

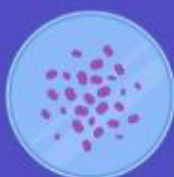


UEB
UNIVERSIDAD
ESTATAL DE BOLIVAR

FUNDAMENTOS TEÓRICOS DE LA FERMENTACIÓN AEROBIA EN EL PROCESO DE OBTENCIÓN DE BIOINSUMOS

Juan Gaibor Chávez
Franz Verdezoto Mendoza
Favian Bayas Morejón
Fabian Rivera Guzman

De desecho a oro negro: la ciencia de la regeneración.



ISBN: 978-9907-0-0519-6

2025

FUNDAMENTOS TEÓRICOS DE LA FERMENTACIÓN AEROBIA EN EL PROCESO DE OBTENCIÓN DE BIOINSUMOS

AUTORES:

JUAN GAIBOR CHÁVEZ

FRANZ VERDEZOTO MENDOZA

FAVIAN BAYAS MOREJÓN

FABIAN RIVERA GUZMAN



Este libro ha sido debidamente examinado y valorado en la modalidad doble par ciego con fin de garantizar la calidad científica.

©Grupo Editorial BLR
Universidad Estatal de Bolívar
Riobamba – Ecuador
Correo: publicaciones@grupobl.com
<https://grupobl.com/libros-investig>
REPOSITORIO



Gaibor, J., Verdezoto, F., Bayas, F. Rivera F. (2025) Fundamentos teóricos de la fermentación aerobia en el proceso de obtención de bioinsumos. Grupo Editorial BLR.

© Juan Gaibor Chávez
Franz Verdezoto Mendoza
Favian Bayas Morejón
Fabian Rivera Guzman

ISBN: 978-9907-0-0519-6

El copyright promueve la libertad de expresión, protege la diversidad de ideas y conocimiento, además apoya la libre expresión. Se prohíbe de manera rigurosa la producción o el almacenamiento de esta publicación, ya sea en su totalidad o en parte, está estrictamente prohibido por ley, incluyendo el diseño de la portada, así como su difusión a través de cualquiera de sus medios, ya sean electrónicos, mecánicos, ópticos, de grabación o incluso de fotocopia, sin permiso de los propietarios de los derechos de autor.

FILIACIONES DE LOS AUTORES

Juan Alberto Gaibor Chávez

Universidad Estatal de Bolívar

Correo Electrónico: jgaibor@ueb.edu.ec

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4516-7416>

Franz Patricio Verdezoto Mendoza

Universidad Estatal de Bolívar

Correo Electrónico: fverdezoto@ueb.edu.ec

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0049-005X>

Isidro Favian Bayas Morejón

Universidad Estatal de Bolívar

Correo Electrónico: fbayas@ueb.edu.ec

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2920-7155>

Edgar Fabián Rivera Guzmán

Universidad Estatal de Bolívar

Correo Electrónico: edgar.rivera@ueb.edu.ec

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2612-4760>

PRÓLOGO

En un mundo donde los desechos se acumulan a un ritmo vertiginoso, amenazando la salud de los ecosistemas y la calidad de vida de las futuras generaciones, surge la urgente necesidad de repensar nuestra relación con lo que consideramos “basura”. Este libro no es solo un tratado técnico sobre compostaje; es un manifiesto científico, una invitación apasionada a transformar lo que descartamos en la base misma de la vida futura. Nace de la convicción profunda de que la solución a la crisis ambiental no está únicamente en tecnologías complejas o políticas globales, sino también en procesos biológicos ancestrales, sabiamente redescubiertos y optimizados por la ciencia moderna. El compostaje, entendido aquí como fermentación aerobia controlada, es mucho más que una técnica de tratamiento de residuos: es un acto de regeneración, un puente entre la economía lineal del “usar y tirar” y la circularidad inteligente que imita los ciclos de la naturaleza. Es la respuesta tangible, viable y profundamente humana a la pregunta de cómo cerrar el ciclo de la materia orgánica, devolviéndole al suelo lo que el suelo nos ha dado.

Este texto se construye sobre la base sólida de un análisis documental exhaustivo, donde cada afirmación, cada modelo matemático, cada recomendación práctica, ha sido cotejada, contrastada y validada contra cientos de estudios científicos, informes técnicos y experiencias de campo de todo el mundo. No se trata de una compilación de buenas intenciones, sino de una síntesis rigurosa del estado del arte. Reconocemos que el compostaje no es un invento reciente; desde las

antiguas civilizaciones chinas y romanas, los agricultores han comprendido el valor de devolver la materia orgánica a la tierra. Sin embargo, en la era del Antropoceno, donde la generación de residuos ha alcanzado niveles críticos —especialmente en países en desarrollo como Ecuador, donde la gestión inadecuada contamina ríos, suelos y afecta directamente la salud humana—, el compostaje debe elevarse de una práctica empírica a una biotecnología de precisión. Este libro asume ese reto, desglosando el proceso en sus componentes fundamentales: la microbiología que lo impulsa, la cinética que lo gobierna, los parámetros físicos y químicos que lo determinan, y los impactos ambientales que lo acompañan, para ofrecer no solo conocimiento, sino también herramientas prácticas para su implementación exitosa.

Está dirigido, en primer lugar, a los estudiantes, a quienes queremos entregar no solo información, sino una forma de pensar: sistémica, crítica y basada en evidencia. Para ellos, este libro es una puerta de entrada a un campo interdisciplinario que combina biología, química, ingeniería y agronomía, mostrando cómo la ciencia puede ser una fuerza transformadora y regenerativa. Para los docentes, es un recurso pedagógico completo, que permite estructurar programas de estudio con fundamentos teóricos actualizados y casos de aplicación concretos. Para los investigadores, es una plataforma de lanzamiento, que identifica vacíos de conocimiento, compara modelos y establece una base sólida sobre la cual construir nuevas líneas de investigación. Y, sobre todo, para los técnicos, agricultores y gestores que día a día ponen las manos en la materia, es una guía práctica, llena de criterios de dosificación, manejo de maquinaria, evaluación de la calidad y estrategias para evitar

errores comunes, como la aplicación de un compost inmaduro que puede dañar más que ayudar.

El propósito trasciende lo académico. Es un llamado a la acción. En un planeta donde los suelos se degradan por el uso excesivo de fertilizantes químicos, donde la pérdida de materia orgánica reduce la capacidad de retención de agua y aumenta la vulnerabilidad al cambio climático, el compost aparece como un agente de restauración. No es un simple sustituto de los fertilizantes sintéticos; es un regenerador integral que mejora la estructura del suelo, aumenta su biodiversidad microbiana, potencia su capacidad de intercambio catiónico y lo convierte en un sistema vivo, resiliente y productivo. Este libro demuestra, con datos y argumentos, que invertir en compostaje no es un gasto, sino una inversión en seguridad alimentaria, en salud ambiental y en justicia social. Transformar residuos en recursos es la esencia de la economía circular, y este proceso es su expresión más pura y accesible.

No ignoramos los desafíos. El compostaje, si no se gestiona correctamente, puede generar emisiones de gases con efecto invernadero, como el amoníaco y el metano, y provocar rechazo social por los olores. Por eso, dedicamos capítulos enteros a la modelación de emisiones y a tecnologías de mitigación, como la biofiltración, que convierten un problema en una oportunidad de innovación. Tampoco escondemos la complejidad. La sucesión microbiana —desde bacterias mesófilas hasta actinomicetos termófilos— es un ballet invisible pero perfectamente coreografiado por la temperatura, la humedad y la relación carbono-nitrógeno. Comprender esta coreografía es la clave para dominar el proceso. Por eso, presentamos, con claridad y

profundidad, los modelos cinéticos de Monod, Haldane, Gompertz y Contois, no como fórmulas abstractas, sino como mapas que permiten predecir, optimizar y escalar el compostaje desde el jardín doméstico hasta la planta industrial.

Este libro es, en esencia, un acto de esperanza fundamentada. En un contexto global de crisis climática y degradación ambiental, ofrece una solución tangible, replicable y profundamente humana. Es un recordatorio de que la naturaleza ya ha resuelto los problemas que nosotros creamos, y que nuestro rol no es dominarla, sino aprender de ella, acompañarla y potenciar sus procesos. Al final de estas páginas, el lector no solo habrá adquirido conocimientos técnicos; habrá desarrollado una nueva mirada, una nueva sensibilidad. Verá en una cáscara de fruta, en una hoja seca, en un residuo agrícola, no un problema, sino una oportunidad; no un final, sino un nuevo comienzo. Porque el compostaje es, en última instancia, una metáfora poderosa: de la descomposición nace la vida; de lo que fue desecho, surge la base de un futuro más fértil, más justo y más sostenible. Este libro es una invitación a participar activamente en esa transformación, una semilla de conocimiento que, al ser plantada, tiene el potencial de germinar en un mundo mejor.

