de los actinomicetos. Los suelos alcalinos o neutros suelen ser más favorable para el desarrollo de estas bacterias, el rango óptimo para el crecimiento de estos microorganismos se encuentra entre 6.5 y 8.0; en suelos con pH por debajo de 5.0 es notable su ausencia.

A nivel de laboratorio, los actinomicetos crecen en medios con agar nutritivo, agar soya tripticaseína, agar sangre y agar infusión cerebro corazón: Para el desarrollo de esporas y pigmentos, es necesario un medio enriquecido con quitina coloidal, extracto de suelo, avena, almidón con sales inorgánicas, extracto de levadura y pectona. El crecimiento de colonias de actinomicetos en medio sólido se puede ver en 3 o 4 días de incubación, pero el desarrollo de micelio madurado con esporas se observa entre 7 y 14 días. En medio líquido se recomienda incubación con agitación, con velocidades entre 200 y 250 rpm de agitación para mejor la aireación.

c) Actividad en el suelo

Los actinomicetos se han estudiado a lo largo del tiempo por el papel importante que desempeñan en diferentes campos, equilibrando el suelo como un ecosistema dinámico y por su gran aporte a la industria en la producción de compuestos bioactivos como los antibióticos. Se ven involucrados en procesos de fitorremediación, reciclaje de los constituyentes más resistentes de la materia orgánica como lignina, celulosa, hemicelulosa y quitina

Los suelos con contenidos de humedad entre 80% y 90% son perjudiciales para el crecimiento de los actinomicetos. Los géneros *Streptomyces*, *Nocardia* y *Micromonospora* se encuentran como habitantes del suelo.

Algunos actinomicetos producen antibióticos que regulan los patógenos de las plantas que están en el suelo. Al agregar conidias de actinomicetos en un suelo contaminado con bacterias y

hongos fitopatógenos, éstos crecen inhibiendo las poblaciones de los patógenos, regulando los problemas hasta alcanzar un balance que le permita a las plantas obtener nutrientes y desarrollarse.

Los géneros de actinomicetos del suelo más importantes para la nutrición de las plantas son: *Streptomyces*, *Nocardia*, *Micromonospora*, *Thermoactinomyces*, *Frankia* y *Actinomyces* (Brock y Madigan, 1994; Carpenter y Alonzo, 2016).

2.1.4 Protozoarios

Son organismos unicelulares, eucariotes, con uno o varios núcleos, que pueden mediar de 1 a 100 μ . Están envueltos por una unidad de membrana, a través de la cual pasan los nutrientes transformados activamente, fagocitados o por pinocitosis.

En su citoplasma existen mitocondrias, aparato de Golgi, lisosomas, retículo endoplásmico liso y rugoso. Estas inclusiones permiten al protozoario respirar, digerir alimentos, generar energía, crecer y reproducirse. Los protozoarios que carecen de mitocondrias suelen ser anaerobios.

Los protozoarios son heterótrofos y las partículas ingeridas se digieren en el fagolisosoma o vacuola digestiva por medio de enzimas lisosómicas. Los desechos son eliminados al exterior por difusión.

La movilidad es conferida por la presencia de pseudópodos, cilios o flagelos. Se pueden reproducir asexualmente por fisión binaria, pero en ocasiones existen otros mecanismos más complejos. Se reproducen sexualmente dando lugar a la formación de un cigoto o huevo.

En su ciclo de vida, los protozoarios presentan una forma vegetativa llamada trofozoito, es lábil y en condiciones ambientales adversas vive poco tiempo fuera del huésped. Por lo tanto, un número importante de protozoarios son capaces de elaborar una forma quística, con menor

actividad metabólica que el trofozoito, pero más resistente, lo que les permite sobrevivir en situaciones desfavorables y pasar de un huésped a otro.

Se conocen unas 25,000 especies dentro del filo Protozoa y tradicionalmente se han clasificado como un subreino del reino animal (*animalia*), en la actualidad se considera más correcto agruparlos en un reino independiente denominado *Protista*. La base de esta clasificación se ha realizado por los elementos locomotores y otras características morfológicas y estructurales; en la figura 2.7 se presentan la morfología de un protozario ciliado.

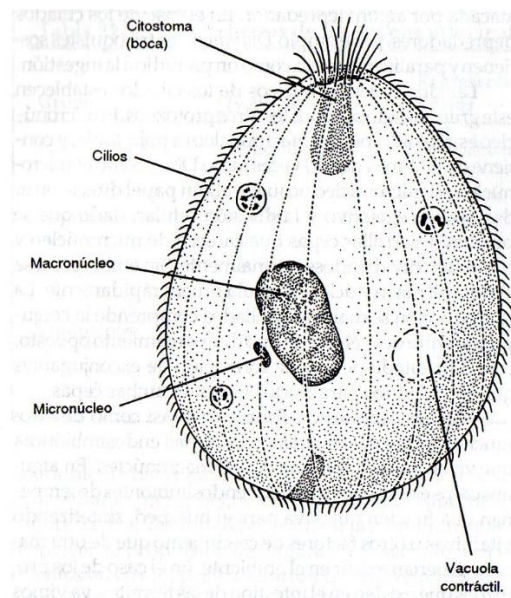


Figura 2.7 Estructura de un protozario ciliado. *Balantidium coli*. Fuente: Brock y Madigan, 1994

2.2 Macroorganismos

La biota del suelo está definida como la flora y la fauna que vive en el mismo, y en su mayoría viven en la capa superficial del litter o capa de residuos frescos. Estos organismos constituyen la parte viva e influyen en su desarrollo, siendo las plantas las de mayor importancia porque controlan la cantidad de materia orgánica que es adicionada. Los organismos viven en esta capa

del suelo conocida también como horizonte “O”, ya que se encuentran las condiciones de temperatura, humedad, ventilación, luminosidad y espacio para satisfacer sus necesidades.

La clasificación de los organismos en el suelo, pueden llevarse a cabo tomando en cuenta diferentes criterios: tamaño, tiempo de permanencia y hábitat en el suelo. La clasificación por tamaño suele ser la más común:

- Microorganismos: organismos caracterizados por tener un tamaño menor a 200 μ
- Mesorganismos: organismos que se encuentran en un rango de tamaño entre 200 μ y 6 mm.
- Macroorganismos: organismos que poseen un tamaño mayor a 6 mm.

Dentro de los microorganismos se encuentran la microflora, formada por bacterias, actinomicetos, hongos y algas. Dentro de la microfauna se presentan los protozoarios.

Respecto a los meso y macroorganismos, los principales grupos de animales son:

- Artrópodos: formados por los insectos, los arácnidos, los miriápodos, crustáceos, en los suelos se encuentran las moscas, los escarabajos, las arañas, las hormigas, las termitas, los milpiés, los ciempiés, los caracoles y las babosas.
- Anélidos: Conocidos también como lombrices de tierra, son animales con forma de gusano (vermiforme) y de sangre fría, por lo que requieren ambiente húmedo para regular su temperatura. Se pueden diferenciar dos tipos de anélidos: epigeas, que viven en la superficie del suelo y endógenas, viven en el interior del suelo.
- Nematodos: corresponde a los animales pluricelulares más pequeños del suelo, tienen un papel importante en la descomposición de la materia orgánica y en los ciclos de nutrientes del suelo; pueden ser también parásitos, predadores y fitopatógenos.

Los macroorganismos del suelo (raíces e invertebrados de tamaño mayor que 2 mm), desempeñan un papel clave en los procesos que determinan la fertilidad del suelo, ya que regulan la disponibilidad de nutrientes asimilables para las plantas. Las esferas de actividad de estos organismos se han definido como los sistemas de regulación biológica del suelo, los cuales están constituidos por una fuente de energía (materia orgánica, MO), una población de descomponedores (microorganismos) y una población de reguladores (macroorganismos). Estos sistemas de regulación se distinguen según la naturaleza de los macroorganismos implicados: el sistema de artrópodos de la hojarasca y raíces superficiales, la rizosfera para las raíces; la drilosfera para las lombrices; y la termitosfera para las termitas.

Ciertos organismos del suelo, principalmente las lombrices, las termitas y las hormigas, se han definido como ingenieros del ecosistema. Estos producen estructuras (turrículos, nidos y galerías) por medio de las cuales pueden modificar el ambiente donde viven, causando dos efectos contrastantes en la descomposición y la dinámica de la MO.

Acelera, por un lado, su velocidad de reciclamiento, lo que facilita la actividad microbiana; favorecen, por otro, su conservación a largo plazo porque la inmovilizan en estructuras biogénicas estables en el tiempo.

Las actividades de la macrofauna afectan, a veces de manera considerable, el crecimiento de las plantas. Pueden ser también vectores de microorganismos simbióticos de las plantas, como los fijadores de nitrógeno o los hongos de micorriza, o pueden digerir, de manera selectiva, microorganismos patógenos. En los ecosistemas, naturales, las lombrices y las hormigas afectan también a la dinámica de la vegetación, ya que pueden influir, de manera selectiva, en la disseminación de las semillas y en la composición de los bancos de semilla del suelo.

De la macrofauna del suelo los organismos más importantes son las lombrices de tierra y los comejenes. Las lombrices de tierra tienen un principal efecto en los primeros 15 a 20 cm de

suelo, y la cantidad de suelos que estos organismos pasan a través de su sistema digestivo en un año puede llegar hasta 30 ton/ha, favoreciendo una mejor agregación tanto en el tamaño de los agregados como en la estabilidad de los mismos. Estos organismos pueden tener una biomasa de hasta 18.000 kg/ha, aunque en promedio su valor es 500 kg/ha, lo cual representa aproximadamente el 0.9 por ciento o el 0.02 por ciento del peso del suelo, respectivamente. Algunos autores consideran que los orificios que algunas lombrices de tierra dejan en el suelo permiten una mejor aireación y drenaje del mismo (Laich, 2011).

2.2.1 Requerimientos de crecimiento

Cuando los microorganismos se encuentran en un medio de cultivo apropiado, comienzan a dividirse activamente empleando los nutrientes que les aporta el medio para "generar" nuevos microorganismos. Este proceso continúa hasta que algún nutriente del medio de cultivo se agota (sustrato limitante) y el crecimiento se detiene. También puede detenerse por la acumulación de alguna sustancia inhibidora formada por los mismos microorganismos. Existen dos aspectos claramente diferenciados que hacen al crecimiento microbiano: uno estequiométrico, por el cual la concentración final de microorganismos obtenidos dependerá de la concentración y composición del medio de cultivo, y el otro cinético, el que dirá con qué velocidad se lleva a cabo el proceso.

a) Nutrición

Es el proceso por medio del cual los organismos toman del medio donde se encuentran los nutrientes y sustancias químicas para poder vivir. Dichos nutrientes son necesarios para: Fines energéticos (catabolismo) y biosintéticos (anabolismo).

La nutrición bacteriana se puede abordar desde los siguientes puntos de vista: tipos de nutrientes requeridos, cantidad de nutrientes, aspectos ambientales y aplicación de la nutrición

bacteriana, utilizado sobre todo en la preparación de medios de cultivo para manejar a los microorganismos en el laboratorio.

Con base en lo anterior, considerando a la nutrición como el medio para que el organismo obtenga energía y para la síntesis celular, se les puede clasificar en dos tipos:

- Litótrofos: los que requieren sustancias inorgánicas sencillas como NH_3 , NO_3 , S, SH_2 , Fe, K, Na, entre otros.
- Organotróficos: requieren compuestos orgánicos (biomoléculas).
- Autótrofos: sintetizan sus materiales a partir de sustancias inorgánicas sencillas como fuente de carbono: CO_2 .
- Heterótrofos: Su fuente de carbono es orgánico (biomoléculas).
- Los microorganismos requieren de una serie de elementos químicos, independientemente si su nutrición es autótrofa o heterótrofa.
- Macronutrientes: C, H, O, N, S, P, K, Mg, Ca.
- Micronutrientes o elementos traza: Co, Cu, Zn, Mo, Fe, entre otros.

b) Crecimiento microbiano

El crecimiento microbiano se refiere al aumento del número de microorganismos a lo largo del tiempo; debe entenderse al crecimiento demográfico de una población, el crecimiento de una célula se denomina ciclo celular. Esto aplica a bacterias, hongos y levaduras.

La descripción se centrará al crecimiento bacteriano. El proceso de desarrollo de una bacteria se denomina ciclo celular, en donde tiene lugar la replicación del material genético, la síntesis de compuestos celulares, el aumento de tamaño de la bacteria para alcanzar el doble del inicial y su división por fisión simple o bipartición para dar lugar a dos células hijas, la duración del ciclo se mide como tiempo de generación.

El crecimiento de una población resulta de la suma de los ciclos celulares de todos los individuos de la población.

El proceso que se lleva a cabo en el crecimiento de una población es asincrónico, puesto que en ellos cada microorganismo se encuentra en un punto diferente del ciclo celular; esto es, en un momento determinado en un cultivo se encuentran células que acaban de dividirse, otras que están replicando su ADN, otras que están creciendo, otras que están iniciando la división celular.

En un cultivo sincrónico todas las células se encuentran simultáneamente en la misma fase de crecimiento celular. En condiciones de laboratorio es muy difícil mantener un cultivo sincrónico. En la naturaleza las bacterias se encuentran en condiciones de crecimiento próximas a la fase estacionaria, presentando cierta sincronización.

c) Cultivo de microorganismos

Los microorganismos requieren de un medio favorable para su crecimiento, esto significa que deben tener nutrientes necesarios para el proceso de síntesis de nuevos materiales, contar con una fuente de energía, temperatura y oxígeno y otros factores de crecimiento.

d) Medio de cultivo

Un cultivo es un sustrato o solución de nutrientes, en los que se propicia el crecimiento artificial de microorganismos en el laboratorio. Un cultivo puro es aquel que tiene un solo tipo de microorganismos. En la naturaleza se encuentran solamente cultivos mixtos de microorganismos. Los microorganismos necesitan distintas sustancias nutritivas y se requieren diferentes medios para cultivos específicos. Los ingredientes que suelen formar parte de los medios de cultivo, son:

Agua. Es absolutamente necesaria para la existencia de la célula viva, debiendo utilizarse agua destilada para la preparación de medios de cultivo, con el fin de evitar que la dureza formada por sales de Ca y de Mg reaccionen con los fosfatos del medio de cultivo, y formen fosfatos

insolubles cuando se lleva a cabo el proceso de esterilización produciendo precipitados indeseables.

Peptonas. Son productos intermedios de la hidrólisis de proteínas naturales por enzimas como la tripsina, papaína y pancreatina. Durante el curso de la hidrólisis de grandes moléculas de proteínas se obtienen varios fragmentos denominados proteosas, peptonas, péptidos y aminoácidos. Las proteosas presentan propiedades coloidales como las proteínas.

Una proteína como la caseína o albúmina de huevo, incorporada a un medio como única fuente de nitrógeno y carbono, probablemente no es atacada por las bacterias. Si se añade al medio un poco de peptona, entrará en la célula y estimulará la síntesis de una enzima proteolítica extracelular capaz de atacar toda la proteína; las fracciones de la proteína, pueden entonces introducirse en la célula bacteriana, en donde son utilizada en el metabolismo intermedio por las enzimas intracelulares. La función más importante de las peptonas en los medios de cultivo es suministrar nitrógeno.

Extracto de carne. Para prepararla se corta en pedazos carne fresca de vaca, en un recipiente se agua y se calienta por varias horas, agitando a intervalos. En un nuevo recipiente, el material sólido se exprime para que escurra bien. El extracto se enfría para eliminar la grasa y se pasa por un cedazo. El líquido se evapora al vacío hasta adquirir consistencia pastosa. En el extracto se distinguen dos tipos de productos: nitrogenados y no nitrogenados. Los primeros comprenden: creatina, xantina, hipoxantina, ácido úrico, ácido adenílico, ácido isosínico, carnosina, carnitina, glicocola, urea, glutamina y alanina beta. Entre los segundos se encuentra el glucógeno, fosfato de hexosa, ácido láctico, ácido succínico, inosita, grasa, sales inorgánicas entre otros. El empleo de extracto de carne de vaca en medios de cultivo fue introducido por Loeffler (1881), y ha persistido desde entonces en bacteriología. Se añade extracto de carne a los medios para proporcionar ciertas sustancias que estimulan la actividad bacteriana.

Extracto de levadura. Este producto se prepara sometiendo células autolisadas de levadura a extracción con agua y evaporando el líquido hasta la sequedad en el vacío. El extracto de levadura estimula notablemente el crecimiento bacteriano. Es una gran reserva de vitamina B, por esto resulta superior al extracto de carne.

Agar. Es un polisacárido que se extrae de *Gelidium corneum* y de otras especies de algas afines al género. Este polisacárido es insoluble en agua fría, soluble en caliente. Una solución al 1.0 %, solidifica a 35-50 °C, formando un gel firme que funde a 100 °C. Como lo atacan muy pocas bacterias, se utiliza como un medio gelificante para el desarrollo y el aislamiento de especies bacterianas.

Cloruro de sodio. Generalmente se añade a los medios de cultivo para aumentar la presión osmótica. El cloruro de sodio no actúa como atemperante o tope. Algunas sales como fosfatos y carbonatos, que tienen muy acentuada esa propiedad, se añaden con frecuencia a medios de cultivo con tal objeto.

e) *Sustancias inorgánicas necesarias*

Se desconoce que sustancias inorgánicas requieren las bacterias. El principal obstáculo en este punto es obtener medios exentos de impurezas inorgánicas para poder efectuar observaciones exactas. A falta de información definida, se suelen añadir a los medios Na, K, Mg, Fe, S, P y Ca.

Existe información de investigaciones realizadas sobre la necesidad de los metales indicados para las diferentes funciones metabólicas que realizan las células microbianas, en donde se resalta la necesidad de azufre como componente universal para las células vivas y su influencia directa en el desarrollo celular; elementos como el Fe que forma parte de estructuras celulares vitales y elementos como el Mn, oligoelemento que interviene en el desarrollo de enzimas microbianas (Manahan, 2004; Prescott, 2004; Salle y García, 1965).

f) Cinética

Estudiar a una población microbiana requiere de la observación de los microorganismos desde una nueva perspectiva. Cuando se estudia una célula, lo que se hace es describir sus partes en particular, como produce la célula las moléculas que necesita para una nueva célula y como protege su información genética cuando ésta pasa de una generación a la siguiente. Sin embargo, cuando se estudian poblaciones de células, lo que se necesita es contar los individuos desde el punto de vista matemático.

El término crecimiento microbiano al referirse a una población, las células individuales crecen, pero la mayoría solo incrementa su tamaño dos o tres veces, antes de que se dividan en dos. La división celular se traduce en un aumento del número de células de la población.

Cuando se siembra un microorganismos en un medio de cultivo apropiado, éstos empiezan a dividirse activamente, empleando los nutrientes que les aporta el medio de cultivo para fabricar nuevos microorganismos. Este proceso continua hasta que algún nutriente del medio de cultivo se agota, éste sería el sustrato limitante, consecuentemente el crecimiento se detiene; también puede verse interrumpido por la acumulación de alguna sustancia inhibitoria formada por las mismas células, como puede ser una alta concentración de metabolito.

Si se produce el agotamiento del sustrato limitante que provoca la detención del crecimiento microbiano, se pueden considerar dos aspectos fundamentales que definen el crecimiento microbiano. Por una parte el aspecto estequiométrico, debido a que la concentración final de los microorganismos dependerá de la concentración y composición del medio de cultivo, y por la otra parte el de tipo cinético, el que dirá con qué velocidad se lleva a cabo el proceso.

2.2.2 Fases del desarrollo de una población bacteriana

El crecimiento microbiano, o el aumento de microorganismos a lo largo del tiempo se refiere al crecimiento demográfico de una población. En esta parte se abordará el crecimiento de bacterias, el cual puede servir para entender el crecimiento de levaduras, de hongos, de protozoarios y de algas. En el metabolismo celular no todo el sustrato es consumido para la elaboración de nueva biomasa, sino que parte se emplea para el mantenimiento celular, otra para la producción de producto y otra parte se dirige al desarrollo celular. Por esto, surge el concepto de rendimiento global estequiométrico (teórico) y el aparente.

El rendimiento estequiométrico se define como la cantidad de biomasa o producto formado por la cantidad de sustrato consumido con esa finalidad. El rendimiento estequiométrico sería la cantidad de biomasa o producto presente entre la cantidad total de sustrato consumido. El rendimiento teórico es difícil hallar, debido a que el proceso es complejo y no se puede averiguar qué cantidad de sustrato va dirigido a la formación de nuevas células y a sus funciones vitales.

El desarrollo de una bacteria a lo largo del ciclo celular, considerada en forma aislada, comprende la nutrición, la síntesis de los componentes celulares, replicación del material de la bacteria, el crecimiento para alcanzar el doble del tamaño inicial y su división por fisión simple o bipartición para dar lugar a dos células hijas. El tiempo que tarda este proceso se conoce como tiempo medio de generación y depende de factores físico químicos del medio (Liebana, 1997; Pisabarro y Peñas, 2009; Prescott, 2004).

2.2.3 Expresión matemática del crecimiento bacteriano

El crecimiento de una población es el resultado de la suma de los ciclos celulares de todos los individuos; el crecimiento suele ser asincrónico, debido a que cada individuo se encuentra en un

punto diferente del ciclo celular, esto significa que cada célula se encuentra en una etapa de síntesis, replicación de su ADN, inicio de la división.

Las bacterias crecen siguiendo una progresión geométrica, en la que el número de individuos se duplica al cabo de un tiempo determinado, denominado tiempo de generación (a). De esta forma se calcula el número de bacterias (N), al cabo de un número de generaciones (x), usando la ecuación 2.1.

$$N = N_0 2^x \quad (\text{Ec. 2.1})$$

Siendo N_0 el número inicial de células. El número de generaciones se puede calcular con la siguiente ecuación:

$$x = \frac{t}{a} \quad (\text{Ec. 2.2})$$

Donde (t) es el tiempo total de generación

Cuando la bacteria crece en un medio líquido, las células que se producen en cada división continúan su vida independientemente, formando una suspensión de células. Cuando la célula crece en un medio sólido, el resultado del crecimiento después de un tiempo es una colonia, la cual se denomina Unidad Formadora de Colonia (UFC). Cuando algunos tipos de bacterias o levaduras crecen sobre superficies forman biopelículas (biofilms), en las cuales las células se asocian entre sí mediante capas de polisacáridos que forman una película que recubre la superficie sobre la que se encuentran las células. Los biofilms son importantes porque los microorganismos que las forman resultan más resistentes a los antibióticos y al ataque de las células del sistema inmunológico y por consiguiente, las infecciones que producen son más difíciles de tratar. La presencia de biopelículas es un problema serio en los implantes ortopédicos, catéteres. El sarro de los dientes es un ejemplo de biofilms.

Durante el crecimiento microbiano en medios de cultivo sólidos, las bacterias se manifiestan mediante la presencia de colonias. El crecimiento explosivo de las bacterias produce un gran número a partir de una única célula, de manera que en un tiempo de incubación, se produce una colonia formada por individuos iguales. En la tabla 2.2 se aprecian los tiempos medios de generación de diferentes especies bacterianas.

Tabla 2.2 *Tiempo de generación de algunas bacterias en condiciones óptimas de cultivo.*

Bacteria	Medio	Tiempo gen (min)
Escherichia coli	Glucosa sales	17
Bacillus megaterium	Sacarosa sales	25
Streptococcus lactis	Leche	26
Streptococcus lactis	Caldo de lactosa	48
Staphylococcus aureus	BHI	27-30
Lactobacillus acidophilus	Leche	66-87
Rhizobium japonicum	Extr. Manitollevadura	344-461
M. tuberculosis	Sintético	792-932
Treponema pallidum	Testículo ratón	1980

Fuente: Adaptada de Pisabarro y Peñas, 2009.

2.2.4 Cinética del crecimiento celular

A pesar de que el crecimiento de las células es un fenómeno complejo, a menudo se puede tener una descripción global del mismo, a través de ecuaciones relativamente sencillas. Entre éstas la más utilizada es la ecuación de Monod. Esta ecuación describe el crecimiento celular en función de la disponibilidad de un sustrato limitante y se puede expresar de la siguiente forma:



$$r_s = \frac{dX}{dt} = \mu_m \frac{S \cdot X}{K_s + S} \quad (\text{Ec. 2.4})$$

Donde r_s es la velocidad de crecimiento de las células, μ_m es la velocidad específica de máximo crecimiento y K_s es la constante de Monod (Monod, 1949).

Es bastante común expresar la ecuación 2.4 en función de la velocidad específica de crecimiento:

$$\mu_m = \frac{S \cdot X}{K_s + S} \quad (\text{Ec. 2.5})$$

En la cual μ_m es el máximo valor que puede alcanzar la velocidad de crecimiento, cuando $S \gg K_s$ y las concentraciones del resto de nutrientes no han cambiado de forma considerable. K_s es el valor de la concentración del nutriente limitante a que la velocidad específica de crecimiento es la mitad de la máxima. Para valores de S inferiores a K_s , la velocidad de crecimiento depende de una forma lineal de S , mientras que para valores superiores, el valor de μ se hace independiente de S .

Uno de los inconvenientes que plantea el uso de la ecuación de Monod es la correcta determinación del valor de K_s , ya que éste normalmente es muy pequeño y no es fácil de averiguar.

La ecuación de Monod es muy simple y no siempre permite tener una correcta representación de los datos de crecimiento de un microorganismo. Por ello, se han desarrollado otros modelos más complejos basados en éste. El modelo de Monod describe solo a los periodos de crecimiento exponencial y de la fase estacionaria. En términos más complejos se puede usar la ecuación

logística, es un modelo sencillo donde se considera que la velocidad de crecimiento de las células solo depende de su concentración, pero incluye además un término de inhibición proporcional al cuadrado de la concentración de biomasa.

$$\frac{dX}{dt} = kX - \beta X^2 \quad (\text{Ec. 2.6})$$

Donde k es un término análogo al de la ecuación de Malthus y β es una constante del término inhibición (Mathews, Van Holde, Ahern y de Buitrago, 2002; Monod, 1949; Zwietering, Jongenburger, Rombouts y Van'T Riet, 1990)

2.2.5 Curva de crecimiento de población bacteriana

En un cultivo bacteriano en medio líquido, se pueden diferenciar cuatro fases en la evolución del proceso de crecimiento en condiciones de lote, durante un tiempo de 30 horas.

Fase de adaptación o Lag: en esta fase los microorganismos adaptan su metabolismo a las condiciones ambientales del medio (nutrientes), antes de iniciar el crecimiento exponencial. En esta fase el microorganismo se vuelve extremadamente sensible a las condiciones ambientales (agentes físicos).

Fase exponencial o logarítmica: Durante este periodo las bacterias consumen los nutrientes del medio rápidamente, siendo la velocidad de crecimiento vertiginosa y el tiempo de generación mínimo. La evolución del número de células se ajusta al modelo matemático descrito anteriormente. En esta etapa los microorganismos son productivos en los procesos industriales, nocivos en los procesos ambientales e infecciosos en la multiplicación dentro del organismo del agente infeccioso. El proceso de reproducción se lleva a cabo una vez que la célula ha terminado

su adaptación, lo que involucra síntesis de macromoléculas. Cada especie microbiana tiene un tiempo medio de generación característico, como se ve en la tabla 2.3.

Tabla 2. 3 *Tiempos de duplicación característicos.*

Tipo de célula	t_d (h)
Bacterias	0.3-2.5
Levaduras	1.0-4.0
Hongos	1.5-7.0
Microalgas	18-35
Células animales in vitro	20-40

Fuente: Pisabarro y Peñas, 2009.

Fase estacionaria: Las células en esta etapa desarrollan un metabolismo diferente al de la fase exponencial, durante este periodo se produce una acumulación y liberación de metabolitos secundarios que pueden tener importancia en el proceso, ambiente o en intoxicaciones producidas por las bacterias. En este periodo no hay un incremento en el número de bacterias.

Fase de declinación o muerte: Los microorganismos entran en esta etapa debido a que se agotan los nutrientes cuando se encuentran en un proceso tipo lote, existiendo acumulación de los metabolitos que se produjeron durante la fase de crecimiento exponencial y competencia entre células, limitando el desarrollo (Figura 2.8) (Pisabarro y Peñas, 2009).

El crecimiento microbiano está gobernado por la acción simultánea de diversos factores físicos y químicos limitantes. La capacidad de sobrevivir e iniciar el crecimiento de cada tipo de microorganismo, está influenciada por la acción de factores extrínsecos e intrínsecos. Los primeros dependen de factores ambientales (pH, temperatura, etc.), mientras que los segundos son propios de las características del sustrato.

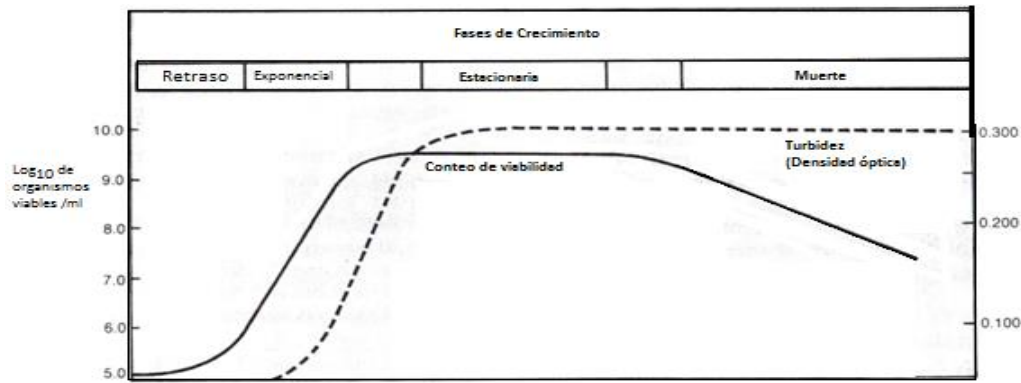


Figura 2.8 Fases del crecimiento de una población de bacterias. Fuente: Pisabarro y Peñas, 2009

La *temperatura* es un parámetro importante para el crecimiento de los microorganismos, cada microorganismo tiene una temperatura de crecimiento adecuada, en donde se encuentra una temperatura mínima por debajo de la cual no existe crecimiento; a temperaturas mayores se produce un incremento lineal de la velocidad de crecimiento hasta alcanzar la temperatura óptima a la que la velocidad es máxima. Por encima de esta temperatura óptima, la velocidad de crecimiento decae bruscamente y se produce la muerte celular. La muerte celular a altas temperaturas se debe a la desnaturalización de las proteínas y a las alteraciones producidas en las membranas lipídicas.

El aumento de la temperatura en un cultivo microbiano trae como consecuencia un incremento generalizado de la velocidad de las reacciones enzimáticas. Se denomina coeficiente de temperatura a la relación entre el incremento de la velocidad de reacción y el de la temperatura. En términos generales, la velocidad de las reacciones bioquímicas suele aumentar entre 1.5 y 2.5 veces, al aumentar 10°C la temperatura a la que tiene lugar.

También es importante conocer que a temperaturas bajas, el metabolismo celular es lento, las células paran de crecer y suelen morir, mientras que a temperatura superior a la óptima, se produce la muerte celular rápidamente. Existe una clasificación de los microorganismos con base

en su temperatura de crecimiento mínimo, máximo y óptimo (Carpenter y Alonso, 2016; Prescott, 2004).

Tabla 2. 4 *Temperaturas de crecimiento para los diferentes tipos de microorganismos.*

Tipo de microorganismo	Temperatura mínima	Temperatura óptima	Temperatura máxima
Psicrófilo	-5 + 5	12-15	15-20
Psicrótrofo	-5 + 5	25-30	30-35
Mesófilo	5-15	30-45	35-47
Termófilo	40-45	55-75	60-90

Fuente Adaptada de Pisabarro y Peñas, 2009.

El *pH* es un parámetro importante para el crecimiento de los microorganismos, debido a que cada microorganismo tiene un rango dentro del cual puede crecer y vivir adecuadamente, fuera de este rango muere.

El pH intracelular es ligeramente más alto con relación al medio que rodea a las células, ya que la obtención de energía por medio del metabolismo, depende de la existencia de una diferencia en concentración de protones a ambos lados de la membrana citoplasmática. El pH interno en la mayoría de las células microbianas se encuentra en rango de 6.0 a 8.0.

Los rangos de pH tolerables por diferentes tipos de microorganismos, son también distintos. Existen microorganismos acidófilos que pueden vivir a pH de 1.0 y otros alcalófilos que toleran pH de 10.0.

Normalmente el medio de cultivo suele bajar como consecuencia de la acidez que generan los microorganismos acidógenos, disminuyendo al pH a niveles de 4.0 por el ácido láctico que generan los microorganismos acidúricos, productores de este ácido a partir de la glucosa. De esta

forma las bacterias competidoras mueren y las productoras de ácido láctico se convierten en la población dominante.

La reducción del pH puede deberse a varios factores, uno de los cuales es la liberación de ácidos orgánicos de cadena corta por bacterias acidógenas; hay que tener en cuenta que la acción bactericida de estos ácidos orgánicos de cadena corta, es más potente que la debida a la bajada únicamente del pH que producen. Esto es debido a que los ácidos orgánicos de cadena corta, son tóxicos para algunas bacterias y microorganismos por sí mismos.

La acidez de los ácidos orgánicos de cadena corta, tiene aplicación en la conservación de alimentos acidificándolos, y la producción de ácidos en el curso de fermentaciones naturales permite alargar la vida de los alimentos (alimentos fermentados).

2.3 Actividad de agua

Se denomina actividad de agua a la relación entre la presión de vapor de agua del substrato de cultivo (P) y la presión de vapor de agua del agua pura (P_o). El valor de la actividad de agua está relacionado con el de la humedad relativa (HR).

El valor de la actividad de agua da una idea de la cantidad de agua disponible metabólicamente. El agua es un substrato en muchas reacciones bioquímicas. Cuando no hay agua disponible, estas reacciones se detienen y el metabolismo se para. Esta falta de agua también detiene muchas de las enzimas que podrían degradar las estructuras biológicas. Por ello, las células que no crecen por falta de agua, no mueren rápidamente. Cuando un microorganismo se encuentra en un substrato con actividad de agua menor que la necesaria, su crecimiento se detiene; esta detención del crecimiento, no suele llevar asociada la muerte del microorganismo, sino que éste se mantiene en condiciones de resistencia durante un tiempo más o menos largo. En el caso de las esporas, la fase de resistencia puede ser considerada prácticamente ilimitada.

La gran mayoría de los microorganismos requiere valores de actividad de agua muy altos para poder crecer. Los valores mínimo de actividad de agua para diferentes tipos de microorganismos son los siguientes: bacterias $a_w > 0.90$, levaduras $a_w > 0.85$, hongos filamentosos $a_w > 0.80$. Como puede verse, los hongos filamentosos son capaces de crecer en sustratos con actividad de agua menor (más secos), de la que permite el crecimiento de bacterias y levaduras. Por esta razón se puede producir la colonización de sustratos con baja actividad de agua (por ejemplo, alimentos como el queso o almíbares o la piel), por mohos (hongos filamentosos), mejor que por bacterias.

En función de su tolerancia a ambientes con baja cantidad de agua, a los microorganismos que pueden crecer en estas condiciones se les clasifica en halotolerantes, halófilos y xerófilos, según toleran o requieren condiciones salinas o hiersalinas, respectivamente.

La reducción de la actividad de agua para limitar el crecimiento bacteriano tiene importancia en industria alimentaria. La utilización de almíbares, salmueras y salazones reduce la actividad de agua del alimento para evitar su deterioro bacteriano (Manahan, 2004).

2.4 Microorganismos en el proceso de compostaje

Existe una gran variedad de especies de microorganismos, por lo que su predominio depende de las condiciones nutricionales y ambientales. Una forma muy común de clasificarlos es en base a la temperatura ya que es el parámetro más influyente para que se desarrollen, siendo así del tipo mesofílico y termofílico; los mesófilos son aquellos que se desarrollan en temperaturas óptimas de 37°C, frecuentemente son capaces de crecer en rangos alrededor de 25 a 45°C. Los termófilos crecen por encima de los 45°C por lo que se encuentran asociados a los materiales en fermentación como la composta, en donde se pueden alcanzar temperaturas de 65°C; sus enzimas tienen alta estabilidad térmica debido principalmente a redes de interacciones iónicas y modificaciones de la membrana plasmática.

A través de la acción de las enzimas se realiza la hidrólisis de macromoléculas complejas que constituyen los residuos sólidos orgánicos (RSO), como consecuencia de esta actividad, los compuestos simples solubles en agua que apoyan el crecimiento microbiano se liberan favoreciendo la continuidad del proceso. Por otra parte, el grado en que se producen estas actividades enzimáticas da información sobre la tasa de descomposición de la materia orgánica (MO) y, por lo tanto, sobre la estabilidad del producto. Los sustratos orgánicos tienen diferente complejidad, por lo que su biotransformación durante el compostaje requiere la acción conjunta de enzimas diferentes (Juárez, 2014). De igual forma la pila de compostaje es un ecosistema, en el que diversas poblaciones microbianas secuencialmente son reemplazadas y degradan la MO de acuerdo a la disposición de nutrientes y las condiciones ambientales que prevalecen en cada fase.

Aunque las bacterias dominan el medio ambiente y participan en la rotación de las sustancias húmicas, su capacidad para degradar macromoléculas estables, tales como los ácidos húmicos y lignina es limitada, los hongos, por otro lado, son los más eficientes degradadores de éstos (Juárez, 2014).

a) Bacterias

Las bacterias son el grupo más numeroso, variado y activo de microorganismos primitivos presentes en el suelo. Tiene estructura unicelular procariota, crecen individualmente o en grupo, su tamaño es menor a un micrómetro (μm), existen millones de especies diferentes según su especie presentan diferente morfología (cocos, bacilos, espirilos, etc).

La gran variedad de especies de microorganismos que están presentes en la composta y su dominio depende principalmente de las condiciones nutricionales y ambientales. Éstos se pueden clasificar con base a la temperatura, ya que es el parámetro más influyente para que se desarrollen; conforme a ello se pueden clasificar en mesofílicas y termofílicas (Ballesteros, 2016; Laich, 2011).

Las bacterias mesófilas aerobias son de gran importancia al inicio de la descomposición de los RO hasta que se alcanzan temperaturas alrededor de los 35°C. Estas bacterias no son tan comunes y pertenecen al género *Bacillus*, las cuales predominan y pueden formar esporas cuando las condiciones del medio son desfavorables. Los *Bacillus* presentan la capacidad de degradar una enorme variedad de derivados de los tejidos animales y vegetales tales como: celulosa, almidón, pectina, proteínas, agar; e intervienen en los procesos de nitrificación, desnitrificación, fijación de nitrógeno, jugando un rol muy significativo en el ciclo del C y N. Los *Bacillus* y *Pseudomonas* producen α -amilasa que degradan el almidón al igual que *Aspergillus* que también producen proteasa, glucoamilasas y pectinasas. Dentro del grupo de los *Bacillus* se encuentran las *Cellulomonas* spp., las fijadoras de nitrógeno atmosférico *Rhizobium* spp. y las nitrificadoras *Nitrosomas* spp. y *Nitrobacter* spp (Laich, 2011; Juárez, 2014).

Bacterias termófilas. La identificación de bacterias termófilas extremas pertenecientes al género *Thermus*, capaces de crecer sobre compuestos orgánicos a temperaturas de 50-80°C, con un óptimo de crecimiento de 65-75°C. Por lo tanto, las especies del género *Thermus* (*T. thermophilus*, *T. aquaticus*, etc.), aisladas inicialmente en sitios geotermales, están probablemente adaptadas a las altas temperaturas del compost y juegan un papel importante en la biodegradación de los residuos durante la fase termófila. Asimismo, las especies del género *Hydrogenobacter* han sido aisladas en estas condiciones. Estas bacterias son autotróficas, no forman esporas y crecen a 60-80°C (óptimo 70-75°C). Obtienen su energía a través de la oxidación del azufre o del hidrógeno y sintetizan sus estructuras carbonadas a partir del CO₂. Estas bacterias actúan sobre la hemicelulosa, descomponen una variedad importante de compuestos orgánicos tales como los carbohidratos, ácidos orgánicos, polisacáridos, proteínas, lípidos y alcoholes (Ballesteros, 2016; Carpenter y Alonzo, 2016).

b) *Actinomicetos*

Son bacterias filamentosas que se desarrollan a tasas de crecimiento inferiores a la mayoría de las bacterias y hongos y por lo tanto compiten ineficientemente cuando el nivel de nutrientes es alto. En esta fase predominan géneros de la familia *Nocardiaceae* (Laich, 2011). Son considerados como un grupo de transición entre las bacterias y los hongos, debido a que son bacterias filamentosas, carecen de núcleo como las bacterias pero poseen filamentos multicelulares como los hongos. Son organismos aerobios, su crecimiento se estimula con la reducción de la humedad, una mejora en la aireación y el aumento de temperatura; son poco tolerantes a la acidez, necesitan un medio equilibrado de minerales y vitaminas. Los actinomicetos son fundamentales para la degradación de compuestos carbonados como: polisacáridos, lípidos, hidrocarburos saturados, fenoles, proteínas, queratina, quitina, nitrogenados, péptidos y algunos aminoácidos. Algunos son capaces de sintetizar y segregar al medio aminoácido libre.