ÍNDICE

PRÓLOGO	i
ÍNDICE	v
ÍNDICE DE TABLAS	xviii
ÍNDICE DE FIGURAS	xix
INTRODUCCIÓN	xx
Metodología utilizada y objetivos	xxvi
Argumentos centrales.....	xxxí
Propósito fundamental	xxxvi
Público objetivo	xxxviii
CAPÍTULO I	41
1 GESTIÓN DE RESIDUOS Y CONTEXTO DEL COMPOSTAJE	41
1.1 Gestión de residuos: Perspectiva del Ecuador	41
1.2 Perspectiva de generación de residuos en la Provincia de Bolívar.....	43
1.3 Fuente de los residuos sólidos orgánicos	45
1.3.1 Residuos agropecuarios.....	47
1.3.2 Residuos sólidos urbanos	48
1.3.3 Residuos sólidos de depuradoras de agua (lodos).....	50
1.3.4 Residuos de incineración	51
1.4 Residuos agroindustriales	53

1.4.1	Clasificación de residuos agroindustriales	54
1.4.2	Caracterización y composición de los residuos Agroindustriales	54
1.4.3	Valorización para los residuos agroindustriales.....	56
CAPÍTULO II.....		57
2	FUNDAMENTOS DEL COMPOSTAJE	57
2.1	Antecedentes del compostaje	57
2.2	¿Beneficios tiene el compostaje doméstico?.....	60
2.3	Métodos de compostaje.....	63
2.3.1	El método Indore (aeróbico)	63
2.3.2	Demarcación del terreno	63
2.4	Etapas del proceso de compostaje.....	67
2.5	Condiciones requeridas para el compostaje	72
2.6	Ventajas del compostaje.....	75
2.7	Desventajas del compostaje	79
CAPÍTULO III.....		81
3	ASPECTOS TÉCNICOS EN EL CONTROL DEL PROCEO DE COMPOSTAJE	81
3.1	Parámetros que se deben tener en cuenta para la preparación del compostaje	83
3.2	Importancia del suministro de oxígeno	86
3.3	Fases del proceso de compostaje	87

3.4	Maduración del compost:.....	88
3.5	Aspectos técnicos en la maduración del compost.....	89
3.6	Propiedades de los parámetros de control en el proceso:.....	91
3.7	Temperatura	91
3.8	Relación C / N.....	95
3.9	Contenido de humedad.....	96
3.10	Aireación.....	98
3.11	Procesos de aireación.....	98
3.12	pH.....	101
CAPÍTULO IV		103
4	MICROBIOLOGÍA DEL PROCESO DE COMPOSTAJE	103
	103	
4.1	Microbiología del proceso de compostaje	103
4.2	Diversidad microbiana de la pila de compostaje	105
4.3	Sucesión microbiana durante el proceso de compostaje.....	106
4.4	Ecología microbiana del proceso de compostaje	111
4.4.1	Sustrato o matriz	111
4.4.2	Temperatura	112
4.4.3	Aireación.....	114
4.4.4	pH.....	115
CAPÍTULO V.....		118

5	CINÉTICA MATEMÁTICA DEL PROCESO DE COMPOSTAJE.....	118
5.1	Modelación matemática para el crecimiento microbiano (Fermentación aerobia)	118
a)	Modelo desarrollado para la fermentación aeróbica	118
5.2	Conceptos cinéticos.....	119
5.2.1	Cinética de crecimiento microbiano	120
5.2.2	Crecimiento de microorganismos	120
5.3	Modelo exponencial.....	122
5.4	Modelo Cinético de Monod	122
5.5	Modelo de Moser	123
5.6	Modelo de Haldane	124
5.6.1	Modelo de Haldane para el crecimiento microbiano	124
5.7	Ecuación logística	125
5.7.1	Ecuación para el crecimiento de biomasa en función del tiempo	126
5.8	Modelo de Teissier.....	126
5.8.1	Modelos de Teissier para el crecimiento microbiano.	127
5.9	Modelo de Contois.....	127
5.9.1	Modelo de Contois para crecimiento microbiano	128
5.10	Modelo de Amrane y Prigent.....	128
5.10.1	Expresión integrada de la ecuación de Amrare y Prigent	129

5.11	Modelos de Powell.....	130
5.11.1	Modelos de Powell para crecimiento microbiano.....	130
5.12	Cinética de Gompertz.....	131
5.12.1	Cinética de 1er Orden	131
5.12.2	Cinética de Gompertz.....	132
5.13	Modelo Cinético de Michaelis Menten.....	132
5.14	Modelo cinético de crecimiento de Edwards	133
5.15	Modelo de Yano y Koga	133
5.16	Modelo de Cono.....	134
5.17	Modelo primario de Gipson para el crecimiento microbiano	134
5.18	Comparación de Modelos	135
5.19	Modelo de Bergter	136
5.20	Modelo de Chen y Hashimoto	137
5.21	Modelos Matemáticos de la Cinética de degradación del sustrato (Fermentación Aerobia).....	138
5.21.1	Cinética de degradación del sustrato.....	138
5.21.2	Modelo de cero orden	138
5.21.3	Modelo de primer orden.....	138
5.21.4	Modelo de segundo orden	139
5.21.5	Modelo de tercer orden del modelo cinético.....	139
5.22	Cinética de consumo de sustrato	139
5.23	Modelación matemática de la fermentación anaeróbica	140

5.23.1	Modelos matemáticos de crecimiento bacteriano	140
5.23.2	Modelado de fermentación y parametrización.....	140
5.24	Modelo de Mitsdörffer	141
5.25	Modelos matemáticos para el crecimiento bacteriano con inhibición por concentración de sustratos	142
5.25.1	Inhibición por concentración de sustratos.....	142
5.26	Modelo de Grant	142
5.27	Modelo de Andrews y Graef.....	143
5.28	Modelo de Webb.....	144
5.29	Modelo de Aiba.....	145
5.30	Modelo de Ierusalimsky	145
5.31	Modelo de Holzberg.....	146
5.32	Modelo de Bazua & Wilke.....	147
5.33	Modelo de Ghose & Tyagi.....	147
5.34	Dagley & Hinshelwood.....	148
5.35	Modelo de Han & Levenspiel	148
CAPÍTULO VI		150
6	MANEJO, DOSIFICACIÓN Y GESTIÓN AGRONÓMICA DEL COMPOST	150
6.1	Valor fertilizante	151
6.2	Composición en nutrientes de los compost.....	153
6.3	Dinámica de los nutrientes en el sistema del suelo	154

6.4	Características químicas del suelo	157
6.5	Características biológicas.....	159
6.6	Criterios de dosificación	160
6.7	Criterio materia orgánica	161
6.8	Los abonos órgano-minerales	163
6.9	Aplicación en el campo del compost	164
6.9.1	Humedad	164
6.9.2	Condiciones atmosféricas	166
6.9.3	Granulometría	167
6.10	Equipos y maquinaria.....	168
6.10.1	Trituradora	169
6.11	Mezcladora de materias iniciales	169
6.11.1	Tractor con pala	169
6.11.2	Volteadoras	170
6.11.3	Línea de cribado.....	170
6.11.4	Ensayadora	171
6.12	Uso del compost como sustrato	171
CAPÍTULO VII.....		173
7	IMPACTO AMBIENTAL DEL COMPOSTAJE: EMISIONES GASEOSAS Y SU MITIGACIÓN.....	173
7.1	Origen de los contaminantes atmosféricos del compostaje .	173
7.2	Nitrógeno	177

7.2.1	Formas del nitrógeno	178
7.2.2	Amomificación.....	179
7.3	Influencia del pH, temperatura y la humedad	181
7.3.1	Evolución de la humedad durante el compostaje.....	185
7.4	Propiedades químicas y físicas del compost	185
7.4.1	Los olores.....	186
7.4.2	Compuestos productores de olores	187
7.5	Características generales de los gases del proceso de compostaje	192
7.5.1	Sistemas de tratamientos fisicoquímicos	193
7.6	Sistemas de tratamientos biológicos	195
7.7	Biofiltración	196
7.7.1	Medios de biofiltración	197
CAPÍTULO VIII		200
8	EFECTO DE LA APLICACIÓN DEL COMPOST SOBRE LAS PROPIEDADES BIOLÓGICAS DEL SUELO.....	200
8.1	Efectos de las comunidades microbianas en el compost y en el suelo	203
8.2	Efecto de la actividad metabólica del compost.....	205
8.3	Efecto de la aplicación de compost en el suelo.....	207
CAPÍTULO IX		213
9	EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DEL COMPOST ..	213