Los actinomicetos *Arthrobacter* ssp. y *Streptomyces* ssp., que están presentes durante el compostaje, también tiene reconocida incidencia en procesos de biorremediación en suelos. Intervienen en determinadas etapas de degradación de C y evitan la generación de malos olores, forman sustancias húmicas en la degradación y formación de sustancias precursoras de los ácidos húmicos, gracias a su capacidad de utilizar compuestos heterocíclicos nitrogenados; le dan el olor característico a tierra, ya que son especialmente importantes en la formación del humus. Sus enzimas les permiten romper químicamente residuos ricos en celulosa, lignina, quitina y proteínas. Con frecuencia producen antibióticos que inhiben el crecimiento bacteriano. Poseen forma alargada con filamentos que se extienden como telas de araña grises, suelen aparecer al final del proceso de descomposición en los primeros 10-15 centímetros de la superficie de la pila (Ballesteros, 2016; Brock y Madigan, 1994).

c) *Hongos*

Los hongos son heterótrofos eucariontes unicelulares y pluricelulares con presencia de esporas y micelio, son saprofitos, es decir metabolizan MO muerta. Las especies son muy diversas, son estrictamente aerobios, pueden tolerar un rango de pH bastante amplio. Los hongos activos en el proceso de descomposición son principalmente ascomicetos y basidiomicetos y pertenecen a los hongos de podredumbre blanca, los cuales presentan un sistema enzimático muy activo, que les permite degradar compuestos orgánicos resistentes como la lignina, que es la principal fuente de humus. Son menores en número que las bacterias o actinomicetos, pero con mayor masa y son responsables de descomponer polímeros vegetales complejos, secos, ácidos o pobres en nitrógeno para ser descompuestos por bacterias, permitiendo a estas continuar el proceso de descomposición una vez que la mayor parte de dichos polímeros han sido degradados. La mayoría viven en las capas externas del compost cuando la temperatura es alta. Crecen en forma de filamentos, formando colonias blancas o grises de textura aterciopelada en la superficie de la pila (Ballester, 2016; Laich, 2011).

2.5 El compostaje

El compostaje es un proceso biooxidativo que da lugar a un producto orgánico altamente estable. Se puede definir como el proceso de mineralización y humificación parcial de sustancias orgánicas, mediante reacciones microbianas. Estas reacciones se realizan bajo condiciones óptimas durante un periodo determinado y relativamente corto. La transformación de la fracción orgánica por medio de los microorganismos es una oxidación aerobia, de forma que la relación superficie/volumen de las partículas y la relación aire/agua en el espacio entre partículas, tiene una influencia directa en el proceso. Los procesos modernos de compostaje se realizan a intervalos de temperatura mesofílica y termofílica. Aunque se considera que los microorganismos

mesofílicos son más eficaces para la descomposición de la materia orgánica, las temperaturas más altas favorecen la eliminación de potenciales patógenos vegetales y animales, y la muerte de semillas de malas hierbas que podrían ser perjudiciales en el uso posterior del producto final.

La adición de compost al suelo introduce una alta variedad de microorganismos implicados en el ciclo de diferentes nutrientes y en procesos de biocontrol de fitopatógenos, debido a la variación de las poblaciones microbianas y a las condiciones ambientales.. Así mismo, cabe destacar el rol que cumple el agregado de compost en la recuperación de suelos, cuya microbiota ha sido atacada por la adición repetitiva de determinados compuestos fitosanitarios. En este caso el compost contribuye a la reinoculación de microorganismos implicados en el ciclo de los nutrientes.

El proceso de compostaje se le considera activo, cuando existe elevación de la temperatura, propiciando el remplazo de poblaciones adaptadas a este cambio, hasta alcanzar la fase termofílica, siempre con una adecuada aireación y humidificación. Cuando disminuye la temperatura es indicativo del agotamiento de los compuestos fácilmente biodegradables.

Los microorganismos que intervienen en este proceso son poblaciones mixtas, siendo las más importantes bacterias, actinomicetos y hongos filamentosos, cuya función principal consiste en la descomposición biológica y estabilización de la materia orgánica, obteniendo un producto que es estable, libre de patógenos y de semillas de plantas que beneficia su aplicación en el suelo.

Las bacterias son las más numerosas en el proceso de compostaje y constituyen entre el 80 y 90% de los microorganismos existentes en el compost. Se trata de un grupo de gran diversidad metabólica, tienen un amplio rango de enzimas que degradan químicamente una gran variedad de compuestos orgánicos. Uno de los géneros bacterianos predominantes en la composta es el *Bacillus*, debido a las temperaturas hasta de 50 °C que se tiene en el proceso, sin embargo, a medida que se incrementa la temperatura disminuye su actividad. Dentro de este tipo de

microorganismos, se puede destacar el grupo de las *Pseudomonas fluorescens*, constituido por algunas especies de bacterias asociadas a procesos de biocontrol de patógenos de plantas y a proceso de estimulación del desarrollo radicular. La utilización de un compost maduro con una alta población de *Pseudomonas fluorescens*, podría actuar como un estimulador del desarrollo de las raíces y un protector frente a diferentes fitopatógenos.

La participación de los actinomicetos durante el proceso de modificación de la materia orgánica del compost es relevante, debido a la capacidad enzimática para degradar compuestos orgánicos complejos (celulosa y lignina). Así mismo, muchas de las especies que participan en este proceso son tolerantes a las temperaturas que alcanza el compost durante el proceso de degradación aeróbica.

Los hongos filamentosos constituyen un grupo muy amplio. Estos pueden estar implicados durante el proceso de compostaje, participando en la degradación aeróbica de la materia orgánica, debido a su alta capacidad lignocelulolítica. Los hongos filamentosos existen en una amplia diversidad de especies que participan en este rango de temperatura, predominando los géneros *Aspergillus* y *Penicillium*, seguidos por *Trichoderma*, *Mucor*, *Rhizopus*, *Cladosporium*, *Fusarium*, *Geotrichum*, entre otros. Así mismo, se encuentran en el suelo como parte de la microbiota normal, implicados en procesos de degradación y solubilización de compuestos orgánicos complejos y compuestos orgánicos.

Los hongos filamentosos y las bacterias mesófilas acidificantes son las poblaciones dominantes en los residuos orgánicos frescos. La población de bacterias puede llegar a 100 millones de células por gramo de material. Las bacterias que participan en esta fase pertenecen a diferentes familias; *Alcaligenaceae*, *Alteromonadaceae*, *Bacillaceae*, *Burkholderiaceae*, *Bradyrhizobiaceae*, *Caryophanaceae*, *Caulobacteriaceae*, *Cellulomonadaceae*, *Clostridiaceae*, *Comamonadaceae*, *Corynebacteriaceae*, *Enterobacteriaceae*, *Flavobacteriaceae*,

Blexibacteriaceae, *Hypomicrobiaceae*, *Intrasporangiaceae*, *Methylobacteriaceae*, *Microbacteriaceae*, *Micrococcaceae*, *Moraxellaceae*, *Neisseriaceae* y *Staphylococcaceae*

Los microorganismos activos e inactivos que intervienen en un compost pueden constituir entre el 2% y el 20% de la masa total. En términos generales, las poblaciones de microorganismos que participan varían entre sí. El rango de temperatura en el que actúan, los sustratos que utilizan, la tolerancia al pH y el oxígeno demandado. En esta sucesión de microorganismos, cada población se adecúa al ambiente creado por la población anterior. En la tabla 2.5 se presentan los patrones típicos en los cambios de las poblaciones microbianas.

Es posible acelerar el proceso de compostaje utilizando solamente microorganismos autógenos de los sustratos utilizados, modificando al inicio y durante el proceso, variables como temperatura, humedad y aireación (Alonso, Molina y Theodoropoulos, 2014).

Tabla 2.5 Población bacteriana en las etapas del compostaje.

Etapas de compostaje				
Microorganismos	Mesofílica	Termofílica	Mesofílica	No. especies
Bacterias:				
Mesófilas	10^8	10^6	10^{11}	6
Termófilas	10^4	10^9	10^7	1
Actinomicetos:				
Termófilos	10^4	10^8	10^5	14
Hongos:				
Mesófilos	10^6	10^3	10^5	18
Termófilos	10^3	10^7	10^6	16

Fuente: Adaptada de Laich, 2011.

Con las fases del proceso y las condiciones de temperatura obtenidas, los microorganismos alcanzan las poblaciones indicadas en la tabla 2.5, en donde no se encuentran patógenos por las temperaturas de la fase termofílica y los antibióticos producidos por los actinomicetos en la fase de maduración. Bajo estas condiciones ocurre la biodegradación de la materia orgánica llevada a cabo por las bacterias, y los materiales lignolíticos son degradados parcialmente por los hongos para la producción de ácidos húmicos, material importante en la matriz de la composta.

Referencias

- Alonso, A. A., Molina, I. y Theodoropoulos, C. (2014). Modeling bacterial population growth from stochastic single-cell dynamics. *Applied and Environmental Microbiology*, 80(17), 5241–53. <http://doi.org/10.1128/AEM.01423-14>
- Ballesteros, T. M. (2016). Elaboración de un mejorador de suelos a partir de residuos orgánicos, lixiviados y biosólidos. Tesis de Maestría. Instituto Tecnológico de Toluca. México.
- Brock, D. T. y Madigan, T. M. (1994). Microbiología. Prentice Hall Hispanoamericana S. A.
- Carpenter, P. L., y Alonzo, V. (2016). Microbiología. México, D. F.: Interamericana. (2016, 18 de Septiembre). Recuperado de <https://books.google.com.mx/books?id=otJQAgAACAAJ>
- De Kruif, P. (2006). Cazadores de Microbios = Microbe Hunters. México, D. F.: Editorial Diana, S. A. Retrieved from <https://books.google.com.mx/books?id=ww9OAQAACAAJ>
- Juárez R. B. (2014). Obtención de composta a partir de biosólidos y residuos sólidos orgánicos con una relación carbono nitrógeno entre 4 y 8 y en tiempo menor a 3 meses. Tesis de Maestría. Instituto Tecnológico de Toluca. México.
- Laich, F. (2011). El papel de los microorganismos en el proceso de compostaje. Jornada Técnica: Fertilidad y Calidad del Suelo. Experiencias de fertilización orgánica en platanera.
- Liébana, U. J. (1997). Microbiología Oral. España: Interamericana McGraw-Hill.
- Loeffler (1881),
- Manahan, S. E. (2004). Environmental Chemistry, Eighth Edition. Taylor y Francis. Retrieved from <https://books.google.com.mx/books?id=k01YDY2vQwoC>
- Mathews, C. K., Van Holde, K. E., Ahern, K. G. y de Buitrago, J. M. G. (2002). Bioquímica: . Pearson Educación. Retrieved from <https://books.google.com.mx/books?id=yClxhenSfA8C>
- Monod, J. (1949). The Growth of Bacterial Cultures. *Annual Review of Microbiology*, 3(1), 371–394. <http://doi.org/10.1146/annurev.mi.03.100149.002103>
- Pisabarro, A. y Peñas, M. (2009). Microbiología Clínica 1er Curso de Diplomatura en enfermería curso 2008-2009, 2009(grupo 1), 142. (2009, 12 de Septiembre). Recuperado de <http://www.unavarra.es/genmic/microclinica/Notas de Micro Clinica 2008.pdf>
- Prescott. (2004). Microbiología. Retrieved from <https://books.google.com.mx/books?id=R0EirgEACAAJ>
- Salle, A. J. y García, I. R. (1965). Bacteriología. S. A. Barcelona 15. Retrieved from <https://books.google.com.mx/books?id=AFfdmQEACAAJ>
- Zwietering, M. H., Jongenburger, I., Rombouts, F. M., y Van'T Riet, K. (1990). Modeling of the Bacterial Growth Curve. *Appl. Envir. Microbiol.*, 56(6), 1875–1881. Retrieved from <http://aem.asm.org/cgi/content/long/56/6/1875>

FACTORES FÍSICOS Y QUÍMICOS DEL COMPOSTAJE

Por María del Consuelo Hernández Berriel y

María del Carmén Carreño de León

El compostaje como degradación aeróbica de compuestos orgánicos siempre se ha producido en la naturaleza, sin embargo, visto como un proceso donde interviene el hombre, es el proceso de transformación biológica controlada de los residuos orgánicos en condiciones óxicas, como se menciona en el capítulo 1. El término “controlado” implica que se debe tener conocimiento para saber manipular aquellas variables que pueden afectar positiva o negativamente al proceso, de manera que las bacterias, actinomicetos, hongos y protozoos implicados puedan realizar adecuadamente las reacciones bioquímicas de degradación, mineralización y humidificación requeridas (Haug, 1993; Vigneswaran, Kandasamy y Johir, 2016).

Cabe aclarar que “variable” es un término que proviene del latín *variabilis*, y representa a aquello que varía o que está sujeto a algún tipo de cambio, mientras que “factor” se refiere al elemento o condicionante que contribuye a la producción o el logro de un resultado. En este sentido, las variables que inciden en el proceso de compostaje son los denominados “factores” y pueden dividirse en climatológicos o externos (precipitación pluvial, infiltración, evapotranspiración, radiación solar, heladas y temperatura ambiente) y en operacionales o internos. Los factores externos son las perturbaciones, mientras que los factores internos son variables manipuladas. Si bien en este capítulo se abordarán especialmente los factores internos y

las variables desde la óptica del control de procesos, se debe tomar en consideración que hay interacción con los agentes externos.

Los factores internos a su vez pueden dividirse en bióticos y abióticos. Los factores bióticos comprenden los microorganismos tratados en el capítulo 2, mientras que los abióticos pueden clasificarse en físicos y químicos. En este capítulo se abundará sobre los dos últimos, sus valores máximos y mínimos recomendables, sus interrelaciones y cuales se utilizan principalmente como variables de control.

3.1 Física del compostaje

La física del compostaje comprende aquellos factores como el tamaño de partícula, el tamaño de la pila y la temperatura. Estos factores se interrelacionan en el proceso de compostaje, por lo que se abordarán en sub-apartados, destacando algunas de las interrelaciones más importantes.

3.1.1 Tamaño de partícula

Viendo al compostaje como un proceso para el aprovechamiento de los residuos orgánicos, destaca la reducción de tamaño como una de las etapas de pre-tratamiento, debido a que si bien cualquier material orgánico es susceptible de ser biodegradado, entre menor sea su tamaño, su degradación será más rápida, lo cual obedece a que los microorganismos tendrán mayor superficie por unidad de volumen.

Conforme a lo anterior, antes de montar una pila o depositar los materiales a compostar en un biorreactor, se deben triturar mediante molinos de cuchillas y martillos. Los primeros son útiles para reducir el tamaño de residuos orgánicos como los de frutas, verduras, agrícolas y de jardinería; mientras que los molinos de martillos son usados para triturar biosólidos de plantas de tratamiento de aguas residuales, excretas, suelo y arcilla. Los residuos se trituran y criban hasta

obtener un tamaño de partícula entre 2.5-7.5 cm (Tchobanoglous, Theisen y Vigil, 1993a), o bien entre 2.0-8.0 cm (Jiménez-Cisneros, 2001). Es importante cuidar que el tamaño no sea demasiado pequeño, ya que pueden originarse problemas de compactación excesiva que limiten la aireación (Labrador, 2001). El tamaño de partícula influye en la densidad (masa/volumen) y en el transporte de energía y masa entre los componentes (flujo o arrastre de agua y materiales).

Cuando se utiliza estiércol, biosólidos de plantas de tratamiento de aguas residuales o aserrín, ayuda la adición de madera en tamaños menores a 1 cm para darle volumen y estructura, así como para alcanzar y mantener temperaturas termófilas. En la figura 3.1 se muestra gráficamente como a mayor tamaño de partícula se afecta el proceso, pues no se alcanza realmente la fase termófila, con lo que se incrementa el tiempo requerido de composteo (Jaramillo-Henao y Zapata-Marquez, 2008; Tavera-Cortés y Alvarado-Raya, 2011).

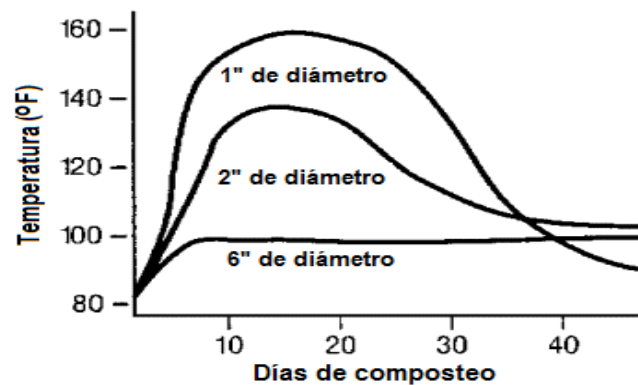


Figura 3.1 Efecto del tamaño de partícula en el proceso de composteo. Fuente: WSU, 2016.

El tamaño de partícula también es importante al final del proceso de compostaje, donde se separan mediante cribado aquellos materiales difíciles de compostar por ser de lenta biodegradación, como es el caso de algunos residuos agrícolas y de jardinería (ramas o trozos de troncos). A la composta obtenida se le puede separar mediante cribado (cernir o tamizar), con un

tamiz que tenga al menos 10 mm de abertura. Los tamaños de cribado dependen del uso que vaya a darse a la composta, los comunes son materiales finos (≤ 15 mm), medios (entre 15 y 50 mm) y gruesos (> 50 mm). Es importante uniformizar el tamaño de partícula en la composta entre materiales finos y medio, especialmente si se va a comercializar (Rodríguez-Salinas, Córdoba y Vázquez, 2006; Tchobanoglous, Theisen y Vigil, 1993b).

3.1.2 Tamaño de la pila

Uno de los métodos más antiguos de compostaje es el de pila o hilera (pila alargada), donde sus dimensiones son importantes, especialmente la altura, pues afecta directamente a la humedad, al oxígeno y a la temperatura. Si una pila es muy pequeña se pueden presentar pérdidas de calor, o bien si su tamaño es excesivo, no tendrá la circulación apropiada de oxígeno.

Se pueden colocar los materiales a compostar en montículos de 2.5-3.0 m de altura por 7.0-9.0 m de base, o bien, como se muestra en la figura 3.2, en pilas de 1.5-2.0 m de alto por 1.5-3.0 m de ancho (Román, Martínez y Pantoja, 2013). Los sistemas de hilera de alto rendimiento emplean hileras de 2.0-2.5 m de alto y 4.5-5.0 m de ancho. Se recomienda que el ancho sea el doble de lo alto; el largo es de acuerdo con las necesidades del productor y del espacio disponible. El ancho y alto también están en función del equipo a utilizar y es importante considerar la altura del vehículo que realiza la recolección y posterior descarga en el centro de compostaje. (Tchobanoglous et al., 1993a). Juárez (2014) utilizó dimensiones de 1 m de ancho por 0.5 m de alto x 2.90 y 1.50 m de largo para las pilas de 500 y 250 kg, respectivamente (Figura 3.3), lo que le permitió el volteo manual con palas para llevar a cabo la aireación, sin embargo para pilas de más de 1,000 kg, es recomendable utilizar equipo mecánico como compresores de aire, tambores rotatorios, mezcladoras y volteadores (Tavera-Cortés y Alvarado-Raya, 2011; Tchobanoglous et al., 1993b).

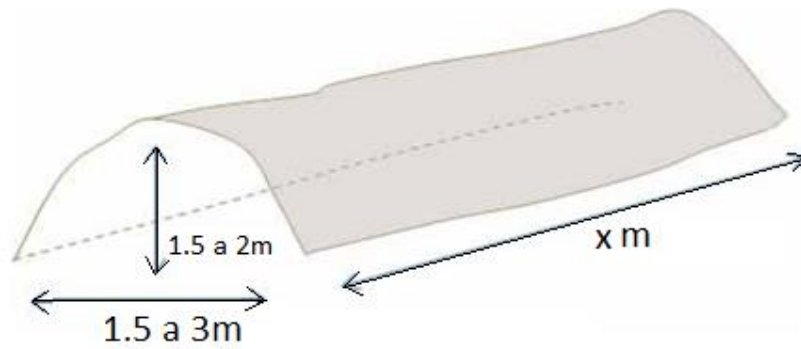


Figura 3.2 Dimensiones para pilas de compostaje. Fuente: Román, et al., 2013.

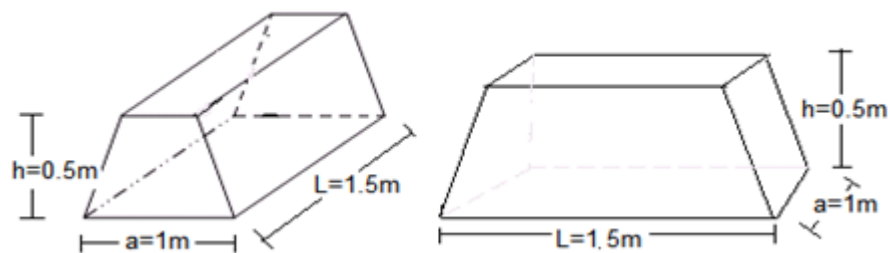


Figura 3. 3 Dimensiones de pilas de composta. Fuente: Juárez-Robles, 2014.

3.1.3 Temperatura y mecanismos de pérdida de calor

Debido a que la temperatura es una variable sencilla de medir, es uno de los indicadores más utilizados para conocer si se está llevando a cabo de forma adecuada el proceso de composteo, por lo que se recomienda realizar el registro de ésta en una bitácora (SMA, 2012). Para minimizar el efecto del clima en la temperatura del material a compostar, se recomienda cubrir la pila una vez conformada con plástico o lona ahulada.

Los cambios de temperatura durante el composteo son resultado de la actividad microbiana, es decir, la temperatura registrada es producto de la energía que se libera por los procesos bioquímicos que tienen las bacterias, hongos y actinomicetos, mientras se reproducen, crecen y mueren. Algunos autores mencionan que el proceso de composteo se realiza en cuatro fases distintas, debido a que en la primera fase mesofílica (30-38°C), incluyen la fase de latencia y la

fase de crecimiento; las siguientes fases son la termofílica (45-60°C), y la segunda fase mesofílica, también denominada fase de maduración (Figura 3.4) (Laich, 2011; Tchobanoglous et al., 1993b).

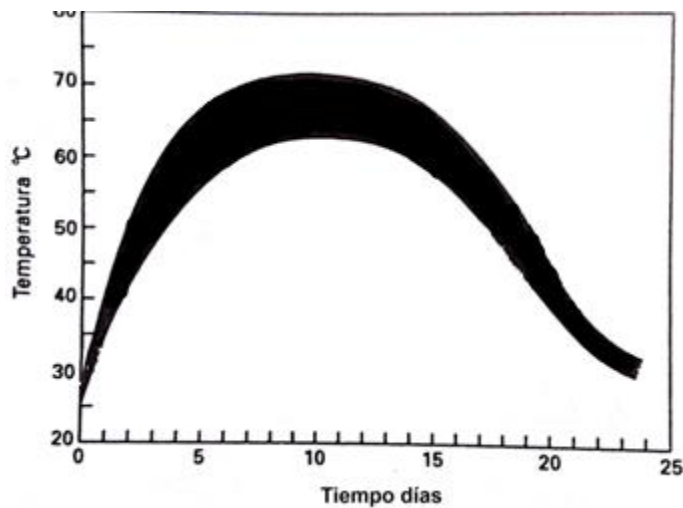


Figura 3.4 Rango de temperaturas típico de compostaje. Fuente: Adaptado de Tchobanoglous y col., (1993b).

Inicialmente, cuando se mezclan los componentes para la conformación de una pila, su temperatura es similar a la temperatura ambiental y los microorganismos activos son mesófilos, mientras que los termófilos se encuentran en menor número y en estado de latencia.

Conforme las condiciones de humedad y aireación son propicias, la actividad microbiana se incrementa y genera calor que aumenta la temperatura dentro de la pila, alcanzando temperaturas termófilas (por encima de 45 °C), hasta valores que pueden ser superiores a 60°C, los cuales se mantienen durante varias semanas, dependiendo del tamaño del sistema y de la composición de las materias primas. Durante la fase termófila o de higienización, porque aparecen la mayoría de microorganismos patógenos, al alcanzar temperaturas mayores que los 45°C, los microorganismos mesófilos son reemplazados por las bacterias termófilas, que actúan facilitando

la degradación de fuentes más complejas de C, como la celulosa y la lignina. Después que los componentes rápidamente degradables son utilizados por la microbiota, la generación de calor disminuye gradualmente a 40-50°C, para alcanzar la segunda fase mesófila (Moreno-Casco y Moral-Herrero, 2008; Román et al., 2016; Ruggieri, Gea, Mompeó, Sayara y Sánchez 2008). Debido a estos cambios de temperatura, la Norma Ambiental para el Distrito Federal (ahora Ciudad de México) NADF-020-AMBT-2011, que establece los requerimientos mínimos para la producción de composta, define al composteo como “el proceso de degradación bioquímica, de un sustrato orgánico, sólido y heterogéneo, en condiciones aerobias y durante el cuál se presenta al menos una etapa termófila”. En la tabla 3.1 se muestran los tiempos recomendados para ciertas temperaturas, cuidando no exceder 65°C por más de 24 horas, para que la composta conserve propiedades favorables para el crecimiento vegetal, entre ellas el nitrógeno (SMA, 2012).

Tabla 3. 1 Relación de temperatura y tiempo para garantizar la inocuidad del producto final.

Temperatura promedio	Tiempo
55°C	2 semanas
60°C	1 semana
Hasta 65°C	3 días

Fuente: Adaptada de SMA, 2012.

Desde el punto de vista de eliminación de microorganismos patógenos (huevos de parásitos, quistes y moscas), es importante que la temperatura sobrepase los 55°C, debido a que la mayoría de *Escherichia coli* y *Salmonella sp.*, mueren después de hora y transcurridos de 15-20 minutos a 60°C. Si se permite que el material a compostar mantenga los 70°C durante una a dos horas, se eliminarían todos los patógenos, pues son pocos aquellos que sobreviven a 67°C durante un corto periodo (Tchobanoglous et al., 1993b; WSU. 2016).

Si bien la producción de calor es resultado de la actividad microbiana y bioquímica, la temperatura de la pila o lote también depende de las pérdidas de calor, las cuales están relacionadas con el tamaño de la pila, la evaporación de agua, la transferencia de masa a la fase gaseosa y la aireación. En la figura 3.5 se muestra como ejemplo los perfiles de temperatura que pueden tenerse en una pila de composta, donde la más alta se encuentra en la zona central, decreciendo hacia la superficie de la pila.

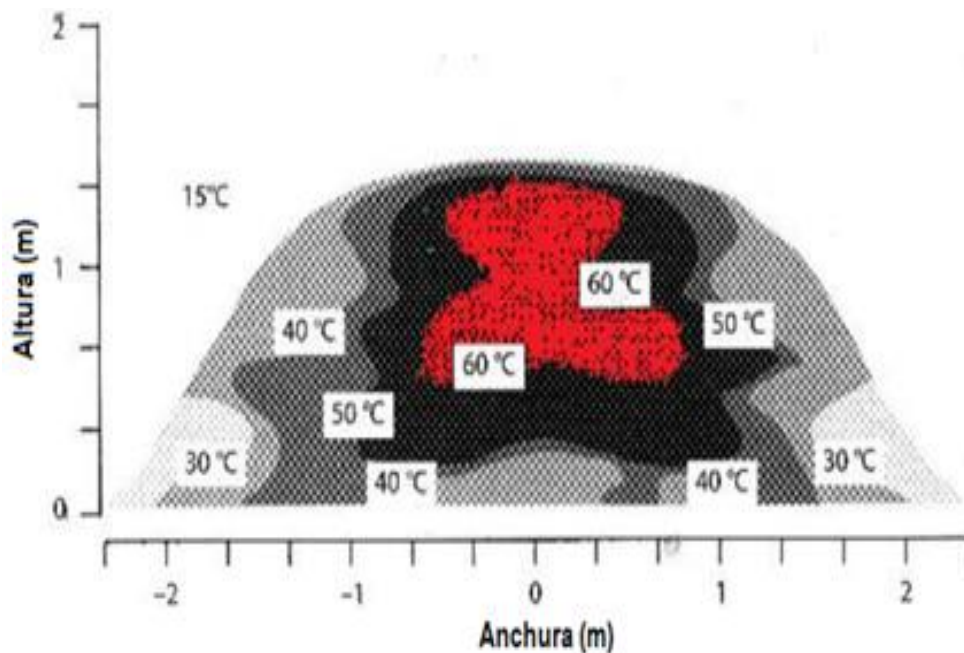


Figura 3.5 Perfil de temperatura en zonas. Fuente: Atlas y Bartha, 2005

Este gradiente de temperaturas se debe a la diferencia existente con el ambiente en el exterior de la pila. Los valores de cada capa y su espesor variarán en función de los materiales utilizados para el composteo, la actividad microbiana, la humedad y la temperatura ambiental. Con el volteo para airear la pila, también habrá pérdidas de calor, por lo que es posible que la temperatura decaiga de 2 a 10°C después del volteo, pero trascurridas unas horas volverá a su nivel anterior.

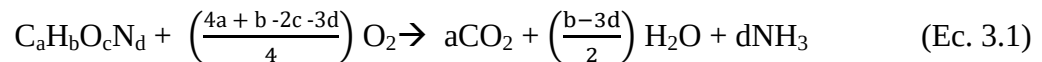
(Tchobanoglous et al., 1993b; Ballesteros-Trujillo, Hernández-Berriel, De la Rosa-Gómez, Mañón-Salas, Camacho-Martínez, 2016).

3.2 Química del compostaje

En este apartado se abordan los factores químicos como el oxígeno (O₂), el pH, el contenido humedad, la relación carbono/nitrógeno (C/N) y la concentración de metales. Estos factores también se interrelacionan entre sí y con los factores físicos.

3.2.1 Contenido de oxígeno

Al ser el composteo un proceso biológico aerobio, tiene requerimientos de O₂, los cuales se satisfacen mediante la aireación. Una concentración de O₂ entre 15-20% se considera óptima. Los requerimientos de O₂ teórico pueden estimarse con la ecuación 3.1 reportada por Tchobanoglous et al., (1993b), sobre una base molar para la conversión completa de la materia orgánica.



Debido a que los requerimientos de O₂ son diferentes en cada fase del proceso (Figura 3.6), es importante contar con equipo como los oxímetros (Figura 3.7) (Negro, Villa, Aibar, Alarcón y Ciria, 2000).

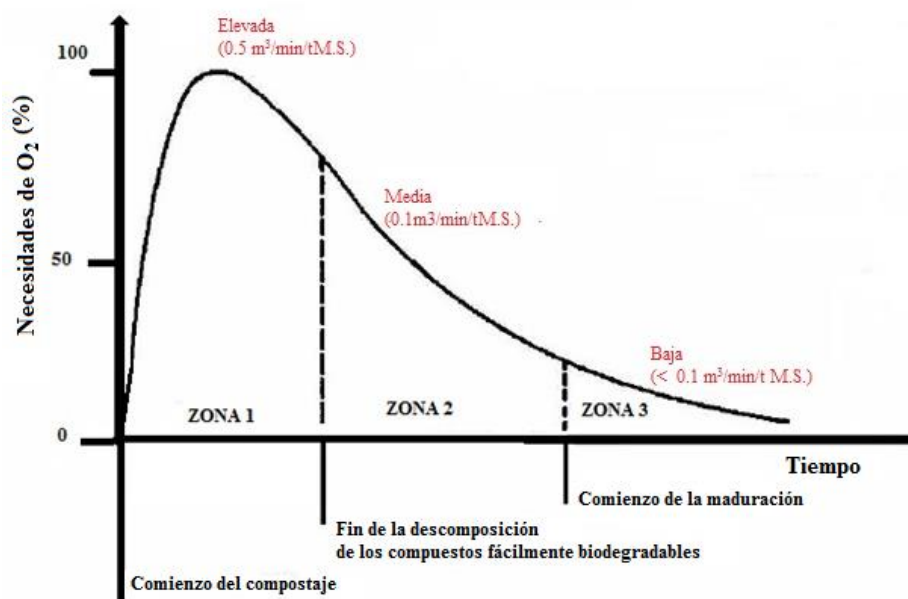


Figura 3.6 Necesidades de O_2 durante el proceso de compostaje. Fuente: Adaptada de Negro et al., 2000.



Figura 3.7 Oxímetro para composta con sonda de aspiración. Fuente: SENSOTRAN, 2016

La velocidad de descomposición y el tiempo de estabilización de los componentes dependen de la cantidad de O_2 suministrado; para el composteo en pila la frecuencia del volteo es determinante en la estabilización de los componentes (Figura 3.8), conforme a lo anterior se sugiere airear cada tercer día.

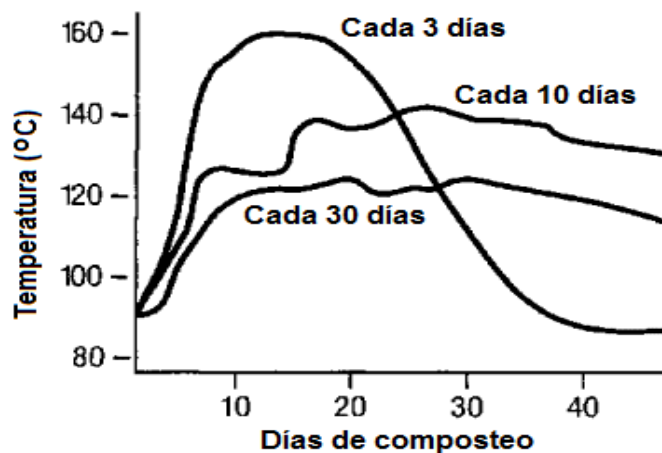


Figura 3.8 Efecto de la frecuencia de aireación en la temperatura durante el composteo. Fuente: WSU, 2016.

3.2.2 Contenido humedad

El contenido de humedad se refiere al contenido de agua del material a compostar, el cual depende del contenido de humedad inicial de cada uno de los componentes utilizados para elaborar la pila. Los materiales frescos contienen más humedad que los secos y serosos. Su importancia radica en que el agua favorece la migración y colonización microbiana, además que los microorganismos presentes durante el proceso de compostaje, requieren que las moléculas orgánicas estén disueltas en agua para poder utilizarlas (Tavera-Cortés y Alvarado-Raya, 2011).

Los rangos del contenido de humedad óptimo, mínimo y máximo varían entre los autores, tal es el caso que se reportan valores óptimos de 15-35 % y de 40-60 % de humedad base húmeda (% Hbh), sí se mantiene una buena aireación. Este rango puede variar en función de la naturaleza del material (Altamirano y Cabrera, 2006); los materiales fibrosos como residuos de jardinería y madera pueden alcanzar 85-90% Hbh, mientras que los materiales fácilmente compactables (de poca estructura) y saturables, como periódico, residuos de pasto, aserrín, estiércol y suelo, no deben exceder de 40-60% Hbh. Los residuos de cactáceas como el nopal tiene características

extraordinarias para el compostaje, debido a que su estructura vascular favorece la aireación de los materiales a compostar y presentan un alto contenido de humedad (Tavera-Cortés y Alvarado Raya, 2011; Tchobanoglous et al., 1993b; WSU, 2016).

Cuando la humedad disminuye, se afecta negativamente la actividad microbiana, con lo que decrecen la temperatura de la composta y el grado de sanitación (Tavera-Cortés y Alvarado Raya, 2011). De acuerdo a Moreno-Casco y Moral-Herrero (2008), los contenidos menores al 10% Hbh, reducen el metabolismo microbiano y el proceso se hace extremadamente lento; mientras que Barrena (2006) reporta que la actividad biológica empieza a disminuir a 40% Hbh, y por debajo de 20% Hbh no existe prácticamente actividad.

Un alto contenido de humedad también es perjudicial, pues reduce el espacio de poros (espacio entre las partículas) disponibles para el aire, así como la reducción de la resistencia estructural del material. Esto favorece una mayor compactación y menos espacio intersticial o vacío para el aire en la pila, con lo que se establece la anaerobiosis y se generan olores desagradables por la formación de biogás, ácidos sulfhídricos, mercaptanos y metil mercaptanos. Para reducir el contenido de humedad se recomienda airear con mayor frecuencia hasta alcanzar la humedad deseada. Los materiales con una alta relación C/N, pueden no tener que ser aireados tan a menudo como el material que se descompone más rápidamente. Se recomienda que el producto final del composteo (composta madura), tenga un contenido menor al 30 %Hbh, para favorecer su estabilidad y disminuir los costos de transporte (Barrena, 2006; Robles-Martínez, 2011; WSU, 2016).

3.2.3 Potencial de hidrógeno

Durante el proceso de compostaje se tienen variaciones en los valores del pH, debido que existen constantes cambios en la composición química. Si se utiliza la fracción orgánica de los

RSU, el pH podría estar entre 5 y 7. Como puede apreciarse en la figura 3.8, durante los primeros días (fase mesófila), el valor del pH desciende a 5 o menos, a causa de la liberación de ácidos orgánicos. Después de aproximadamente tres días, ya en la fase termófila, el pH se incrementa hasta 8.0-8.5 por el aumento de NO_3^- y la conversión del amonio en amoniaco (NH_4^+ en NH_3). En la fase de maduración desciende ligeramente y la composta final tendrá valores de pH entre 7-8 (Román y col., 2013; Tchobanoglous et al., 1993b).

Debido a que el pH es fácil de medir, se utiliza para indicar cómo avanza el proceso. En un inicio su descenso hasta 6.5 indica un proceso normal. Los valores óptimos de pH son 6.5-8.0 para sustratos orgánicos. El pH actúa como un factor selectivo para las poblaciones microbianas y además se recomienda no exceder el valor de 7.5, pues mayores de 8.0 favorecen la pérdida del nutriente N por volatilización de amoniaco (Castrillón et al., 2004; Jiménez-Cisneros, 2001; Rodríguez-Salinas et al., 2006).

El pH en la composta está influenciado por tres sistemas ácido-base, que se combinan formando la curva típica del pH durante el compostaje (Figura 3.9). El sistema carbónico, donde el CO_2 producido durante la descomposición puede escapar a la atmósfera como gas o disolverse en los líquidos formando H_2CO_3 , bicarbonato (HCO_3^-) y carbonato (CO_3^{2-}). El segundo sistema es el $\text{NH}_4^+ - \text{NH}_3$, que se forma cuando se descomponen las proteínas. El tercer sistema lo conforman varios ácidos orgánicos, predominando el ácido acético y el láctico (Moreno-Casco y Moral-Herrero, 2008; Román et al., 2013).

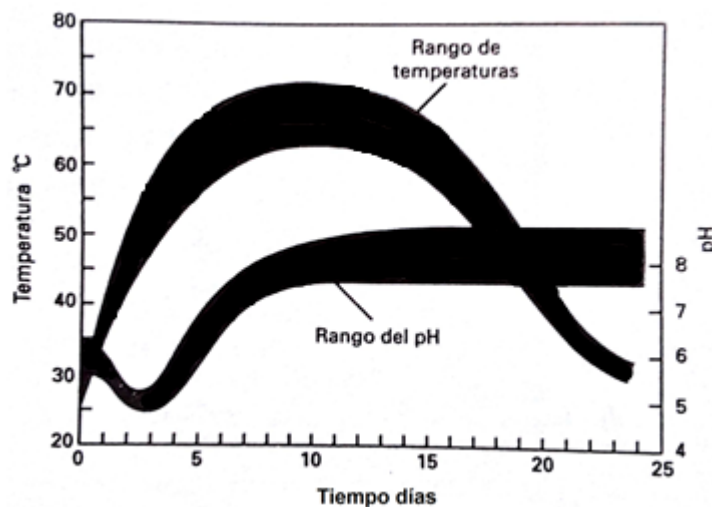


Figura 3.9 Rangos típicos de pH y temperaturas durante el compostaje. Fuente: Tchobanoglous et al., 1993b

3.2.4 Carbono, nitrógeno y fósforo

Dentro de los materiales utilizados para conformar una pila de compostaje, los elementos C, N, y P destacan como macronutrientes fundamentales para el desarrollo microbiano. Para un correcto compostaje en el que se aproveche y retenga la mayor parte del C y del N, debe ser apropiada la relación C/N del material de partida. Debido a que los microorganismos utilizan generalmente 30 partes de C por cada una de N, se considera que el intervalo de C/N teóricamente óptimo es de 25-35:1, aunque la relación óptima dependerá de la composición del material y fundamentalmente de la biodisponibilidad del carbono presente en el mismo (Tabla 3.2). Lo anterior es de suma importancia, porque los microorganismos involucrados en el proceso utilizan el C como fuente de energía y N para la síntesis de proteínas. Con las proteínas construyen la estructura celular y, necesitan más C que N debido a que la cantidad del primero se reduce mientras que el N se recicla. Si una cantidad considerable de C está en forma de lignina u otros materiales resistentes, la proporción real de C/N debe ser mayor que 20. La degradación de

la materia orgánica requiere más tiempo cuando la relación C/N inicial es mayor de 30, como se muestra en la figura 3.10 (Moreno-Casco y Moral-Herrero, 2008; WSU, 2016) .