9.1.1	Evaluación de la calidad del compost	213
9.2	Fitotoxicidad	215
9.2.1	Bloqueo biológico del nitrógeno.....	216
9.2.2	Reducción de oxígeno radicular.....	217
9.2.3	Exceso de amonio y nitratos en las plantas y contaminación de fuentes de agua.....	217
9.3	Parámetros ambientales.....	220
CAPÍTULO X.....		222
10	EFECTOS DE LA APLICACIÓN DEL COMPOST SOBRE LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS DEL SUELO.....	222
10.1	Las propiedades físico-químicas del suelo.....	223
10.1.1	Textura	223
10.1.2	Densidad aparente	224
10.1.3	Importancia de la materia orgánica en el suelo.....	224
10.1.4	Índice óptimo de pH.....	225
10.1.5	Micronutrientes	226
10.2	Estrategias para la recuperación y manejo de suelos de ecosistemas agrícolas	226
10.2.1	Abono verde.....	226
10.2.2	Abono orgánico compostado	227
10.2.3	Humus de lombriz.....	227

10.3	Compostaje de residuos verdes	229
10.3.1	Efecto sobre la compactación del suelo	230
10.4	Efectos de la compactación en el espacio poroso del suelo .	231
10.4.1	Efecto sobre los micronutrientes	231
10.5	Efecto sobre la retención y el almacenamiento del agua y suelo	232
10.5.1	Efectos sobre la infiltración la escorrentía y la erosión hídrica del suelo	233
10.6	Efecto sobre la capacidad de intercambio iónico.....	234
10.6.1	Efecto sobre la nutrición nitrogenada	234
10.7	Efectos sobre la regulación del pH y la retención de iones .	235
10.8	Efectos sobre la nutrición fosfórica potásica cálcica y magnésica.....	236
10.8.1	Efecto sobre la productividad agrícola.....	236
10.8.2	Efectos del compost en el suelo	237
10.9	Consideraciones para la mejora del compost y la prevención de efectos negativos	237
10.9.1	Efectos sobre la estabilidad de los agregados del suelo.....	238
CAPÍTULO XI		240
11	INDICADORES DE LA ESTABILIDAD Y MADUREZ DEL COMPOST	240
11.1	Introducción (Estabilidad Biológica “Humidificación” y Madurez)	240

11.1.1	La humidificación del compost.....	242
11.2	La madurez del compost	244
11.2.1	Efectos del compost inmaduro en sistema suelo-planta.....	246
11.2.2	Criterios y métodos propuestos para la determinación del grado de madurez	249
11.3	Indicadores sensoriales de madurez (test de tipo físico).....	250
11.3.1	Temperatura (test de autocalentamiento).....	251
11.3.2	Olor (ausencia de ácidos grasos de bajo peso molecular)....	252
11.3.3	Color (grado de luminosidad valor Y)	253
11.4	Métodos basados para el método de la evolución de parámetros de biomasa microbiana.....	254
11.5	Cuantificación de la microbiota y biomarcadores de la diversidad microbiana	255
11.5.1	Respirometria (consume de O ₂ y emisión de CO ₂)	256
11.5.2	Parámetros bioquímicos de la actividad microbiana (ATP, actividades enzimáticas)	257
11.5.3	Análisis de constituyentes fácilmente biodegradables.....	258
11.6	Parámetros basados en el estudio de la materia orgánica unificada del compost	259
11.6.1	Carbono extraíble.....	260
11.6.2	Ratio AH/ a AF	260
11.7	Indicadores químicos de la madurez	261
11.7.1	Ratio C/N (fase sólida, cot/not).....	261

11.7.2	Ratio C/N (fase soluble en agua, Cw/Nw y Cw/Not)	261
11.7.3	Carbón orgánico soluble en agua (Cw).....	262
11.7.4	Capacidad de intercambio catiónico	263
11.7.5	Ratio N-NH ₄ / N-NO ₃	263
11.7.6	Presencia de compuestos reductores	264
11.7.7	La fitotoxicidad como indicador de madurez (métodos biológicos).....	265
11.7.8	Germinación y elongación de raíces	265
11.7.9	Siembra directa	266
11.8	Cultivo de plantas.....	267
11.8.1	Técnicas instrumentación avanzada.....	267
11.8.2	Espectroscopia infrarroja mediante transformada de Fourier (FT-IR).....	268
11.8.3	Resonancia magnética nuclear de alto campo (rmn)	268
11.8.4	Espectroscopia de fluorescencia	269
11.8.5	Espectroscopia de resonancia magnética nuclear de solidos	270
11.8.6	Espectroscopia de infrarrojo mediante transformada de Fourier (FT-IR).....	271
11.8.7	Termo gravimetría.....	272
11.8.8	Pirolisis analítica y termoquimiólisis con TMAH	273
CAPÍTULO XII.....		274
12	FACTORES QUE AECTAN EL COMPOSTAJE	274

12.1.1	Temperatura	275
12.1.2	Aireación	277
12.1.3	Humedad	279
12.1.4	pH.....	282
12.2	Parámetros relativos a la naturaleza del sustrato	285
12.2.1	Tamaño de partícula.....	285
12.3	Relaciones C/N y C/P	286
	BIBLIOGRAFÍA.....	290

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Contenido de N, P, K en el compost.....	154
Tabla 2. Factores que influyen en el compost.....	184
Tabla 3. Compuestos identificados como emisores de olores en el compostaje.....	189
Tabla 4. Parámetros para evaluar la calidad de un compost dependiendo del uso.....	218
Tabla 5. Parámetros clave para la certificación de calidad de un compost.....	219

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Esquema básico de un proceso de compostaje.	65
Figura 2. Representación gráfica de las tres fases del proceso de compostaje.	69
Figura 3. Fases del proceso de compostaje.	87
Figura 4. Evolución de la temperatura en el compost.	89
Figura 5. Temperatura, oxígeno y pH en el proceso de compostaje. ...	93

INTRODUCCIÓN

La gestión integral de residuos, particularmente la valorización de los desechos orgánicos mediante el compostaje, se ha convertido en un pilar fundamental para la sostenibilidad ambiental y la seguridad alimentaria en el siglo XXI. Frente al crecimiento demográfico, la urbanización acelerada y los cambios en los patrones de consumo, la generación de residuos sólidos urbanos ha alcanzado niveles críticos, convirtiéndose en una problemática social, económica y, sobre todo, ambiental. En países como Ecuador, esta situación se agrava por la insuficiencia de infraestructuras y políticas públicas efectivas, lo que conduce a prácticas inadecuadas como el vertido en ríos y arroyos, contaminando suelos y aguas superficiales, y afectando directamente la salud humana. El marco legal, como el Código Orgánico del Ambiente del Ecuador, establece principios como la “responsabilidad integral” y el “que contamina paga”, pero la brecha entre la normativa y su implementación sigue siendo amplia. En este contexto, el compostaje emerge no solo como una técnica de tratamiento de residuos, sino como una estrategia clave dentro de la economía circular, capaz de transformar un problema ambiental en un recurso valioso para la agricultura y la restauración de ecosistemas degradados. La provincia de Bolívar, con una generación estimada de 27 toneladas diarias de desechos, refleja este desafío nacional, donde la falta de planes de manejo adecuados ha saturado botaderos clandestinos, evidenciando la urgente necesidad de soluciones tecnológicas y comunitarias sostenibles.

El compostaje es un proceso biológico aeróbico controlado, en el que microorganismos descomponen la materia orgánica —proveniente de residuos agropecuarios, urbanos, agroindustriales o de depuradoras de agua— hasta convertirla en un producto estable, higienizado y rico en nutrientes, conocido como compost. Este proceso, lejos de ser una novedad, tiene raíces históricas profundas, practicado desde la antigüedad en civilizaciones como la china, que recolectaban y compostaban todos los desechos domésticos y agrícolas. El compostaje moderno, sin embargo, es un proceso científico que requiere el manejo preciso de parámetros físicos, químicos y biológicos. Estos incluyen la temperatura, que define las fases mesófilas, termófila y de maduración; la humedad, que debe mantenerse entre el 40% y el 60% para facilitar la actividad microbiana sin generar anaerobiosis; la aireación, esencial para suministrar oxígeno y controlar la temperatura; y la relación carbono-nitrógeno (C/N), que debe estar inicialmente entre 25:1 y 30:1 para optimizar la degradación y evitar la pérdida de nitrógeno en forma de amoníaco. La correcta gestión de estos factores no solo acelera el proceso, sino que garantiza la obtención de un producto final de alta calidad, libre de patógenos y fitotóxicos, apto para su aplicación en suelos agrícolas.

La microbiología del compostaje es el motor invisible de esta transformación. El proceso está gobernado por una sucesión dinámica de comunidades microbianas —bacterias, actinomicetos y hongos filamentosos— cuya composición y actividad varían según la temperatura y la disponibilidad de nutrientes. En la fase mesófila inicial, microorganismos como las bacterias *Pseudomonas* y *Bacillus* degradan

los compuestos más lábiles, generando calor. A medida que la temperatura supera los 45°C, entran en juego las bacterias termófilas, que descomponen estructuras más complejas como la celulosa y la lignina, y actinomicetos que atacan ceras y hemicelulosas. Esta fase termófila, que puede alcanzar hasta 70°C, es crítica para la higienización, ya que elimina patógenos, huevos de helmintos y semillas de malezas. Finalmente, en la fase de enfriamiento y maduración, los microorganismos mesófilos y una diversidad de invertebrados completan la estabilización, sintetizando coloides húmicos, hormonas y vitaminas que enriquecen el producto final. Comprender y monitorear esta sucesión microbiana es esencial para optimizar el proceso y garantizar la calidad del compost, ya que la presencia o ausencia de ciertos microorganismos puede indicar el estado de madurez y estabilidad del material.

Para escalar el compostaje desde una práctica doméstica a una solución industrial, es indispensable la modelación matemática y la cinética del proceso. Estos modelos, como los de Monod, Haldane, Gompertz o Contois, permiten predecir y optimizar el crecimiento microbiano, el consumo de sustrato y la producción de biomasa en función de variables como la concentración de nutrientes, la temperatura y la inhibición por productos finales. La ecuación desarrollada por Luini Hurtado, por ejemplo, integra dinámicamente la biomasa, los fertilizantes orgánicos, los productos del metabolismo y la temperatura, ofreciendo una herramienta poderosa para el diseño de reactores y la estandarización de procesos. Estos modelos no solo facilitan la toma de decisiones en la operación de plantas de compostaje, sino que también permiten simular

escenarios, minimizar costos y maximizar la eficiencia, convirtiendo el compostaje en un proceso predecible y controlable desde el punto de vista ingenieril.

Una vez obtenido, el compost debe ser manejado, dosificado y aplicado con criterio agronómico. Su valor fertilizante radica en su capacidad para mejorar no solo la nutrición vegetal —aportando nitrógeno, fósforo, potasio y micronutrientes de liberación gradual— sino también las propiedades físicas y biológicas del suelo. El compost aumenta la porosidad, mejora la retención de agua, reduce la erosión y fomenta la actividad microbiana, creando un ambiente propicio para el desarrollo radicular. Su aplicación varía según el cultivo: desde 1-2 kg/m² en hortalizas hasta 20 ton/ha en suelos altamente degradados.

El compostaje no está exento de impactos ambientales, principalmente en forma de emisiones gaseosas. La liberación de amoníaco (NH₃), metano (CH₄), óxidos de nitrógeno y compuestos orgánicos volátiles (COV) como sulfuros y aminas, es inherente al proceso, especialmente si no se controlan adecuadamente el pH, la temperatura y la aireación. Estos gases no solo contribuyen al efecto invernadero y la acidificación atmosférica, sino que también generan olores que pueden causar rechazo social, particularmente cuando las plantas de compostaje están cerca de zonas residenciales. Para mitigar estos impactos, se han desarrollado sistemas de tratamiento de emisiones, como la biofiltración, que utiliza microorganismos inmovilizados en un soporte inerte para degradar los contaminantes gaseosos, convirtiéndolos en compuestos inodoros e inocuos como CO₂ y agua. La implementación de estas tecnologías, junto con un manejo óptimo del proceso, es esencial para hacer del

compostaje una práctica ambientalmente responsable y socialmente aceptable.

La verdadera medida del éxito del compostaje reside en su impacto sobre el suelo. La aplicación de compost no solo enriquece el suelo con nutrientes, sino que regenera su estructura y su vida. Mejora la estabilidad de los agregados, aumenta la capacidad de intercambio catiónico (CIC), regula el pH y promueve una microbiota diversa y activa, que a su vez suprime patógenos y mejora la disponibilidad de nutrientes. Para que estos beneficios se materialicen, es imperativo evaluar la calidad del compost mediante indicadores de estabilidad y madurez. Estos incluyen parámetros físicos (color, olor, temperatura), químicos (relación C/N, pH, conductividad) y biológicos (índice de germinación, actividad enzimática, producción de CO₂). Un compost inmaduro puede causar efectos fitotóxicos, inmovilizar nitrógeno y reducir la oxigenación radicular, anulando sus potenciales beneficios.

El compostaje es un proceso profundamente influenciado por una multitud de factores interrelacionados. Desde los parámetros ambientales —temperatura, humedad, oxígeno y pH— hasta las características del sustrato —tamaño de partícula, relación C/N y C/P, y contenido de nutrientes—, cada variable debe ser cuidadosamente gestionada. Un tamaño de partícula demasiado grande reduce la superficie de contacto microbiano, ralentizando la degradación, mientras que uno demasiado pequeño puede compactar la pila, limitando la aireación. Una relación C/N desequilibrada puede provocar la pérdida de nitrógeno o un proceso excesivamente lento. La maquinaria utilizada —trituradoras, mezcladoras, volteadoras y cribas— debe estar alineada

con la escala y los objetivos del proceso. En última instancia, el compostaje es un arte que combina ciencia, tecnología y sensibilidad ecológica. Es una respuesta tangible a la crisis de residuos, una herramienta para la regeneración del suelo y un símbolo de la capacidad humana para cerrar ciclos, transformando lo que fue desecho en la base de una nueva vida vegetal, en un acto de sostenibilidad y respeto por el planeta.

Metodología utilizada y objetivos

La construcción de este libro se fundamentó en una metodología rigurosa, sistemática y centrada en el análisis documental, con el propósito de sintetizar, contrastar y actualizar el conocimiento científico y técnico disponible sobre la fermentación aerobia y la obtención de bioinsumos, particularmente a través del compostaje. Reconociendo que el compostaje no es un proceso nuevo, sino una práctica ancestral redescubierta y optimizada por la ciencia moderna, la metodología priorizó la revisión crítica de literatura científica, informes técnicos, normativas nacionales e internacionales, y estudios de caso, con el fin de construir un cuerpo de conocimiento coherente, aplicable y contextualizado, especialmente para realidades como la ecuatoriana, donde la gestión de residuos orgánicos representa un desafío ambiental, social y económico creciente.

El enfoque metodológico se basó en una investigación documental de tipo descriptiva y analítica. Se realizó una búsqueda exhaustiva y selectiva en bases de datos académicas reconocidas (Scopus, Web of Science, Google Scholar, SciELO, ResearchGate, Dialnet, entre otras), utilizando descriptores controlados como “compostaje”, “fermentación aerobia”, “gestión de residuos orgánicos”, “microbiología del compostaje”, “cinética de compostaje”, “madurez y estabilidad del compost”, “impacto ambiental del compostaje” y “aplicación agronómica del compost”, combinados con filtros geográficos (“América Latina”, “Ecuador”) y temporales (priorizando estudios de los últimos 15 años, aunque incluyendo referencias clásicas e indispensables). Esta búsqueda permitió identificar y seleccionar más de

200 fuentes primarias y secundarias, que incluyen artículos científicos arbitrados, tesis de grado y posgrado, libros, manuales técnicos, normativas (como el Código Orgánico del Ambiente de Ecuador, normas chilenas NCh 2880 y colombianas NTC 5167) y reportes de organismos internacionales (FAO, OMS, IPCC).