Tabla 3. 2 *Relación carbono a nitrógeno de material usado en el compostaje.*

Nivel alto de nitrógeno 1:1 – 24:1		C:N equilibrado 25:1 – 40:1		Nivel alto de carbono 41:1 – 1000:1	
Material	C:N	Material	C:N	Material	C:N
Purines frescos	5:1	Estiércol vacuno	25:1	Hierba recién cortada	43:1
Gallinaza pura	7:1	Hojas de frijol	27:1	Hojas de árbol	47:1
Estiércol porcino	10:1	Crotalaria	27:1	Paja de caña de azúcar	49:1
Desperdicios de cocina	14:1	Pulpa de café	29:1	Basura urbana fresca	61:1
Camada de Gallinaza	18:1	Estiércol ovino/caprino	32:1	Cascarilla de arroz	66:1
		Hojas de plátano	32:1	Paja de arroz	77:1
		Restos de hortalizas	37:1	Hierba seca (gramíneas)	81:1
		Hojas de café	38:1	Bagazo de caña de azúcar	104:1
		Restos de poda	44:1	Mazorca de maíz	117:1
				Paja de maíz	312:1
				Aserrín	638:1

Fuente: Adaptado de Román et al., 2013.

En la fase de maduración del proceso de composteo tienen lugar la mineralización y la humificación, que infieren directamente sobre la relación C/N. El término mineralización se usa normalmente para describir la transformación de N orgánico en N inorgánico, ya sea esté en forma de NH_4^+ o NO_3^- .

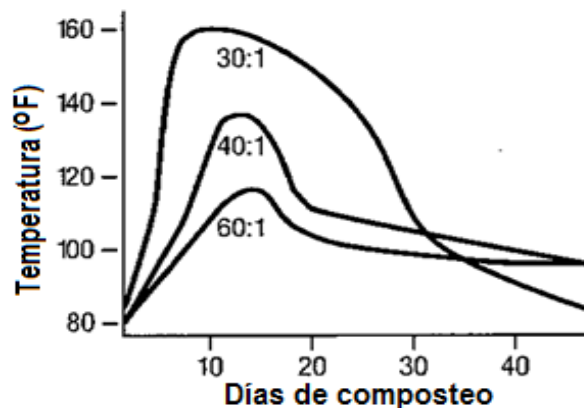


Figura 3.10 Efecto de la relación C:N en el tiempo de compostaje. Fuente: Adaptado de WSU, 2016.

En la figura 1.2 se muestran las fases bio-oxidativa y la de maduración; en esta última cuando se llega a una relación C/N igual a 10, se dice que la composta tiene similitud en su composición con el humus del suelo (Moreno-Casco y Moral-Herrero, 2008; Zhu, 2006).

El P es el tercer elemento básico constituyente de las biomoléculas, como los ácidos nucleicos, fosfolípidos. Este elemento además del C y el N, es otro de los macronutrientes más importantes para las plantas y los microorganismos, ya que conforma las moléculas de ATP y el ADP, y es un compuesto intermedio para la respiración y la fotosíntesis. El P orgánico está compuesto, a su vez, por varias fracciones, desde las más lábiles hasta las más resistentes a la mineralización. Los compuestos fosfatados más importantes de la materia orgánica son nucleoproteínas, fosfolípidos y fosfoazúcares, los cuales se mineralizan por vías microbianas. La mayor parte está en formas insolubles o fijadas, principalmente como minerales primarios fosfatados, humus, fosfatos insolubles de Ca, Fe, Al y fosfatos fijados por los óxidos y minerales silicatados. Los biosólidos del tratamiento de aguas residuales proveen N y P, así como micronutrientes esenciales (Ni, Zn y Cu). Otros residuos con importantes aportes de P son el estiércol. La relación C/P inicial para un compostaje ideal es de 75:1 a 150:1. Aunque el P se encuentra ampliamente distribuido en la

naturaleza, es un recurso limitado y deficiente en la mayoría de los suelos (Negro et al., 2000; Olson, McKenzie, Larney y Bremer, 2010; Pérez, Pérez y Vertel, 2010).

3.3 Factores de control

El proceso de composteo es un proceso dinámico, por lo que para controlarlo se deben identificar los elementos que lo conforman como un sistema que se pretende vigilar de forma retroalimentada (Smith y Corripio, 1996). En este sentido, se presentan los elementos del proceso de compostaje, se establecen las salidas controladas como los parámetros de calidad para la composta a producir, y se describen las principales interrelaciones entre los factores físicos y químicos, identificando las variables a controlar por las variables manipuladas.

3.3.1 Control retroalimentado del proceso de compostaje

Los elementos de un control retroalimentado para el proceso de compostaje se muestran esquemáticamente en la figura 3.11, donde tanto las Perturbaciones como las Variables manipuladas son Variables de entrada al proceso, que lo afectan. Los factores ambientales pueden ser Perturbaciones, mientras que las Variables manipuladas, como su nombre lo indica, permiten ser modificadas por la acción del ser humano; tal es el caso de la humedad, con la adición de agua; de manera que el Controlador es el ser humano si se considera un proceso no automatizado.

Los puntos de referencia (Set point), son los valores esperados en cada fase del proceso, establecidos bien por la experiencia de las personas que participan o por un experto en el tipo de composteo en cuestión. Para el final del proceso, los puntos de referencia son aquellos especificados por la calidad requerida de la composta.

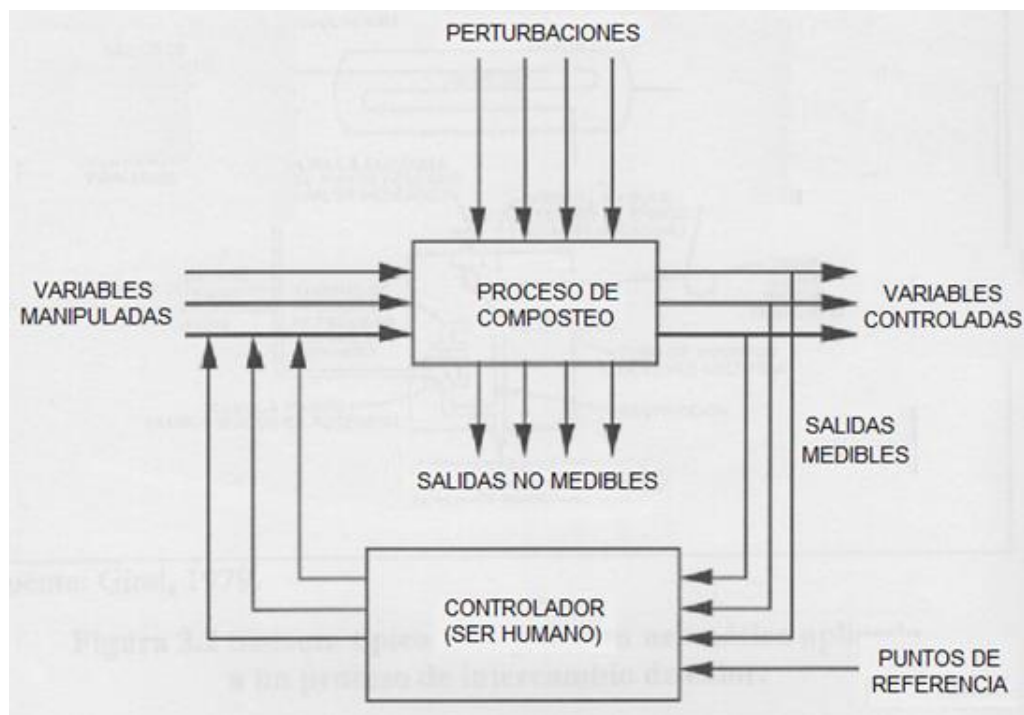


Figura 3.11 Control retroalimentado del proceso de compostaje. Fuente: Adaptada de Stephanopoulos (1983)

Las Variables medibles (de salida), son aquellas que permiten ir dando seguimiento al proceso y sirven para calificar al final la calidad de una composta. El que una variable sea o no medible depende de la existencia de un sensor específico o técnica probada, así como del costo y del tiempo requerido para ello (Figura 3.11). En el proceso de compostaje las variables de interés a ser medidas, prácticamente son las denominadas variables controladas, de las cuales una vez que se determinan sus valores, se comparan con los Puntos de referencia y si no tienen valores cercanos a los establecidos, el Controlador realizará algo sobre el proceso con las Variables manipuladas, para que los valores de las Variables controladas se acerquen a los esperados. Conforme a lo anterior, los elementos del proceso a controlar se pueden clasificar como enseguida se muestra:

a) Inicio del proceso

- Variables medibles: Tamaño de partícula, temperatura, tamaño de la pila, pH, contenido de humedad, relación C:N:P y concentración de O₂
- Variables no medibles: Olor y color. Dependiendo de los recursos económicos que se dispongan se considera la concentración de metales
- Perturbaciones: Factores ambientales
- Variables manipuladas: Reducción de tamaño (tamaño de partícula), altura y ancho (tamaño de la pila), proporción de componentes (relación C:N:P), neutralización (pH), humidificación (contenido de humedad), aireación (concentración de O₂ y contenido de humedad)
- Variables controladas: pH, contenido de humedad, relación C:N:P y concentración de O₂

b) Durante el proceso

- Salidas medibles: Temperatura, tamaño de la pila, pH y contenido de humedad. Dependiendo de los recursos se consideran la relación C/N y la concentración de O₂
- Salidas no medibles: Tamaño de partícula. Dependiendo de los recursos se consideran no medibles la relación C/N, la concentración de metales y la concentración de O₂
- Perturbaciones: Concentración de metales y factores ambientales
- Variables manipuladas: Reducción de tamaño (tamaño de partícula), altura y ancho (tamaño de la pila), proporción de componentes (relación C:N:P), neutralización (pH), humidificación (contenido de humedad), aireación (concentración de O₂, contenido de humedad)
- Variables controladas: Temperatura, pH, contenido de humedad, relación C:N:P y concentración de O₂

c) Fin del proceso

- Salidas medibles: Temperatura, tamaño de la pila, tamaño de partícula, pH, contenido de humedad, relación C:N:P, concentración de O₂ y concentración de metales
- Salidas no medibles: Ninguna
- Perturbaciones: Factores ambientales
- Variables manipuladas: Reducción de tamaño (tamaño de partícula), proporción de componentes (relación C:N:P), neutralización (pH), humidificación (contenido de humedad), aireación (concentración de O₂ y contenido de humedad)
- Salidas controladas: Tamaño de partícula, pH, contenido de humedad, relación C:N:P y concentración de metales.

3.3.2 Variables controladas

Basado en el diseño de calidad del proceso, una manera recomendable de dar seguimiento al compostaje es mediante la elaboración de la “Hoja de proceso” (Figura 3.12), la cual es un documento que muestra gráficamente los valores de las principales *variables controladas* (contenido de humedad, temperatura y pH) y las acciones que se llevan a cabo durante el proceso, como es la aireación (Variable manipulada). Como el proceso de compostaje es dinámico, la “Hoja de proceso” está organizada en forma secuencial y toma como referencia el tiempo de proceso (Rodríguez-Salinas et al., 2006). Otra forma recomendable es la utilización de una Planilla para el control del proceso de composteo, de la que se presenta un ejemplo en la Tabla 3.3 (Román y col., 2013).

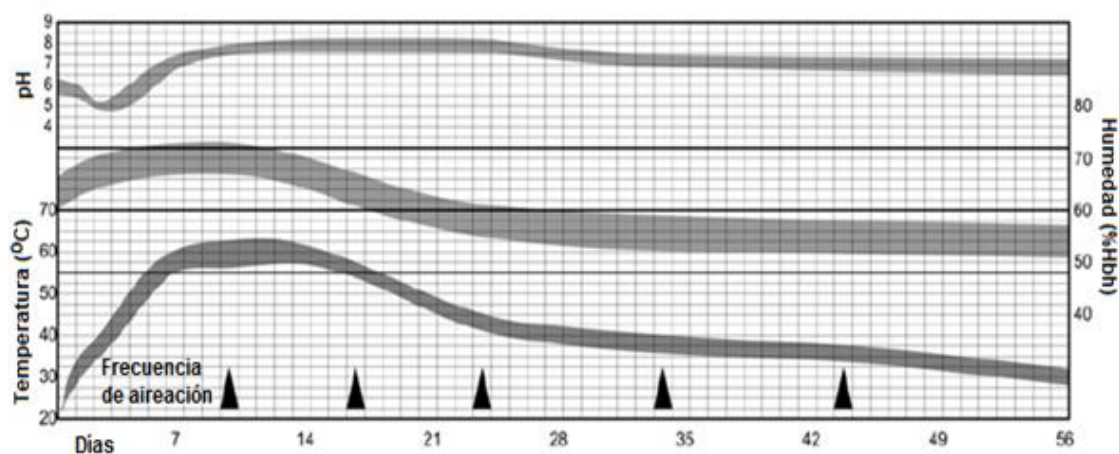


Figura 3. 12 Gráficas con datos de Hoja de Proceso de compostaje. Fuente: Rodríguez-Salinas et al., 2006

Tabla 3.3 Planilla de control del proceso de composteo.

SEMANA	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Temperatura												
Ref. Temperatura	15°-40°		45°-65°			15°-40°				Temperatura Ambiente		
pH												
Ref. pH	4-6		8-9			7-8				6-8		
Humedad												
Ref. Humedad	Variable dependiendo de la humedad de entrada, entre 30% - 60%.											
Aspecto												
Aspecto visual												

Fuente: Adaptado de Román et al., 2013.

Como los factores químicos y físicos (Variables medibles), son diferentes a lo largo del periodo de compostaje (Tabla 3.4), es pertinente mantener sus valores en rangos ideales (Puntos de referencia), con el fin de cumplir con los parámetros de calidad establecidos (Tabla 3.5).

En las últimas columnas de la tabla 3.4 y la tabla 3.5, se muestra que los valores de los parámetros de una composta madura pueden variar; ésto obedece tanto a los sustratos con los que se ha elaborado, como a la operación realizada durante el proceso con el fin de alcanzar rangos establecidos de acuerdo a su utilización final, especialmente si se pretende comercializar la composta.

Tabla 3.4 Cambios en los valores los químicos y físicos factores durante el proceso de compostaje.

Parámetro	Material de inicio		Tiempo de compostaje (días)							
	Desechos alimenticios	Recortes de jardín	0	22	33	40	57	71	92	125
T (°C)	—	—	24	48	30	37	33	30	29	34
O ₂ (%) ^a	—	—	15.9	17.55	16.87	17.22	18.53	19.38	19.16	
			4							
CO ₂ (%) ^a	—	—	4.65	2.20	2.96	2.79	1.25	0.04	0.29	
	84.5	37.8	79.9	52.3 ^b	54.7 ^b	52.3 ^b	60.5 ^b	61.4	54.0 ^b	45.5
MC (%)				56.7 ^c	62.4 ^c	66.4 ^c	68.3 ^c	65.7	65.3 ^c	
C/N	25.2	138.4	41.7	38.8	34.5	29.1	26.9	23.6	22.0	20.9
VS (%)	93.7	97.1	95.8	94.8	92.8	92.7	91.6	89.5	88.3	89.3
VS _{Red} (%)	—	—	0	20.1	43.5	44.3	52.2	62.6	66.9	63.4
pH	4.1	6.5	4.2	6.4	7.3	7.6	7.8	7.8	8.0	7.8
EC(dS/m)	2.76	0.57	2.86	1.83	1.68	1.61	1.35	1.71	1.29	1.74

^a Valor medio de la lectura de la concentración de gas diaria entre giros. ^b Antes del volteo.

^c Después del volteo y de la adición de agua

MC, Contenido de humedad; T, Temperatura; VS, Sólidos volátiles, VS_{Red}, Reducción de VS

Fuente: Adaptado de Chroni, Kyriacou, Manios y Lasaridi, 2009.

Tabla 3. 5 Rangos ideales de factores para el proceso de composteo.

Factor-Parámetro	Rango ideal al comienzo (2-5 días)	Rango ideal para composta en fase mesofílica II (2-5 semanas)	Rango ideal de compost madura (3-6 meses)
C:N	25:1 – 35:1	15/20	10:1 – 15:1
Humedad	50% - 60%	45% - 55%	30% - 40%
Concentración de O ₂	~10%	~10%	~10%
Tamaño de partícula	< 25 cm	~15 cm	< 1.6 cm
pH	6.5 – 8.0	6.0 – 8.5	6.5 – 8.5
Temperatura	45 – 60 °C	45°C- Temperatura ambiente	Temperatura ambiente
Densidad	250 – 400 kg/m ³	<700 kg/m ³	<700 kg/m ³
Materia orgánica (Base seca)	50% - 70%	>20%	>20%
Nitrógeno Total (Base seca)	2.5 – 3.0%	1.0 – 2.0%	~1.0%

Fuente: Adaptado de Román et al., 2013.

Por ejemplo, la Norma Técnica Estatal Ambiental del Estado de México NTEA-006-SMA-RS-2006 (GGEdoMex, 2006), contiene los requisitos para la producción de mejoradores de suelos, elaborados a partir de residuos orgánicos (Tabla 3.6); la NADF-020-AMBT-2011 (GODF, 2012), incluye los requerimientos mínimos para la producción de composta tipo A, B y C, a partir de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos, agrícolas, pecuarios y forestales, así como las especificaciones mínimas de calidad de la composta producida y/o distribuida en el Distrito Federal, ahora Cd. de México (Tabla 3.7); mientras que la NMX-FF-109-SCFI-2007 presenta parámetros con tres grados de calidad (Extra, Primera y Segunda) para humus de lombriz o lombricomposta (Tablas 3.8), a partir de materia orgánica como la siguiente (DOF, 2008):

- Residuos de la producción agrícola de frutas, hortalizas, legumbres, cereales, forrajes, fibras, aceites comestibles, tabaco, café y otros similares
- Residuos de agroindustrias de conservas, beneficio de café, deshidratados, congelados, empacadoras, de hongos comestibles, industria azucarera, tequilera, henequenera
- Residuos de sistemas pecuarios: estiércol, pelo, plumas, orín

- Residuos de industrias de preparación y transformación de carnes, pescados, previamente mezclados con materiales vegetales de alta relación carbono/nitrógeno
- Residuos orgánicos domiciliarios y residuos orgánicos de mercados y supermercados
- Residuos orgánicos urbanos (de poda, de jardines, de parques y áreas verdes)
- Residuos de la industria maderera que no tenga sustancias toxicas, lacas ni barnices
- Lodos de plantas de tratamiento secundario y de aguas servidas (domésticas y agroindustriales).

Tabla 3. 6 Requisitos para mejoradores de suelos según NTEA-006-SMA-RS-2006.

Parámetros fisicoquímicos	LMP de MP (ppm)	Parámetros microbiológicos	Valores máximos de impurezas Número de Tamiz ASTM / % peso bs
pH 6.5 a 8.0	Ar, 5.0	Hongos, Ausente	Plásticos flexibles y/o película
Materia orgánica > 15%	Cd, 1.0	Huevos de helmintos/ g bs, < 10	3.5 (Tamaño de abertura 5.60 mm) / ≤ 0.05
Relación carbono-nitrógeno (C/N) < 12	Cu, 30.0	Coliformes fecales, < 1000 NMP/g bs	
Fósforo > 0.10% ó 1.000 ppm	Ni, 5.0	Salmonella spp, < 3 /g bs	Vidrio y/o metales y/o plásticos
Potasio > 0.25% ó 2.5000 ppm	Pb, 5.0	(1) Huevos de helmintos viables	10 (Tamaño de abertura 2.00mm) / ≤ 0.5
Relación potasio-sodio (K/Na) > 2.5	Zn, 90.0	(2) Número más probable	

bs, base seca; LMP, Límite máximo permisible; MP, Metales pesados asimilables; ppm, partes por millón

Fuente: Adaptado de GEdoMex. 2006.

Tabla 3.7 Características a cumplir por tipos de composta según NADF-020-AMBT-2011.

Características generales por tipo		Concentraciones máximas de elementos trazas, Nivel-tipo mg·kg ⁻¹	
<p>Humedad</p> <p>A 25-35 %Hbh</p> <p>B 25-35 %Hbh</p> <p>C 25-45 %Hbh</p> <p>Conductividad eléctrica</p> <p>A <4 dS/m</p> <p>B <8 dS/m</p> <p>C <12 dS/m</p> <p>Granulometría</p> <p>A ≤ 10mm</p> <p>B ≤ 30mm</p> <p>C ≤ 30mm</p> <p>Relación C/N</p> <p>A < 15</p> <p>B < 20</p> <p>C < 25</p> <p>Macronutrientes (NPK)</p> <p>En % MS, de 1% a 3% en cualquiera de éstos y su suma ≤ 7%: portará la leyenda “Composta -mejorador de suelos”. Si cualquiera excede 3% o la suma es mayor a 7%, debe portar la leyenda “Composta para nutrición vegetal” y se indicarán las cantidades para cada macronutriente</p>	<p>pH</p> <p>A 6.7 – 7.5</p> <p>B 6.5 – 8.0</p> <p>C 6.5 – 8.0</p> <p>Materia orgánica</p> <p>A >20% MS</p> <p>B >20% MS</p> <p>C >25% MS</p> <p>Carbono total y Nitrógeno total % MS</p> <p>Debe indicarse en la etiqueta el resultado del último análisis realizado</p> <p>Fitotoxicidad (IG)</p> <p>A-IG ≥ 85 %</p> <p>B-IG ≥ 75 %</p> <p>C-IG ≥ 60 %</p> <p>Diferencia de temperatura con el ambiente medida a una profundidad ≥ 50 cm</p> <p>A ≤ 10°C</p> <p>B ≤ 10°C</p> <p>C ≤ 15°C</p>	<p>As</p> <p>Nivel 1-tipo A 0.1</p> <p>Nivel 2-tipo B 0.7</p> <p>Nivel 3-tipo C 2.0</p> <p>Cr total</p> <p>Nivel 1-tipo A 70</p> <p>Nivel 2-tipo B 70</p> <p>Nivel 3-tipo C 250</p> <p>Hg</p> <p>Nivel 1-tipo A 0.4</p> <p>Nivel 2-tipo B 0.7</p> <p>Nivel 3-tipo C 3</p> <p>Pb</p> <p>Nivel 1-tipo A 45</p> <p>Nivel 2-tipo B 120</p> <p>Nivel 3-tipo C 200</p>	<p>Cd</p> <p>Nivel 1-tipo A 0.7</p> <p>Nivel 2-tipo B 1</p> <p>Nivel 3-tipo C 3</p> <p>Cu</p> <p>Nivel 1-tipo A 70</p> <p>Nivel 2-tipo B 150</p> <p>Nivel 3-tipo C 400-500</p> <p>Ni</p> <p>Nivel 1-tipo A 25</p> <p>Nivel 2-tipo B 60</p> <p>Nivel 3-tipo C 100</p> <p>Zn</p> <p>Nivel 1-tipo A 200</p> <p>Nivel 2-tipo B 500</p> <p>Nivel 3-tipo C 1200-800</p>
Estabilidad y madurez.	LMP especificaciones microbiológicas.	<p>Relación de temperatura/tiempo para garantizar la inocuidad del producto final</p> <p>55°C / Por 2 semanas</p> <p>60°C / Por 1 semana</p> <p>Hasta 65°C / Por 3 días</p>	
Índice de madurez Solvita ^(R)	Coliformes fecales < 1000 NMP*/g bs	Máximos permitidos de materias inertes, en % de MS para partículas mayores a 5 mm	
<p>A 7</p> <p>B 6</p> <p>C 5</p> <p>Consumo de O₂ mg/kg MS/h</p> <p>A < 50</p> <p>B 50-100</p> <p>C 101-150</p> <p>Emisión de CO₂</p> <p>A <30</p> <p>B 30-60</p> <p>C 61-120</p>	<p>Salmonella < 3 NMP en 4g bs</p> <p>Huevos de Helminto viables, 1 en 4 g bs</p>	<p>Roca</p> <p>A Ausente</p> <p>B < 3%</p> <p>C* < 5%*</p> <p>Plástico</p> <p>A Ausente</p> <p>B < 0.5%</p> <p>C* < 1%*</p> <p>Vidrio y metal</p> <p>A Ausente</p> <p>B < 1%</p> <p>C* < 2%*</p>	

*La suma de los porcentajes de impurezas físicas debe ser menor al 5%; bs, base seca; LMP, Límite máximo permisible; ppm, partes por millón

Fuente: Adaptado de GODF, 2012.

Tabla 3. 8 Grados de calidad para el humus de lombriz según NMX-FF-109-SCFI-2007.

Especificaciones Físicoquímicas	Especificaciones Biológicas	Grados de Calidad para el Humus de Lombriz	
Nitrógeno total de 1 a 4 % (base seca)	<i>E Salmonella spp</i> , 3 NMP en 4 g, en base seca	Material mineral extraño (% bs p/p): Extra 0.0-1.5 Primera 1.51-3.0 Segunda 3.1-5.0	Material orgánico no digerido por las lombrices (% bs p/p): Extra 0.0-3.0 Primera 3.1-6.0 Segunda 6.1-10.0
Materia orgánica de 20% a 50% (base seca)	Huevos de helmintos viables	Material inerte (% vidrio, metales, plásticos, etcétera): Extra < 0.5 Primera 0.51-1.0 % Segunda 1.01-1.5 %	Semillas viables (semillas L ⁻¹): Extra ≤1 Primera > 1.0 a ≤1.5 Segunda >1.5 a ≤2
Relación C/N ≤20	** 1 en 4 g, en base seca	Lombrices vivas (lombrices L ⁻¹): Extra <0.2 (una / 5L) Primera 0.2 (una / 5L) Segunda 0.4 (dos / 5L)	
Humedad de 20 a 40% (sobre materia húmeda) ²	Hongos		
pH De 5.5 a 8.53	Fitopatógenos**		
Conductividad eléctrica ⁴ ≤4 dS m ⁻¹	Ausente		
Capacidad de intercambio catiónico 40 c mol kg ⁻¹	<i>schierichia coli</i> ≤ 1,000 NMP/g bs		
Densidad aparente sobre materia seca (peso volumétrico) 0.40 a 0.90 gmL ⁻¹			
Materiales adicionados, Ausente			

NMP, Número más probable; p/p, peso sobre peso; **, Sólo será exigible a solicitud expresa de la autoridad competente

Fuente: Adaptado de DOF, 2008.

Para España *El Real Decreto 824/2005 del 8 de julio 2005* sobre productos fertilizantes, define diferentes tipos composta como “Grupo 6 de enmiendas orgánicas”, los cuales pueden ser utilizados en la agricultura ecológica. En la tabla 3.9 se concentra información sobre tres tipos de enmiendas, de acuerdo a los residuos utilizados en su elaboración, el contenido mínimo en nutrientes (porcentaje en masa), que debe especificarse y más información (BOE, 2005).

Tabla 3.9 Características de diferentes tipos de enmiendas orgánicas.

Deno-minación del Tipo	Informaciones sobre la forma de obtención y los componentes esenciales	Contenido mínimo en nutrientes (porcentaje masa). Información sobre la evaluación de los nutrientes.	Otras informaciones sobre la denominación del tipo o etiquetado.	Contenido en nutrientes que debe declararse y garantizarse. Formas y solubilidad de los nutrientes. Otros criterios.
Enmienda orgánica Composta vegetal	Producto higienizado y estabilizado, obtenido mediante descomposición biológica aeróbica (incluyendo fase termofílica), exclusivamente de hojas, hierva cortada y restos vegetales o de poda, bajo condiciones controladas.	Materia orgánica total: 40% Humedad: entre 30 y 40 % C/N <15 No podrá contener impurezas ni inertes de ningún tipo, tales como piedras, gravas, metales, vidrios o plásticos.	pH Conductividad eléctrica Relación C/N Humedad mínima y máxima Tratamiento o proceso de elaboración	Materia orgánica total C orgánico N total (si supera el 1%) N orgánico (si supera el 1%) N amoniacal (si supera el 1%) P ₂ O ₅ total (si supera el 1%) K ₂ O total (si supera el 1%) Ácidos húmicos Granulometría
Enmienda Orgánica Composta de estiércol	Producto higienizado y estabilizado, obtenido mediante descomposición biológica aeróbica (incluyendo fase termofílica) exclusivamente de estiércol, bajo condiciones controladas.	Materia orgánica total: 35% Humedad entre 30 y 40 % C/N <20 No podrá contener impurezas ni inerte de ningún tipo, tales como piedras, gravas, metales, vidrios o plásticos	pH Conductividad eléctrica Relación C/N Humedad mínima y máxima Tratamiento o proceso de elaboración	Materia orgánica total C orgánico N total (si supera el 1%) N orgánico (si supera el 1%) N amoniacal (si supera el 1%) P ₂ O ₅ total (si supera el 1%) K ₂ O total (si supera el 1%) Ácidos húmicos Granulometría
Enmienda Orgánica Vermi-compost	Producto estabilizado, obtenido a partir de materiales orgánicos, por digestión con lombrices bajo condiciones controladas	Materia orgánica total 40% Humedad entre 30 y 40 % C/N <20 El 90 % de las partículas pasarán por la malla de 25 mm.	pH Conductividad eléctrica Relación C/N Humedad mínima y máxima Se podrán añadir las denominaciones usuales en el comercio.	Materia orgánica total C orgánico N total (si supera el 1%) N orgánico (si supera el 1%) N amoniacal (si supera el 1%) P ₂ O ₅ total (si supera el 1%) K ₂ O total (si supera el 1%) Ácidos húmicos Tipo o tipos de estiércoles empleados.

Fuente: Adaptado de Alvarez de la Puente, 2007.

3.3.3 Variables manipuladas

Con el fin de monitorear y controlar el proceso de compostaje, se recomienda realizar al menos cada 24 horas la medición de variables, tales como concentración de O₂, temperatura, humedad y pH. En la tabla 3.10 se presentan los métodos de medición directa que pueden utilizarse. Para la medición directa de temperatura, concentración de O₂ y humedad, se sugiere hacerlo en los nueve puntos que se muestran en la figura 3.13, a una profundidad de al menos 10 cm. Para la determinación del pH y de la humedad por termogravimetría, se recomienda tomar una muestra compuesta de los 9 puntos antes mencionados, a la profundidad de 10 cm. Es importante mantener en todos los muestreos profundidades similares a lo largo del proceso (Robles-Juárez, 2014; Tchobanoglous et al., 1993a).

Tabla 3. 10 Variables a monitorear para el control del proceso de composteo.

VARIABLE	MÉTODO DE MEDICIÓN	NORMA O TÉCNICA
Concentración de O ₂	Directo con oxímetro	
Humedad	Directo con sensor de humedad o por el método Termogravimétrico ^a	^a NMX-AA-016-1984
Temperatura	Directo con termómetro de mercurio, termómetro bimetalico o termopar	^b NMX-AA-007-SCFI-2013
pH	Directo con pH-metro o por el Método Potenciométrico	^c NMX-AA-25-1984

Fuente: ^a SEMARNAT, 2016a; ^b SEMARNAT, 2016b; ^c SEMARNAT, 2016c.

Como se mencionó en el apartado 3.3.1, las Variables manipuladas son aquellas variables de entrada que pueden ser modificadas, con el fin de incidir en el proceso de compostaje y generar los cambios necesarios, para que las Variables controladas tengan valores cercanos a los establecidos (Set point) por la calidad requerida.

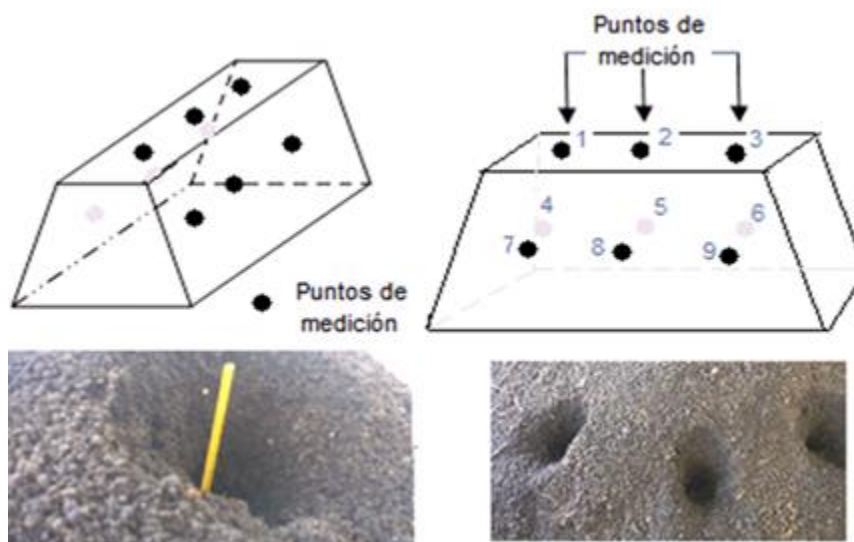


Figura 3.13 Puntos de muestreo y medición para temperatura, humedad y pH. Fuente: Juárez-Robles, 2014.

En la tabla 3.11 se presentan las principales Variables manipuladas con sus correspondientes Variables controladas. Posteriormente, se describen la aireación, la humidificación y la neutralización como Variables manipuladas.

Tabla 3. 11 Variables manipuladas y controladas en el proceso de compostaje.

Variables manipuladas	Variables controladas
Reducción de tamaño con troceadoras, trituradoras y molinos	Tamaño de partícula
Altura y el ancho de acuerdo a la cantidad de componentes a compostear	Tamaño de la pila
Mezcla de componentes en las proporciones adecuadas	Relación C:N:P
Aireación (manual o mecánica)	Concentración de O ₂
Humidificación (adición de agua) o secado	Contenido de humedad
Neutralización con sustancias ácidas o básicas según se requiera	pH

3.3.4 Aireación

La concentración de O_2 (Variable controlada) en una pila o hilera de composteo se regula mediante la aireación (Variable manipulada). La aireación, además de ayudar a suministrar O_2 , ayuda a enfriar descendiendo el valor de la temperatura como se mencionó en el apartado 3.1.3, redistribuye nutrientes, evita la compactación y la formación de canales preferenciales de aire y agua, además que reduce el contenido de humedad. Este último factor se ve afectado, debido a que la aireación facilita la liberación al ambiente de parte del agua en estado gaseoso (Robles-Martínez, 2011; Tchobanoglous et al., 1993b).

Si al tercer día de haber preparado la pila o hilera de composta no se detecta un aumento en la temperatura, es recomendable airear los componentes y agregarle agua, material verde (frutas, verduras, bolsas de té, maleza verde) y/o estiércol. Existen varias maneras de airear en el proceso de compostaje (Rodríguez-Salinas et al., 2006):

- Aireación natural, incluyendo en la pila partículas de diferentes tamaños, la cuales ayudan formando bolsas o túneles de aire.
- Aireación manual o mecánica, volteando o revolviendo las pilas con palas o equipo mecanizado.
- Aireación forzada, mediante tubería acomodada en el interior de la mezcla, a través de la cual se puede forzar la intrusión del aire.

La frecuencia de volteo así como el número total de vueltas depende principalmente del contenido de humedad y el tipo de material a compostar. Para pilas como las mostradas en la figura 3.3, es pertinente hacer la aireación por volteo cada 48 horas (cada tercer día) y aprovechar para adicionar agua de manera asperjada, para que la humedad no descienda a valores menores a

40%Hbh (Ballesteros-Trujillo et al., 2016; Torres-Cedillo, 2016). En la Tabla 3.12 se muestran como ejemplo los parámetros operacionales para varios niveles tecnológicos del compostaje de residuos de jardín. Si la aireación no es apropiada se producirá anaerobiosis, el pH descenderá hasta valores de 4 a 5 y el proceso de compostaje se retrasará (Tchobanoglous et al., 1993b).

Tabla 3.12 *Parámetros operacionales para varios niveles tecnológicos.*

Nivel tecnológico	Frecuencia de volteo	Dimensión de Hilera (m)		Tiempo para producto acabado, (meses)
		Altura	Anchura	
Mínimo	Una vez/año	3.0-4.0	6.0-7.0	24.0-36.0
Bajo	3-5 veces/año	1.5-2	4.0-4.5	14.0-18.0
Intermedio	Semanal	1.5-2.5	4.0-5.5	4.0-6.0
Alto	Pila estática aireada ^a	2.5-3	5.0-6.0	3.0-4.0
Nivel alto en reactor				2.0-2.5 ^b

^a Se utiliza la aireación forzada durante un periodo de 2 a 10 semanas, en el cual se apagan los ventiladores y se voltean las pilas periódicamente.

^b Los tiempos de compostaje en el reactor varían de 8 horas a 20 días, según el proceso. Después se cura el material compostado en hileras abiertas durante 6-8 semanas adicionales.

Fuente: Adaptado de Tchobanoglous et al. (1993a).

Tavera-Cortés y Alvarado-Raya (2011) mencionan que Sadaka y El-Taweel (2003), determinaron la máxima temperatura (68 °C) para residuos residenciales, con un flujo de aireación de $3.0 \text{ Lh}^{-1}\text{kg}^{-1}$ en comparación con $6.0 \text{ Lh}^{-1}\text{kg}^{-1}$, lo cual corrobora que altas velocidades de flujo de aireación pueden tener efecto adverso en la temperatura y sanitación de la composta, aunque el flujo apropiado va a depender de los materiales usados en la conformación de la pila. En la figura 3.14 se muestran algunos equipos comerciales para el volteo mecánico de materiales para compostar.



a)



b)



c)

Figura 3. 14 Ejemplos de equipo para airear pilas durante el composteo. Fuente: a) COMPOSTAMEX , 2016; b) PEZZOLATO, 2016; c) RECOVERY. (2016).

3.3.5 Humidificación

El agua además del O_2 es un elemento esencial para la supervivencia de los microorganismos que intervienen en el compostaje; cuando se encuentra en exceso dificulta la circulación del O_2 , con lo que puede provocar un ambiente anaeróbico, con el que la descomposición de la mezcla de componentes generará malos olores (Torres-Cedillo, 2013; Wilson, Zhao, Yorgey y Frear, 2013; WSDE-WSU, 2013).

Independientemente de la escala del proceso a compostar, debe de monitorearse la humedad. Si el valor determinado es superior al óptimo (40-60 %Hbh), se puede agregar paja seca y papel para que absorban la humedad, o bien airear, debido a que como se mencionó en el apartado

3.3.1, la aireación elimina agua mediante evaporación (Roman et al., 2013; Tavera-Cortés y Alvarado-Raya, 2011).

Si bien existen medidores de humedad (Figura 3.15) y lo establecido en la NOM-021-SEMARNAT-2000, se puede determinar la humedad de manera práctica y empírica en una pila de composteo, para ello se sugiere tomar con la mano una porción del materia y formar una pelota, si no gotea y tiene la textura de una esponja húmeda, entonces se dice que la humedad es adecuada (Rodríguez-Salinas et al, 2006).



Figura 3.15 Medidores de humedad en suelos y compostas. Fuente: HYDROCULTURA. 2016; OREMOR, 2016.

Si se detecta que falta humedad, se puede regar la pila y taparla con plástico para reducir la evaporación del agua. La cantidad de agua a adicionar se estima mediante la ecuación 3.2.

$$CH = \frac{CA}{SS+CA}100 \quad (\text{Ec. 3.2})$$

Dónde:

CH , Es el contenido en porcentaje de humedad base húmeda, %Hbh

CA , cantidad de agua en la muestra de composta, g

SS , presencia de sólido seco en la muestra de composta, g

Además de la adición de agua que puede ser manual o mecanizada (Figura 3.16), para incrementar el contenido de humedad en un proceso de compostaje, también es posible agregar

agua residual o lixiviados de residuos sólidos urbanos, previo análisis para garantizar su inocuidad y que el contenido de metales no rebasa la normatividad vigente. La adición de estos líquidos contribuye al proceso de composteo al incorporar también materia orgánica y microorganismos (Ballesteros-Trujillo et al., 2016; Jingwei, Kelpie, Quanbao, Georgine y Craig, 2013).



Figura 3. 16 Máquina volteadora de material con adición de agua. Fuente: Cifuentes, de León y Porres, 2011.

3.3.6 Control de pH

Los residuos orgánicos pueden variar mucho en su pH sin afectar la velocidad de descomposición en el proceso de composteo, debido a que el rango adecuado de pH a lo largo de este proceso puede estar en el intervalo de 4 a 9. En general los hongos toleran un margen de pH entre 5-8, mientras que las bacterias tienen menor capacidad de tolerancia (pH= 6-7.5). El valor óptimo está entre 5.5 y 8.5, pH más bajos alientan el crecimiento de hongos y se incrementa la descomposición de celulosa y lignina. Para minimizar la pérdida de nitrógeno en forma de gas amonio, el pH no debería sobrepasar un valor de 8.5 (Ballesteros-Trujillo et al., 2016; Tchobanoglous et al., 1993a). En la figura 3.17 se presentan algunos de los medidores comerciales de pH para suelos y compostas.