El análisis documental no se limitó a la compilación de información, sino que implicó un proceso profundo de síntesis, comparación y evaluación crítica. Cada fuente fue examinada para extraer datos relevantes, identificar metodologías empleadas, contrastar resultados y conclusiones, y detectar consensos o controversias en la literatura. Por ejemplo, al abordar la microbiología del compostaje, se analizaron estudios que utilizan técnicas tradicionales de cultivo frente a métodos moleculares modernos (como el análisis de ácidos grasos fosfolípidos o la secuenciación de ADN) para comprender la sucesión microbiana, permitiendo ofrecer una visión integral y actualizada. De igual forma, en el capítulo de cinética, se compararon y contrastaron diversos modelos matemáticos (Monod, Haldane, Gompertz, Contois, entre otros) aplicados en investigaciones previas, evaluando su pertinencia y limitaciones para predecir el comportamiento del proceso en diferentes contextos.

La triangulación de fuentes fue una estrategia clave. Para cada tema central —como los parámetros óptimos de compostaje (humedad, temperatura, relación C/N, aireación), los indicadores de madurez o los impactos gaseosos— se confrontaron los hallazgos de múltiples estudios realizados en distintos países y con diferentes tipos de residuos (urbanos, agroindustriales, agrícolas). Esto permitió establecer patrones generales

y, al mismo tiempo, identificar particularidades contextuales. La información recopilada se organizó temáticamente en capítulos lógicos, que van desde la problemática de los residuos y su marco legal, hasta los aspectos técnicos del proceso, su modelación, su aplicación agronómica y la evaluación de su calidad e impacto ambiental. La redacción de cada capítulo integró esta información de manera coherente, citando y fundamentando cada afirmación en la literatura revisada, asegurando así la validez y confiabilidad del contenido presentado. Este enfoque garantiza que el libro no sea una mera recopilación, sino una obra de síntesis crítica que aporta una visión holística y basada en evidencia del estado del arte del compostaje.

El presente libro, presenta los siguientes objetivos específicos, diseñados para guiar su estructura y contenido hacia una utilidad práctica y académica:

1. Sintetizar y sistematizar el conocimiento científico actual sobre la microbiología involucrada en la fermentación aerobia durante el compostaje. Este objetivo busca identificar, describir y explicar la sucesión dinámica de las comunidades microbianas (bacterias, actinomicetos, hongos) a lo largo de las fases mesófila, termófila y de maduración, basándose en el análisis de estudios que utilizan tanto metodologías culturales como moleculares, con el fin de comprender su papel crucial en la degradación de la materia orgánica y la higienización del producto final.

2. Analizar, comparar y evaluar críticamente los modelos matemáticos y cinéticos existentes para la predicción y optimización del proceso de

compostaje. A través del examen detallado de investigaciones previas, este objetivo pretende presentar las ecuaciones fundamentales (Monod, Haldane, Gompertz, Contois, entre otras), sus supuestos, sus aplicaciones prácticas y sus limitaciones, proporcionando a los lectores las herramientas conceptuales necesarias para seleccionar y aplicar el modelo más adecuado según sus necesidades y recursos.

3. Establecer y fundamentar, a partir de la evidencia documental, los parámetros físico-químicos críticos (temperatura, humedad, pH, relación C/N, aireación) que determinan la eficiencia, estabilidad y calidad del proceso de compostaje. Este objetivo se enfoca en consolidar los rangos óptimos y los efectos de la desviación de estos parámetros, basándose en la comparación de resultados de numerosos estudios experimentales, para ofrecer una guía técnica clara y respaldada por la literatura científica.

4. Evaluar los impactos ambientales, especialmente las emisiones gaseosas (NH_3 , CH_4 , COV), asociados al proceso de compostaje, y revisar las tecnologías disponibles para su mitigación. Mediante el análisis de estudios de caso y reportes técnicos, este objetivo busca identificar las principales fuentes de emisiones, los factores que las intensifican y las mejores prácticas, como la biofiltración, para minimizar la huella ambiental y el rechazo social, transformando un problema en una oportunidad de gestión sostenible.

5. Determinar y describir los indicadores físicos, químicos y biológicos que permiten evaluar la madurez y estabilidad del compost, garantizando su inocuidad y eficacia como bioinsumo. Este objetivo se

centra en recopilar y validar, a partir de protocolos y normas internacionales, una batería de pruebas (índice de germinación, relación C/N, consumo de O₂, presencia de fitotóxicos) que los productores y usuarios pueden aplicar para certificar la calidad del producto antes de su aplicación en el suelo, evitando efectos adversos en los cultivos y el ecosistema.

6. Documentar y analizar el efecto agronómico del compost sobre las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, así como su impacto en la productividad vegetal. Basándose en resultados de ensayos de campo y estudios a largo plazo, este objetivo busca demostrar, con evidencia concreta, cómo la aplicación de compost mejora la estructura del suelo, su capacidad de retención de agua y nutrientes, su actividad microbiana y, en última instancia, el rendimiento y la salud de los cultivos, posicionándolo como un pilar fundamental de la agricultura sostenible y la economía circular.

Argumentos centrales

1. El compostaje es una solución estratégica e integral para la crisis global de residuos orgánicos, especialmente crítica en países en desarrollo como Ecuador. El libro argumenta que la gestión inadecuada de residuos sólidos urbanos, agroindustriales y agropecuarios genera graves problemas ambientales, sanitarios y económicos. Frente a prácticas insostenibles como los vertederos a cielo abierto o la incineración, el compostaje se presenta como una alternativa viable, económica y ecológica que transforma un problema en un recurso valioso, alineándose con los principios de la economía circular y la legislación ambiental (como el “que contamina paga” del Código Orgánico del Ambiente ecuatoriano).

2. La calidad y eficacia del compostaje dependen críticamente del control riguroso de parámetros físico-químicos y biológicos durante todo el proceso. No es un proceso pasivo, sino una biotecnología que requiere manejo científico. Factores como la relación Carbono/Nitrógeno (óptima entre 25:1 y 30:1), la humedad (40-60%), la temperatura (con fases mesófila y termófila controladas), la aireación (para mantener condiciones aeróbicas) y el pH son interdependientes y deben ser monitoreados y ajustados constantemente. Un desequilibrio en cualquiera de ellos puede ralentizar el proceso, generar olores, producir un compost inmaduro o incluso tóxico.

3. La microbiología es el motor invisible y fundamental del compostaje, gobernando la descomposición y la higienización del material. El libro enfatiza que el proceso es conducido por una sucesión dinámica y

predecible de comunidades microbianas (bacterias, actinomicetos, hongos filamentosos) que varían según la temperatura y la disponibilidad de nutrientes. La fase termófila (50-70°C), dominada por bacterias termófilas, es crucial no solo para la degradación de materiales complejos (celulosa, lignina) sino también para la eliminación de patógenos, huevos de helmintos y semillas de malezas, garantizando un producto final inocuo.

4. La modelación matemática y la cinética son herramientas esenciales para profesionalizar, optimizar y predecir el proceso de compostaje a escala industrial. El libro sostiene que el compostaje no debe basarse solo en la experiencia empírica. Modelos cinéticos (como los de Monod, Haldane, Gompertz, Contois) permiten cuantificar y predecir el crecimiento microbiano, el consumo de sustrato y la producción de biomasa. La ecuación desarrollada por Luini Hurtado es presentada como un ejemplo de cómo integrar dinámicamente variables como biomasa, nutrientes, metabolitos y temperatura, convirtiendo el proceso en algo controlable, replicable y económicamente viable desde una perspectiva ingenieril.

5. Un compost de calidad no es simplemente materia orgánica descompuesta, sino un producto estabilizado, maduro y libre de fitotoxicidad, cuya aplicación agronómica debe ser precisa y basada en análisis. El libro argumenta que aplicar compost inmaduro puede ser perjudicial, causando inmovilización de nitrógeno, reducción del oxígeno radicular o fitotoxicidad. Por ello, establece que la madurez (ausencia de compuestos fitotóxicos) y la estabilidad (baja actividad microbiana residual) deben ser evaluadas mediante indicadores físicos

(color, olor, temperatura), químicos (relación C/N final <15, pH, conductividad) y biológicos (índice de germinación >80%). Su dosificación en el campo debe considerar las necesidades del cultivo y las características del suelo para evitar impactos negativos.

6. La aplicación del compost va más allá de la simple fertilización; es un regenerador integral del suelo que mejora sus propiedades físicas, químicas y biológicas. El libro defiende que el compost no es un mero sustituto de los fertilizantes químicos, sino un agente de restauración edáfica. Mejora la estructura del suelo (aumentando la porosidad y reduciendo la densidad aparente), su capacidad de retención de agua y nutrientes, y su actividad biológica. Incrementa la capacidad de intercambio catiónico (CIC) y promueve una microbiota diversa y saludable, creando un ambiente propicio para el desarrollo radicular y la supresión de patógenos, lo que contribuye a una agricultura verdaderamente sostenible.

7. El proceso de compostaje genera impactos ambientales, principalmente emisiones gaseosas, que deben ser gestionados y mitigados. El libro no idealiza el compostaje, reconociendo que la liberación de amoníaco (NH_3), óxidos de nitrógeno, metano (CH_4) y compuestos orgánicos volátiles (COV) es inherente al proceso. Estas emisiones contribuyen al efecto invernadero, la acidificación atmosférica y generan rechazo social por los olores. Por lo tanto, argumenta que una planta de compostaje moderna debe incorporar tecnologías de tratamiento de emisiones, como la biofiltración, para neutralizar estos contaminantes y hacer del proceso una práctica ambientalmente responsable.

8. La valorización de residuos agroindustriales mediante compostaje representa una oportunidad económica y ambiental clave, transformando desechos en productos de alto valor. El libro destaca que residuos como cáscaras de frutas, bagazos, orujos o restos de cosechas, que a menudo son un problema de disposición, poseen un alto potencial para ser convertidos en bioinsumos de calidad. Su compostaje no solo soluciona un problema de contaminación, sino que genera un producto comercializable que puede reemplazar parcialmente los fertilizantes sintéticos, cerrando ciclos productivos y fomentando la bioeconomía en sectores como la agricultura y la agroindustria.

9. La maquinaria y la tecnología son componentes indispensables para escalar el compostaje desde una práctica doméstica a una solución industrial eficiente. El libro argumenta que para producir compost de calidad a gran escala, es necesario un enfoque tecnológico. Equipos como trituradoras (para reducir el tamaño de partícula y aumentar la superficie de ataque microbiano), mezcladoras, volteadoras (para garantizar la aireación y homogeneidad) y cribas (para refinar el producto final) no son lujos, sino inversiones necesarias para optimizar el proceso, reducir tiempos, garantizar la higienización y obtener un producto estandarizado y de alta calidad.

10. La evaluación de la calidad del compost es un paso obligatorio y multifacético que debe preceder a su aplicación, combinando análisis sensoriales, químicos, biológicos y técnicas instrumentales avanzadas. El libro sostiene que no basta con que el compost “parezca” bueno. Su calidad debe ser certificada mediante un conjunto de pruebas. Además de los parámetros básicos, se deben emplear métodos biológicos (como

el índice de germinación con semillas de lechuga o berro) para detectar fitotoxicidad, y técnicas avanzadas (como la espectroscopía FT-IR o la RMN) para analizar la estructura química de las sustancias húmicas formadas, que son indicadores directos de su grado de estabilidad y su potencial beneficio para el suelo.

Propósito fundamental

El propósito fundamental de este libro es posicionar el compostaje, entendido como fermentación aerobia controlada, como una solución científica, técnica y sostenible ante la creciente crisis global de gestión de residuos orgánicos. Frente a prácticas insostenibles como los vertederos a cielo abierto o la incineración —que generan graves impactos ambientales y sanitarios—, el libro argumenta que la transformación biológica de desechos agropecuarios, urbanos y agroindustriales en compost no es simplemente una alternativa, sino una necesidad estratégica. Este enfoque responde directamente a los desafíos planteados en contextos como el ecuatoriano, donde la insuficiencia de infraestructura y políticas públicas ha convertido la acumulación de residuos en una problemática social, económica y ambiental urgente, exigiendo soluciones basadas en evidencia y alineadas con principios legales como el “que contamina paga” y la responsabilidad integral.

Más allá de ser un método de tratamiento de desechos, el libro busca redefinir el compostaje como un proceso biotecnológico de alta precisión, cuyo éxito depende del manejo riguroso de parámetros físico-químicos y biológicos. No se trata de una práctica empírica, sino de una disciplina que integra microbiología, cinética de procesos, ingeniería ambiental y agronomía. También el propósito es dotar a investigadores, técnicos, formuladores de políticas y productores de un marco teórico sólido y actualizado, basado en un análisis documental exhaustivo, que les permita diseñar, optimizar y escalar sistemas de compostaje eficientes. Esto incluye desde la selección y caracterización de materias primas, hasta el control de temperatura, humedad, aireación y relación

C/N, pasando por la modelación matemática del crecimiento microbiano, asegurando así la obtención de un bioinsumo de alta calidad, estable y maduro.

El libro también tiene como propósito demostrar que el producto final —el compost— es mucho más que un simple abono. Es un agente regenerador de suelos degradados, un catalizador para la agricultura sostenible y una herramienta clave en la lucha contra el cambio climático. Al cerrar el ciclo de la materia orgánica, el compostaje no solo evita la emisión de metano en vertederos, sino que devuelve al suelo nutrientes, materia orgánica y vida microbiana, mejorando su estructura, su capacidad de retención de agua y su fertilidad a largo plazo. El libro argumenta que la aplicación adecuada del compost, guiada por criterios agronómicos y de calidad, puede reducir la dependencia de fertilizantes químicos sintéticos, mitigar la erosión y aumentar la resiliencia de los ecosistemas agrícolas, convirtiéndolo en un pilar fundamental de la economía circular y la soberanía alimentaria, y, servir como un puente entre la teoría y la práctica, y entre la ciencia y la comunidad. Al sistematizar y sintetizar conocimientos dispersos en cientos de estudios científicos, el libro no solo educa, sino que capacita. Busca empoderar a sus lectores para que puedan implementar, mejorar o simplemente comprender el compostaje, ya sea a escala doméstica, comunitaria o industrial. Al hacerlo, fomenta una cultura de responsabilidad ambiental, participación ciudadana y gestión sostenible de los recursos, transformando lo que fue un problema —el residuo— en la base de una nueva vida vegetal y, por ende, en un símbolo tangible de sostenibilidad y respeto por el planeta.

Público objetivo

El público objetivo primordial de este libro son los estudiantes universitarios de carreras afines a las ciencias ambientales, agronómicas, agroindustriales, biológicas e ingenierías. Para ellos, la obra constituye un recurso pedagógico integral que sistematiza los fundamentos teóricos, técnicos y prácticos del compostaje, transformando un tema complejo y multidisciplinario en un cuerpo de conocimiento accesible y estructurado. Al basarse en un riguroso análisis documental de estudios científicos actualizados, el libro no solo transmite información, sino que también modela una metodología de investigación, enseñando al estudiante cómo contrastar fuentes, evaluar evidencias y construir argumentos sólidos sobre la fermentación aerobia y la obtención de bioinsumos, preparándolos para enfrentar los desafíos ambientales del siglo XXI con una base científica sólida.

En segundo lugar, el libro está dirigido a docentes y formadores que imparten asignaturas relacionadas con la gestión de residuos, la microbiología ambiental, la agricultura sostenible o la ingeniería sanitaria. Para este grupo, la obra sirve como una herramienta didáctica de alto nivel, que proporciona un marco conceptual actualizado y profundamente fundamentado, ideal para la elaboración de planes de estudio, guías de laboratorio o materiales de apoyo académico. Los docentes encontrarán en sus páginas no solo los principios básicos, sino también los modelos matemáticos avanzados, los indicadores de calidad y los aspectos normativos, lo que les permite adaptar el contenido a diferentes niveles educativos y contextos, desde cursos introductorios

hasta seminarios de posgrado, siempre con un enfoque práctico y basado en la evidencia científica.

Los investigadores y científicos que trabajan en el campo de la valorización de residuos orgánicos, la microbiología del suelo o la sostenibilidad agrícola también constituyen un público clave. El libro, al sintetizar y analizar críticamente cientos de estudios, ofrece una visión panorámica y actualizada del estado del arte, identificando consensos, controversias y vacíos de conocimiento. Esto les permite situar sus propias investigaciones dentro del contexto global, validar sus hipótesis con base en la literatura existente y encontrar inspiración para nuevas líneas de trabajo. La inclusión de modelos cinéticos (Monod, Haldane, Gompertz, entre otros), parámetros de madurez y estabilidad, y técnicas de análisis avanzadas (como FT-IR o RMN) convierte al libro en una referencia técnica indispensable para diseñar experimentos, interpretar resultados y publicar en revistas científicas de alto impacto.