Figura 3. 17 Medidores directos de pH para suelos y compostas. Fuente: HANNA, 2016; PCE, 2016.

Para el acondicionamiento inicial de la materia orgánica, especialmente si se utiliza estiércol, es posible corregir la acidez del medio agregando un poco de cal o ceniza (Caro- Lara, Romero y Lora, 2009), aunque no siempre es necesario, como fue el caso del trabajo de Pérez et al., (2010), donde se elaboraron abonos orgánicos a partir de diferentes sustratos, no neutralizaron y obtuvieron para la composta de bovinaza y el lombricompost un pH ligeramente básico (7.37-7.36), mientras que en la composta de pollinaza, fue ligeramente ácido (6.72).

Durante el proceso de compostaje no es fácil controlar el pH del material porque es una Variable medible de salida, sin embargo, también se sugiere aplicar con medida cal o ceniza, mezclar y medir nuevamente el pH antes de repetir la adición (Flores y Carranza, 2006; Román y et al., 2013). Cabe mencionar que los olores debidos a la producción de amoníaco se asocian con valores de pH superiores a 9.0 (Sundberg et al., 2013; NSW, 2004; WSDE-WSU, 2013).

3.3.7 Control de problemas

Cuando la aireación no es la apropiada, la reducción de O₂ conduce a condiciones anaeróbicas, con lo que se producen malos olores. En NSW (2004) se menciona que los malos olores se deben a la presencia de amoníaco, aminas volátiles (residuos con un alto contenido de nitrógeno), sulfuro de hidrógeno y compuestos orgánicos volátiles; estos compuestos tienen olores características como los listados en la tabla 3.13. Para evitar malestar a quién, las instalaciones donde se produce composta deben cumplir con criterios de reducción de olores, especificados en “Approved Methods and Guidance for Modelling and Assessment of Air Pollutants in New South Wales” (EPA, 2016; Wilson et al., 2013; WSDE-WSU, 2013).

Tabla 3. 13 *Compuestos de olores desagradables.*

Compuesto	Descripción del Olor	Límite de detección para un panel particular de olor ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
Compuestos de azufre		
Disulfuro de dimetilo	Repollo podrido	0.1
Sulfuro de dimetilo	Repollo podrido	2.5
Disulfuro de carbono	Calabaza podrida	24.0
Sulfuro de hidrógeno	Huevo podrido	0.7
Metanotiol	Azufre agudo	0.04
Compuestos de nitrógeno		
Gas amoníaco	Medicinal	27.0
Trimetilamina	Pescado	0.11
Ácidos grasos volátiles		
Ácido acético	Agrio (vinagre)	1019.0
Ácido propiónico	Rancio	28.0
Ácido butírico	Podrido	0.3

Fuente: Adaptado de NSW, 2004.

Para minimizar la posibilidad de generación de malos olores se debe reducir el tamaño de partícula, separar plásticos y partes duras de revistas y libros, o bien utilizar para la preparación de la pila residuos orgánicos separados desde la fuente o no contaminados (Tchobanoglous et al., 1993b; WSDE-WSU, 2013).

Además de los malos olores, durante el composteo es importante controlar la emisión de partículas, la generación de metano y el riesgo de incendios (NSW, 2004). En la Tabla 3.14 se presenta un listado de los problemas más comunes, su causa más probable y su solución; y en la Tabla 3.15 se listan los residuos orgánicos clasificados para el compostaje doméstico, donde se identifican los residuos verdes y cafés.

Tabla 3. 14 *Problemas, causas y soluciones comunes en el proceso de compostaje.*

PROBLEMA	CAUSA	SOLUCIÓN
Mal olor	Humedad excesiva	Mezclar, añadir material más seco para absorber la humedad
Olor a amoníaco	Compactación excesiva (falta de aire)	Mezclar; disminuir el tamaño de la pila; agregar trozos de tamaños diferentes (ramitas, etc.) para hacer espacios de aire en la mezcla
	Demasiados residuos verdes (nitrógeno)	Añadir residuos cafés
Temperatura baja	Pila demasiado pequeña	Aumentar el tamaño de la pila; tapar o aislar la pila/compostadora
	Humedad insuficiente	Añadir agua durante el mezclado; cubrir la compostadora para evitar que se pierda la humedad
	Insuficiente aeración	Voltear/mezclar; agregar trozos de material de tamaños diferentes
	Falta de desechos verdes	Añadir residuos verdes
	Tiempo frío	Aumentar el tamaño de la pila; protegerla con plástico perforado para guardar el calor
Temperatura demasiado alta	Pila demasiado grande	Disminuir el tamaño de la pila
Presencia de vectores: moscas, hormigas, roedores	Presencia de carne, desechos grasos	Retirar desechos de origen animal, cubrir la compostadora/pila con tierra o con hojas; usar una compostadora diseñada especialmente para estos residuos
	Pila seca	Añadir agua o desechos húmedos
	Exceso de humedad	Añadir residuos cafés
Moho	Falta de oxígeno	Mezclar pila.

Fuente: Adaptado de Rodríguez-Salinas et al., 2006.

Tabla 3. 15 *Clasificación de residuos orgánicos para el compostaje doméstico.*

TIPO	RESIDUO	OBSERVACIONES
	Aserrín, virutas de madera	No usar si proviene de madera tratada con productos químicos
	Hojas perennes (no se caen en el otoño)	Es mejor añadirlas picadas
Cafés	Hojas secas	Se recogen en otoño para utilizarlas todo el año
	Paja y heno	Picar y mojar. Favorecen la aireación
	Pasto cortado y seco	Cuando es necesario material café, se puede secar al sol el pasto recién cortado
	Podas de árboles	Ayudan a la aireación.
	Cítricos	Se requiere buena aireación
	Estiércol de animales herbívoros	Muy útil si se requiere de materiales verdes
Verdes	Frutas, verduras, residuos de comida	Picar en trozos pequeños, principalmente las cáscaras
	Hojas y bolsas de té	Esparcir dentro de la mezcla
	Maleza verde	Pasteurizarla al sol dentro de una bolsa negra durante 7 a 10 días para eliminar semillas
	Pasto verde	Mezclar con materiales secos. No usar si tiene pesticidas.
Pequeñas cantidades	Aceites, grasas y productos lácteos	Al podrirse generan malos olores
	Carne, hueso, pescado	Generan malos olores y atraen roedores y moscas
	Papel sin tinta	Se degrada lentamente; cortar en tiras
	Excremento de animales carnívoros y humanos	Contienen microorganismos peligrosos para la salud
Riesgo sanitario	Plantas enfermas	La composta resultante puede seguir infectada
	Malezas y plantas persistentes	Las plantas con raíces persistentes y malezas con semillas son muy difíciles de pasteurizar

Fuente: Adaptado de Rodríguez-Salinas et al., 2006.

Referencias

- Altamirano, F.M. y Cabrera, C.C. (2006). Estudio comparativo para la elaboración de compost por técnica manual. Revista del Instituto de Investigaciones de la Facultad de Geología, Minas, Metalurgia y Ciencias Geográficas FIGMMG Vol. 9, N° 17, 75-84 (2006) de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos (UNMSM) Lima, Perú.
- Alvarez de la Puente J.M. (2007). Manual de compostaje para Agricultura Ecológica. Junta de Andalucía, Conserjería de Agricultura y Pesca, “Servicio de Asesoramiento a los Agricultores y Ganaderos” Dirección General de la Producción Ecológica, España. <http://www.ciencias-marinas.uvigo.es>
- Atlas R. y Bartha R.. (2005). Ecología Microbiana y Microbiología Ambiental. Addison-Wesley. ISBN 9788478291106. España.
- Ballesteros-Trujillo M., Hernández-Berriel M.C, De la Rosa-Gómez I, Mañón-Salas M.C., Camacho-Martínez M.I. (2016). Comportamiento del crecimiento microbiano después de la aireación en pilas de compostaje de residuos orgánicos y biosólidos. Memorias del VI Simposio Internacional de Química. ISBN: 978-959-312-169-9. 7-10 Junio 2016. Universidad Central “Marta Abreu” de las Villas Santa Clara, Cuba.
- Barrena R., (2006). Compostaje de residuos sólidos orgánicos. Aplicación de técnicas respirométricas en el seguimiento del proceso. Departamento de Ingeniería Química, Universidad Autónoma de Barcelona, España.
- BOE (2005). REAL DECRETO 824/2005, de 8 de julio, sobre productos fertilizantes. 25592 Martes 19 julio 2005 BOE núm. 171 Ministerio de la Presidencia de España.
- Castrillón, Q.O., Bedoya, M.O. y Montaya M.D. (2004). Efectos del pH sobre el crecimiento de microorganismos durante la etapa de maduración en pilas estáticas de compost. *Producción + Limpia*, 1(2). 87-98.
- Caro-Lara, I., Romero, O. Z. y Lora, S. R. (2009). Producción de abonos orgánicos con la utilización de Elodea (*Egeria densa*) presente en la Laguna de Fúquene. Revista UDCA Actualidad y Divulgación Científica, 12(1), 91-100.
- Cifuentes, R., de León, R. y Porres, C. (2011). Producción de abono orgánico a partir de cachaza y tallos de caña de azúcar recuperados de las carreteras. Revista de la Universidad del Valle de Guatemala. 23, pp 8-17. Recuperado de http://www.uvg.edu.gt/publicaciones/revista/volumenes/numero-23/REVISTA_23_pag_8-17.pdf
- Chroni C., Kyriacou A., Manios T. y Lasaridi K.E. (2009). Investigation of the microbial community structure and activity as indicators of compost stability and composting process evolution. *Bioresource Technology*. (100), 3745-2750.
- COMPOSTAMEX. (2016). Equipos para compostaje. Soluciones sostenibles. Recuperado de <http://www.compostamex.com/index.php/paquetes-tecnologicos/compostaje>
- DOF. (2008). NMX-FF-109-SCFI-2007 Humus de lombriz o lombricomposta a partir de materia orgánica. Publicada por el Diario Oficial de la Federación (DOF) el 2008-06-10. Recuperado de <http://www.ecotec2000.de/nmx-ff-109-scfi-2008.pdf>
- EPA. (2016). Approved Methods and Guidance for Modelling and Assessment of Air Pollutants in New South Wales. Environment Protection Authority (EPA). Recuperado de <http://www.epa.nsw.gov.au/air/appmethods.htm>
- Flores, M. A. y Carranza, C. C. (2006). Estudio comparativo para la elaboración de compost por técnica manual. Revista del Instituto de Investigación de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalurgia y Geográfica, 9(17), 75-84.

- GGEdoMex. (2006). Norma Técnica Estatal Ambiental NTEA-006-SMA-RS-2006, que establece los requisitos para la producción de los mejoradores de suelos elaborados a partir de residuos orgánicos. Gaceta del Gobierno del Estado de México (GGEdoMex). Toluca de Lerdo a 9 de octubre de 2016. http://sma.edomex.gob.mx/sites/sma.edomex.gob.mx/files/files/sma_pdf_ntea_006_sma_rs_2006.pdf
- GODF (2012). Norma Ambiental para el Distrito Federal NADF-020-AMBT-2011, que establece los requerimientos mínimos para la producción de composta a partir de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos, agrícolas, pecuarios y forestales, así como las especificaciones mínimas de calidad de la composta producida y/o distribuida en el Distrito Federal. Gaceta Oficial del Distrito Federal (GODF). 30 de Noviembre de 2012. Recuperado de <http://www.sedema.cdmx.gob.mx/storage/app/uploads/public/577/290/22c/57729022cdb18069720357.pdf>
- HANNA. (2016). Kit de medición directa del pH del suelo HI 9912. Recuperado 30 de Noviembre <http://www.hannainst.es/catalogo-productos/medidores-de-ph/phmetros-portatiles/kit-de-medicion-directa-del-ph-del-suelo-hi-99121>
- Haug, R. T. (1993). The Practical Handbook of Compost Engineering. Lewis Publishers. ISBN 10 0873713737. Boca Rato, USA.
- HYDROCULTURA. (2016). Medidor de humedad en suelo LINCOLN 6400 y Medidor de ph, humedad y luz para suelo ALLAFRANCE 92100-001/B. Recuperado de <https://hydrocultura.com/collections/all/medidor-de-humedad-para-composta-lincoln-6400>
- Jingwei, Ma., Kelpie, W., Quanbao, Z., Georgine, Y. y Craig, F. (2013). Odor in Commercial Scale Compost, Literature Review and Critical Analysis. Waste 2 Resources Washington State Department of Ecology Olympia, Washington.
- Jaramillo-Henao, G. y Zapata-Marquez, L. M. (2008). Aprovechamiento de los residuos sólidos orgánicos en Colombia. Doctoral dissertation, Especialización en Gestión Ambiental). Colombia.
- Jiménez-Cisneros, B.E. (2001). “Residuos Sólidos”. La contaminación Ambiental en México, Causas, efectos y tecnología apropiada. Limusa/Noriega Editores, México D.F.
- Juárez R. B. (2014). Obtención de composta a partir de biosólidos y residuos sólidos orgánicos con una relación carbono nitrógeno entre 4 y 8 y en tiempo menor a 3 meses. Tesis de Maestría. Instituto Tecnológico de Toluca. México.
- Laich, F. (2011). El papel de los microorganismos en el proceso de compostaje. Jornada Técnica: Fertilidad y Calidad del Suelo. Experiencias de fertilización orgánica en platanera. Recuperado de <http://biomusa.net/es/jornadas-y-actividades/jornada-tecnica-sobre-calidad-y-fertilidad-del-suelo/65-el-papel-de-los-microorganismos-en-el-proceso-de-compostaje/file>
- Moreno-Casco J. y Moral-Herrero R. 2008. Compostaje. Edit. Cient. Ediciones Mundi-Prensa. ISBN: 978-84-8476-346-8 84-8476-346-3. Madrid, España.
- Negro, M.J., Villa, F., Aibar, J., Alarcón, R. y Ciria, P. (2000). Producción y gestión del compost. Informaciones técnicas del departamento de agricultura de la dirección general de tecnología agraria. Gobierno de Aragón.(88).
- NSW. (2004). Composting and related organics processing facilities. Environmental guidelines. Published by Department of Environment and Conservation (NSW). USEPA. Recuperado de http://www.environment.nsw.gov.au/resources/waste/envguidlms/composting_guidelines.pdf
- Olson, B. M., McKenzie, R. H., Larney, F. J. y Bremer, E. (2010). Nitrogen-and phosphorus-based applications of cattle manure and compost for irrigated cereal silage. Canadian Journal of Soil Science, 90(4), 619-635.

- OREMOR. (2016). Medidor de humedad. Nogales, Arizona. <http://www.oremor.com/medidor2.html>
- PCE. (2016). pH-metro para suelo resistente al agua PCE-PH20S. PCE Iberica S.L. Instrumentación. Recuperado 30 de Noviembre <http://www.pce-iberica.es/medidor-detalles-tecnicos/instrumento-de-medida-laboratorio/ph-metro-suelo.htm>
- Pérez, R., Pérez A., y Vertel M. (2010). Caracterización nutricional, fisicoquímica y microbiológica de tres abonos orgánicos para uso en agroecosistemas de pasturas en la subregión sabanas del departamento de Sucre, Colombia. *Tumbaga*, 1(5), 27-37.
- PEZZOLATO. 2016. Volteadores. Máquinas para Compostaje Tromels. Recuperado de http://www.pezzolato.it/es/greenline/linea_compost
- RECOVERY. (2016). Equipo Compostaje. Recuperado de <http://www.recovery.com.es/portfolio-view/equipo-compostaje/>
- Robles-Juárez. (2014). Obtención de composta a partir de biosólidos y residuos sólidos orgánicos con una relación carbono nitrógeno entre 4 y 8, y en tiempo menor a 3 meses. Tesis de Maestría en Ciencias en Ingeniería Ambiental. Instituto Tecnológico de Toluca. Toluca, Estado de México, México.
- Robles-Martínez F. (2011). Residuos Sólidos: Un Enfoque Multidisciplinario, Tratamiento aerobios de residuos sólidos orgánicos. Editorial Libros en Red.
- Rodríguez-Salinas M.A., Córdoba y Vázquez A. (2006). Manual de compostaje municipal, Tratamiento de residuos sólidos urbanos. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), (Instituto Nacional de Ecología) INE y Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ). Recuperado de http://www.virtual.sepi.upiicsa.ipn.mx/pp_web_sepi_composta/files/Manual_compostaje_municipal.pdf
- Román, P., Martínez, M. M. y Pantoja, A. (2013). Manual de compostaje del agricultor. Experiencias en América Latina. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) Oficina Regional para América Latina y el Caribe. Santiago de Chile. Recuperado en <http://www.fao.org/3/a-i3388s.pdf>
- Ruggieri, L., Gea, T., Mompeó, M., Sayara, T. y Sánchez, A. (2008). Performance of different systems for the composting of the source-selected organic fraction of municipal solid waste. Recuperado de <http://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2008.05.014>
- SEMARNAT. (2016a). Norma Mexicana NMX-AA-016-1984 Protección al Ambiente- Contaminación del Suelo-Residuos Sólidos Municipales-Determinación de Humedad. Recuperado de <http://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/agenda/DOFsr/NMX-AA-016-1984.pdf>
- SEMARNAT. (2016b). Norma Mexicana NMX-AA-007-SCFI-2013: Análisis de agua- medición de la temperatura en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - método de prueba. Recuperado de http://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium-bin/janium_login_opac.pl?scan=1&ubicación=18&keyword=NMXVIGENTE_NMX-AA-007-SCFI-2013
- SEMARNAT. (2016c). Norma Mexicana NMX-AA-25-1984. Protección al ambiente-contaminación del suelo-residuos sólidos-determinación del pH-Método potenciométrico. modificada de Norma Oficial Mexicana a Norma Mexicana, de acuerdo al Decreto publicado en el Diario Oficial de la Federación de fecha 6 de Noviembre de 1992. Recuperado de <http://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/agenda/DOFsr/NMX-AA-025-1984.pdf>
- SMA (2012). Prontuario Estadístico. Secretaría del Medio Ambiente (SMA). Gobierno del Estado de México. Julio 2012.

- Smith, C. A y Corripio, A. B. (1996). Principios y Práctica de Control Automático de Procesos. John Wiley y Sons. ISBN 968-18-3791-6. México.
- SENSOTRAN. (2016). Oxímetro portátil con la sonda de aspiración para compostaje. Marca SENSOTRAN. Recuperado de http://www.sensotran.com/web/repositori/documents/es_ES/33_document.pdf
- Stephanopoulos G. (1983). Chemical Process Control, An Introduction to Theory and Practice. Prentice Hall.
- Sundberg C., Yu D., Franke-Whittle I., Kauppi S., Smårs S., Insam H. y Jonsson H. (2013). Effects of pH and microbial composition on odour in food waste composting. *Waste Management*, 33(1), 204-211.
- Tavera-Cortéz, M. E. y Alvarado-Raya, H. (2011). La factibilidad tecnológica para la producción de composta en el DF. ICyTDF, CONACYT.
- Tchobanoglous George. Theisen Hilary y Vigil Samuel. (1993a). Gestión Integral de Residuos Sólidos. Vol. 1. Ed. Mc Graw Hill.
- Tchobanoglous G., Theisen H. y Vigil S. (1993b). Gestión Integral de Residuos Sólidos. Vol. 11. Ed. Mc Graw Hill. 1087. ISBN 9788448118303.
- Torres-Cedillo, L. (2016) Elaboración de Composta. Ficha. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA). (2016, 11 de Noviembre). Recuperado de <http://www.sagarpa.gob.mx/desarrolloRural/Documents/fichasCOUSSA/Abonos%20organicos.pdf>
- Vigneswaran, S., Kandasamy, J. y Johir, M. A. H. (2016). Sustainable Operation of Composting in Solid Waste Management. *Procedia Environmental Sciences*, 35, 408–415. <http://doi.org/10.1016/j.proenv.2016.07.022>
- Wilson, Ma.J., Zhao, K., Yorgey, Q.G. y Frear, C. (2013). Odor in Commercial Scale Compost: Literature Review and Critical Analysis. *Washington State Department of Resources*. (74).
- WSDE-WSU. (2013). Odor in comercial scale compost: Literature review and critical analysis. Publication no. 13-07-066. Amendment 1 to Contract C1200132. October 17, 2013. Washington State Department of Ecology (WSDE) y Washington State University (WSU). Recuperado de www.ecy.wa.gov/biblio/1307066.html
- WSU (2016). Compost fundamentals, Airation. Washington State University. Recuperado de http://whatcom.wsu.edu/ag/compost/fundamentals/needs_aeration.htm
- Zhu, N. (2006). Effect of low initial C/N ratio on aerobic composting of swine manure with rice strow. *Bioresource Technology*. 98(1). 9-13.

TÉCNICAS DE MODELADO Y SIMULACIÓN

Por María del Consuelo Mañon Salas

El conocimiento de cómo es el mundo y las leyes que rigen su funcionamiento han dejado huella en la evolución de la humanidad. En la segunda década del siglo pasado surge el lenguaje científico, conceptos y relaciones provenientes de la denominada teoría de sistemas. Esto ocurre principalmente en disciplinas tradicionales como la biología y la etnología, como resultado de la observación y análisis de organismos, sociedades o culturas en términos de entidades cualitativamente distintas a las partes o elementos que las componen. La relación *el todo y sus partes* incorporado en la teoría de la observación, fue sustituida por la de *sistema ambiente*. Diversos componentes del orden de complejidad teórica y conceptual acompañan este cambio, como un fenómeno sustentado bajo el concepto de sistema. En este capítulo, se ofrece una descripción de los conceptos que acompañan este paradigma, entre los que se encuentran: sistema, modelo y simulación; se mencionan algunas técnicas para el análisis y diseño, así como herramientas indispensables en la construcción de un simulador. Se toma como caso de estudio el proceso de compostaje de una pila con volteo.

4.1 El método científico y la teoría de sistemas.

La teoría general de sistemas (TGS) tiene su origen en las concepciones aristotélicas de causa y efecto y de que todo entero forma parte de otro; este pensamiento puede resumirse en la frase de Aristóteles: *“El todo es más que la suma de sus partes”*. La TGS se representa como una forma sistemática y científica de aproximación y representación de la realidad y al mismo tiempo como una orientación al trabajo interdisciplinario. Tiene su base en el humanismo científico, que fundamenta todos los avances y productos de la era de la información y la tecnología. Es un método que permite analizar y estudiar la realidad y desarrollar abstracciones, a partir de las cuales es posible aproximar la percepción del universo que se va a representar. En este sentido la TGS genera teorías y formulaciones conceptuales que pueden crear condiciones de aplicaciones en la realidad empírica. Fue propuesta por el biólogo de origen austriaco Ludwig Von Bertalanffy (1989), quien señaló que no existe elemento físico o químico independiente; todos los elementos están integrados en unidades relativamente interdependientes (Contreras 2007). Esto llevó a revolucionar los enfoques existentes, sustentando y justificando la mayor parte de los supuestos políticos, empresariales, tecnológicos y comunicativos que dieron lugar a los cambios del siglo XX.

De esta manera surge el enfoque sistémico, con la interpretación del mundo como una gran organización: una jerarquía de niveles complejamente organizados. El éxito de la TGS se debió a la necesidad de sintetizar e integrar las teorías que le precedieron, además a la gran cantidad de alternativas posibles que brindaron la tecnología informática y la cibernética (Siles, 2007; Domínguez-Ríos y López-Santillán, 2017).

4.1.1 Definiciones generales.

La concepción fundamental que facilita el entendimiento de este paradigma, es el concepto de *Sistema*, descrito como el conjunto de elementos relacionados que interactúan entre sí para alcanzar un fin determinado, concebido como la combinación de cosas o partes que forman un conjunto unitario y complejo. Los sistemas se caracterizan por poseer propiedades globales (emergentes o sistémicas) que sus partes componentes no poseen (Arnold y Osorio 1998; Domínguez-Ríos y López-Santillán, 2017).

Entre los elementos que componen un sistema se encuentran:

- Los conceptos que surgen de una idea o imagen de algo que no es palpable.
- Los objetos son cosas que se pueden ver y tocar.
- Los sujetos son las personas que forman parte del sistema.
- Las actividades son procedimientos o funciones que deben realizarse con limitación de recursos.
- Las secuencias hacen referencia al orden lógico y sistemático.
- Los métodos son un conjunto de pasos ordenados que permiten alcanzar una meta u objetivo.
- Los procedimientos se refieren a aplicar un método específico dentro de un marco amplio de solución de problemas.
- Los recursos son los insumos y suministros, los controles permiten verificar los pasos seguidos por el proceso.
- Los subsistemas son sistemas que conforman un todo de un rango inferior.

Un subsistema es un conjunto de elementos y relaciones que responden a estructuras y funciones especializadas dentro de un sistema mayor. Desde este punto de vista se puede hablar de subsistemas, sistemas o supersistemas, siempre y cuando posean las características sistémicas mencionadas previamente (Osorio, Arnold, González y Aguado, 2008). La tabla 4.1 describe los elementos que componen un sistema de compostaje abierto.

Tabla 4. 1 Elementos que integran un sistema de compostaje abierto.

Elemento	Descripción
Concepto	Sistema de compostaje
Objeto	Pila de composta
Sujeto	a) Experto del área ambiental b) Analista de Laboratorio c) Responsable de la experimentación en campo
Actividades	Acondicionamiento de materiales a) Análisis microbiológicos y físico – químicos b) Elaboración de la pila c) Seguimiento de variables de control (pH, Temperatura, humedad) d) Aireación y humidificación de la pila
Secuencias	Acondicionamiento de biosólidos a) Deshidratación b) Colocar sobre una película de polietileno el biosólido c) Secar mediante radiación solar d) Verificar humedad del biosólido e) Moler biosólido en molino de cuchillas f) Cribar con malla de 2 mm de diámetro g) Obtener gránulos y polvo h) Almacenar composta
Métodos	Cálculo del porcentaje de humedad - método Termo gravimétrico Contenido de metales Pesados (Pb, Cd y Cr) - Método de absorción atómica. Índice de madurez de la composta - Método Solvita
Procedimiento	Caracterización de residuos orgánicos La porción orgánica de los residuos se fraccionó en un molino de cuchillas, obteniendo un tamaño de partícula aproximado de 2.0 cm. Esta porción fue deshidratada mediante radiación solar durante 24 horas, aireándose cada tres horas hasta obtener una humedad aproximada de 50 ± 5 % base húmeda (%Hbh). Hasta dejar lista la muestra para una serie de determinaciones.
Recursos	Área para ubicar la pila de composta. Materiales a compostar (biosólidos, residuos orgánicos, material de jardín, estiércol equino, etc.) Agua o lixiviados Equipo de laboratorio, de medición y seguridad Personal de apoyo Palas, cubetas, costales, cribas, tijeras, molino de cuchillas, entre otros
Controles	Parámetros de seguimiento Los parámetros se miden y monitorean durante todo el proceso y se adecuan en caso de ser necesario para que sus valores se encuentren en los intervalos considerados correctos (contenido de humedad, pH, aireación y temperatura de la pila) Parámetros relativos a la naturaleza del sustrato Son aquellos que se miden al inicio y al final del proceso (tamaño de partícula, relaciones C/N, nutrientes, materia orgánica, determinación de metales pesados, nitrógeno).

Si el sistema principal se considera como un “sistema abierto” (Figura 4.1), entonces el “sistemas de compostaje”, por encontrarse en un nivel de abstracción mayor que el sistema abierto, se consideraría un supersistema; en cambio, las pilas con volteos y pilas estáticas, formarían parte como subsistemas de uun sistema abierto, por encontrarse a un nivel de abstracción inferior. Esto mismo sucede con los reactores verticales, rotatorios y horizontales, que son clasificados como subsistemas de los sistemas cerrados.

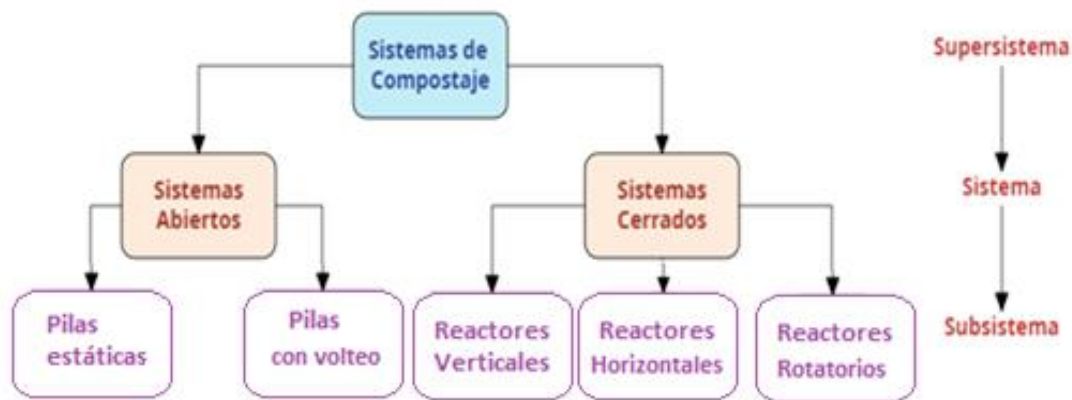


Figura 4. 1 Estructura del sistema de compostaje.

Para conocer y comprender un sistema independientemente del tipo que sea (físico, químico, biológico o social), Bunge (2009) emplea la descripción de la composición (C), el entorno (E), la estructura (S) y el mecanismo (M) del sistema, método también conocido como enfoque CESM. La composición hace referencia a la colección de sus partes llamados componentes. Su entorno es la colección de componentes que sin ser los principales, están vinculados con ellos, actúan en el sistema y generan efectos sobre el mismo. La estructura es la colección de relaciones o vínculos que se establecen entre los componentes y los elementos del entorno. Los atributos son las propiedades estructurales o funcionales que identifican las partes o componentes del sistema; se concibe por elemento a cada parte que lo constituye, las cuales pueden referirse a objetos o procesos. El mecanismo es el conjunto de procesos que suceden dentro del sistema y lo hacen

cambiar en algún aspecto. Es de suma importancia conocer el propósito del sistema, ya que a partir de él se definen las relaciones que deben tener ciertas unidades o elementos para tratar de alcanzar un objetivo. Una vez identificados los elementos, pueden ser organizados en un modelo. Como ejemplo se aplica el CESM para un sistema de compostaje abierto (Tabla 4.2).

Tabla 4. 2 Enfoque CESM para un sistema de compostaje abierto.

Concepto	Descripción
Propósito	Degradación de la materia orgánica por microorganismos bajo un ambiente en condiciones controladas, facilitando el incremento de temperatura para destrucción de patógenos y acelerando el proceso de compostaje.
Composición	Material a compostar (residuos orgánicos, biosólidos), material de soporte (arcilla, lama), biomasa (bacterias, hongos, actinomicetos), agua, lixiviados.
Entorno	Humedad, altitud, clima, estación del año, temperatura ambiental
Estructura	Velocidad de crecimiento microbiano, degradación biológica
Mecanismo	Descomposición aeróbica, reacciones de óxido reducción, humidificación y aireación de la pila, nutrición, reproducción y muerte de microorganismos.

Bunge (2009), define dos criterios para reconocer si “algo” es un sistema o solo es un agregado (conglomerado). El primer criterio consiste en verificar que el objeto se comporte como un todo en ciertos aspectos, o que tenga leyes propias en cuanto a su totalidad. El segundo comprueba si su comportamiento cambia apreciablemente cuando se quita uno de sus componentes o se reemplaza por otra clase diferente.

Una pila de composta puede ser vista como una unidad, donde se lleva a cabo un proceso controlado de transformaciones biológicas aeróbicas y termófilas de los residuos orgánicos biodegradables que dan lugar al compost. Con respecto al segundo criterio, si se retirará algunos de los materiales a compostar, o activadores, o si se modificaran los periodos de aireación, en consecuencia se vería afectada la composición, la actividad de la población microbiana y en consecuencia perturbando significativamente el proceso de compostaje.

4.1.2 Conceptos básicos de la Teoría General de Sistemas

El comportamiento del sistema se encuentra definido por las funciones del sistema y su dinámica está constituida por estados sucesivos u órdenes y procesos que permiten el cambio de estado. Se denomina función a la salida (output) de un sistema que está dirigido a la mantención de un sistema mayor en el que se encuentra inmerso. Para la determinación de los subsistemas de un sistema es de fundamental importancia definir las escalas espaciales y temporales que se están considerando (Fishman, 1978).

Un sistema tiene identidad a lo largo del tiempo, de manera que es necesario describir sus estados sucesivos y su estado está determinado por un conjunto de información proporcionada por variables aleatorias y no influenciadas por la probabilidad, y que están enfocadas a describir un sistema en un tiempo (t) determinado (Arnold y Osorio, 1998).

La temperatura, el pH y la humedad de la pila son solo algunos de los factores que intervienen en el proceso. Los valores que estos toman en un tiempo (t), al ser evaluados en su conjunto, permiten inferir el estado de la pila de composta. Por ejemplo, si la temperatura registra un valor menor a 45°C y un pH menor a 6.5 en el día dos, se puede deducir que el sistema está en la fase mesófila; si se toma una nueva lectura el día nueve, con temperatura mayor a 48 °C y un pH mayor a 6.5, se confirmaría que está en la fase termófila; de esta manera, los valores registrados en un tiempo (t) determinan los estados del sistema pila. La evolución del sistema de compostaje está dado en función de la degradación de la materia orgánica y su dinámica queda determinada por los valores medidos en un tiempo (t) de las variables de seguimiento: temperatura, pH y humedad

En la figura 4.2, se presentan las dinámicas de las variables temperatura y pH durante la duración del proceso de compostaje. El estado₁ ($T \geq 40^{\circ}\text{C}$ y $\text{pH} < 7$) determina el cambio de fase

mesófila a termófila y el estado₂ ($T \leq 45$ y $pH > 6.5$) establece el cambio de la fase termófila a la fase de estabilización.

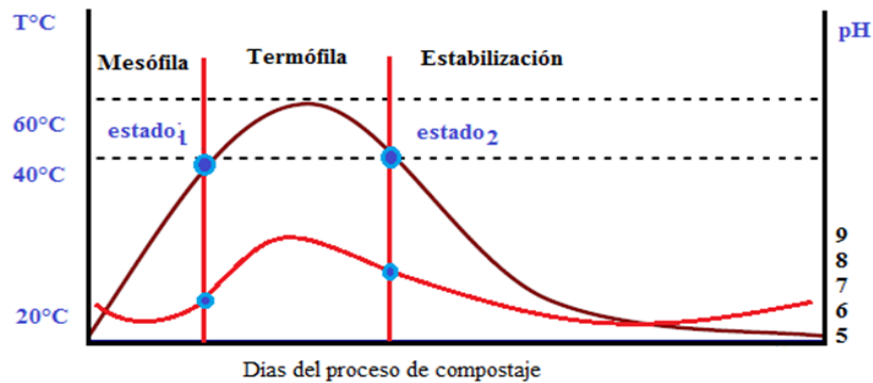


Figura 4. 2 Fases del proceso de compostaje.

El ambiente es un parámetro que comprende todo aquello que esta fuera del control del sistema, es el área de sucesos y condiciones que influyen sobre su comportamiento; está en constante interacción con el sistema ya que recibe las entradas, los procesos y genera las salidas. La sobrevivencia del sistema depende de la capacidad de adaptarse, cambiar y responder a las exigencias y demandas del ambiente externo, a pesar de que el ambiente puede ser un recurso para el sistema, también puede representar una amenaza (Freeman y Herron, 2002).

En el caso de una pila de composta, su ambiente está representado por el área donde se encuentra ubicada la pila (si esta techado o al aire libre), por las condiciones climatológicas (frío, cálido, húmedo, seco) y la estación del año de la localidad (primavera, verano, otoño, invierno). Las entradas, insumos o impulsos (input), son el material o energía necesarios para arrancar y operar un sistema y de los que puede disponer para su propio beneficio. Las variables de entrada o exógenas, también conocidas como parámetros o atributos, pueden ser establecidas por el ambiente del sistema o fijadas a voluntad. Como ejemplo de entradas en un sistema de composta,

se considera el agua (H₂O), el oxígeno (O₂), los materiales a compostar (biosólidos y residuos orgánicos), y los materiales estructurantes (arcilla, lama).

Los procesos son las acciones que transforman una entrada en salida como pueden ser una máquina, un individuo, una computadora o un producto químico. Su naturaleza es variada y pueden ser explicados a través de las actividades que se realizan al interior del sistema. Se distinguen dos tipos de variables: externas si se encuentran en el entorno del proceso; las internas no son ni de entrada ni de salida, son conocidas como de estado, conforman el conjunto mínimo de variables internas del sistema necesarias para describir completamente su estado interno. Las variables de salida son las variables de estado o una combinación de ellas que son medidas o traspasan la frontera del sistema (Ortiz, Sarriegi y Santos, 2006). Como ejemplo se considera el proceso de degradación aerobia representado mediante la ecuación estequiométrica (Ec. 4.1) la cual requiere como entrada materia orgánica, oxígeno y amoníaco, produce como salida CO₂, H₂O y biomasa (C₅H₇O₂N).



La retroalimentación, retroacción o retroinformación (feedback) consiste en ingresar las salidas del sistema como recurso de entrada; abarca la información que se brinda a partir del desempeño del producto, ya que en caso de ocurrir alguna desviación del plan original permite determinar su causa y los ajustes que sería recomendable realizar. Un caso de retroalimentación en la pila de composta, se da durante el monitoreo de las variables de seguimiento: temperatura, pH y humedad, pues una variación fuera de los rangos revela las desviaciones que sufre el proceso y brindan la pauta para su posible corrección. La temperatura es un factor indicativo de la evolución del proceso de compostaje. Las variaciones en este parámetro se utilizan normalmente

para conocer la actividad microbiana a lo largo del proceso y determinan la estabilidad de la materia orgánica. La humedad afecta la composición y el crecimiento de las poblaciones microbianas, se encuentra relacionada con la evolución de la temperatura y el grado de descomposición del material orgánico. El pH es un factor que influye sobre la actividad microbiana ya que las bacterias y los hongos se desarrollan óptimamente a valores de pH diferentes (Xi, Wei y Liu, 2010).

Hay sistemas que se consideran necesarios y perdurarán por mucho tiempo. Otros, al no ser apoyados por diversas razones, caen en la entropía y desaparecen. El desorden (entropía) se ha definido como la tendencia a importar más energía de la necesaria y lleva a la muerte o desintegración del sistema. Sin mecanismos eficaces de retroalimentación (feedback), el sistema va degenerándose, consumiéndose, hasta que muere. También puede definirse como el desgaste que el sistema presenta por el transcurso del tiempo o por el funcionamiento del mismo. La energía que se incorpora a los sistemas se comporta según la ley de la conservación de la misma, lo que quiere decir que la cantidad de energía que permanece en un sistema es igual a la suma de la energía importada, más la generada por el sistema, menos la energía exportada (entropía, negentropía) (Ec 4.2) (Domínguez-Ríos y López-Santillán, 2017).

$$\text{Energía}_{\text{Importada}} + \text{Energía}_{\text{Generada}} - \text{Energía}_{\text{Exportada}} = \text{Energía}_{\text{Almacenada}} \quad (\text{Ec 4.2})$$

Mantener el equilibrio (homeóstasis) en un sistema abierto implica necesariamente la importación de recursos provenientes del ambiente. Estos recursos constan de flujos energéticos, materiales o informativos. La información es el alma del sistema, el cual no puede funcionar sin información del medio, ni tampoco sin el traslado de información entre sus componentes. La

información es utilizada por el sistema para provocar un tipo de conducta que le permita adaptarse a las condiciones del medio. Tal es el caso de una pila de composta, si no se dispone de la información que proporcionan las variables de seguimiento (temperatura, humedad y pH), sería imposible tener un control del proceso de compostaje.

Las relaciones internas y externas de los sistemas han tomado diversas denominaciones: efectos recíprocos, interrelaciones, organización, comunicaciones, flujos, prestaciones, asociaciones, intercambios, interdependencias, coherencias, entre otras. Las relaciones entre los elementos de un sistema y su ambiente son de vital importancia para la comprensión del comportamiento de los sistemas vivos. Para los microorganismos que habitan una pila de composta, la relación que estos guardan con su ambiente es de vital importancia, alguna variación fuera de los rangos de temperatura, humedad y pH conduciría a la muerte de la población afectada.

La sinergia es un fenómeno que surge de las interacciones entre las partes de un sistema conglomerado. Este concepto responde al postulado aristotélico que dice que "el todo no es igual a la suma de sus partes". La totalidad es la conservación del todo en la acción recíproca de las partes componentes y es la propiedad común a todas aquellas cosas que pueden observarse como sistemas. La emergencia surge cuando el sistema se divide en unidades menores y avanza hasta el límite, donde surge un nuevo nivel de comportamiento correspondiente a otro sistema cualitativamente diferente. La figura 4.3 presenta los elementos que intervienen en el sistema pila de composta de acuerdo a las descripciones anteriores.

.