Finalmente, el libro está pensado para técnicos, extensionistas y profesionales que trabajan directamente en la elaboración, gestión o comercialización de compost, ya sea en plantas industriales, proyectos comunitarios o fincas agroecológicas. Para ellos, el contenido ofrece un manual de buenas prácticas basado en ciencia, donde se explican con claridad los parámetros críticos (temperatura, humedad, relación C/N, aireación) que determinan la calidad del producto final. Al comprender la sucesión microbiana, los riesgos de fitotoxicidad y los criterios de certificación, estos profesionales pueden optimizar sus procesos, evitar errores costosos, garantizar la inocuidad y eficacia de sus bioinsumos, y, en última instancia, contribuir de manera más efectiva a la economía

circular y a la regeneración de los suelos, transformando lo que fue un residuo en la base de una nueva vida vegetal.

CAPÍTULO I

1 GESTIÓN DE RESIDUOS Y CONTEXTO DEL COMPOSTAJE

1.1 Gestión de residuos: Perspectiva del Ecuador

La gestión de residuos sólidos urbanos (RSU) en Ecuador ha ido evolucionando a la par de lo que ha ido exigiendo el crecimiento demográfico, la densificación en zonas urbanas, el desarrollo del sector industrial y empresarial y el cambio en los patrones de consumo, entre otros factores. El incremento en la generación de RSU (Responsabilidad Social Universitaria) ha dificultado su gestión al demandar una alta inversión económica, tanto por parte de las administraciones como por parte de empresas privadas.

Resultando hasta el momento en sistemas de gestión insuficientes. En tal sentido, en Ecuador el manejo de los desechos sólidos se ha constituido en una problemática social, económica y sobre todo ambiental para los gobiernos municipales, que son responsables directos de su gestión. Esta situación favorece las prácticas inadecuadas de manejo de RSU, como el vertido en arroyos y ríos, que producen graves problemas de contaminación en el suelo y las aguas superficiales. Como resultado de ello se presentan afecciones a la salud humana y al medio ambiente en todos los países en vías desarrollo, que se concretan también en Ecuador.

En el artículo 9 del Código Orgánico del Ambiente (COA) (Suplemento Registro Oficial No. 983 emitido el 12 de abril de 2017) en su Título II

de los Derechos, Deberes y Principios Ambientales expone que “los principios ambientales deberán ser reconocidos e incorporados en toda manifestación de la Administración pública”. Con relación a la gestión de residuos, se reconoce el principio de responsabilidad integral, es decir, para toda actividad que genere o pueda generar impactos ambientales, en todas las fases de la actividad, esto es desde su generación hasta su disposición final. Se incluye la aplicación del principio ambiental “de la cuna a la tumba” y “el que contamina paga”, mediante la incorporación en los costos de producción de todas las medidas ambientales necesarias (ya sea para: prevenir, evitar o reducir) a fin de precautelar cualquier tipo de contaminación en el medio ambiente.

En la actualidad, la gestión de los residuos sólidos representa uno de los principales desafíos de los sistemas económicos a nivel global, no solo por la cantidad en la que se producen en campos y ciudades, sino por su naturaleza diversa; el peligro que representan para la salud humana y la estabilidad de los ecosistemas; y por las condiciones con las que cuenta cada región o gobierno en lo pertinente a tecnología, personal y recursos financieros para su recolección, transporte, almacenamiento y disposición final. La contaminación ambiental debido a los residuos sólidos es en uno de los problemas más graves de la actualidad, principalmente en los países en vías de desarrollo. La urbanización, industrialización y el progresivo crecimiento de la población son los principales responsables del incremento de la generación de residuos sólidos, además de un desafío en sí mismo para lograr un desarrollo sostenible. Actualmente el mundo genera

anualmente alrededor de 1,3 billones de toneladas de residuos sólidos incluyendo los industriales, comerciales, residenciales, institucionales, municipales y se espera que se incremente a aproximadamente 2,2 billones de toneladas por año hacia el 2025. Por otra parte, las aguas residuales son consideradas también un problema global, con experiencias diversas como en África y Asia donde son la causa de muchas enfermedades o en China y Europa donde la eutrofización ya es evidente. Según un reporte realizado por el Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático se estima que en el 2010 el sector de residuos sólidos y aguas residuales aportó aproximadamente el 3 % de las emisiones globales de los Gases de Efecto Invernadero (GEI), con la mayor contribución por emisiones de metano (CH₄) en los rellenos sanitarios, que representan la mayor fuente antropogénica y un importante contribuyente al calentamiento global.

1.2 Perspectiva de generación de residuos en la Provincia de Bolívar

En la provincia Bolívar no se cuenta con registros sobre la producción diaria de desechos sólidos, pero según el Gobierno Autónomo Descentralización del cantón Guaranda (GAD-G) se produce una cantidad 540 toneladas de desechos sólidos al mes, y de 27 toneladas diarias, generado así un límite limitado de desarrollo sustentable en cuanto a los desechos sólidos.

En la provincia Bolívar se depositan entre 3 y 5 toneladas de basura producidas por sus 5 000 habitantes, estos desechos pueden ser orgánicos e inorgánicos ya que existe una cantidad desmesurada de

basura y el manejo por los cantones no son tratados de una buena manera de control sin ningún plan de manejo de desechos posterior así se incrementa los botaderos de basura clandestinas dejando como saldo la saturación de basureros, consigo se obtiene un desgaste al ambiente y a todo el ecosistema en general.

La generación de residuos puede tener variaciones dependiendo de las dinámicas de consumo de la población o de la modificación de los hábitos sociales; estas variaciones se trasladan a las etapas de gestión, las cuales deberán adecuarse a los cambios de los ciudadanos. A partir de la reciente situación impuesta por la pandemia del COVID-19 en Colombia, las personas han tenido que realizar cambios en sus dinámicas de vida. ‘Quedarse en casa’ pasó de ser una medida de autocuidado a una orden derivada del aislamiento preventivo impuesto por el Gobierno local y nacional. Sin duda, estas decisiones han de tener repercusiones sanitarias y ambientales en lo referente a la generación y manejo de los residuos sólidos.

La adecuada gestión de los residuos sólidos es agenda de trabajo para el desarrollo sostenible. América Latina ha adoptado políticas y promulgada normatividad que han llevado a la prohibición de botaderos a cielo abierto, la incorporación de los recicladores al proceso de gestión y el intento de reducir la cantidad de residuos generados. En este artículo se analiza la correlación entre la generación de residuos sólidos urbanos y algunas variables en nueve ciudades de la región, entre el 2007 y el 2014, utilizando estadísticas oficiales de cada país. Se encuentra que el ingreso por habitante y la tasa de cobertura escolar se correlacionan significativamente. Se concluye la importancia de generar conciencia en

los ciudadanos respecto a su papel en la reducción de residuos sólidos generados.

Ambiental-residuos y cambio climático. El impacto ambiental del inadecuado manejo de residuos a nivel local ya ha sido destacado. A nivel global el sector residuos contribuye a la generación de gases de efecto invernadero (GEI), favoreciendo el cambio climático.

En tanto los gases generados por el transporte de los residuos no se contabilizan en el sector, la mayor contribución se produce en los rellenos sanitarios por la descomposición anaeróbica de éstos. La tendencia que se ha observado de reemplazar los basurales a cielo abierto por rellenos sanitarios, unida al crecimiento de la población y al aumento en la cantidad de residuos, conducirá inevitablemente al incremento de la generación de GEI.

Esto solamente será evitado con políticas que conduzcan a una gestión integral de residuos, donde los conceptos de minimización, reúso y reciclado cobren relevancia. Además, se deberá incorporar a los rellenos sanitarios aquellas tecnologías que permitan una captación activa del biogás para su posterior quemado a través de antorchas o para la generación de energía.

1.3 Fuente de los residuos sólidos orgánicos

Los residuos quedan definidos por una o más de estas características: corrosividad, reactividad, explosividad, toxicidad, inflamabilidad y biológico infeccioso. Por sus características físicas, químicas o biológicas pueden o no ser acoplados a procesos de recuperación o

transformación, y en casos extremos tratarse para su incineración o confinamiento controlado. Independientemente de su origen o estructura, los residuos sólidos son factibles de reutilizarse, recuperarse o reciclarse. La tecnología disponible, el nivel de concientización y los recursos legales son factores decisivos para llevar a cabo algún método de gestión.

De acuerdo con la fuente generadora, estos pueden ser:

- Residuos agropecuarios.
- Residuos sólidos urbanos.
- Residuos sólidos de depuradoras de agua (lodos).
- Residuos de incineración.
- Residuos agroindustriales.