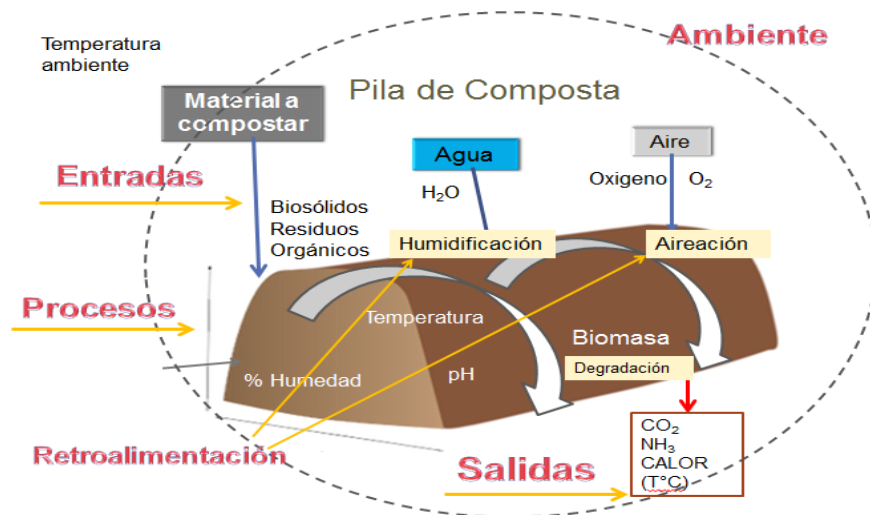


Figura 4.3 Elementos del sistema pila de compostaje aerobio.

4.1.3 Clasificación de sistemas

Existe una gran variedad de sistemas y una amplia gama de tipologías para clasificarlos de acuerdo con ciertas características básicas (Figura 4.4). A continuación se describen brevemente.

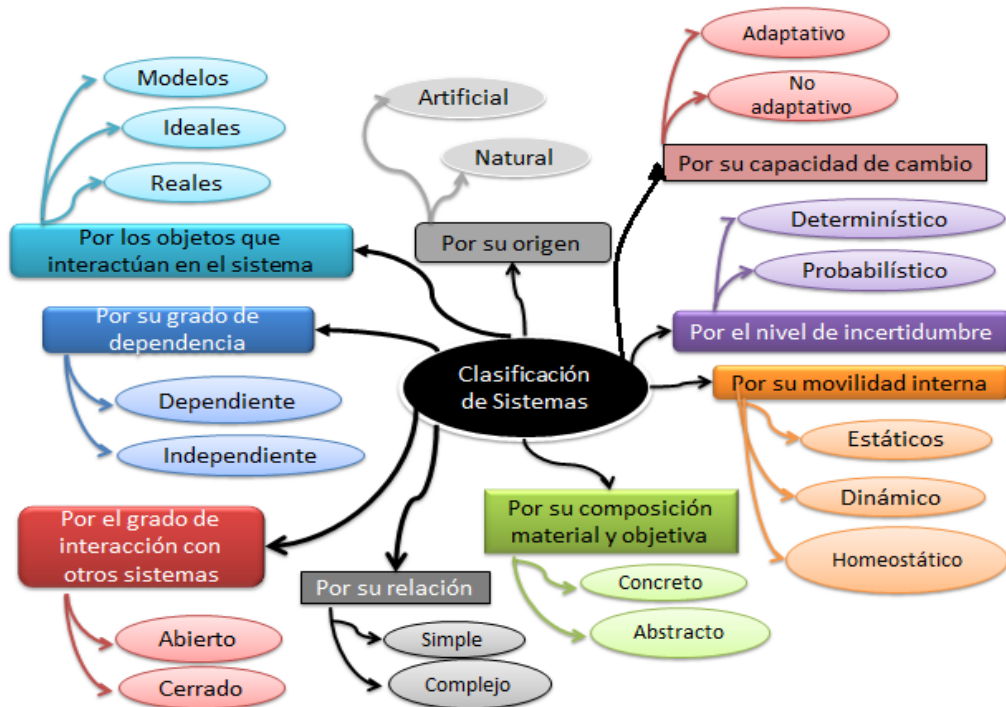


Figura 4.4 Clasificación de los Sistemas.

Por los objetos que interactúan en el sistema se clasifican en (Figura 4.5); sistemas reales, existen independientemente del observador (a), los sistemas ideales son construcciones simbólicas, como el caso de la lógica y las matemáticas (b), mientras que el sistema modelo corresponde a abstracciones de la realidad, en donde se combina lo conceptual con las características de los objetos, que es propio del proceso mental de abstracción (c) y clasificación.

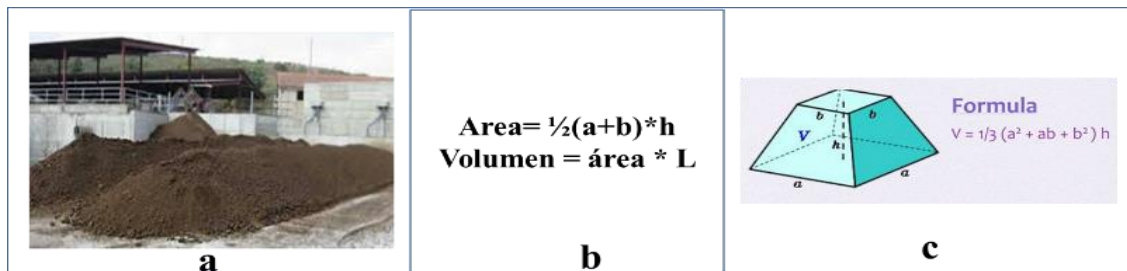


Figura 4.5 Clasificación de sistemas desde la perspectiva TGS.

La diferencia entre los sistemas naturales o artificiales (Figura 4.6), radica en la dependencia de su estructura con otros sistemas. Los primeros (a) están formados por la naturaleza sin una alteración voluntaria del hombre, con sub-sistemas y sus partes; el hombre no fue quien lo creó, ni quien los interconectó ni tampoco lo modificó en algún momento. Los sistemas artificiales en cambio son complejos, muy variados debido a que fueron desarrollados por el hombre (b).



Figura 4.6 Clasificación de sistemas de acuerdo a su origen a) naturales b) artificiales.

De acuerdo al tipo de intercambio que establece el sistema con su ambiente, son clasificados como cerrados o abiertos. Un sistema abierto mantiene estructuras en las que intervienen seres humanos o sus sociedades, tienen íntima relación con el ambiente en el que están inmersos, presentan una constante tendencia hacia la evolución y a un orden estructural. Ambos se condicionan mutuamente y dependen unos de otros. Para que exista un sistema abierto, debe encontrarse siempre un sistema superior, permanentemente relacionado con su medio ambiente, intercambiando energía, materia e información (Figura 4.7).

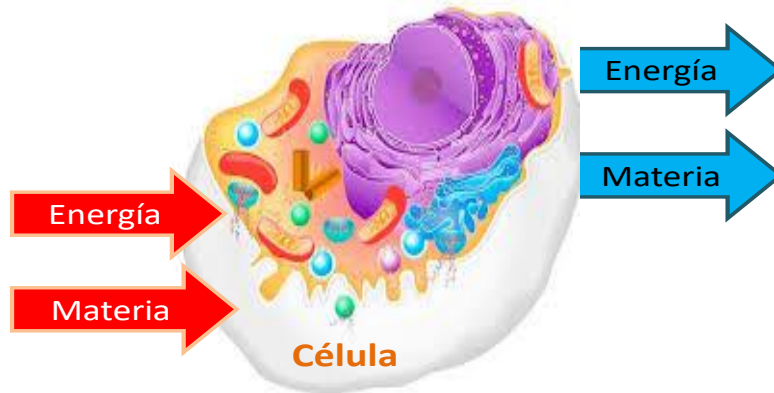


Figura 4.7 Ejemplo de sistema abierto.

Todo sistema si es abierto, puede innovar, cambiar y aprender conductas de acuerdo con la información que recibe del medio a través de sus entradas. Debido a la retroalimentación, estos se comportan de una forma característica evitando desviaciones que pondrían en peligro su proceso teleológico (objetivo por el que existe). El proceso es necesario investigarlo, analizarlo constantemente para poder afirmar que se está evaluando de cara a su posterior enriquecimiento, mejora o puesta al día. La capacidad que poseen los sistemas abiertos de mantenerse mediante el cambio de estructura y de conducta se conoce como ultra estabilidad.

Los sistemas abiertos pueden crear, nuevas estructuras, para así seguir siendo estables bajo otras condiciones. Son estables a pesar de las grandes posibilidades de cambio que poseen, es tal

la influencia creativa que genera la retroalimentación (feedback), que un sistema flexible nunca puede morir (entropía), si se mantienen sus necesidades, los objetivos son correctos y la capacidad de adaptación a los cambios aumenta.

En el caso de una pila de composta, se le puede clasificar como un sistema abierto, debido a que es parte de un sistema mayor (el planeta) e interactúa con seres humanos (técnico, analista, experto). Está en constante cambio ya que su estado se modifica conforme transcurre el proceso de degradación de la materia orgánica (Figura 4.8).



Figura 4.8 Proceso de aireación en una pila con volteo.

En un sistema cerrado no se establece un orden o diferenciación de sus elementos ya que se valen de su propia reserva de recursos, por consiguiente distribuyen de manera uniforme la energía y sus componentes no sufren modificación alguna. Alcanzan su estado máximo de equilibrio al igualarse con el medio (entropía-). En ocasiones el término sistema cerrado es también aplicado a sistemas que se comportan de una manera fija, rítmica o sin variaciones. Tal es el caso del compostaje a través de reactores o contenedores, en este tipo de sistemas no interviene el ser humano durante el proceso. La figura 4.9 presenta una compostera horizontal o

discontinua. Recibe este nombre por que es un proceso “por cargas”; una vez que se carga el material se debe dejar hasta que termine el proceso de compostaje para extraer la composta.

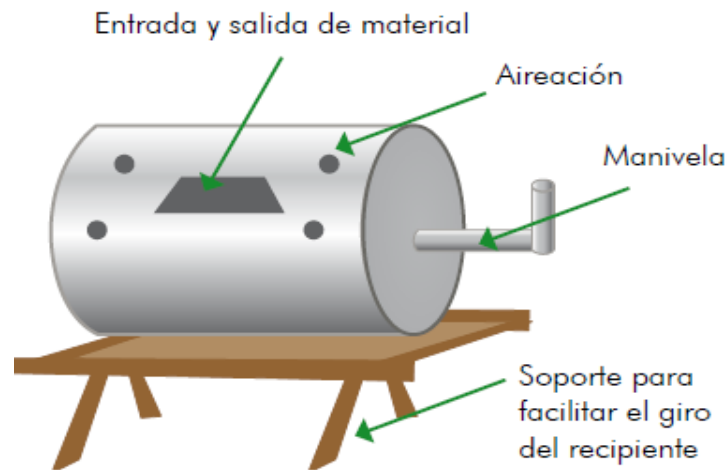


Figura 4.9 Compostera horizontal o discontinua. Fuente: Román et al., 2013.

Los sistemas se consideran simples, si se componen de pocos elementos con un número reducido tanto de estados como de relaciones entre las partes. Existe una tendencia a llamar sistemas complejos a aquellos sistemas formados por un gran número de componentes heterogéneos en interacción. La ciencia de la complejidad, se ha utilizado para referirse al estudio de los sistemas que operan en el "borde del caos". Es un concepto vagamente definido donde es necesario inferir la estructura de sus propiedades en un punto intermedio entre el orden y desorden perfectos.

Los sistemas complejos de caracterizan por tener una estructura compuesta por varios niveles, en estos sistemas los componentes de niveles jerárquicos inferiores, suelen mostrar un grado de autonomía significativo (Gilbert, 2004). Constan de un elevado número de componentes interactuando entre sí, exhiben comportamientos que no son consecuencia obvia de la interacción entre sus componentes. Presentan propiedades emergentes, fenómeno por el cual sus propiedades

globales emergen de las interacciones entre sus elementos, éstas solo le pertenecen al sistema en su conjunto y no a sus elementos individualmente (Figura 4.10). Tienden hacia la auto-organización y a la formación de patrones, su desarrollo se dirige hacia un mayor orden, organización y complejidad. Se adaptan a circunstancias cambiantes, usando mecanismos de retroalimentación y análisis en paralelo de las opciones.

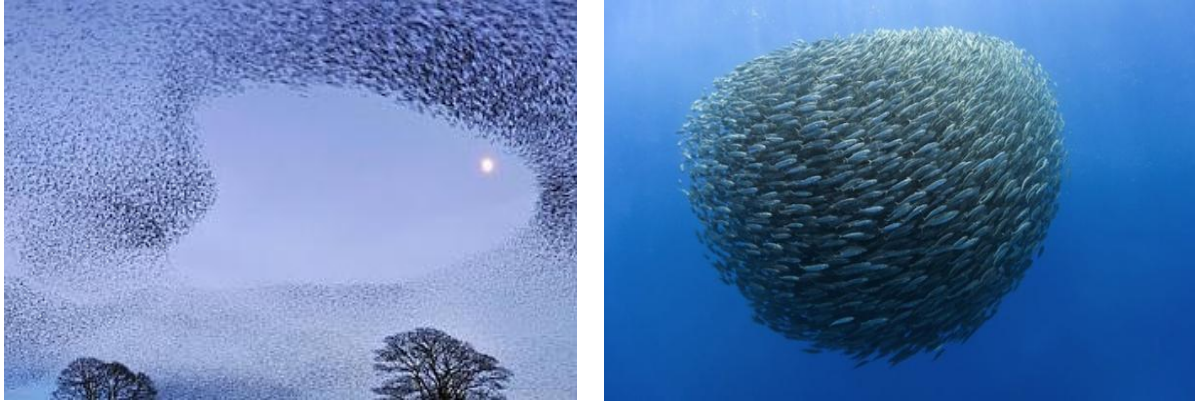


Figura 4.10 Ejemplos de sistemas complejos.

Los sistemas complejos son sistemas dinámicos debido a que cambian con el tiempo y sus estados previos pueden tener una influencia en estados presentes. A pesar de que se conozca de manera precisa el comportamiento de las partes constituyentes del sistema complejo (determinista), no es posible anticipar con certeza su evolución futura (no-determinista o aleatoria).

Debido a la carencia de una sola teoría que les dé sustento, su estudio se realiza considerando diferentes marcos teóricos, los cuales pueden ser clasificados en tres categorías, desde su origen más general se encuentran: las ciencias naturales (incluye a la biología, química, física y matemáticas), cibernética y teoría general de sistemas y la corriente de los sistemas complejos adaptativos. Entre las diferentes disciplinas se encuentran la biología evolutiva, la dinámica de sistemas con los modelos de simulación, la teoría de juegos con su utilidad para comprender el

efecto global de “reglas” locales y la inteligencia artificial con sus técnicas de solución de problemas (Caballero, 2008).

Al considerar la complejidad como una propiedad evaluable de los sistemas, es posible establecer modelos que permitan cuantificarla. Existen dos enfoques en el modelado de sistemas complejos: la dinámica de sistemas y la simulación basada en agentes (Izquierdo, Galán, Santos y Del Olmo, 2008).

El enfoque de la dinámica de sistemas se centra en las relaciones causales que ligán variables observables. Estas relaciones pueden expresarse fácilmente con ecuaciones algebraicas y es la particularización de valores que satisfacen estas ecuaciones lo que genera la dinámica global del sistema. Las ecuaciones pueden tener en cuenta variabilidad en el tiempo (ecuaciones diferenciales) y en el espacio (ecuaciones en diferencias parciales). El modelador que usa dinámica de sistemas puede ser perfectamente consciente de que las relaciones entre las variables observables son fruto de las interacciones no-lineales entre los componentes básicos del sistema, pero no lo reproduce explícitamente en su modelo; el modelador (y quizá previamente el experto) se abstrae de estas interacciones (Caselles, 2008).

La figura 4.11 presenta la dinámica de compostaje bajo dos supuestos (Sayed *et al.*, 2014), si el calor se produce más rápido de lo que se enfría, las temperaturas dentro de la pila subirán, lo que dará lugar a un aumento de la actividad (a), en cambio, si el exceso de aire ocasiona que la temperatura y el contenido de humedad disminuyan, se reducirá la tasa metabólica de los microbios y la tasa de compostaje, produciendo menores cantidades de calor y reduciendo la temperatura (b).

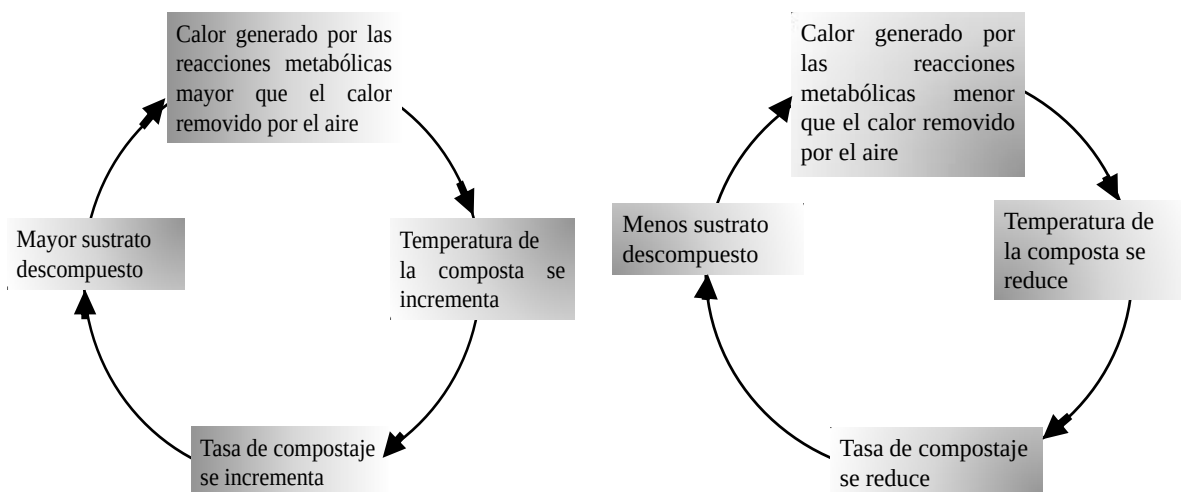


Figura 4.11 Dinámicas de una pila de composta. Fuente: Adaptado de El-Sayed *et al.*, 2014.

Los sistemas basados en agentes (SBA) emplean el concepto agente como principal nivel de abstracción y son probablemente el área de la tecnología de la información con mayor desarrollo. A pesar de esto, aún no existe un acuerdo sobre qué es exactamente un agente. Ferber (1999) menciona que “Un agente es un hardware o software que puede actuar sobre sí mismo o sobre su ambiente. Es una representación parcial de su ambiente y puede comunicarse con otros agentes. Por otro lado, tiene objetivos individuales y su comportamiento es el resultado de las observaciones, conocimiento, habilidades e interrelaciones que él puede tener con otros agentes o con su ambiente”.

Weiss (1999) define un agente como “Un sistema computacional que está situado en un ambiente y que es capaz de tomar acciones autónomas con el fin de cumplir sus objetivos de diseño”. Combinando las anteriores definiciones, un agente es un sistema informático situado en un entorno (ambiente) que percibe mediante sensores, capaz de realizar acciones autónomas dentro de ese entorno por medio de efectores para alcanzar sus objetivos. En la figura 4.12, se presentan los elementos que integran un agente

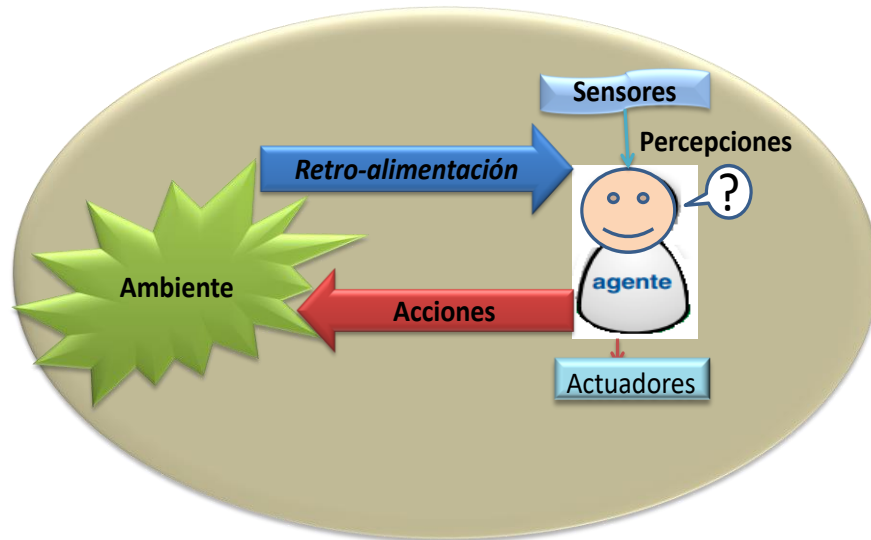


Figura 4.12 Elementos de un sistema basado en agentes. Fuente: Adaptado de Wooldridge, 2009.

- Otros tipos de sistemas

Un sistema reactivo es aquel que interactúa constantemente con su medio ambiente, tiene la característica de ser conducido por eventos (Event Driven), la respuesta de tiempo es crítica y una vez que el sistema se activa permanece en ese estado de manera indefinida. En estos sistemas los eventos llegan en tiempos impredecibles y el sistema debe tener la capacidad de responder de manera inmediata, en el orden de los milisegundos o microsegundos, sobre todo en sistemas donde la seguridad es crítica.

La gran mayoría de los sistemas embebidos (emplean microcontroladores o microprocesadores) corresponden a esta categoría, debido a que estos sistemas están típicamente conectados a varios tipos de sensores y transductores de entrada encargados de captar los estímulos del medio ambiente (temperatura, presión, luz, magnetismo, fuerza, peso, etc.), procesar dicha información y generar una respuesta del sistema hacia el medio ambiente a través de transductores de salida y actuadores.

Los sistemas cibernéticos, constan de dispositivos internos de autorregulación que reacciona ante información de cambios en el ambiente, elaborando respuestas variables que contribuyen al cumplimiento de los fines instalados en el sistema (retroalimentación). Todo sistema cibernético puede descomponerse en subsistema rector y subsistema regido, como resultado de aplicar el criterio jerárquico para su división. El subsistema rector ejerce la dirección sobre el subsistema regido y mediante el control y la regulación garantiza que la parte regida se comporte de acuerdo con lo establecido en el plan. El método de caja negra es usualmente empleado para este tipo de sistemas, el cual se usa cuando no interesa conocer la estructura y organización interna del sistema u objeto que se estudia, ni el contenido de los procesos que en el mismo tienen lugar. Los sistemas cibernéticos son organizados, dinámicos, probabilistas, autorregulados y abiertos (Figura 4.13)

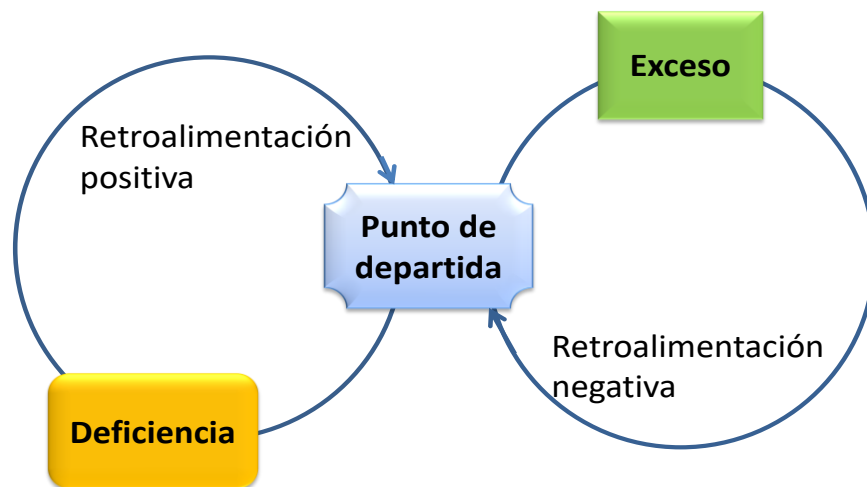


Figura 4.33 Esquema de un sistema cibernético.

Los sistemas biológicos son vistos como un tipo particular de los sistemas físicos generales, con la característica de presentar gran complejidad en distintos niveles: organización, evolución, auto referencia e información. Por tal razón, los sistemas biológicos están sujetos a las leyes generales de la Física y por ende su comportamiento se ve interpretado mediante el uso de dichas

leyes teniendo en cuenta las condiciones particulares que conforman el comportamiento de los seres vivos.

La elaboración de modelos que reflejen dinámicas esperadas resulta un paso esencial para la comprensión de cualquier sistema. Disponer de un volumen significativo de datos experimentales, no significa que se tiene conocimiento sobre el sistema, sino únicamente gran cantidad de información. Solo el análisis y síntesis de dicha información permitirán confirmar o rechazar hipótesis en búsqueda de una representación que capture la esencia de su comportamiento y por lo tanto, conduzcan a la adquisición de conocimiento (García, 2006).

4.2 Modelado

El proceso de modelización de un sistema se considera “multifacético” o “perspectivista” (Caselles, 2008), porque el modelo que se construye de un sistema real obedece principalmente al objetivo del diseñador y al grado de detalle que se alcance en la descripción, el cual comienza por identificar sus elementos y las relaciones que existen entre estos. Una primera aproximación puede ser un modelo de tipo “caja negra ó “entrada-salida” donde solo se especifican las entradas y las salidas (datos y resultados). Conforme se va incrementando el detalle en la descripción, se va transformando esa caja negra en caja transparente o blanca. Obviamente, dado la infinita complejidad de los fenómenos fisicoquímicos, estas construcciones abstractas son sólo meras aproximaciones de la realidad. La figura 4.14 presenta un ejemplo de modelo de caja negra del sistema de compostaje.

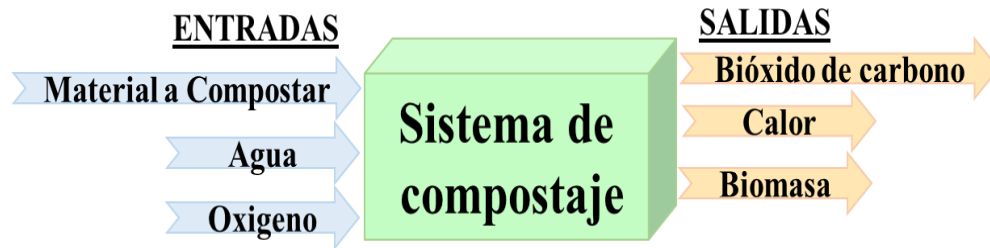


Figura 4. 4 Modelo de caja negra.

4.2.1 Definición de un modelo

Un modelo es una representación de un objeto, sistema, o idea (Shannon, 1988) que se construye mediante un proceso de abstracción con el objetivo de facilitar la comprensión de ciertos aspectos de un determinado sistema real (Izquierdo *et al.*, 2008). El proceso de abstracción inicia con la observación del sistema bajo estudio (incluye el levantamiento de datos) y termina con el diseño del modelo.

Los modelos comprenden estructura y comportamiento; con el paso del tiempo la estructura cambia y ese cambio es el comportamiento, por lo tanto el modelo consiste en crear una abstracción tanto de la estructura como del comportamiento mediante algún tipo de especificación que puede ser textual, visual o verbal. Cuando se estudia un sistema real, lo primero que se identifica son los elementos que lo constituyen y las interrelaciones que estos exhiben. Cuando se describe un sistema lo que se hace es presentar un modelo conceptual del mismo, es decir, hacer visibles tanto a sus elementos como a sus relaciones (Maldonado y Gómez Cruz, 2010).

Durante su construcción se deben considerar en el estudio todos los detalles que interesan para que realmente represente al sistema real (modelo válido). Por razones de simplicidad, deben eliminarse aquellos detalles que no interesan y que lo complicarían innecesariamente. De este

modo, parte de la complejidad del sistema real se pierde de forma intencionada durante la creación del modelo.

En la figura 4.15 se muestra el modelo general del proceso de compostaje, el cual consiste en la oxidación de la materia orgánica en presencia de microorganismos (bacterias, hongos, actinomicetos), obteniendo CO_2 y H_2O , además de energía calórica y composta.



Figura 4.15 Proceso básico de generación de composta. Fuente: Adaptado de Castells, 2012.

4.2.2 Tipos de modelos

Al describir un sistema son muchas las representaciones que se pueden hacer de él, que van a depender de las fases que se quieren estudiar, de las herramientas que se van a utilizar e incluso del perfil del personal que lo construye (Figura 4.16). La clasificación de los modelos, puede ser abstracta, física o simplemente verbal. Los modelos abstractos se componen de conceptos, planes, hipótesis e ideas. Aquí, los símbolos representan atributos y objetos, que muchas veces sólo existen en el pensamiento de las personas.



Figura 4.16 Clasificación de los modelos.

La figura 4.17 presenta como ejemplo, un modelo abstracto de un balance de calor en una pila de composta (El-Sayed et al., 2014). Los componentes del balance energético incluyen: calor acumulado (generación de calor y radiación solar) y calor perdido (radiación, evaporación, convección y conducción) a diferentes temperaturas ambiente.

Con respecto a los modelos físicos, estos pueden ser estáticos (maquetes) o dinámicos como los simuladores para entrenamiento. Como ejemplo de este tipo de modelos, encontramos las pilas de composta de aireación activa y pasiva a diferentes escalas (Figuras 1.7 y 1.8) y los reactores agitados (Figura 1.11). Los modelos verbales son descripciones tradicionales donde los elementos, conceptos y las relaciones son conexiones lógicas como los diagramas. En ocasiones, el sistema físico (hardware) opera en consonancia con el sistema abstracto (software).

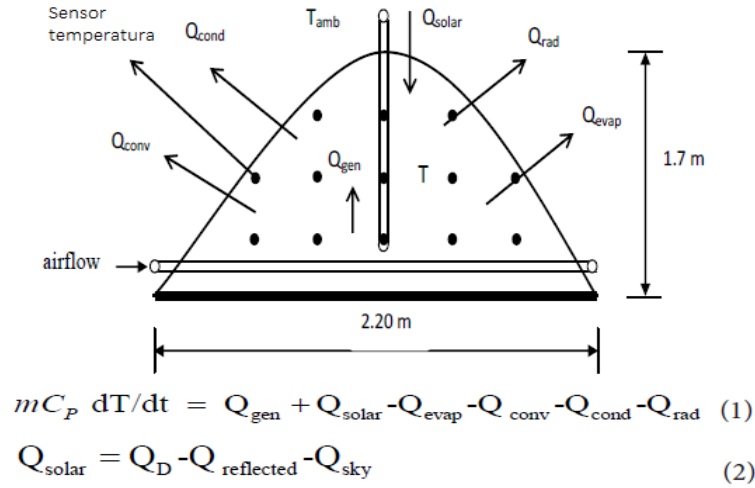


Figura 4.5 Balance de calor en una pila de composta. Fuente: El-Sayed et al., 2014.

En (Mohee, White y Das, 1998) se presenta un modelo conceptual de una versión simplificada del proceso de compostaje, basado en los principios de transferencia de calor y masa, como de cinética de procesos biológicos. En el modelo se muestra una matriz de sustrato uniforme con suministro continuo de aire. El sustrato está sometido a oxidación biológica que requiere oxígeno y en la que se liberan energía térmica y dióxido de carbono (Figura 4.18).

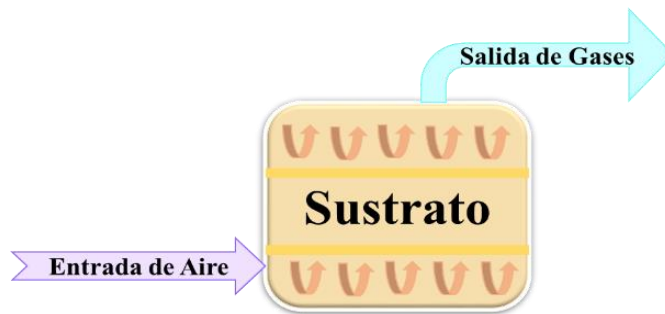


Figura 4.6 Diagrama esquemático de un reactor. Fuente: Adaptado de Mohee et al., 1998.

Cuando se quiere representar un sistema cuyo estado varía en el tiempo, se emplean modelos dinámicos (Figuras 1.2 y 1.3), en cambio si su estado es invariable a través del tiempo, se recomienda el uso de modelos estáticos. Ahora bien, si lo que interesa cuantificar son los cambios

en los estados del sistema, los modelos continuos permiten representar sistemas cuyos cambios de estado son graduales mediante el empleo de variables continuas. En cambio los modelos discretos, representan cambios de estado de a saltos, emplean variables discontinuas.

La figura 4.19 presenta la dinámica de la temperatura en dos pilas de composta, durante intervalos de 24 horas (datos discretos); al considerar los rangos de temperatura es posible definir las fases de degradación de la pila de composta.

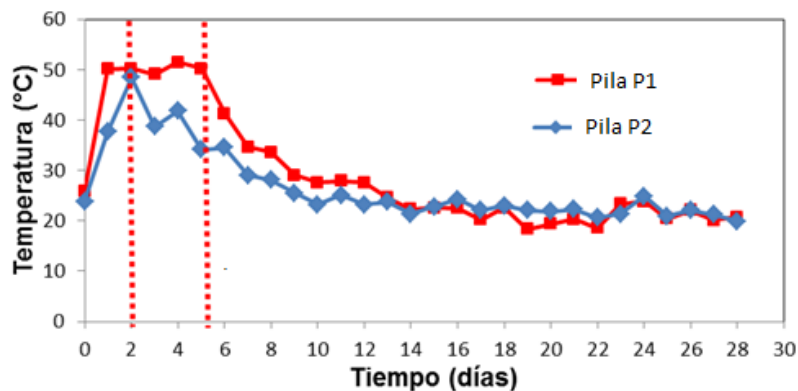


Figura 4.19 Comparativo de temperatura de dos pilas de composta.

Otra forma de obtener un modelo es considerando la salida del sistema. Cuando la solución para determinadas condiciones es única y siempre la misma, se habla de un modelo determinístico. Si la salida depende de una serie de hechos al azar, no repetitivos y cuyas acciones pueden ocurrir en cualquier instante, se hace referencia a modelos estocásticos. Los modelos estocásticos producen mucha más información que los deterministas. Cuando se estudia un sistema a través de una serie de fórmulas matemáticas (resolución de ecuaciones), se trata de modelos analíticos. Sí solo se tiene el comportamiento numérico de las variables intervinientes, se dice que son modelos numéricos (Bialobrzewski et al., 2015; Khater, Bahnasawy y Ali., 2014; Luangwilai, Sidhu, Nelson y Chen, 2011).

Un modelo experimental requiere una gran cantidad de datos para poder calibrarlo o ajustarlo correctamente, y su rango de validez está limitado a ese conjunto de datos. En contraposición, un modelo teórico requiere una cantidad menor de datos y puede ser utilizado fuera del rango de los mismos ya que el rango de validez del modelo está dado por la teoría utilizada y no por los datos. Cuando lo que se quiere representar son las reacciones del sistema a las influencias externas, teniendo en cuenta elementos como la retroalimentación y el control, se usa un modelo de comportamiento. Si únicamente se presentan aspectos relacionados a la posición relativa o dependencia causal se trata de un modelo de estructura.

4.2.3 Modelado basado en agentes

El modelado basado en agentes es una herramienta que está siendo utilizada en el estudio de sistemas complejos, para la resolución de este tipo de sistemas cuando no pueden resolverse de manera satisfactoria mediante técnicas clásicas. Estos modelos pueden simular y analizar el comportamiento que muestra el sistema en distintos escenarios y configuraciones, permitiendo la construcción del sistema bajo estudio mediante un proceso ascendente, a partir del comportamiento a nivel micro de los componentes del sistema y sus relaciones (Pavón, López-Paredes y Galán, 2012).

Las técnicas orientadas a agentes proporcionan un nuevo enfoque hacia el desarrollo de software; son una extensión natural de las técnicas orientadas a objetos. El análisis, diseño e implementación se realizan de manera sencilla y natural, a un nivel de abstracción más adecuado al problema a resolver. Su objetivo es manejar todas las fases con un solo concepto uniforme: el de los agentes. Durante la fase de análisis, las entidades actuantes del dominio del problema se identifican y modelan como agentes, los cuales en conjunto con sus acciones (o comportamiento) se refinan y se especifican en la fase de diseño. Finalmente, en la fase de implementación, los

agentes se programan con la ayuda de un lenguaje de programación orientado a agentes (por ejemplo: Netlogo, JACK, JASON, entre otros) o utilizando un entorno de desarrollo multi-agente, como por ejemplo: Jade (Kornhauser, Rand y Wilensky, 2007).

Las diferencias entre objetos y agentes radica en que estos últimos actúan de forma proactiva, constituyen una especie de objetos mejorados, los cuales son capaces de establecer con otros agentes, relaciones que no estaban previstas en el diseño. Además, son capaces de adaptar al entorno a todas las correspondencias de carácter relacional, mientras que los objetos son pasivos y no conllevan de forma inherente a la activación de ningún tipo de comportamiento, sino que se limitan a intercambiar datos y comandos (Gracia y Cenjor, 2007). Como resultado de estas diferencias conceptuales, los sistemas orientados a agentes deben analizarse, diseñarse e implementarse de manera diferente (França, Moreira, Labidi y Paiva,, 2008).

4.2.4 Subtipos del modelo orientado a Agentes

De acuerdo a los resultados de un análisis orientado a agentes se pueden dividir en tres submodelos: el modelo de agentes, el modelo de organización y el modelo de cooperación (Figura 4.20). El modelo de agentes consiste de una estructura interna, descrita en términos de nociones mentales tales como metas, planes y creencias o cualquier estructura que se considere apropiada para una arquitectura de agente. El modelo de organización especifica las relaciones de herencia (entre agentes y tipos de agentes y, éstos últimos se dividen en subtipos o super-tipos) además de las relaciones basadas en roles de las organizaciones. Estas organizaciones pueden servir como medios para estructurar un sistema complejo en subsistemas o pueden usarse para modelar organizaciones reales. Finalmente el modelo de cooperación describe la interacción específica entre los agentes y su dinámica.

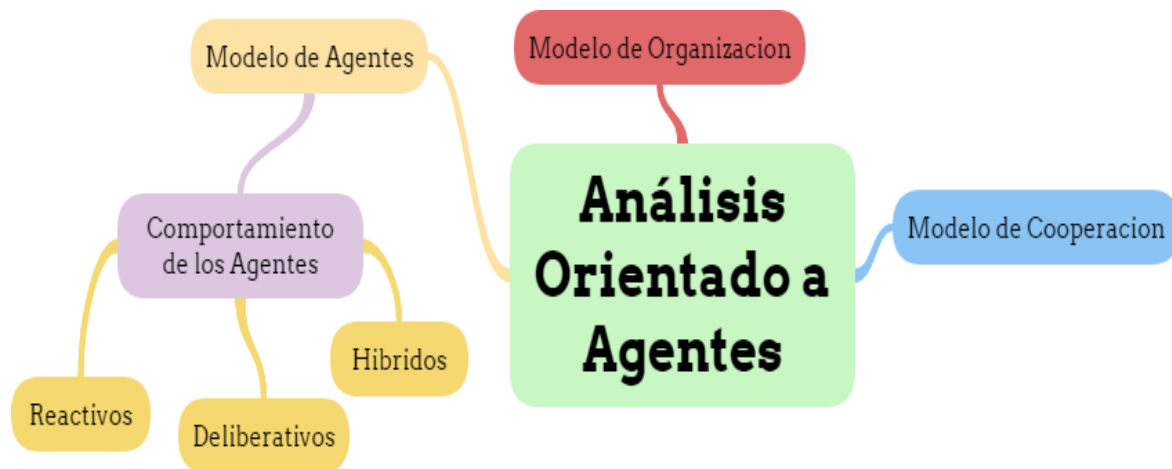


Figura 4.20 Clasificación de los modelos orientados a Agentes. Fuente: Adaptado de Wooldridge, 2009.

El modelo de agentes contiene a los agentes y su estructura interna. Se construye siguiendo los siguientes pasos (Gilbert, 2007):

- Identificar los agentes y su entorno. En un paso intuitivo, los agentes son las entidades vivas y "activas" del sistema, pueden cambiar sus propios estados y sus acciones pueden afectar su entorno, mientras que el entorno consiste en elementos pasivos cuyo estado sólo cambia por las acciones de los agentes.
- Definir las motivaciones (intereses, preferencias, responsabilidades, y objetivos a largo plazo) de cada agente. Éstas desempeñan un papel importante en la forma en que un agente toma sus decisiones y además caracterizan al agente. Su papel es especialmente importante cuando un agente tiene más de una forma de actuar en una situación dada.
- Definir el comportamiento de cada agente. Este se establece mediante planes, los cuales describen la secuencia de acciones que un agente puede llevar a cabo para cumplir ciertas motivaciones o reaccionar ante ciertos eventos. Por lo tanto, los planes se relacionan con la motivación específica, que puede especificarse en una notación gráfica similar a los diagramas de transición de estados.

- Definir el conocimiento y la creencia. Este paso consiste en integrar el conocimiento y las creencias que un agente utiliza para ejecutar sus planes.

En este sentido se han empleado algunas técnicas de ingeniería del conocimiento para modelar características cognitivas de los agentes, los métodos de KE (Knowledge Engineering, Ingeniería del conocimiento en español) proveen una base para el modelado de sistemas multi-agentes. Como ejemplo de este enfoque está MAS-CommonKADS (Iglesias, 2012; Macal y North, 2008).

4.2.5 Clasificación de los agentes

De acuerdo a la función del comportamiento de los agentes, se clasifican en:

a) Reactivos

Estos agentes reciben información del entorno mediante sensores y una vez que analizan la información recibida, actúan en consecuencia para garantizar la consecución de objetivos. Durante la ejecución de las acciones, el agente toma repetidas lecturas del sensor y las compara con las condiciones de ese instante para ejecutar las acciones pertinentes. El problema aparece, si más de una condición del estado del sistema coincide con la misma lectura del sensor.

Rodney Brooks identifica un modelo diferente por el cual la cognición se puede observar simplemente usando sistemas perceptivos y de acción que interactúan directamente entre sí en un bucle de retroalimentación a través del ambiente. Llamó a este modelo de control robótico de inspiración biológica la arquitectura de la subsunción. (Figura 4.21). Cada condición está asociada con una lista de acciones de menor ponderación a las cuales inhibe. Una de sus ventajas es que los agentes funcionan si se toma la acción correcta con base en la percepción del momento; su mayor desventaja, es que solo observan la situación actual y carecen de medios para iniciar cualquier otro tipo de comportamiento (Brooks, 1991; Corchado y Laza, 2003).

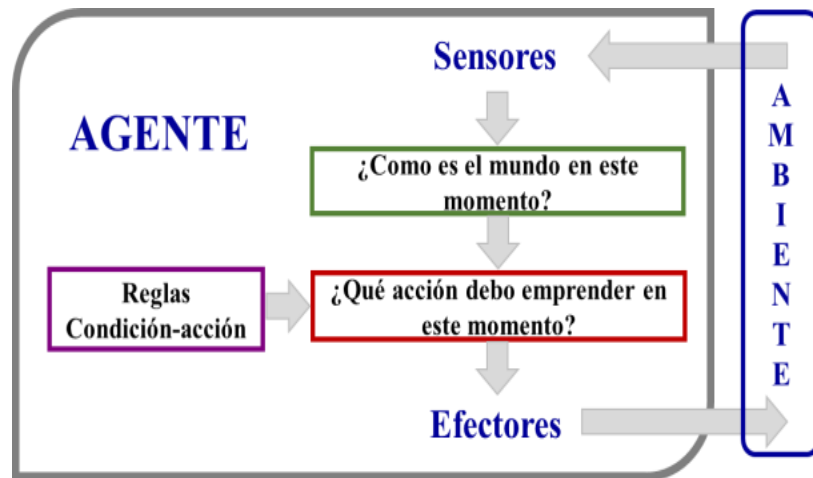


Figura 4.7 Esquema de una agente reactivo. Fuente: Norvig y Russell, 2004.

b) Deliberativos.

Son agentes que trabajan por medio de la deducción lógica y que presumen el estado del entorno mediante una base de datos de fórmulas de predicados lógicos. Por tanto, la toma de decisión se modela a través de un conjunto de reglas de deducción y una base de datos. El problema que conllevan estos agentes es que su toma de decisiones está basada en la suposición de que el entorno no cambia significativamente mientras los agentes deciden qué iniciativa tomar, por lo que no resulta muy apropiado para sistemas dinámicos, debido a estas restricciones temporales (Figura 4.22). Para solucionar este problema, se introdujo el concepto de agente deliberativo denominado de “Creencias, Deseos e Intenciones” (BDI: Beliefs-Desires Intentions) incluyendo un razonamiento ejecutivo (Wooldridge, 2009).

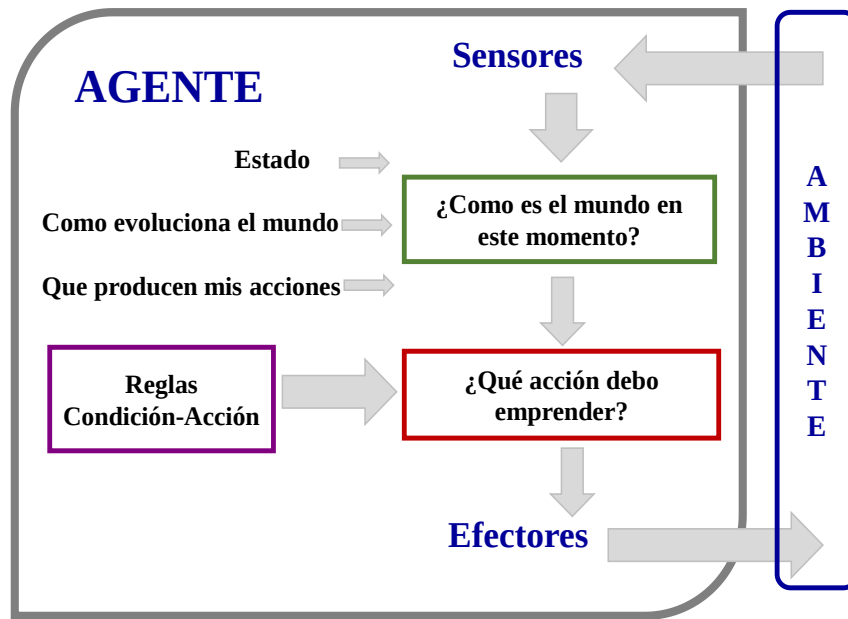


Figura 4.8 Esquema de un agente deliberativo. Fuente: Norvig y Russell, 2004.

c) *Híbridos.*

Son agentes cuyo comportamiento incluye mecanismos reactivos y deliberativos en su arquitectura. Un agente híbrido es autónomo, reactivo y proactivo, además de ser capaz de establecer comportamientos sociales. La única desventaja que presentan estas arquitecturas es que resulta muy difícil su diseño, así como implementar y coordinar las distintas categorías que debe considerar para provocar un comportamiento coherente. Estos agentes son un paradigma, ya que resulta verdaderamente complicado determinar hasta qué punto diseñar el carácter reactivo y a partir de cuál el proactivo (Figura 4.23).

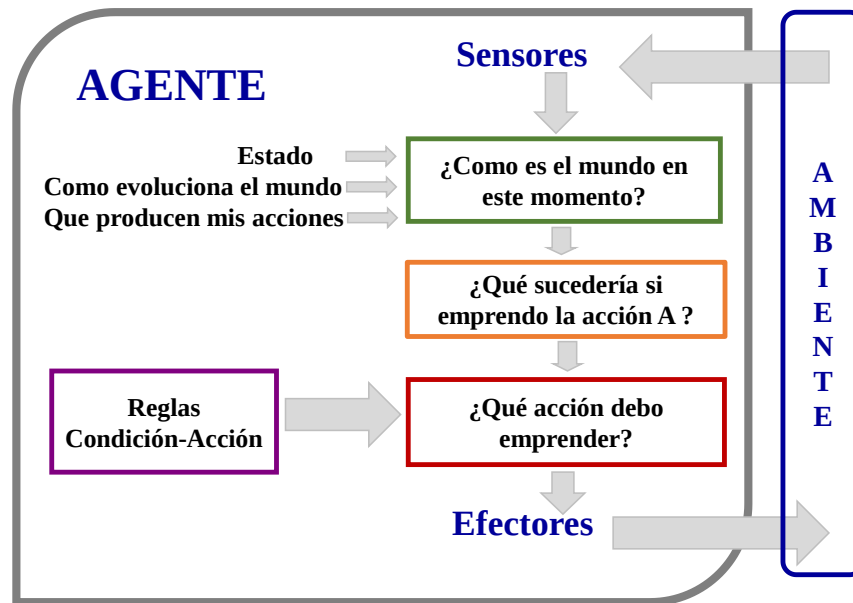


Figura 4.23 Esquema de un agente híbrido. Fuente: Norvig y Russell, 2004.

4.2.6 Sistemas Multiagentes

Un sistema multi-agente (en inglés Multi-Agent System [MAS]) puede ser definido como una red débilmente acoplada de agentes que, a pesar de que cada uno tiene objetivos propios, trabajan juntos para resolver algún problema que está fuera de su capacidad individual de resolución o su conocimiento. Los sistemas multi-agentes pueden estar compuestos por agentes de un solo tipo (sistema homogéneo) en el cual todos los agentes tienen las mismas características o bien por varios tipos de agente (sistema heterogéneo) en el cual cada tipo tendrá sus propias capacidades y limitaciones. En este tipo de sistemas pueden interactuar el uno con el otro indirectamente a través del entorno o directamente. Los agentes deciden cooperar para beneficio mutuo o competir para servir sus propios intereses (De la Hoz Manotas, 2010).

Los sistemas multiagente modelan las organizaciones ya que se basan en la idea de que la mayoría del trabajo en las organizaciones se hace sobre la base de la inteligencia, la

comunicación, la cooperación, la negociación y el procesamiento paralelo (Ortiz et al., 2006). Es una práctica común modelar a los agentes como recursos deterministas haciendo caso omiso de su variación, rendimiento y comportamiento proactivo.

Los modelos multiagente permiten tener en cuenta el comportamiento de cada agente, el cual es definido a través de los valores de sus atributos. Con ello se modela la variación del comportamiento individual y la proactividad de los agentes. Esta técnica de modelado es adecuada para sistemas relacionados a través de las interacciones entre sus entidades y que puedan dejar ver un comportamiento emergente complejo a nivel del sistema, incluso cuando los agentes involucrados tengan un comportamiento bastante simple (Garces, Moreno y Múnera, 2009; Gilbert, 2004).

Tanto la modelación basada en agentes como la dinámica de sistemas tienen el potencial de complementar modelos no formales (normalmente verbales) de sistemas complejos y modelos matemáticos más abstractos. Con frecuencia la representación verbal de sistemas complejos carece del rigor formal necesario para valorar su coherencia lógica y para generalizar a partir de ellos, mientras que los modelos matemáticos suelen ser menos realistas debido a las fuertes restricciones impuestas por las hipótesis simplificadoras que son necesarias para poder resolverlos. Usando técnicas de modelado computacional como la simulación basada en agentes y la dinámica de sistemas, se tiene el potencial de construir modelos que combinan la riqueza descriptiva de los modelos verbales con el rigor formal de los modelos matemáticos más abstractos (Dignum y Pavón, 2012).

Por otra parte, según el objetivo que persiguen los modelos pueden clasificarse en:

- Modelos predictivos, si pretenden informar del comportamiento de sus parámetros o variables en un futuro.

- Modelos evaluativos, si intentan medir las diferentes alternativas para poder comparar los resultados de ellas.
- Modelos de optimización, si tratan de identificar un óptimo (máximo o mínimo) del problema, es decir, la mejor de las alternativas posibles.
- Modelos explicativos, si se interesan en comprobar cómo se conectan las variables para buscar algún tipo de explicación del fenómeno que estudian, y para de ese modo contrastar o demostrar nuestras hipótesis.

Entre las características deseables que un modelo debe tener destacan: la *facilidad* en su comprensión, manipulación y control por parte del usuario. Deberá estar *dirigido a metas u objetivos*, poseer cierta sensatez, con el fin de reducir o eliminar la generación de respuestas absurdas. Ser *Adaptable*, con un sencillo procedimiento para modificar o actualizar el modelo, además de *evolutivo*, ya que deberá ser simple al principio y volverse más complejo en el tiempo.

En el caso de modelos de sistemas complejos, la predicción es prácticamente imposible, en gran parte debido a su imprevisibilidad. Por lo tanto, los modelos explicativos son asequibles para su comprensión.

4.2.7 Fases de la modelación

Cabe precisar que no todas las metodologías de modelación o tipos de modelos son aplicables a todos los problemas o proyectos, pero cada modelo que sea ha desarrollado, implementado y verificado, puede proporcionar una idea de cómo el sistema bajo estudio trabaja o se comporta. De forma genérica las técnicas de modelación incluyen: la formulación del problema, conceptualización del modelo, diseño y codificación, inferencia, verificación, validación, análisis e interpretación. A continuación se describe cada una de estas etapas.

a) Formulación del problema.

Se debe tener claro qué problema se va a modelar y cuál es su propósito. Si el modelo no está bien definido o no están claramente identificadas las entidades principales del sistema y sus atributos característicos, el modelo difícilmente alcanzará el objetivo para el que fue diseñado. Si la formulación la realiza el analista, es importante que el experto o el usuario la entiendan y estén de acuerdo con el planteamiento. Es aconsejable el uso de herramientas que faciliten el proceso, como lluvia de ideas y mapas conceptuales, para visualizar las nociones generadas en un proceso de intercambio de ideas.

b) Conceptualización.

En esta fase se determinan los elementos y procesos que actúan sobre el sistema y los factores que influyen sobre estos. De este modo un modelo conceptual constituye una teoría acerca del funcionamiento del sistema. Si los resultados del modelo que se construye partiendo de esta teoría no se ajustan a la realidad, se debe concluir que tanto la teoría de partida como el modelo conceptual, no eran los correctos y deben revisarse. Durante la conceptualización no basta con tener en cuenta aspectos puramente científicos sino que también habrá que tener en cuenta los objetivos del modelo y las limitaciones técnicas con las que se debe trabajar. En el desarrollo de esta etapa se requiere conocimiento del sistema y de herramientas de construcción de modelos, como diagramas de flujo de datos y diccionario de datos (Ruiz, 2009; Menéndez y Collado, 2007).

c) Diseño y codificación.

Consiste en representar el modelo formal ajustándose a las especificaciones del experto. Si el modelador no es el mismo experto, esta labor la realizará en estrecha comunicación con él. Aquí se define cual es el lenguaje que se va a utilizar algunos de estos pueden ser de propósito general, lenguajes de simulación, simuladores.

d) Inferencia.

Reside en la aplicación de procesos deductivos para averiguar el conjunto de proposiciones que se derivan lógicamente de los axiomas y reglas del modelo. Se establecen las variables que se identificaron durante el diseño y codificación del sistema.

e) Verificación.

Es un proceso continuo, cuyo objetivo es comprobar que el modelo desarrollado cumple con los requisitos de diseño auto-impuestos por el modelador. Mediante la verificación se busca transformar una formulación del problema a una especificación de modelo o convertir una representación del modelo de un diagrama de flujo a un programa de software ejecutable. El aseguramiento de la calidad incluye la medición y valoración de una variedad de características tales como exactitud, eficiencia en la ejecución, mantenimiento, portabilidad, reusabilidad y usabilidad (Sargent, 2005).

f) Validación.

Tiene por objetivo evaluar el error cometido por el modelo y determinar si es asumible. Hace referencia explícita al sistema real que se está modelando, consiste en valorar su utilidad dentro del contexto de aplicación, de acuerdo con los criterios para los cuales el modelo fue diseñado (Moss, 2008). Existen diferentes técnicas de validación, entre las que se encuentran :

- Estructuración modular. En esta técnica se identifican los subsistemas independientes, se modelan y verifican por separado. Estos modelos pueden utilizarse posteriormente en otros modelos. Como ejemplo, se tiene el proceso de degradación del material a compostar, este se compone de dos submodelos, el modelo de degradación de los residuos sólidos y de los biosólidos.

- Incremento en el detalle del modelo. Con esta técnica se recomienda partir de modelos sencillos e incrementar la complejidad a medida que se comprueba que el modelo está bien programado en cada caso.
- Participación de personas ajenas al desarrollo del modelo. De esta manera se puede agilizar la detección de errores, el intercambio de impresiones acerca de la forma de construcción del modelo desde una perspectiva más eficaz y eficiente.

g) Análisis.

Se realiza el análisis de los resultados utilizando técnicas estadísticas, teoría de procesos estocásticos, aproximaciones de campo medio y visualizaciones de datos.

h) Interpretación.

Consiste en asignar significado a los resultados previamente analizados con el modelo formal, además de aplicar sobre el sistema real el conocimiento adquirido sobre la abstracción.

4.3 Simulación

La simulación es el proceso por el cual se puede observar el comportamiento del modelo de un sistema de estudio a lo largo del tiempo. Permite experimentar con él, “ejecutándolo” bajo ciertas circunstancias de interés, observar qué es lo que pasa y probar teorías acerca de éste. La simulación empieza en un estado inicial dado y continúa con la repetición de la dinámica prescrita por el modelo a través de su trayectoria en el tiempo (Banks, 2001; Menéndez y Collado 2007).

4.3.1 Definición de simulación.

Cuando se simula, lo que se desea es asegurar que la investigación pueda producir buenos resultados. De acuerdo a Shannon (1998), la simulación se define como: “*El proceso de diseñar*

un modelo de un sistema real junto con la realización de experimentos con este modelo con el fin de mejorar la comprensión del comportamiento del sistema y/o de la evaluación de diferentes estrategias de funcionamiento”.

Uno de sus principales objetivos de la simulación es realizar ensayos de cambios en el sistema probándolos en el modelo, con el fin de elegir la mejor alternativa y así enfrentar mejor a una realidad que cambia día a día. La simulación puede emplearse cuando se necesite el estudio y la experimentación con las interacciones internas de un sistema o subsistema complejo. Cuando se requiera observar el efecto de alteraciones en el modelo debido a cambios ambientales, en la información u organización (Zeigler, Kim y Praehofer, 2000). También puede emplearse como dispositivo pedagógico para reforzar metodologías de soluciones analíticas, entre otros.

La simulación cuenta con entradas proporcionadas por el investigador, son los atributos necesarios para que el modelo coincida con el objeto de estudio, son todos aquellos datos sobre los cuales el decisor no tiene control. Los parámetros son aquellos datos de entrada sobre los cuales el decisor tiene control. Las salidas se generan mientras el proceso de simulación se ejecuta y son las que permiten observar el comportamiento del modelo a través de una función que avanza en el tiempo, es decir su dinámica es decir su dinámica(Railsback, Lytinen y Jackson, 2006) (Figura 4.24).



Figura 4.9 Elementos que integran a la simulación.

Entre los conceptos subyacentes con respecto a la simulación se encuentran: el sistema real, el modelo del sistema, las variables de estado del sistema, entidades y sus atributos, el listado de procesos, y las actividades que ejecuta cada entidad. El *modelo* se considera como una representación del sistema real, las *variables de estado* son la colección de toda la información necesaria para definir qué sucede dentro del sistema en un determinado momento. Asimismo, una *entidad* representa un objeto que requiere una definición explícita, puede ser dinámica o estática; está a su vez tiene características que le describen y puede tener atributos que solo le pertenezcan a ella. Las *actividades* se consideran como un periodo de tiempo cuya duración se conoce por anticipado. Con la expresión *estado del sistema* se indica una colección de variables que contienen toda la información para la descripción de todas las entidades, atributos y actividades de acuerdo con su existencia en algún punto del tiempo. Estas variables de estado determinan la *efectividad del sistema*. Un *evento* es un hecho que ocurre instantáneamente y que cambia el estado del sistema. Ciertas actividades del sistema también pueden producir cambios que no reaccionan en el mismo. Los cambios que ocurren fuera del sistema suceden en el *medio ambiente del sistema*. En general, el medio ambiente del sistema queda delimitado por el objetivo del análisis del sistema. Se utiliza el término *endógeno* para describir las actividades que ocurren dentro del sistema (variables internas) y el término *exógeno* para actividades en el medio ambiente (variables externas) que afectan al sistema.

Además del modelo simbólico, se debe considerar un *evaluador* representado por una serie de instrucciones que procesarán el modelo para obtener los resultados de la simulación. Puede contener rutinas para la resolución de sistemas de ecuaciones, generadores de números aleatorios, rutinas estadísticas. Una *interfaz*, es la parte dedicada a interactuar con el usuario, recibe las acciones del mismo y presenta los resultados de la simulación en una forma adecuada. A

continuación se presenta la representación del sistema de compostaje y sus componentes en un modelo de simulación del mismo (Tabla 4.3).

Tabla 4. 3 Componentes del sistema de simulación de compostaje.

Componente	Descripción
Sistema	Sistema de Compostaje Abierto
Entidades	Pila con volteo
Atributos	Densidad, Peso, Volumen, Contenido de humedad Características químicas (pH, DQO, relación C/N) Características biológicas (Características físicas (Color, Olor,) pH , Temperatura, Color, Olor, Relación C/N,
Actividades	Preparar material, Airear pila Hacer análisis (variables físico químicas y biológicas), Humidificar pila, Medir / Registrar (pH, Temperatura,DQO, ST)
Eventos	Temperatura < temperatura mínima, temperatura > temperatura máxima Humedad < Humedad mínima, Humedad > Humedad máxima pH < pH mínima, pH > pH máxima Agotamiento de sustrato
Variables de estado	Cantidad de sustrato, pH, Temperatura, Humedad, Relación C/N

4.3.2 Simulación por computadora

De acuerdo a la naturaleza del modelo empleado, la simulación se supone por *identidad*, si el modelo es una réplica exacta del sistema en estudio. Por *cuasi-identidad*, si se utiliza una versión ligeramente simplificada del sistema real y de laboratorio, si se utilizan modelos bajo las condiciones controladas del laboratorio. De éstas se pueden distinguir dos tipos de simulaciones: cuando las personas compiten entre ellas y forman parte del sistema, se llama juego operacional. La otra parte está formada por la computadora o maquinaria; en este tipo de simulación se estudia la relación entre ambas y las personas forman parte del modelo. La computadora no se limita a

recolectar información, sino que también la genera, se le conoce como simulación Hombre-Máquina.

La simulación por computadora es la disciplina encargada de la construcción de modelos computacionales y su posterior ejecución y del análisis de los resultados. Es una técnica usada para reducir el riesgo asociado al crear un nuevo sistema o al hacer cambios en sistemas existentes. La simulación es especialmente adecuada en sistemas altamente complejos (donde no son válidos los modelos exactos), de carácter dinámico y con fenómenos de carácter estocástico (Rodríguez y Roggero, 2014). Este tipo de simulación se puede clasificar en digital, analógica dependiendo del tipo de computadora que utilice. Existen cuatro enfoques que son equivalentes y deben proporcionar los mismos resultados al realizar una simulación (Ruiz, 2009).

a) Método orientado a eventos.

Considera los diferentes eventos (aquello que puede cambiar el estado del sistema) y cómo afectan al sistema. Bajo dicho esquema tanto los tiempos de llegada como los tiempos de servicio distribuidos estadísticamente se producen aleatoriamente. Se emplea un sistema de colocación de cola de los eventos que esperan por el servicio y finalmente se eliminan dichos eventos para ser servidos. Los elementos que conforman este tipo de simulación son:

- Un reloj de simulación que controla el tiempo simulado.
- Una lista de eventos que almacena la lista de los siguientes eventos.
- La rutina de inicialización que prepara el sistema para la simulación.
- La rutina de eventos que se encarga de actualizar el estado del sistema y la generación de eventos futuros.
- La rutina de temporizador que avanza el reloj hasta el instante del evento.
- Las rutinas de variables aleatorias, encargadas de distribuciones de probabilidad.

- El estado del sistema que se refiere a los datos almacenados, para identificar el estado actual del sistema.
- Finalmente, el almacenamiento de estadísticas que registran los datos de ejecución de la simulación.

b) Método orientado a procesos.

Considera una entidad y la secuencia de eventos que se producen en el sistema, por lo que un proceso es una secuencia de eventos ordenada temporalmente. En lugar de modelar el cambio del estado del sistema se describe el progreso de un trabajo a través del sistema. Como los trabajos llegan en momentos diferentes, el comportamiento del sistema se describe por una serie de procesos, algunos de los cuales pueden traslaparse. Para resolver este tipo de conflictos entre los procesos, se emplean preposiciones de espera y retraso, tanto en los contextos condicionales e incondicionales. De esta manera, las proposiciones incondicionales se relacionan al enfoque de programación temporal de eventos mientras que las proposiciones condicionales corresponden en su mayoría a la comprobación lógica del enfoque del examen de la actividad (Moreno, 2009).

c) Método orientado a actividades.

Considera a las actividades como una serie de operaciones que transforman el estado de una entidad, que pueden empezar o terminar en cada avance de reloj, y de las cuales se tiene el conocimiento por anticipado sobre su duración. El rastreo de las actividades genera un programa de simulación compuesto de módulos independientes esperando a ser ejecutados. El rastreo se realiza en lapsos de tiempo fijos en los cuales se verifica si un evento ha sucedido o no. Si un evento aparece, el estado del sistema se actualiza. Por lo tanto siempre que avanza el tiempo hasta el siguiente evento de la cola de eventos, se examinan todas las actividades para determinar

cuál puede iniciar o terminar en ese momento. Este enfoque también es conocido como aproximación de dos fases.

d) Método de tres fases.

El sistema es examinado para determinar todos los eventos que tienen lugar en un instante de tiempo, y solo cuando todos los recursos están por liberarse, es posible su reasignación en nuevas actividades que inician en la tercera fase de la simulación. La primera fase se refiere al avance del tiempo, que sólo se realiza cuando se presenta un cambio en el estado del sistema o hasta que algo suceda. La segunda es la liberación de recursos programados para terminar sus actividades en ese instante y la tercera es la inicialización de actividades dado el estado general de disponibilidad de los recursos.

En la actualidad, la mayoría de las propuestas de simulación están orientadas a eventos de procesos.

e) Simulación visual interactiva

La simulación visual interactiva, facilita la creación gráfica de modelos de simulación al mostrar por pantalla dinámicamente el sistema simulado, así como la interacción entre el usuario y el programa en ejecución. La interacción implica que bien se detiene la simulación y solicita información al usuario, o bien que éste puede detener la simulación e interaccionar con el programa; esto último se puede realizar "off-line" o "on-line", es decir sin interrumpir la simulación, e introduciendo las variaciones oportunas tanto en los modelos, como en los valores de las variables en el siguiente ciclo del proceso de ejecución del programa en la computadora, para esto se debe tener una estructura multitarea que permita este tipo de operaciones.

f) Simulación con agentes

Finalmente, la simulación con agentes constituye un sistema de modelado que permite trabajar con agentes que actúan como entidades autónomas, que gestionan sus acciones con respeto a un

conjunto de atributos y de reglas que les son asignadas. Estos modelos se componen de tres elementos principales: los agentes, el entorno y las reglas: los agentes, son las entidades de las sociedades artificiales, el entorno es el medio sobre el cual los agentes interactúan, las reglas son las pautas de comportamiento de los agentes y del entorno que pueden ser agente-entorno, entorno-entorno y/o agente-agente. De acuerdo con García-Valdecasas (2010), una de las ventajas de la simulación basada en agentes es que a partir de una estructura individual es posible identificar las acciones, creencias, deseos y oportunidades, para transformarlas en un esquema social que representa el nivel macro y micro de la realidad de un sistema, la cual es vista como el resultado emergente de las interacciones entre los agentes o las partes que los constituyen.

4.3.3 Modelos de simulación con respecto al tiempo.

Los modelos de simulación de sistemas pueden ser clasificados con respecto al tiempo en diversas formas (Raczynski, 2012). Si lo que se busca es una representación de un sistema en un instante de tiempo determinado, se trata de un modelo de simulación estática (simulación de Monte Carlo). Si se trata de representar la evolución del sistema en el tiempo, es un modelo de simulación dinámica. Si la simulación no posee variables aleatorias es determinista. Por el contrario si tiene una o más variables aleatorias es un modelo de simulación estocástica.

En el caso de un sistema dinámico es fundamental el paso de tiempo, que se concibe como aquel que opera de forma independiente, donde todos los cambios dinámicos se ordenan siguiendo dicho flujo de tiempo.

La base temporal se define como una estructura: tiempo = $\{T, <\}$ Dónde: T es un conjunto y $<$ es una relación de ordenación de elementos transitiva, irreflexiva y antisimétrica. La relación de ordenación permite utilizar los términos tales como pasado, futuro y presente. Si t , es interpretada para funcionar como tiempo presente, entonces el conjunto de T ($t = \tau \mid \tau \in T, \tau < t$) denota el

pasado y el conjunto T ($t = \tau \mid \tau \in T, t < \tau$ denota el futuro. El pasado y el futuro son disjuntos, tal como es requerido en un mundo donde cada momento cuenta y no puede ser recapturado en el futuro una vez que ha pasado. Para el intervalo $\langle t_1, t_2 \rangle$; t_1 es denominado el tiempo inicial y t_2 es el tiempo final. La base de tiempo puede contener un elemento mínimo t_0 el cual sería el límite inferior, por lo tanto todos los elementos $t \in T$ son mayores que t_0 . Si no existiera un límite inferior, entonces $-\infty$ denota un límite inferior ficticio. Si una base de tiempo no tiene un límite superior, el límite superior ficticio es denotado por ∞ . Obsérvese, que $-\infty$ y ∞ no se incluyen en la base de tiempo. El símbolo de infinito satisface $\infty + t = \infty$ para cualquier $t \in T$. De esta forma, mediante la base de tiempo es posible describir cómo es que se presentan los comportamientos a lo largo del tiempo.

Considerando el mecanismo de avance de tiempo se pueden distinguir dos tipos de mecanismos: Sincrónico en el tiempo y orientada a eventos (Banks *et al.*, 2001). El mecanismo de avance de tiempo *síncrono* tiene como característica general, intervalos de tiempo siempre iguales, lo que significa que el reloj de simulación avanza un intervalo en cada ciclo. Entre las características específicas presenta una evaluación del modelo y los intervalos de tiempo. Cuantifica el tiempo considerando dos situaciones: los eventos no simultáneos pero próximos en el tiempo (se consideran simultáneos) y una cuidadosa selección de los intervalos de tiempo para separar los eventos. Además de que las condiciones lógicas se implementan fácilmente y los cálculos no están sincronizados con los eventos.

En el mecanismo de avance por eventos se observan las siguientes características: los eventos se producen en cualquier instante, existe una única lista de eventos planificados que se mantienen en orden temporal y el sistema sólo calcula en los momentos en los que se producen eventos; el

reloj de simulación avanza hasta el instante del siguiente evento y los cálculos están sincronizados con los eventos.

Una de las propuestas estándar utilizadas por Morgan (1984) para establecer una secuencia de tiempo es la utilización de un “reloj maestro” el cual almacena el tiempo actual donde los cambios en el tiempo no son unidades constantes, sino que controla dichos cambios en base al siguiente evento. El periodo de tiempo hasta el siguiente evento se obtiene mediante una referencia a una “lista de eventos” la cual proporciona los posibles eventos que podrían presentarse a continuación y también determina cuando deberían ocurrir.

Dos conceptos de tiempo se manejan en la simulación de un sistema (Harrell y Tumay, 1997): tiempo de simulación y tiempo de ejecución. El tiempo de simulación es el periodo de tiempo simulado por el modelo, que generalmente se establece en cero al iniciar la ejecución de la simulación y actúa como un contador del número de las unidades del tiempo de la simulación. El tiempo de ejecución es el tiempo que toma la computadora para simular el periodo de tiempo y está influenciado por la complejidad del modelo de simulación, el número de eventos simulados, así como por la duración de la ejecución. La duración de la ejecución de una simulación es la diferencia entre el tiempo inicial establecido en el reloj y el tiempo final del reloj al terminar la simulación. En muchos casos, el tiempo de ejecución es significativamente diferente del tiempo de simulación.

4.3.4 Etapas de la simulación por computadora

Un proyecto de simulación es un proceso de pasos interpretativos, de desarrollo y analíticos. En la literatura generalmente se recomienda seguir un proceso de nueve a doce pasos en el desarrollo de modelos de simulación. Una de las propuestas más detalladas, es la realizada por Banks (et al, 2001), describen las actividades a realizar en cada uno de sus pasos (Figura 4.25).

Toda simulación debe iniciar con una *declaración del problema*. El analista debe asegurarse de que el problema que describe lo entiende claramente el usuario. Los *objetivos* indican las preguntas a ser respondidas a través de la simulación. El arte del modelado se ve reforzada por la capacidad de *abstraer los rasgos esenciales* de un problema para seleccionar y modificar las suposiciones básicas que caracterizan al sistema, y luego para enriquecer y elaborar el modelo hasta que resulte en una aproximación útil. Por lo tanto, lo mejor es comenzar con un modelo sencillo y construir hacia una mayor complejidad. Sin embargo, la complejidad del modelo no tiene que ser superior a la necesaria para lograr los fines para los que está destinado el modelo. La violación de este principio trae por consecuencia el incremento en los gastos de construcción del modelo. Sólo se necesita la esencia del sistema real. A medida que se incrementa la complejidad del modelo, los elementos de información también cambian. Los objetivos de la simulación generalmente establecen el tipo de datos que deben recogerse. La mayoría de los sistemas del mundo real dan lugar a modelos que requieren una gran cantidad de información, almacenamiento y recursos de computación, por lo que el modelo debe ser introducido en un formato informático. Se emplea el término "programa" para hacer referencia al software que se desarrolla, y es tarea del modelador decidir si el modelo se programa en un lenguaje de simulación, en un software de simulación o en uno de uso general. Durante la etapa de *verificación* del programa, se determina si el programa funciona correctamente. Con modelos complejos es difícil, si no imposible, traducir un modelo de éxito en su totalidad sin una buena dosis de depuración. Durante la *validación* del modelo, se comprueba la consistencia del modelo de simulación con el sistema real, debe realizarse antes de asumir que el modelo de simulación puede ser utilizado para la toma de decisiones. Por cada diseño experimental que se simule, las decisiones se relacionan con el período de inicialización, duración de la simulación que se ejecuta, y el número de repeticiones en cada ejecución. Teniendo en cuenta el análisis de las

ejecuciones que se han completado con el simulador, el analista determina si se necesitan ejecuciones adicionales y qué diseño experimental deben seguirse. La documentación del programa es requerida por los analistas en tareas de actualización o mantenimiento del software. Hay dos tipos de documentación: la del programa y la de simulación. Esto crea confianza en el programa, por lo que los usuarios del modelo y gerentes toman decisiones basadas en él.

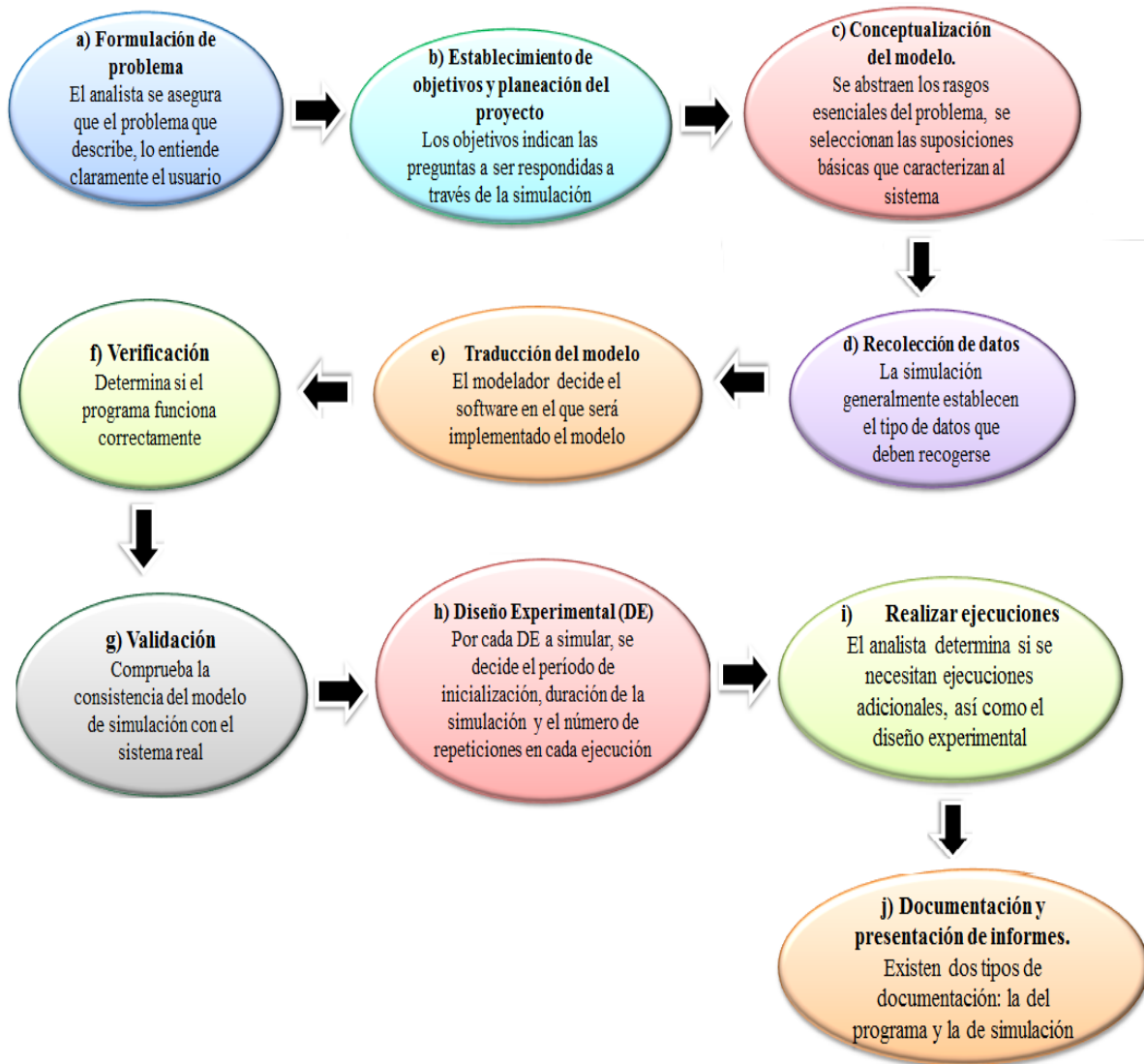


Figura 4.10 Etapas de un Estudio de Simulación. Fuente: Adaptado de Banks et al., 2001.

4.3.5 Ventajas y desventajas de los modelos de simulación

En ocasiones la simulación es considerada una herramienta de análisis, por lo que resulta indispensable conocer sus ventajas y desventajas antes de decidir usarla. Entre las ventajas más importantes se encuentra la facilidad para ser modificada de una manera rápida con el fin de analizar diferentes políticas o escenarios. Resulta más económico mejorar el sistema vía simulación, que hacerlo directamente en el sistema real. Es mucho más sencillo comprender y visualizar los métodos de simulación que los métodos puramente analíticos. Este tipo de métodos son empleados en sistemas muy sencillos donde suele hacerse un gran número de suposiciones o simplificaciones, mientras que con los modelos de simulación es posible analizar sistemas de mayor complejidad o con mayor detalle. En algunos casos, la simulación es el único medio para encontrar una solución.

Entre sus desventajas se encuentran los costos de desarrollo e implementación de los modelos de simulación en una computadora, debido a que requieren mucho tiempo para su desarrollo y validación. Se requiere gran cantidad de corridas computacionales para encontrar soluciones óptimas, lo cual repercute en altos costos; la solución de un modelo de simulación puede dar al analista un falso sentido de seguridad.

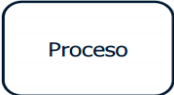
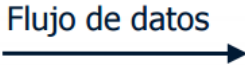
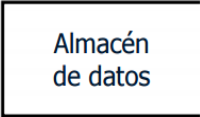
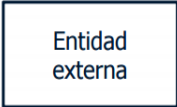
4.4 Herramientas de análisis.

Definir el sistema y los objetivos que se persiguen al estudiarlo, es un de las primeras tareas que condicionan la etapa de análisis. Debido a que facilitan la comprensión de entradas y salidas del sistema de manera sistemática, procesan o transforman los datos, almacenan y producen información en el contexto de una organización específica. Mediante un análisis detallado, los modeladores buscan identificar y diseñar modelos de un sistema real.

4.4.1 Diagramas de Flujo de datos

Los diagramas de flujo de datos (DFD) fueron desarrollados por Larry Constantine, basado en el modelo de computación de Martin y Estrin “Flujo gráfico de datos”. Los DFD son una técnica de modelación que describe un sistema como una red de procesos conectados por flujos y almacenes de datos (archivos o base de datos). Un diagrama de flujo describe, los puntos de inicio y final de los datos (límites del sistema), las transformaciones a las que son sometidos (procesos internos), los lugares en los que se almacenan los datos dentro del sistema y las vías por donde circulan los datos. Son cinco los componentes que integran un diagrama de flujo, en la tabla 4.4 se describen brevemente.

Tabla 4. 4 Componentes de un diagrama de flujo.

Concepto	Descripción	Símbolo
Proceso	Son las funciones o procedimientos que transforman entradas de datos en salida de información. Se representa con un rectángulo de orillas redondeadas.	
Flujo	Representa una estructura de datos en movimiento de una parte del sistema a otro. Se presenta gráficamente por medio de una flecha que entra o sale de un proceso. El sentido de la flecha indica la dirección del flujo.	
Almacén	Archivo lógico en donde se agregan o donde se extraen datos. Implica escritura, actualización o borrado de datos o recuperación de información almacenada.	
Terminador	Representa fuentes o destinos externos de datos que pueden ser personas, programas, organizaciones u otras entidades que interactúan con el sistema pero están fuera de sus límites. El terminador se representa gráficamente como un rectángulo.	
Conectores	Conecta dos partes del DFD en la misma hoja Conecta el diagrama de una hoja a otra	

Los DFD se emplean tanto para modelar sistemas de procesos de información como para modelar organizaciones enteras, es decir, son una herramienta de soporte para la planeación estratégica y de negocios. Al elaborar un DFD cada elemento tiene asociado un nombre unívoco a modo de etiqueta. Los procesos y archivos no pueden poseer sólo flujos de entrada (ni sólo de salida); los flujos no pueden incluir información de control, pueden converger o divergir. Las entradas y salidas netas de un DFD deben coincidir con los flujos de entrada y salida del proceso al que corresponde en el nivel superior (Kendall, 2005). En la figura 4.26 se presenta el diagrama de flujo, del sistema multiagente del proceso de compostaje de biosólidos.

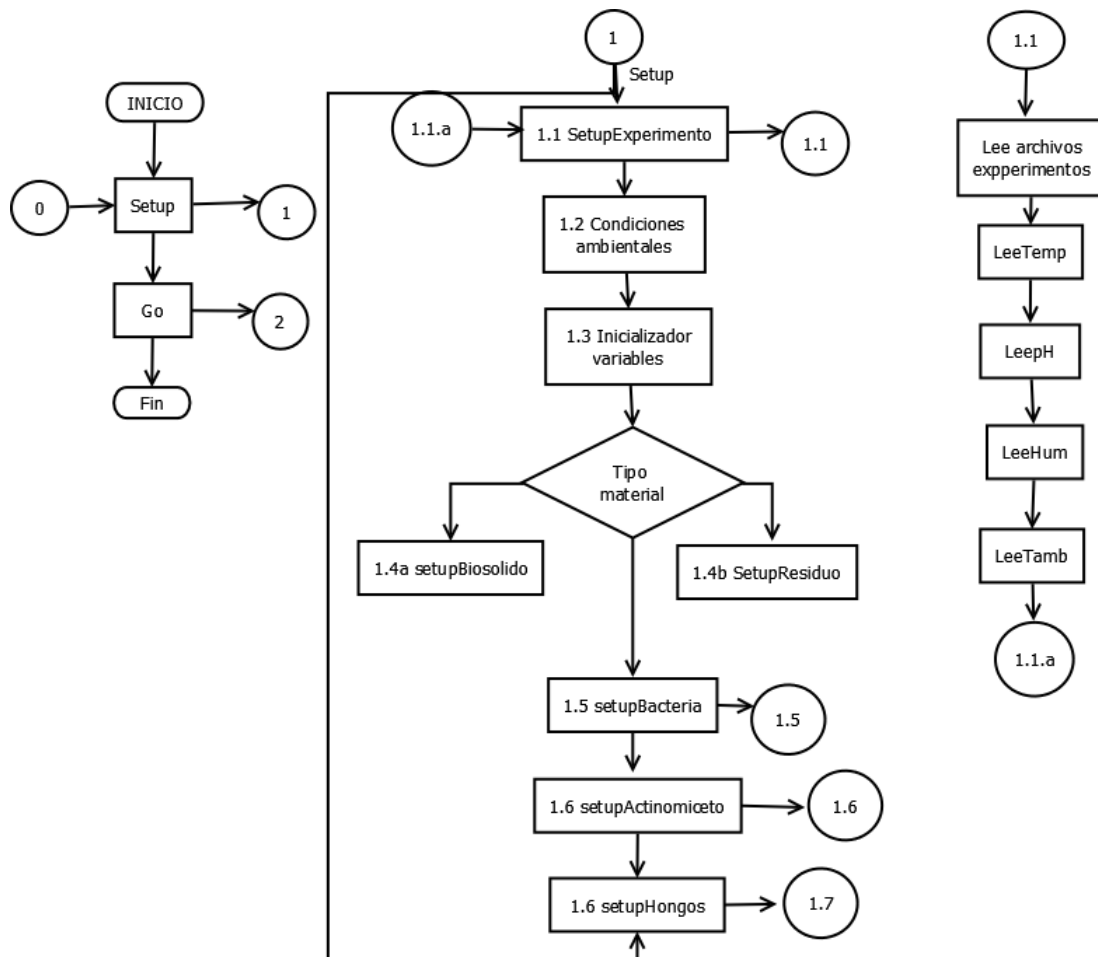


Figura 4.26 Diagrama de flujo del sistema multiagente para el proceso de compostaje.

Se observa que son dos los procesos principales (setup y go). En el primer proceso, se agrupan los procesos de configuración e inicialización de los elementos del sistema. Se encuentran los procesos de configuración de los microorganismos y del sustrato. Mientras que en el procedimiento *go*, relaciona los procesos de interacción con el usuario, el seguimiento del proceso y los parametros de salida.

4.4.2 Diccionario de datos

El diccionario de datos (DD) es la colección central de información sobre los datos, almacena su significado y el origen de los mismos y la relación con otros datos, así como su uso. El DD es frecuentemente empleado como repositorio de metadatos que completa la información que aparece en los DFD, aportando descripciones de: flujos, archivos, los datos que contienen unos y otros, entidades externas, procesos que se considere necesario especificar. El DD contiene dos tipos de descripciones para el flujo de datos dentro del sistema: elementos de datos y estructuras de datos. (Kendall, 2005).

Entre las ventajas que tiene el empleo del diccionario de datos, se encuentran la eliminación de posibles ambigüedades y redundancias en los datos. Ayudan a mantener sincronizado el trabajo de los analistas y de los diseñadores mientras se usa el mismo objeto de referencia en todo el programa y aportan una vía de documentación para el diseño de la base de datos y validar la integridad y exactitud del diagrama de flujo de datos (Whitten, Lonnie y Barlow, 2003).

En la tabla 4.5 muestra la descripción de la entidad microorganismo como parte del modelo de datos, identifica si el campo es un campo llave, el nombre del campo, tipo de dato que almacena ese campo y su descripción.

Entre las ventajas que tiene el empleo del diccionario de datos, se encuentran la eliminación de posibles ambigüedades y redundancias en los datos. Ayudan a mantener sincronizado el trabajo

de los analistas y de los diseñadores mientras se usa el mismo objeto de referencia en todo el programa y aportan una vía de documentación para el diseño de la base de datos y validar la integridad y exactitud del diagrama de flujo de datos. Además de proporcionar un punto de partida para desarrollar pantallas e informes, auxilian en el desarrollo de la lógica para los procesos del diagrama de flujo de datos (Whitten et al., 2003).

Tabla 4.5 Diccionario de datos del Sistema multiagente para el proceso de compostaje.

Entidad	Llave	Campo	Tipo	Descripcion
Microorganismo	PK	idMicroOrg	Entero	Identificador del microorganismo
		Reino	Cadena	Guarda el reino (Monera, Fungi)
		Nombre	Cadena	Nombre del microorganismo
		pHMin	Decimal	pH minimo
		pHMax	Decimal	pH máximo
		TemMin	Decimal	Temperatura minima
		Toptb	Decimal	Temperatura optima minima
		Topta	Decimal	Temperatura optima maxima
		Tmax	Decimal	Temperatura máxima
		HumMin	Decimal	Humedad minima
		HumMax	Decimal	Humedad máxima
Pila	PK	idPila	Entero	Identifica la pila
		pH	Decimal	Almacena el pH de la pila
		Humedad	Decimal	Humedad de la pila
		Temperatura	Decimal	Temperatura de la pila
		Relacion C/N	Decimal	Relación C/N de la pila
		Color	Texto	Color del material a degradar de la Pila
Material a degradar	PK	IdMaterial	Entero	Identificador del material a degradar
		Nombre	Texto	Nombre del material a degradar
		Relación C/N	Decimal	Relación carbono nitrógeno
		SVT	Decimal	Solicos volátiles totales
		Humedad	Entero	Procentaje de humedad

4.4.3 Mapa Conceptual

Los mapas conceptuales son un medio para la representación de proposiciones a través de conceptos formados mediante palabras de enlace que forman relaciones jerárquicas. Es una técnica, método o recurso esquemático para representar un conjunto de significados conceptuales incluidos en una estructura de proposiciones que tiene por objeto representar las relaciones significativas entre los conceptos y el conocimiento previo del sujeto (Cañas et al., 2000).

Hay tres características que diferencian los mapas conceptuales de otros recursos gráficos: los conceptos están dispuestos por orden de importancia. Sólo aparece una vez un mismo concepto (Jerarquización). Son una síntesis o resumen que contienen lo más significativo de un tema (Selección). Se pueden elaborar sub-mapas, que vayan ampliando diferentes partes o subtemas del tema principal. Un buen mapa conceptual es conciso y muestra las relaciones entre las ideas principales de un modo simple y vistoso, aprovechando la capacidad humana para la representación visual (Impacto visual). En la figura 4.27, se presenta el mapa conceptual de un sistema de compostaje, en un nivel inferior esta el sistema cerrado y abierto de composta, el cual tiene como subsistema una pila de volteo, dentro del sistema abierto se encuentra la pila con volteo la cual debe ser monitoreada de acuerdo a la normatividad nacional y estatal vigente. La pila esta formada por material a compostar (residuos orgánicos, biosólidos, lixiviados) y material mejorador (activadores, inoculadores, enriquecedores y estructurantes). Es en estos donde se encuentran los microorganismos, pertenecientes a tres reinos (monera, fungi, proctistas), dentro del reino monera se encuentran las bacterias degradadoras y patogenas, asi como los actinmicetos, que junto con los hongos son los encargados de degradar la materia orgánica, contenida en la pila.

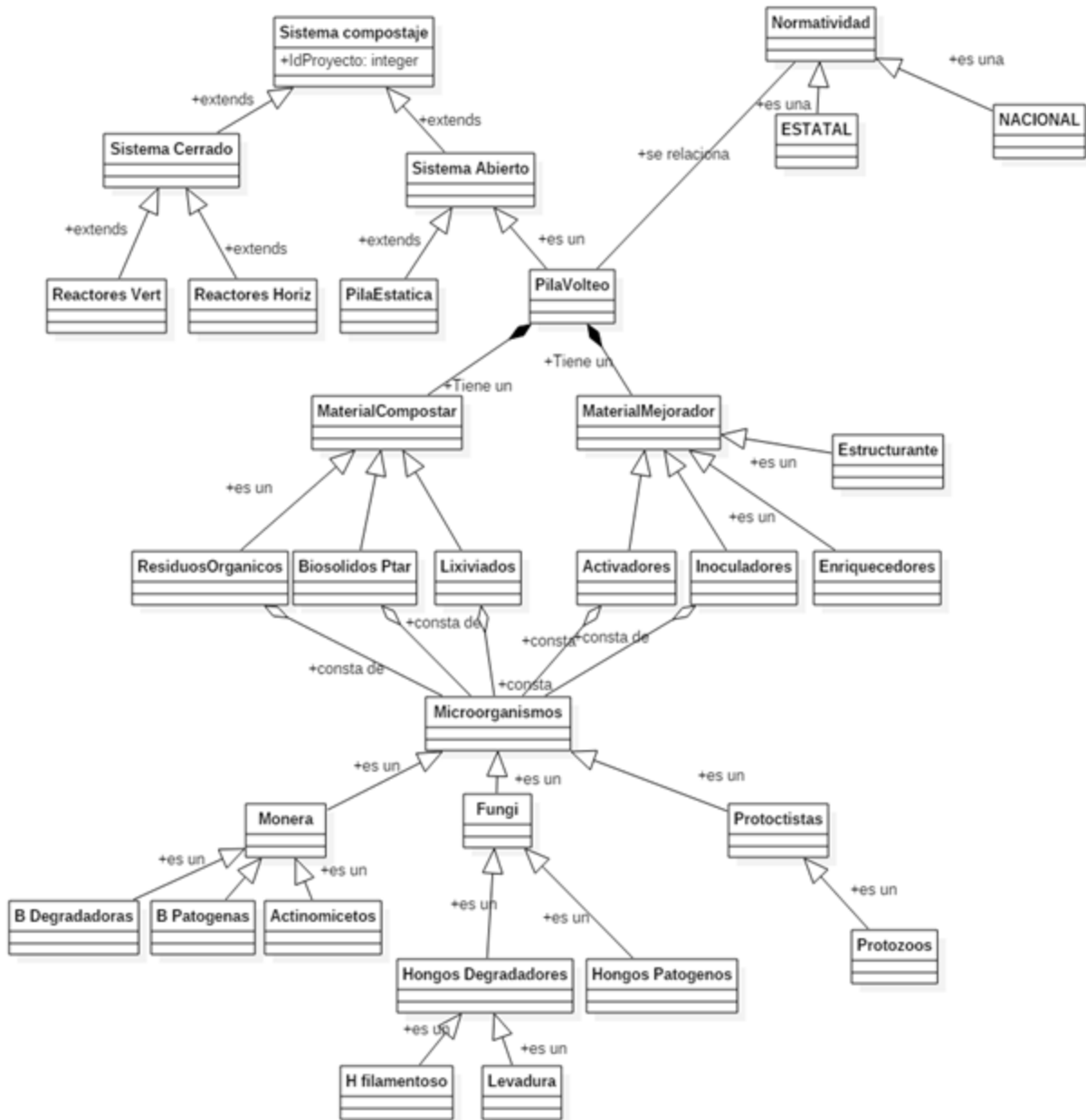


Figura 4.27 Modelo conceptual del proceso de compostaje..

De esta manera, un mapa conceptual es una representación gráfica de un conjunto de proposiciones sobre un tema. Donde cada concepto consiste del mínimo de palabras necesarias para expresar el objeto o acontecimiento. Las palabras de enlace son también tan concisas como es posible y casi siempre incluyen una estructura jerárquica de conceptos, donde los más

generales están "arriba" en la jerarquía y los conceptos más específicos, menos generales, se encuentran jerárquicamente más abajo. Para el diseño de los mapas conceptuales existen una gama de herramientas que facilitan el proceso, entre las que se encuentran C-Maps, Inspiration, DigiDocMap, starUML entre otros (Rovira, 2005).

4.5 Herramientas de diseño

Todos los sistemas tienen una estructura estática y un comportamiento dinámico, y el Lenguaje Unificado de Modelado (UML: Unified Modeling Language, por sus siglas en inglés), proporciona diagramas para capturar y describir ambos aspectos. Es un lenguaje de modelado gráfico usado para especificar o describir métodos o procesos, construir y documentar un sistema. Ofrece un estándar para describir un "plano" del sistema (modelo), incluyendo aspectos conceptuales tales como procesos, funciones del sistema, y aspectos concretos como expresiones de lenguajes de programación, esquemas de bases de datos y compuestos reciclados. Los diagramas de casos de uso, son una técnica que permite especificar el comportamiento del sistema. Los diagramas de interacción describen su comportamiento para demostrar cómo los objetos o entidades interactúan dinámicamente en diferentes momentos durante la ejecución del sistema. Los diagramas de estado son especialmente útiles para representar sistemas reactivos. El diagrama de clases se usa para documentar y expresar la estructura estática de éste, es decir, las clases y sus relaciones (Larman, 2003).

4.5.1 Casos de uso

Expresan cómo alguien o algo externo al sistema lo usa, los sistemas no solo son empleados por personas, sino también por otros sistemas de hardware y software. Éstos pueden especificarse

mediante escenarios que contendrán el propósito del caso de uso, los actores que interactúan, el evento inicial y la condición final. Los escenarios pueden ser representados mediante diagramas de traza de eventos o bien por el diagrama de interacción. Los casos de uso se caracterizan por estar expresados desde el punto de vista del actor; se documentan con texto informal; describen tanto lo que hace el actor como lo que hace el sistema cuando interactúa con él, aunque el énfasis está puesto en la interacción; son iniciados por un único actor; están acotados al uso de una determinada funcionalidad claramente diferenciada del sistema (Moreno, Velásquez y Ovalle., 2005).

En la figura 4.28 se presenta el diagrama de caso de uso de un simulador del proceso de compostaje en el nivel 0, el cual se caracteriza por describir de manera muy general las relaciones que guarda el sistema con los actores, en este ejemplo el usuario y el sistema de adquisición de datos (SAD) son los actores. Ambos proporcionan información al simulador, el usuario por su parte suministra los datos requeridos para la configuración de la simulación, el SAD envía los datos que son registrados por los sensores desde la pila de composta, ambos son almacenados en la base de datos (BD). Por su parte el simulador usa la información que le dio el usuario para ejecutar la simulación y la del SAD para validar la simulación.

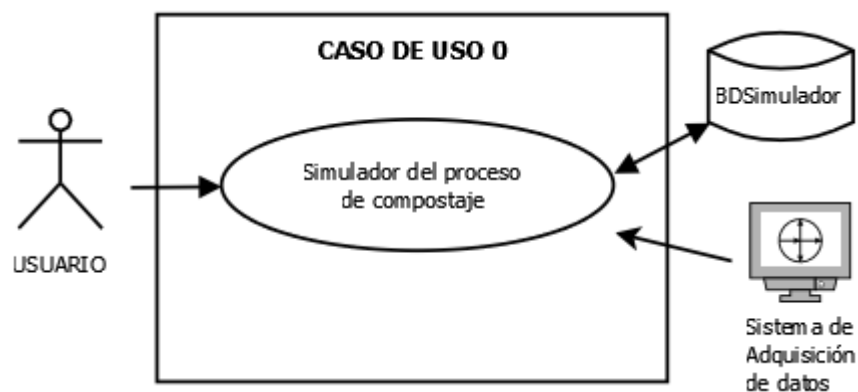


Figura 4.28 Caso de uso del simulador del proceso de compostaje en el Nivel 0.

En la figura 4.29 se presenta el caso de uso en el nivel 1, se observa un mayor detalle de los casos de uso involucrados en el simulador. El caso de uso del ejemplo anterior esta conformado por siete casos de uso. El caso de uso “Registrar sesión”, recibe como entrada el usuario y password del usuario, dicha información es verificada en la BD. Si el usuario tiene permisos, el simulador le despliega la interfaz gráfica de acuerdo a su perfil, mediante el caso de uso “Mostrar GUI perfil”. En un segundo paso, el usuario proporciona los datos requeridos para la simulación en el caso de uso “Configurar simulción”, los parámetros proporcionados son validados con información contenida en la BD.

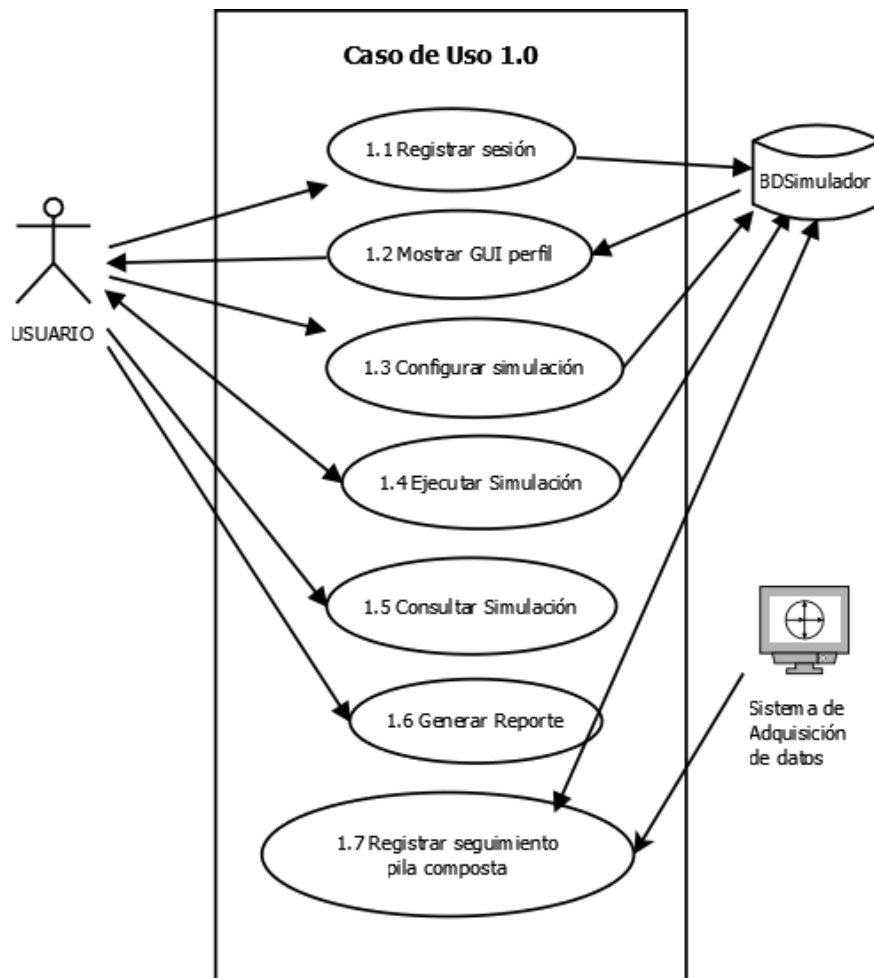


Figura 4.29 Caso de uso del simulador del proceso de compostaje nivel 1.

Una vez que los parámetros son validados, se llama el evento “Ejecutar simulación”, la información se almacena en la BD. El usuario tiene la posibilidad de “Consultar una simulación” con información previamente ejecutada, así como “Generar un reporte” con información de simulaciones previas. Finalmente en el caso de uso “Registrar seguimiento de composta”, se procesa y almacena la información registrada desde el SAD, la cual es recopilada a través de los sensores que se insertan en la pila de composta que se está monitoreando.

Los casos de uso se suelen documentar con texto informal. En general, se usa una lista numerada de los pasos que sigue el actor para interactuar con el sistema. En ocasiones suelen aparecer errores o excepciones. Esas desviaciones del curso normal del caso de uso se llaman alternativas. Las alternativas tienen las siguientes características: Representan un error o excepción en el curso normal del caso de uso. No tienen sentido por sí mismas, fuera del contexto del caso de uso en el que ocurren. A continuación se muestra una parte simplificada de la descripción del caso de uso “Configurar simulación” (Tabla 4.6).

Tabla 4.6 Caso de uso Configurar Simulación.

Nombre:	1.3 Configurar Simulación
Autor:	Analista del sistema
Fecha :	23/11/2016
Descripción: En este caso de uso se solicitan una serie de parámetros como: cantidad, humedad, peso y material a compostar, periodo de aireación (24/48 horas), tipo de humidificación con agua o lixiviados.	
Actores: Usuario, Base de datos	
Precondiciones: Tener una cuenta de acceso al simulador. Contar con la información solicitada.	
Flujo Normal: <ol style="list-style-type: none"> 1) El usuario proporciona los valores de los parámetros solicitados. 2) Los datos son validados por el simulador con información almacenada en la DB. 3) Se envía mensaje, continuar con la simulación 	
Flujo Alternativo: 1) los datos proporcionados no son válidos. Se envía mensaje de error al usuario, se solicita una nueva captura de datos.	

Entre las ventajas de los casos de uso destaca, la facilidad en su interpretación, ya que el lenguaje que utiliza es común y entendible para el usuario. simplicidad en la identificación de requerimientos y un mayor entendimiento de los procesos realizados por el sistema para el desarrollador. Permiten la representación de más de un caso de uso cada vez con mayor detalle.

4.5.2 Diagramas de Secuencia

Un diagrama de secuencia muestra las interacciones expresadas en función del tiempo, presenta los objetos participantes y los mensajes que intercambian entre ellos a lo largo del tiempo. Su uso es recomendado cuando se desea especificar restricciones de interacción en tiempo real. Este tipo de diagramas tiene dos dimensiones, la vertical que representa el tiempo que avanza desde el comienzo hasta el final de la página, aunque se puede tomar en el sentido contrario y la horizontal, que representa los distintos objetos mediante un rectángulo que contiene el nombre y la clase del objeto. La parte superior del rectángulo está alineado con el comienzo de la acción y la inferior alineada con su término (y puede estar marcada por un mensaje de vuelta). La exactitud temporal solo toma importancia en las aplicaciones de tiempo real, por lo que los ejes de tiempo suelen tener marcas temporales (Ovalle, Guzmán y Pastrana, 2005).

Los diagramas de secuencia tienen dos características: línea de vida y activación de un objeto. Un objeto activado está bien ejecutando su propio código o bien esperando la vuelta de otro objeto al cual ha enviado previamente un mensaje.

En la figura 4.30 se presenta el diagrama de secuencia para el caso de uso “Configurar Simulación”, los objetos que participan son: el usuario, el simulador y la base de datos. El usuario envía mensaje al simulador indicando que los datos han sido capturados, el simulador realiza la validación y si los dtos son correctos los registra en la base de datos, regresando un

mensaje al usuario para que pueda seguir con el proceso de ejecución, en caso contrario, le envía un mensaje al usuario solicitándole capture nuevamente la información.

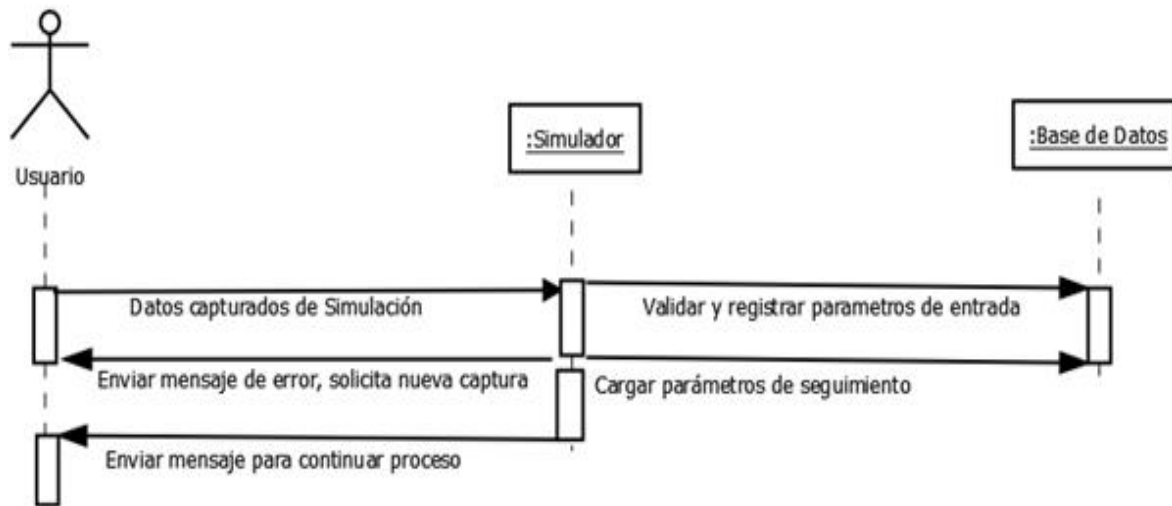


Figura 4.30 Diagrama de secuencia para el caso de uso Configurar Simulación.

4.5.3 Diagramas de estados

Son útiles para modelar la vida de un objeto ya que muestran el flujo de control entre sus estados. Un estado es una condición o situación en la vida de un objeto durante la cual satisface una condición, realiza alguna actividad o espera algún evento. En un evento es una ocurrencia que puede causar la transición del objeto de un estado a otro. Una transición es una relacion entre dos estados que indica que un objeto en un primer estado puede entrar a un segundoo estado y ejecutar ciertas operaciones cuando un evento ocurre.

Los diagramas de estado ven a los objetos como máquinas de estado o autómatas finitos que pueden estar en un conjunto de estados definidos y que pueden cambiar su estado a través de un estímulo perteneciente a un conjunto determinado de estados. En la tabla 4.7, se describen los elementos relacionados con el diagama de estados.

Tabla 4. 7 Elementos de un diagrama de estados.

Concepto	Descripción	Símbolo
Estado	Identifica una condición o una situación en la vida de un objeto durante la cual satisface alguna condición, ejecuta alguna actividad o espera que suceda algún evento. Un objeto permanece en un estado durante un tiempo finito. <ul style="list-style-type: none"> Al crearse un objeto, se encuentra en el estado inicial. Cuando el objeto llega a su estado final desaparece. 	  
Evento	Especificación de un acontecimiento significativo que ocupa un lugar en el tiempo y en el espacio, que puede (o no) activar una transición de estado. Este estímulo puede ser una condición que toma el valor de verdadero (EventoCambio).	
Acción	Operación atómica, que no se puede interrumpir por un evento y que se ejecuta hasta su finalización. Puede ser una llamada a una operación, la creación o destrucción de otro objeto o el envío de una señal a un objeto.	
Transición	Relación entre dos estados que indica que un objeto que esté en el primer estado realizará ciertas acciones y entrará en el segundo estado cuando ocurra un evento especificado y se satisfagan las condiciones especificadas.	

Como ejemplo en la figura 4.31, se presentan una serie de estados que se determinaron durante el crecimiento bacteriano. Inicia con la verificación de las condiciones ambientales; el día del proceso; la temperatura de la pila; los rangos de temperatura de las bacterias; la cantidad de estrato disponible y el tamaño de las bacterias, que al menos debe ser el doble de su tamaño, si estas condiciones se cumplen el estado cambia a buscar nutrientes, caso contrario el estado es Morir bacterias. En buscar nutrientes las bacterias localizan sustrato próximo a su localización. Si

encuentran el sustrato cambia su estado a “Nutrir”. En este estado incrementa su tamaño y energía. Se evalúa que si la bacteria a alcanzado el doble de su tamaño puede cambiar su estado a “Reproducir”. En éste la bacteria genera una nueva bacteria idéntica a ella, con las mismas características y con la mitad del tamaño de la bacteria original.

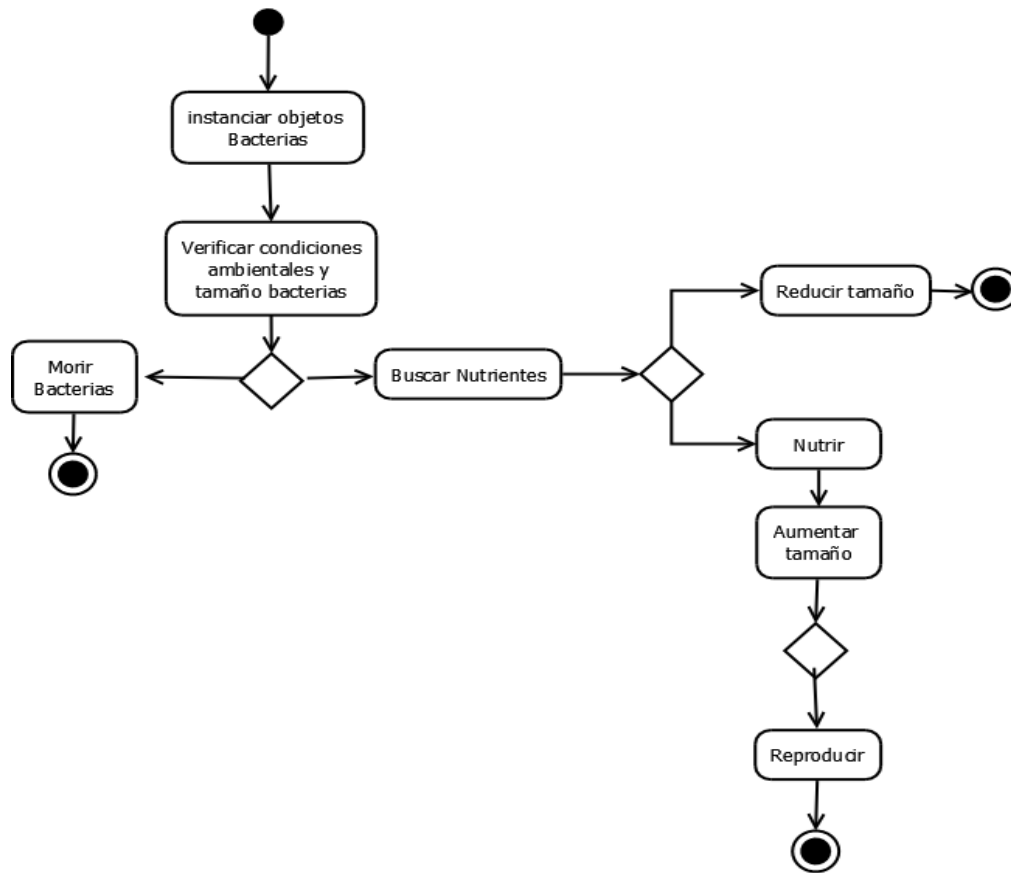


Figura 4.31 Diagrama de estados para el método crecimiento bacteriano.

4.5.4 Diagrama de Clases

A través de este diagrama se especifica la estructura estática del sistema, las relaciones que existen entre las distintas clases, los objetos y su estructura interna, además de definir y documentar una solución de diseño.

Entre los elementos que integran este diagrama se encuentra la *Clase* a través de esta se define la estructura y el comportamiento de un conjunto de objetos que tienen el mismo patrón estructural y de comportamiento (Fig. 4.32). Se representa por un cuadrado dividido en tres secciones, en la primera sección se coloca el nombre de la clase, en la segunda sección se listan las propiedades ó características de la clase junto con el tipo de dato que van a almacenar. En la tercera sección se describe el comportamiento de la clase, por medio de la implementación de los métodos.

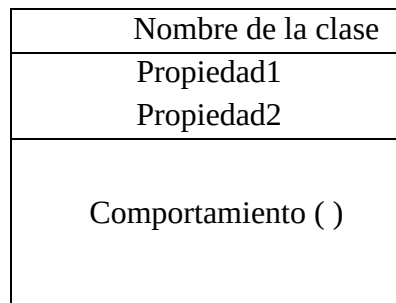


Figura 4.32 Secciones que integran una Clase.

Existen una serie de relaciones entre las diferentes clases que conforman el diagrama de clases, están pueden ser uno o muchos (1.. *) o bien (1..n) , Cero o muchos: (0..*) / (0...n), o puede ser un número fijo: m (m denota el número).

En el caso de la *Agregación*, es una relación "uno a muchos". en la que una de las clases representa un todo y la otra representa parte de ese todo. Se representa con una flecha que parte de una clase a otra en cuya base hay un rombo de color blanco. En la *composición* el todo no puede existir sin sus partes, es una relación más fuerte que la agregación. Aporta documentación conceptual ya que es una "relación de vida", es decir, el tiempo de vida de un objeto está condicionado por el tiempo de vida del objeto que lo incluye. Se representa con una flecha que parte de una clase a otra en cuya base hay un rombo de color negro. Mediante la *herencia*, se

indica que una subclase hereda los métodos y atributos especificados por una Súper Clase, por ende la Subclase además de poseer sus propios métodos y atributos, poseerá las características y atributos visibles de la Súper Clase. Se simboliza con un flecha sin rellenar va de la subclase a la superclase.

En la figura 4.33 se presenta la super clase “Sistema Abierto”, esta clase posee información general sobre el sistema de compostaje implementado experimentalmente, como es la identificación del sistema, área donde será ubicado, periodo de volteo (24 o 48 horas), periodo de inicio y termino (duración), escala (piloto, laboratorio). Se tiene como subclase a PilaAireada por lo que hereda las características de la clase sistema abierto. Esta clase registra las características de la pila (peso, humedad, color, pH, temperatura). La MaterialComposta se relaciona de y el mejorador componen a una pila con volteo. Biosólidos, residuos orgánicos y lixiviados son un tipo de material a compostar. La clase microorganismos son parte del material a compostar. Monera y fungi heredan de la clase microorganismos, la clase monera esta tiene como subclases a patógenas, degradadora y actinomicetos.

Entre las ventajas que posee un diagrama de clases, se encuentran: la facilidad de comunicación entre analistas y programadores, descubrimiento de fallas del sistema en el diseño y ofrecer mayor documentación durante la construcción del software.

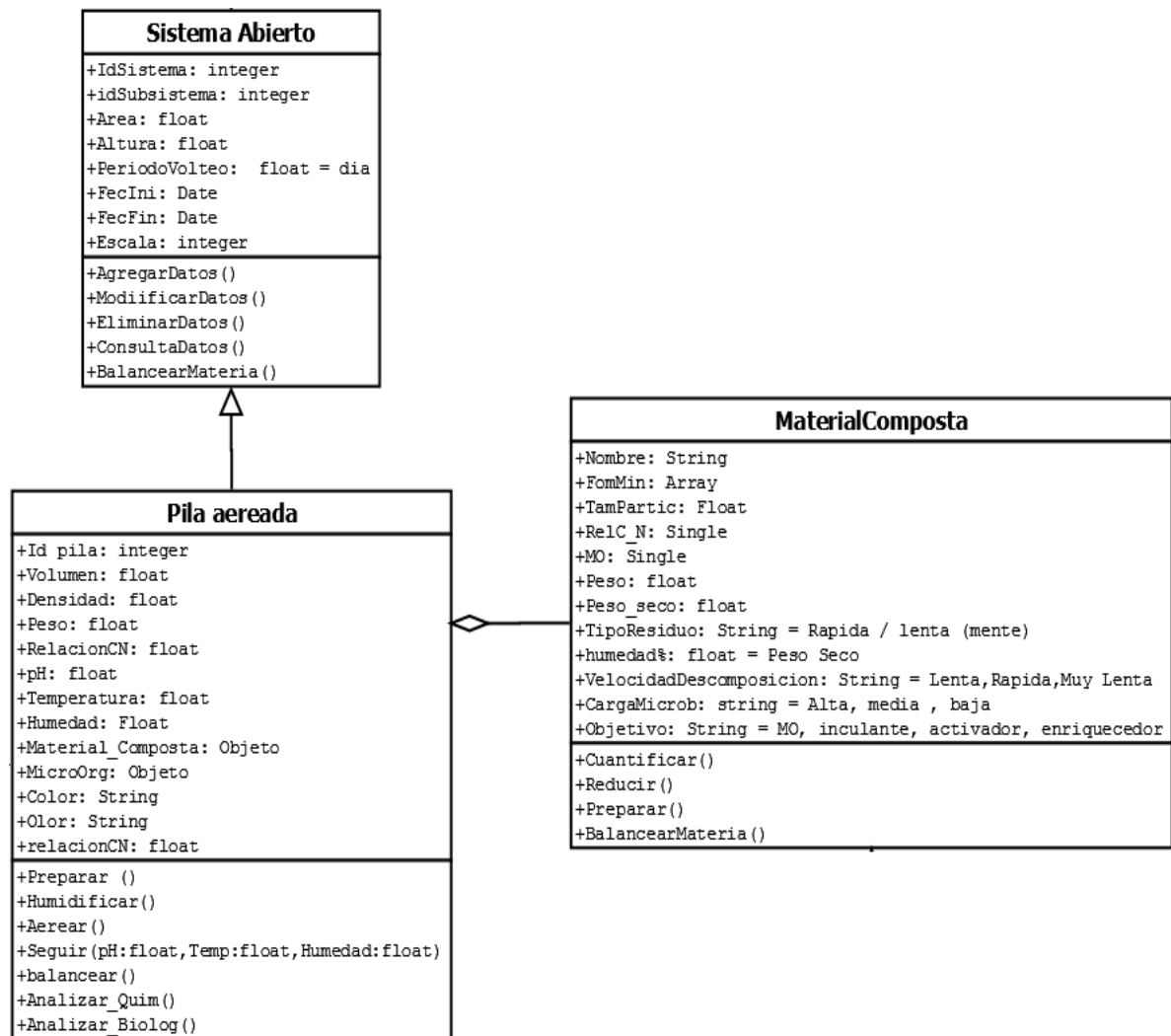


Figura 4.33 Diagrama de clases para un sistema de compostaje.

4.6 Herramientas de desarrollo

Una vez determinado el sistema que se quiere diseñar a través de las etapas anteriores, es necesario construir el modelo informático. Debido a que la simulación de sistemas complejos implica la realización de numerosos cálculos, es absolutamente necesario desarrollar un programa que reproduzca el comportamiento previsto por el modelo conceptual, alimentarlo con las variables de entrada adecuadas y que permita examinar diferentes valores de salida. La elección del lenguaje de programación depende directamente de las características del modelo. Existen en

el mercado dos grandes clases de software para simulación: los simuladores también conocidos como “Toolkits” y los lenguajes de simulación.

4.6.1 Simuladores

Un simulador es un paquete de computadora que permite realizar la simulación para un ambiente específico, no requiriendo esfuerzo en programación. Son una versión depurada de los diferentes lenguajes de propósito general y presentan algunas ventajas: reducción de la tarea de programación y mayor flexibilidad en la realización de cambios y en la diferenciación de las entidades que conforman el sistema, mediante una definición exacta del sistema.

Los simuladores son actualmente muy utilizados para análisis de alto nivel, requiriendo únicamente agregar detalles, puesto que lo demás es estándar. En un simulador, se pierde flexibilidad pero se gana eficacia y rapidez en el modelado. Si el sistema real no se adapta a ninguna de las configuraciones que tenga programadas el simulador, éste último no debe ser utilizado. Como ejemplo de simuladores existen:

- **ARENA** sus aplicaciones se centran en el análisis de procesos de gestión administrativa y servicios en Seguros, Banca o Finanzas, o flujos y procesos de fabricación no intensivos en manejo de materiales (Kelton y Sadowski, 2002).
- **SIMUL8** es un ambiente integrado para trabajar con modelos de simulación. Esta aplicación permite crear simulaciones con precisión, flexibilidad y velocidad.
- **Simulink** ofrece un editor gráfico, bibliotecas de bloques personalizables para modelar y simular sistemas dinámicos.
- **20-sim** es un programa de modelado y simulación para sistemas mecatrónicos (Broenink, 1999).

- **ProModel** es una herramienta de simulación que funciona en computadoras personales.

Permite diseñar y analizar sistemas de producción y servicios de todo tipo y tamaño, modelar prácticamente toda situación, en forma casi real. Mediante la simulación se tiene la habilidad para determinar el uso de los recursos disponibles: personal, equipo e instalaciones (SIMULART,2017).

El empleo de un simulador presenta como ventajas la estandarización en su funcionalidad y durante el proceso de modelado. Los ciclos de desarrollo son más cortos y existe un mayor soporte al momento de la verificación del modelo. El código presenta una mayor legibilidad, es más entendible debido a que ya existe un estándar, pero dentro de sus inconvenientes se encuentra el costo, ya que es necesario invertir por la capacitación del lenguaje de simulación, o contratar a personal calificado.

4.6.2. Lenguajes de Simulación

A partir de la década de 1960 hacen su aparición los lenguajes de simulación (o de propósito especial), revolucionando el campo de las aplicaciones en esta área. Son similares a los lenguajes de programación de alto nivel (propósito general) pero especialmente preparados para proporcionar automáticamente las características necesarias para la programación de un modelo de simulación, que reduzca significativamente el esfuerzo requerido para programar el modelo (Yang, Li, y Xiao, 2001). Algunos lenguajes de este tipo son:

- **SIMAN** (Simulation Modeling and Analisis). Es un lenguaje de modelamento de propósito general, el cuál incluye ciertas facilidades para procesos de manufactura, que son muy útiles en el modelamiento de sistemas complejos de manufactura.

- **SIMSCRIPT II.5** es un lenguaje de simulación orientado al evento y al proceso; se considera híbrido porque sustenta tanto facilidades para la simulación de sistemas discretos como para sistemas continuos.
- **SLAM II** (Simulation Language For Alternative Modeling) es un lenguaje de simulación por el cual se pueden construir modelos con orientación al proceso o al evento. Ofrece recursos de eventos de redes, discretos y simulación continua.
- **LabVIEW** (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench) es un lenguaje de programación gráfica (G) que utiliza un modelo de flujo de datos en lugar de líneas secuenciales de código de texto, lo que le permite escribir código funcional utilizando un diseño visual que se asemeja a su proceso de pensamiento (LabView, 2017).
- **MATLAB** (MATrix LABoratory). El lenguaje de MATLAB, se basa en matrices para expresar las matemáticas computacionales. Los gráficos integrados facilitan la visualización de los datos y la obtención de información a partir de ellos. Una vasta librería de toolboxes preinstaladas le permiten empezar a trabajar inmediatamente con algoritmos esenciales para su dominio (MATLAB, 2017).
- **Netlogo** es un lenguaje de programación que sigue la filosofía del modelado basado en agentes, ofrece un entorno programable de modelado para simular fenómenos naturales y sociales. Desarrollado por Uri Wilensky en 1999, está en continuo desarrollo por el Centro de Connected Learning and Computer-Based Modelling (Wilensky, 2017). Netlogo es adecuado para modelar sistemas complejos desarrollados sobre el tiempo. Los modeladores pueden dar instrucciones a un elevado número de agentes operando todos independientemente. Lo que permite examinar la relación entre el comportamiento micronivel de los individuos y los patrones macronivel que surgen de la interacción de muchos individuos (Kornhauser et al., 2007).

Entre sus principales características (Wilensky, 2017) se distinguen:

- Es multiplataforma. Puede ejecutarse independientemente del sistema operativo del equipo (Windows, Linux o Mac).
- Su lenguaje es complementamente programable, posee una estructura simple, es un dialecto de Logo extendido para soportar agentes. Estos pueden ser móviles (tortugas) o estacionarios (patches). Permite generar vinculos entre tortugas para formar grafos.
- Con respecto al ambiente: facilita la representación 2D y 3D, ofrece un centro de comandos para interactuar con el modelo en tiempo de ejecución. Cuenta con una interfaz gráfica de construcción de objetos visuales (botones, sliders, choosers, entre otros). Permite controlar la velocidad de la simulación, lo que facilita el modelado de sistemas dinámicos. Se pueden realizar simulaciones a través de dispositivos de red (HubNet).

El mundo de Netlogo esta soportado por Agentes, estos son entidades que pueden seguir instrucciones, cada agente puede realizar su propia actividad, o todos simultáneamente. En Netlogo hay cuatro agentes (turtles, patches, links y observer). Las tortugas son agentes que se trasladan en el mundo. El mundo es bidimensional y esta dividido en una rejilla de patches, Cada patch es una pieza cuadrada “de la tierra” en la coordenada(x,y) en la que las tortugas pueden moverse (Figura 4.34). Los links son agentes que unen a dos tortugas. El observador no tiene una posición, solo mira el mundo de las tortugas y patches (Wilensky 2017).

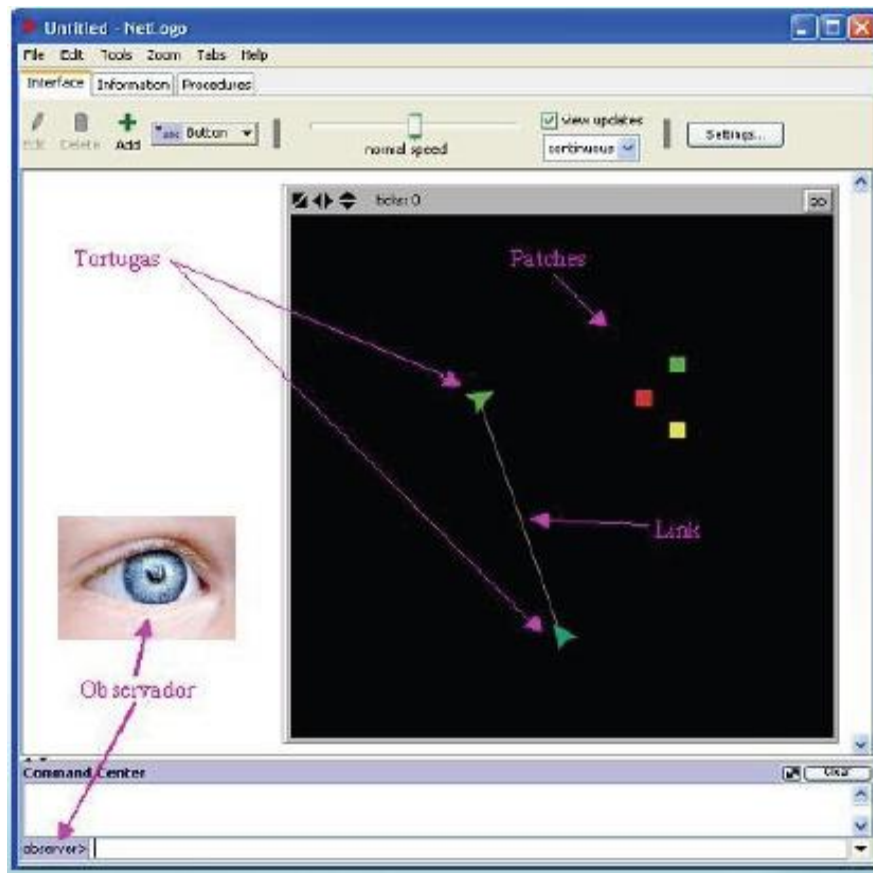


Figura 4.34 Tipos de tortugas en Netlogo.

Un lenguaje de simulación presenta algunas ventajas frente a un lenguaje de programación de propósito general, entre las que se encuentran; mayor flexibilidad, debido a que se trabaja a un nivel de programación, sin requerir demasiado esfuerzo de programación, facilidad de operación al proporcionar un marco de trabajo natural para el uso de modelos de simulación, detección de errores, asignación dinámica de memoria durante la ejecución, entre otras.

Entre sus desventajas se encuentra la inversión tanto de tiempo como de costos por el software, considerando la capacitación de los programadores en el nuevo lenguaje y en algunas

ocasiones por la adquisición de equipo que debe ser compatible con el software que se va adquirir.

4.7 Modelado del proceso del compostaje

En esta sección se ejemplifican los aspectos de interés en la conceptualización del proceso de compostaje aerobio, para que en un futuro pudieran facilitar el desarrollo de un modelo independientemente de las herramientas seleccionadas, algunas de estas ya se presentaron en la sección anterior.

Los residuos que se generan diariamente en los hogares, contienen alrededor de un 40% de materia orgánica que puede ser reciclada y retornada a la tierra en forma de humus para plantas y cultivos. Acción que contribuiría no solo a reducir la cantidad de residuos que son depositados en los rellenos sanitarios, tiraderos a cielo abierto o plantas de tratamiento. Al mismo tiempo se podría reducir el empleo de abonos elaborados con diferentes sustancias químicas a través del uso de mejoradores de suelo orgánicos.

En este sentido el compostaje intenta duplicar los procesos de degradación natural de la materia orgánica en una situación controlada. Para lograrlo de manera efectiva y eficiente, se deben considerar los factores que intervienen en el proceso de descomposición y sus relaciones. En la búsqueda de alternativas que faciliten la comprensión del proceso de compostaje, se han desarrollado modelos para un conjunto específico de condiciones que aportan un indicativo de qué anticipar cuando se trata de entender los principales factores que afectan al proceso de descomposición. Mediante los modelos físicos, ha sido posible explorar a nivel laboratorio y a escala piloto ciertos aspectos del proceso, como es la tasa de recirculación, las proporciones de las mezclas de materiales a compostar, periodos de aireación, entre otros. Si las variables de seguimiento se controlan apropiadamente, el modelo que se desarrolle podrá simular ambientes a

gran escala y hacer estimaciones a un nivel aceptable, tanto a nivel de laboratorio como a escala piloto (Ballesteros, 2016; Juárez, 2014). Por otro lado, cuando se busca predecir el rendimiento del proceso a partir del conocimiento de las propiedades del sustrato y las condiciones ambientales y operativas del proceso, los modelos matemáticos son una buena opción. Si el modelo matemático es validado, predecirá dentro de los límites especificados el desempeño del proceso a nivel de laboratorio, piloto y a escala (Bialobrzewski et al., 2015; Xi *et al.*, 2010).

La simulación es una herramienta de apoyo a la decisión que permite a los profesionales modelar y analizar el comportamiento de sus propios sistemas. A pesar de que actualmente la mayoría de los simuladores son capaces de reproducir la mayoría de los procesos en un sistema del mundo real. Sin embargo, cuando existen determinadas actividades de toma de decisiones que escapan del alcance de éstos paquetes, es ampliamente recomendado el uso de lenguajes de simulación (Caselles, 2008).

4.7.1 Conceptualización del proceso de compostaje.

El estudio del proceso de compostaje de una pila aireada desde el paradigma de agentes, lleva inicialmente a la identificación de las entidades tanto sus características como el comportamiento que presentan en el sistema bajo estudio. En este sentido destacan los microorganismos con propiedades tales como: tipo de microorganismo (bacterias, hongos, actinomicetos), tamaño, energía, peso, rango de temperatura (mínima, máxima), alcalinidad o acidez (rango de pH mínimo-máximo), humedad (rango mínimo-máximo), fase de degradación en el que alcanzan su óptimo desarrollo (mesofila, termófila y maduración o segunda fase mesofila),. El comportamiento del microorganismo esta en función de estados vitales como (nutrirse, reproducirse y morir), y la relación con las características del ambiente en el que habita (latencia,

activo). Este ambiente esta a su vez se integra por el material a compostar, dadas sus características físico químicas (Relación C/N, pH, sólidos volátiles totales, peso seco, porcentaje de humedad) (Sección 3.1 y 3.2). El ambiente (pila de composta) en el que se desenvuelven los agentes se ve influenciado por las variables de control (pH, temperatura, humedad) resultado de la retroalimentación de los microorganismo en su ambiente y donde las fases de degradación (mesófila, termófila, estabilización) son resultado de las acciones de los mismos. La relación que existe entre los agentes microorganismos se define por el sustrato que consumen y los residuos que generan al degradarla, los cuales son reintegrados al medio ambiente (Sección 2.1 y 2.2).

4.7.2 Diseño del modelo.

En esta etapa se considerará que el modelo es una simplificación del sistema real, se parte de un modelo físico de una pila de composta, el cual es una abstracción de un sistema real, simula el proceso de degradación aerobia que ocurre en la naturaleza (Sección 1.1.3. y Fig. 4.3).

Uno de los primeros pasos es determinar lo que se incluirá en el modelo y lo que se omitirá, en el caso de una pila de composta se deben considerar los procesos que caracterizan sus dinámicas; factores de control, degradación aerobia; entrada de oxígeno (aireación), incorporación de agua (humidificación) (Sección 3.3, 3.4.). En segundo lugar se encuentra la selección de la escala que se va representar, de acuerdo a Haug (1993) por cada gramo de composta existen alrededor de 1×10^6 UFC de microorganismos (Sección 2), con un peso aproximado de 1×10^{-12} , basta con imaginar cómo será su presentación visual de un millón de microorganismos desplazándose en una ventana grafica de (36 x 36) pixeles. Es por ello que el modelo conceptual es de gran apoyo, ya que permite abstraer los objetos y sus propiedades relevantes, que facilitarán el estudio del sistema real. Es recomendable al inicio implementar modelos lo más sencillo posible y poco a poco ir aumentando su complejidad. Por ejemplo se puede representar a nivel micro una UFC,

definir sus propiedades y programar su comportamiento y, a través de técnicas de interpolación alcanzar una representación a nivel macro. Además en cada ciclo de reloj, el número de UCF va a cambiar en relación a las condiciones ambientales que se den en un instante en el tiempo dentro del proceso.

Se busca que el modelo represente un número mínimo de suposiciones, las cuales se relacionan generalmente a los diferentes procesos que integran el comportamiento del sistema real. Una de las principales suposiciones es considerar que los agentes (microorganismos) en un gramo de material se comportan de igual forma que en una pila de 250 kg. Otra suposición y que se sustenta bajo la anterior, es si es reproducible el comportamiento de los agentes partiendo de datos de seguimiento de la pila de composta en intervalos de 24 horas y si la modelación de estos supuestos brindará información que conduzca a una mayor comprensión del proceso.

Acerca del tiempo de la simulación, se sabe que cada microorganismo posee un tiempo de duplicación específico, que puede ser afectado por las condiciones ambientales y por la cantidad de sustrato en él ambiente (Sección 2), lo que supondría una simulación en donde cada cambio de reloj represente una hora en el sistema real y que las condiciones ambientales se mantienen durante 24 horas (un día). Dando oportunidad para que los agentes (microorganismos) reaccionen y actualicen su estado. Por otro lado, el tiempo de la simulación puede estar estrechamente relacionado con el tiempo de duplicación de cada uno de los agentes, y la duración del proceso de compostaje.

Graficamente el ambiente podría representarse mediante un plano bidimensional, donde se encuentren localizadas las UFC de los agentes, cuya propiedad sería posición en el plano (x, y), mediante una tabla de equivalencias se podría posteriormente interpolar los resultados obtenidos. Otra de las suposiciones es que los agentes tienen un peso, el material que degradan se encuentra proporcionalmente relacionado a este, cuando alcanzan el doble de su tamaño, tienen la energía

suficiente para reproducirse. La cantidad de agentes calculados se relaciona con la cantidad de material que ha sido degradada y que es incorporada al ambiente. Como puede observarse el modelo esta enfocado a procesos (Sección 4.3.2.)

4.7.3 Construcción del modelo.

Una vez conceptualizado el sistema real a estudiar, es necesario definir como se va a desarrollar y cuales serán las herramientas de desarrollo que se usarán para su implementación: un lenguaje de propósito general, un lenguaje de simulación o un simulador específico (Sección 4.6), es de suma importancia analizar ventajas y desventajas de cada uno y los requerimientos del sistema. Se dispone de personal capacitado para desarrollarlo, el tiempo de entrega programado, se tiene el presupuesto necesario para adquirir un simulador con las características necesarias para alcanzar el objetivo planteado durante el análisis. Otra opción que vale la pena considerar es el uso de software libre, y poner en la balanza costos sobre tiempo de capacitación para su aprendizaje.

Si se eligiera un lenguaje de simulación de libre acceso para modelar con agentes el proceso de compostaje, este podría ser NetLogo, debido a sus características las cuales se mencionaron en la sección 4.6, y a que el objetivo de la simulación es comprender lo que sucede dentro de una pila de composta a nivel micro. A continuación se proponen una serie de componentes para la construcción del simulador: las entradas, procesos y salidas que podrían integrar el modelo del proceso de compostaje.

a) Entradas.

Son los parámetros necesarios para que el sistema funcione adecuadamente. Éstos deben ser proporcionados *a priori*, ya sea por el usuario o mediante una función que genere números pseudoaleatoriamente.

- Experimento. Relaciona los valores de seguimiento de una serie de pilas experimentales a escoger. Al seleccionar un experimento, la información de las variables de control (pH, temperatura y humedad en la pila y temperatura ambiental) son cargadas en arreglos para ser usada durante la ejecución de la simulación. La información se encuentra almacenada en archivos de texto.
- Material a compostar. El usuario tiene la opción de seleccionar el material con el que realizará la simulación. Los materiales a compostar son biosólidos o residuos orgánicos. Para la selección se emplearán componentes que permitirán elegir la cantidad del material a compostear.
- Material Estructurante. Se consideran como materiales de este tipo a la arcilla y la lama, el usuario podrá seleccionar una cantidad proporcional a los materiales a compostar. Se tiene información de sus características físico-químicas y biológicas.
- Porcentaje de Humedad. Se solicita el porcentaje de humedad inicial de los materiales a compostar y materiales estructurantes. El usuario captura estos datos o bien deja el valor asignado *a priori*, el cual fue obtenido experimentalmente.
- Periodo_Humidificación. Se empleará un componente con dos opciones, en el que el usuario podrá seleccionar lixiviados o agua, para humidificar la pila.
- Litros. La cantidad de líquido que se empleara durante la simulación, el usuario puede colocar un valor o bien considerar el que se encuentra predeterminado, el cual se obtuvo experimentalmente.

El valor de estas variables de entrada pueden ser solicitadas mediante una interfaz gráfica, Netlogo posee una serie de componentes que proporcionan una interfaz amigable al usuario (Fig. 4.35).



Figura 4.35. Elementos de entrada en el simulador.

b) Procesos

Un proceso es un conjunto de pasos sucesivos de un fenómeno o hecho complejo. En Netlogo, los procesos se encuentran definidos dentro de estructuras To_End y son llamados desde los procesos principales Setup y Go.

- Setup.

Este proceso es el primero que ejecuta Netlogo cuando inicia la ejecución de la simulación, permite la inicialización de variables globales, agentes, configuración del ambiente y la lectura de archivos en memoria. Entre los principales procesos a desarrollar, se tendrían.

SetupExperimento. En este proceso se localizan, se leen y se cargan en memoria los archivos relacionados con las variables ambientales (Temperatura, pH, Humedad, Temperatura ambiental) del experimento seleccionado por el usuario.

CondicionesAmbientales (día). Se leen los archivos de cada una de las variables de seguimiento, las cuales se cargan en memoria durante la ejecución de la simulación. Dentro de este proceso se encuentra el proceso LeeFase.

LeeFase. Tiene como objetivo leer los datos del día que se está simulando y obtener como salida la fase del proceso de compostaje, considerando los rangos de las variables de seguimiento (temperatura, humedad, pH y día del proceso).

InicializaVariables. En este proceso se inicializan las variables globales, estas variables se caracterizan porque pueden ser utilizadas en cualquier parte del modelo y el valor que almacenan no cambia durante la ejecución de la simulación.

SetupMaterialCompostar. Se define el ambiente con respecto al material a compostar (biosólidos ó materia orgánica) se inicializan sus propiedades asignando valores de origen experimental o bien tomados de la bibliografía, se calcula su peso en gramos mol. En la Tabla 8, se listan las propiedades a considerar en el material a compostar (biosólidos, residuos orgánicos).

Tabla 8. *Propiedades de los materiales a compostar.*

Propiedad	Descripción
setxy	Posición dentro del plano bidimensional punto (x, y)
color	Color que distingue gráficamente al sustrato (gris)
shape	Forma asignada al sustrato para distinguirlo gráficamente (circulo)
size	Tamaño con el que es representado el sustrato gráficamente (0.3)
pesoMolS	Peso en moles del sustrato (201 g/mol para biosólido y 936 g/mol residuos orgánicos)
%Humedad	Porcentaje humedad
Relacion C/N	Relación C/N

c) Salidas

A continuación se describen las variables obtenidas como salida, al finalizar la simulación, como resultado de los procesos descritos anteriormente (Figura 4.36).

- Dia. Muestra el día del proceso de compostaje, se calcula después de 24 ciclos de reloj.
- Temperatura. Muestra la temperatura de la pila, se encuentra relacionada con el día del proceso. Se lee del archivo del experimento seleccionado.

- Fase. Muestra el nombre de la fase en la que se encuentra el proceso de compostaje seleccionado en experimento (Mesofila, Termófila, Maduración)
- Temperatura mayor 55°C. Devuelve el número de días con temperatura de la pila superior a 55°C.
- Población de bacterias (UFC). Muestra la cantidad de bacterias en unidades formadoras de colonias.
- Población de Actinomicetos (UFC). Muestra la cantidad de actinomicetos generados durante la simulación
- Población de Hongos (UFC). Muestra la cantidad de bacterias Mesófilas generadas durante la simulación de un día "x",
- Relación (Carbono/Nitrogeno). Muestra los resultados de calcular la relación C/N. este valor es calculado mediante formula estequiométrica.
- Rendimiento (Y X/S). Relación entre la biomasa generada y el sustrato consumido, usualmente referidos a la fuente de carbono y energía.



Figura 4.36 Elementos de salida en el simulador.

d) Ambiente

Se refiere a las características del mundo que habitan los agentes durante la simulación, en este caso el ambiente gráfico esta constituido por un plano bidimensional de tamaño (38 x 38) pixeles. En cada pixel se ubica un agente de manera aleatoria, éste puede ser una bacteria, actinomiceto u hongo o bien material a compostar (*biosólido, residuos orgánicos o ambos*). En la Figura 4.37 se muestra la interfaz gráfica del usuario, donde se presenta el ambiente de los agentes.

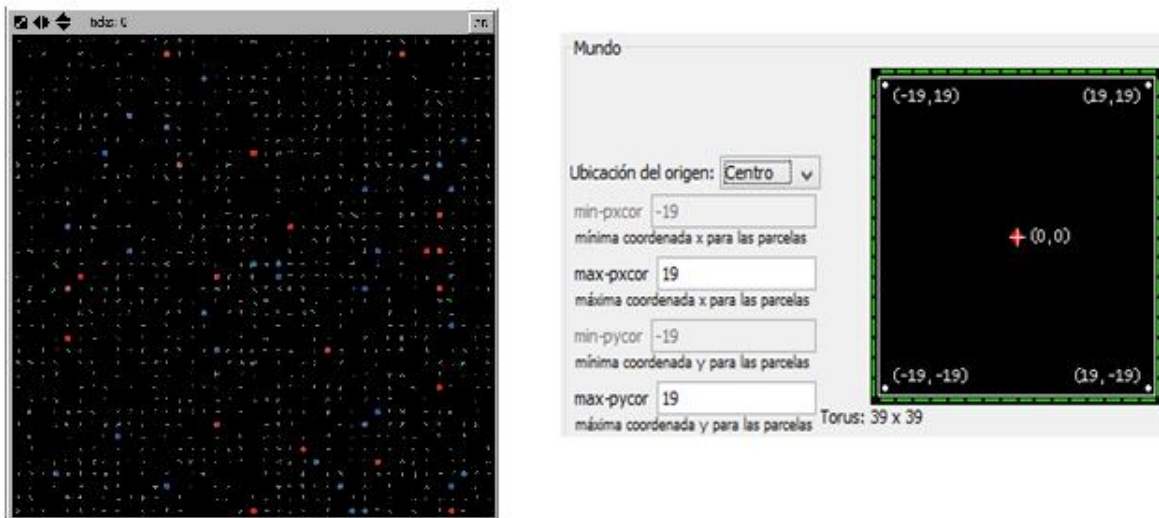


Figura 4.37 Descripción del mundo en el simulador.

e) Relaciones

Las relaciones representan un tipo de asociación entre los conceptos del dominio (agentes), permiten visualizar en qué dirección se está retroalimentando el modelo, la comunicación entre clases y los tipos de mensajes. En la tabla 9 se presentan los conceptos padre e hijos, así como la cardinalidad (uno-muchos, uno-uno, muchos-muchos), concepto que permite cuantificar la relación presente entre éstas. Por ejemplo el concepto padre “Material mejorador” tiene cuatro conceptos hijos (activadores, inoculantes, enriquecedores, estructurantes), su relación es uno a muchos.

Tabla 4.9 Relación de entre las entidades.

Concepto padre	Concepto hijo	Relación
Sistema Compostaje	Sistema Abierto	Es un (1..1)
	Sistema Cerrado	Subclase de
Sistema Abierto	Pila Estática	Es un (1..1)
	Pila Volteo	Subclase de
Material Mejorador	Activadores	Es un [1, n]
	Inoculantes	Subclase de
	Enriquecedores	
	Estructurantes	
Material a compostar	Residuos Orgánicos	Es un [1..1]
	Biosólidos	Subclase de
Microorganismos	Bacterias	Son un
	Fungi	Subclase de
	Protoctistas	

4.7.4 Verificación y validación.

Una vez que el modelo se ha terminado de construir este se verifica y valida. La diferencia entre estos dos conceptos consiste en que la verificación garantiza que el modelo está desarrollado correctamente y es coherente con el modelo conceptual, mientras que la validación, asegura que el modelo representa de forma adecuada el sistema estudiado y cumple con los objetivos establecidos.

Para este último fin es frecuente emplear dos técnicas, la primera de ellas, la técnica de estructuración modular, promueve la implementación individual de los modelos, en este caso se podría desarrollar un modelo de degradación por cada material a compostar (Sección 3), así como los modelos de crecimiento de microorganismos para cada agente (Sección 2). En la técnica de incremento en el detalle del modelo, se hace un planteamiento sencillo del modelo y poco a poco se va aumentando su complejidad.

Otro punto importante de la verificación y la validación es la ejecución del programa con distintos conjuntos de datos, estos pueden ser provistos de modo interactivo; el usuario introduce los valores de los datos durante la ejecución del programa, y a través de la pantalla se le presenta directamente la salida producida. En esta parte es importante la participación de los expertos como personas ajenas al desarrollo del modelo, lo cual facilita y acelera su verificación. Otra forma sería a través de procesamiento por lotes, la ejecución se lleva a cabo sin ninguna interacción con el usuario, en esta se proporciona toda la información necesaria para su ejecución de la simulación a través de un archivo.

4.7.5 Experimentar con el modelo

Independientemente del objetivo que haya motivado el estudio de un sistema real(predicción, experimentación y/o enseñanza) a través de un modelo de simulación, una vez que fue validado, el siguiente paso consiste en explotarlo (ejecutarlo) a través de un estudio de simulación.

Si el modelo fue construido de manera adecuada y es alimentado con datos de entrada correctos, conducirá a la obtención de variables de salida con datos correctos. Si no se disponen de datos de entrada para reproducir el comportamiento del sistema, se suelen usar valores aleatorios de las variables de entrada, que siguen distribuciones probabilidad conocidas (distribución exponencial, Poisson). Es necesario realizar una serie de replicaciones y obtener información significativa a partir de ellas. La experimentación con el modelo consiste en generar los datos deseados y realizar un análisis de los índices requeridos, debe ser rigurosa y estadísticamente correcta, si es que se desea obtener información significativa del sistema. A posteriori se hace una analisis de sensibilidad el cual facilita el estudio de posibles cambios en la solución óptima disponible como resultado de hacer cambios en el modelo original a través de la variación de las variables. Finalmente se interpretan los resultados de la simulación con base a estos se toman decisiones acerca del sistema bajo estudio.

La modelación científica tiene el propósito de encontrar, interpretar y validar las representaciones aproximadas de los sistemas que se describen a través de un conjunto de elementos y conceptos, cuyas características y mecanismos de relación se describen con objetos y operaciones matemáticas. Facilitando el desarrollo de modelos bajo diferentes paradigmas, teorías y modelos se dispone de más de un modelo con el cual experimentar y aprender sobre el sistema real.

Si la motivación principal al construir un modelo es la predicción, no se debe buscar que sea exacto en términos de los datos proporcionados y de las suposiciones que le dieron sustentento, pero si lo que se busca es entender el sistema que se va a modelar, el objetivo principal debe ser

la simplicidad. Es mucho más sencillo comprender y visualizar los métodos de simulación que los puramente analíticos.

La simulación representa un medio para reducir costes y el riesgo que puede acarrear el que se realice la experimentación en campo o en un laboratorio. Una vez terminada la construcción del modelo, este puede ser modificado para analizar las variaciones que presenta el sistema bajo diferentes escenarios y parámetros. Lo que representa un ahorro, ya que es más barato mejorar el sistema via simulación que hacerlo directamente en el sistema real.

Entre las desventajas que deben considerarse al desarrollar un modelo, es el tiempo invertido en el aprendizaje de la plataforma sobre la que se va a desarrollar y su validación.

Referencias

- Arnold, M., y Osorio, F. (1998). Introducción a los Conceptos Básicos de la Teoría General de Sistemas. Cinta de Moebio, (3).
- Ballesteros, T. M. (2016). Elaboración de un mejorador de suelos a partir de residuos sólidos orgánicos, lixiviados y biosólidos. Instituto Tecnológico de Toluca. Tesis de grado. México.
- Banks, J., Carson, J., Nelson, B. y Nicol, D. (2001). Discrete-Event System Simulation, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.
- Bertalanffy, V. L. (1989). Teoría General del Sistema. fundamentos, desarrollo, aplicaciones. Fondo de Cultura Económica, México.
- Bialobrzeski I., Mikš-Krajnik M., Dach J., Markowski, M., Czekala W. y Głuchowska, K. (2015). Model of the sewage sludge-straw composting process integrating different heat generation capacities of mesophilic and thermophilic microorganisms. *Waste Management*, 43, 72-83.
- Broenink, J. F. (1999). 20-sim software for hierarchical bond-graph/block-diagram models. *Simulation Practice and Theory*, 7(5), 481-492.
- Brooks, R. A. (1991). Intelligence without Representation. *Artificial Intelligence*, 47, 139-159.
- Bunge, M. (2009). Dos enfoques de la Ciencia: Sectorial y Sistemico. *Revista de la Academia de Ciencias Exactas, Físico-Químicas y Naturales de Zaragoza*, 64, 51-63.
- Caballero, L. (2008). La búsqueda del Comienzo: El pensamiento complejo en Biología. IFUNAM, Universidad Autónoma de la Ciudad de México.
- Cañas, A. J., Ford, K. M., Coffey, J., Reichherzer, T., Carff, R., Shamma, D., y Breedy, M. (2000). Herramientas para construir y compartir modelos de conocimiento basados en mapas conceptuales. *Revista de informática educativa*, 13(2), 145-158.
- Caselles, A. (2008). Modelización y simulación de sistemas complejos. Editorial de la Universitat de València: Valencia, España.
- Castells, X. E. (2012). Vías de tratamiento y valorización de fangos de depuradora: Reciclaje de residuos industriales. Ediciones Díaz de Santos.
- Contreras, A. V. (2007). La organización, el sistema y su dinámica: una versión desde Niklas Luhmann. *Revista Escuela de Administración de Negocios*. (61), 129-155.

- Corchado J. M. y Laza R. (2003) Constructing Deliberative Agents with Case-based Reasoning Technology. *International Journal of Intelligent Systems*. 18(12).
- De la Hoz Manotas, A. (2010). Diseño de un sistema multi-agente para monitoreo de redes utilizando JADE y JPCAP. *INGE CUC*, 6(1), 227-236.
- Domínguez-Ríos, V. A. y M. A. López-Santillán. (2017). Teoría General de Sistemas, un enfoque práctico. *TECNOCENCIA Chihuahua* 10(3), 125-132.
- Dignum F. y Pavón J. (2012), Special issue: Multi-agent Systems Applications in Transports. *Progress in Artificial Intelligence*, 1-1.
- Ferber, J. (1999) Multi-Agent Systems: An Introduction to Artificial Intelligence, Addison-Wesley.
- Fishman, G. S. (1978). Conceptos y métodos en la simulación digital de eventos discretos. LIMUSA, México.
- França R. M., Moreira T. D., Labidi S. y Paiva B. (2008). Análise Comparativa entre as Plataformas Multiagentes JADE e FIPA-OS. *Anais SULCOMP*, 4.
- Freeman, S., Herron, J., 2002. Análisis Evolutivo. Prentice Hall. Madrid.
- García, R. (2007). Sistemas complejos, conceptos, método y fundamentación epistemológica de la investigación interdisciplinaria. Editorial Gedisa. España.
- García-Valdecasas, José I. (2010). La simulación basada en agentes: una nueva forma de explorar los fenómenos sociales. *Revista Española de Investigaciones Sociológicas*, 136: 91-110.
- Garces A.E., Moreno J., y Múnera F.S. (2009) Double auction simulation model using a Multi-Agent Approach. *Revista Avances en Sistemas e Informatica*, 6(1), 1657-7663.
- Gilbert, N. (2004). Agent-based social simulation: Dealing with complexity. Centre for Research on Social Simulation. University of Surrey, Guildford, UK.
- Gilbert N. (2007). Agent-based models. Sociology. The Centre for Research in Social Simulation. University of Surrey, Guildford, UK.
- Harrell, C., y Tumay, K. (1997). Simulation made easy: a manager's guide. Engineering & Management Press.
- Iglesias, C. (2012). Definición de una metodología para el desarrollo de Sistemas Multi-Agente. Tesis doctoral. Departamento de ingeniería de Sistemas Telemáticos, Universidad Politécnica de Madrid. Recuperado de <http://www.upv.es/sma/teoria/agentes/tesiscif.pdf>.

- Izquierdo L. R., Galán J. M., Santos J. I. y Del Olmo, R. (2008). Modelado de sistemas complejos mediante la simulación basada en agentes y mediante dinámica de sistemas. *Empiria. Revista de Metodología de Ciencias Sociales*. 16, 85–112.
- Juárez R. B. (2014). Obtención de composta a partir de biosólidos y residuos sólidos orgánicos con una relación carbono nitrógeno entre 4 y 8 y en tiempo menor a 3 meses. Instituto Tecnológico de Toluca. Tesis de Maestría. México.
- Khater E.G., Bahnasawy A.H., Ali S.A. (2014) Mathematical Model of Compost Pile Temperature Prediction. *J Environ Anal Toxicol*. 4(242). doi: 10.4172/2161-0525.1000242
- Kelton, D.W. y Sadowski, R., (2002) “Simulation with Arena”, 2ª edición, Ed. McGraw-Hill, Nueva York.
- Kendall, J. E. (2005). Análisis y diseño de sistemas. Sexta edición. Pearson educación. México.
- Kornhauser D., Rand W. y Wilensky U. (2007). Visualization tools for agent-based modeling in NetLogo. Agent2007, Chicago, November, 15-17. Recuperado de <http://www.raczynski.com/pn/pn.htm>
- LabView (2017) Software de Desarrollo de Sistemas NI LabVIEW. National Instruments. Recuperado de <http://www.ni.com/labview/esa/>
- Larman C. (2003) UML y Patrones: Una introducción al análisis y diseño orientado a objetos y al proceso unificado. 2da Edición. Pearson Educación S.A. Madrid.
- Yang, L., Li, H. T., y Xiao, X. (2001). LabVIEW program design and application. *Publishing House of Electronics Industry, Beijing*.
- Luangwilai T., Sidhu H. S., Nelson M. I. y Chen X. D. (2011) Modelling the effects of moisture content in compost piles, Proceedings of the 39th Australian Chemical Engineering Conference, Chemeca-2011, Engineers Australia. Recueprado de <http://www.conference.net.au/chemeca2011/papers/411.pdf>
- Macal, C. M., y North, M. J. (2008). Agent-based modeling and simulation: ABMS examples. In Simulation Conference, 2008. Winter. 101-112.
- Maldonado, C. E., y Gómez-Cruz, N. A. (2010). Modelamiento y simulación de sistemas complejos. *Borradores de Investigación: Serie documentos Administración*. (66).
- MATLAB (2017) MathWorks. El lenguaje del calculo técnico. Recuperado de <https://es.mathworks.com/products/matlab.html>

- Menéndez, M. A., y Collado, S. H. (2007). Simulación de procesos sociales basada en agentes software. *Empiria. Revista de metodología de ciencias sociales*, (14), 139-161.
- Moreno C.J.; Velásquez H.J.D.; Ovalle C.D. (2005) Hacia una Metodología para la Construcción de Modelos de Simulación Basados en Sistemas Multi-Agente. *Revista Avances en Sistemas e Informática*, 2(2), 7-15.
- Moreno P.A. (2009). Módulo Teoría General de Sistemas. Primera Edición. Centro Nacional de Medios para el Aprendizaje. Bogota. Columbia.
- Morgan, B. J. (1984). Elements of simulation. Mathematical Institute. University of Kent, Canterbury, UK
- Moss, S. (2008). Alternative approaches to the empirical validation of agent-based models. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 11(1). Recuperado de <http://jasss.soc.surrey.ac.uk/11/1/5.html>
- Ortiz, A., Sarriegi, J. M., y Santos, J. (2006). Modelización de variables soft. *Revista de dinámica de sistemas*, 2(1), 67-101.
- Osorio F., Arnold, M., González L.S., y Aguado L.E. (2008). La nueva teoría social en Hispanoamérica: introducción a la teoría de sistemas constructivista. Centro de Estudios de la Universidad. Colección Pensamiento Universitario No 11.
- Ovalle, D., Guzmán, J., y Pastrana, M. (2005). Simulación Basada en Agentes Inteligentes del Proceso de Negociación del Mercado de Energía Eléctrica en Colombia. *Energética: Revista del Instituto de Energía, Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia*, 33, 25-36.
- Pavón, J., López-Paredes, A., Galán, J.M. (2012). Modelado basado en agentes para el estudio de sistemas complejos. *Novática*. (218), 13-18.
- Railsback, S. F., Lytinen, S. L., y Jackson, S. K. (2006). Agent-based simulation platforms: Review and development recommendations. *Simulation*, 82(9), 609-623.
- Rodríguez Z.L. y Roggero P. (2014). La modelización y simulación computacional como metodología de investigación social, Brasil en la integración de América Latina, Polis. *Revista Latinoamericana*, (39).
- Rovira, C. (2005). El editor de mapas conceptuales DigiDocMap y la norma Topic Maps. Hipertext. net, 3. Recuperado de <https://www.upf.edu/hipertextnet/numero-3/digidocmap.html>
- Ruiz V. N. (2009). Simulación asistida por agentes para sistemas de fabricación inteligentes, Tesis de Grado Doctorado. Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, España.

- Sargent, R. G. (2005). Verification and validation of simulation models. In Proceedings of the 37th conference on Winter simulation. 130-143.
- Sayed E., Khater G. y Ali. S. (2014). Mathematical model of compost pile temperature prediction. *Environmental and Analytical Toxicology*. 4(6), 1-7.
- Shannon R. E., (1988). Simulación de Sistemas. Diseño, desarrollo e implementación. Trillas, México.
- Siles G. I. (2007). Cibernética y sociedad de la información: el retorno de un sueño eterno. *Signo y Pensamiento*. 26(50), 84-99.
- SIMULART (2017) Desarrolle simulaciones rapida y fácilmente con ProModel (23/08/2017) Recuperado de <http://www.simulart.cl/software-de-simulacion/software-promodel/>
- Norvig P. y Russell S. J. (2004). Inteligencia Artificial. Un Enfoque Moderno. (2da Edición) . Editorial Prentice Hall. España.
- Weiss, G. (1999) Multiagent Systems: A Modern Approach to Distributed Artificial Intelligence, Edited by Gerhard Weiss, MIT Press, 1999.
- Wilensky U. (2017) NetLogo 6.0.1 User Manual. Recuperado de <https://ccl.northwestern.edu/netlogo/docs/>
- Wooldridge M. (2009) An Introduction to Multiagent Systems. 2nd Edition, Wiley y Sons. Glasgow.
- Whitten, J. L. B., Lonnie, D., y Barlow, V. M. (2003). Análisis y diseño de sistemas de información. McGraw-Hill Interamericana, México.
- Xi, B., Wei, Z., y Liu, H. (2010). Dynamic simulation for domestic solid waste composting processes. *Academia Arena*, 76.
- Zeigler B., Kim T. y Praehofer H. (2000). Theory of Modeling and Simulation, 2nd ed. ACADEMIC PRESS , San Diego, USA.