Los elementos considerados para definir qué son los residuos orgánicos difieren entre Canadá, Estados Unidos y México. Por ello, y a fin de orientar el alcance y contenidos del informe, el término “residuo orgánico” —según su aplicación en el presente trabajo— se refiere a todo aquel material que proviene de especies de flora o fauna y es susceptible de descomposición por microorganismos, o bien consiste en restos, sobras o productos de desecho de cualquier organismo, se centra en categorías específicas de residuos orgánicos, a saber: desechos alimentarios (es decir, comida desechada y cualquier parte no comestible de un alimento), desechos de jardín (por ejemplo, hojas y

recortes de hierba), cartón y otros productos de papel, desechos de madera (salvo escombros de construcción y demolición) y desechos de mascotas. Sobre aclarar que los residuos orgánicos no incluyen metales, vidrio ni plásticos derivados del petróleo. Se excluyen además textiles, pieles y plásticos derivados del petróleo, así como el estiércol y los biosólidos provenientes del tratamiento de aguas residuales, excepto cuando un tipo de residuo orgánico (conforme a la definición recién dada) se somete a codigestión con estiércol o biosólidos, y también salvo los casos en que la referencia corresponde específicamente a México, donde el análisis sí comprendió estos tipos de desechos en específico.

1.3.1 Residuos agropecuarios

Son aquellos generados mediante las actividades agrarias, ganaderas o silvícolas. Estos residuos son utilizados habitualmente en el marco de explotaciones, generando una vocación de la materia prima, ya sea con fine de abono o con destino a la alimentación animal.

Las características y composiciones que nos brindan estos residuos agropecuarios, varían según la especie cultivada, ya sea de parte vegetal que se trate o del origen del residuo que se obtenga

La generación de residuos se está incrementando a nivel global y su deficiente aprovechamiento provoca serios problemas ambientales, económicos y sociales. El objetivo del presente trabajo fue analizar el estado del arte de los residuos sólidos urbanos, agrícolas y pecuarios en cuanto a cantidad y composición, así como analizar el concepto de biorrefinerías desde su diseño como una alternativa sostenible para el

aprovechamiento de materias primas residuales. La consulta de la información se realizó en diferentes bases de datos como Web of Science, Scopus y Google Scholar. El análisis de la información permitió identificar que los residuos se producen en cantidades considerables y poseen compuestos orgánicos de valor, que son aprovechados en mayor o menor proporción de acuerdo con factores tecnológicos, culturales y socio-económicos en cada región particular. Son necesarias nuevas políticas para la gestión integral de los residuos sólidos que integren el concepto de biorrefinerías desde la generación y separación en la fuente hasta su aprovechamiento y disposición final. La implementación adecuada de procesos físicos, termoquímicos, químicos y biológicos bajo el concepto de biorrefinerías puede recuperar o transformar de forma integral las materias primas residuales para la obtención de productos como biocombustibles, alimentos y energía. Se hace necesario diseñar biorrefinerías para determinar su viabilidad en el aprovechamiento de los residuos. Explorar este tipo de alternativas evaluando diferentes factores (tecnológico-económico, ambiental y social), puede apoyar la toma de decisiones de inversión e investigación en tecnologías de aprovechamiento para ser implementadas a pequeña o gran escala en regiones de Colombia y el mundo con gran disponibilidad de residuos.

1.3.2 Residuos sólidos urbanos

Los residuos sólidos urbanos son aquellos que se originan en los núcleos de población como consecuencia de la actividad habitual y diaria del ser humano. Se clasifican en dos grandes grupos: Residuos Sólidos Urbanos, RSU, y Aguas Residuales Urbanas, ARU. Las principales

aplicaciones de estos residuos son como fuente de energía, aprovechándolos directamente o transformándolos en otras sustancias combustibles, o como materia prima, para someterlos a un proceso de reciclado y generar otros productos.

Los residuos sólidos urbanos constituyen un caso singular dentro de la biomasa. De acuerdo con la definición de biomasa, sólo la parte orgánica de los residuos sólidos urbanos puede ser considerada como tal. Así, la valoración energética de los residuos sólidos urbanos constituye uno de los últimos pasos en el proceso de eliminación de estos residuos. Los residuos sólidos urbanos tienen una composición muy variable, pero el contenido en materia orgánica suele ser del orden del 50%, dependiendo sobre todo del tamaño de la población y de su nivel de vida. Al aumentar ambas magnitudes, la tendencia es una disminución en el contenido de materia orgánica.

La gestión de la recolección de los residuos sólidos urbanos básicamente está referida al conjunto articulado de acciones a desarrollar desde el ámbito económico, operativo, administrativo, social, de supervisión, monitoreo y educación que permitan el manejo de los residuos sólidos urbanos desde su generación hasta su disposición final para obtener beneficios ambientales. En el Ecuador, desde el año 2002 hasta el 2010 la situación a nivel nacional no había variado significativamente, de un total de 221 municipios, 160 disponían sus desechos en botaderos a cielo abierto, perjudicando y contaminando los recursos suelo, agua y aire; con la consiguiente afectación a la salud de la población y en especial de los grupos de minadores que trabajaban en condiciones inadecuadas. Los restantes 61 municipios, presentaban un manejo de sus desechos con

insuficientes criterios técnicos, en sitios de disposición final parcialmente controlados. Bajo este contexto, el Gobierno Central a través de su Ministerio del Ambiente, en abril del año 2010, crea el Programa Nacional para la Gestión Integral de Desechos Sólidos, con el objetivo primordial de impulsar la gestión de los residuos sólidos en los municipios del Ecuador, con un enfoque integral y sostenible; con la finalidad de disminuir la contaminación ambiental, mejorando la calidad de vida de los ciudadanos e impulsando la conservación de los ecosistemas; a través de estrategias, planes y actividades de capacitación, sensibilización y estímulo a los diferentes actores relacionados.

1.3.3 Residuos sólidos de depuradoras de agua (lodos)

Los lodos consisten en una mezcla de agua y sólidos separada del agua residual, como resultado de procesos naturales o artificiales. En las estaciones depuradoras que reciben aguas residuales urbanas, en las fosas sépticas y en otras estaciones depuradoras de aguas residuales que traten aguas de composición similar (principalmente de la industria agroalimentaria).

Existen ciertos factores que acentúan estos tiempos de retención de metales pesados en el suelo, como son los suelos básicos con altos niveles de carbonatos. En esta línea, algunos estudios han demostrado que la migración de estos elementos es prácticamente insignificante. Otros autores han demostrado que pequeñas cantidades de Zn, Cr, Cu y Cd se lixivian a través del suelo. Estos hechos parecen indicar que

existen ciertas propiedades del suelo, tales como la materia orgánica y el pH, afectan directamente sobre la movilidad.

Una estación depuradora de aguas residuales, o EDAR, es una planta de tratamiento de agua dedicada a la depuración de aguas residuales cuyo objetivo fundamental es recoger las aguas de una población o de un sector industrial, y eliminar las sustancias contaminantes de esta para, posteriormente, ser devuelta al ciclo del agua, bien mediante desagüe al mar o bien mediante su reutilización directa. Entre las distintas sustancias que se han de eliminar, se encuentran residuos, aceites, arenas y distintos sólidos sedimentables, compuestos con nitratos, amoníaco y fosfatos, entre otros. El problema es, como se mencionará a continuación, que las EDAR convencionales no se diseñan para la eliminación de contaminantes de carácter emergente.

1.3.4 Residuos de incineración

La incineradora es una instalación dónde se produce la combustión controlada a temperaturas muy elevadas (más de 850°C) de la fracción rechazo (contenedor gris) o de los rechazos de otras plantas de tratamiento, como de la planta de envases o rechazos de los Ecoparques (material que no se puede reciclar), entre otras. Toda la materia que entra en la planta incineradora se transforma en cenizas, escorias y gases, obteniendo la energía de la combustión que se puede transformar en electricidad (calentando agua y con una turbina) o en climatización (de frío o calor).

Esta tecnología aporta una serie de ventajas:

- Reducción en peso y volumen (95%) de los residuos.
- Alta disponibilidad y fiabilidad.
- Valorización energética de los residuos.
- Disminución de la necesidad de vertederos.
- Valorización de escorias y cenizas.

Sin embargo, las incineradoras requieren un coste elevado en sentido económico y de salud. Entre los inconvenientes destacan:

- Altos costes de explotación (250 millones de euros para una planta de tratamiento de unas 450.000 ton/año).
- Sistema de tratamiento de gases complejo y costoso.
- Tiempos largos de preparación del proyecto y de construcción.
- Rechazo social ya que existen grandes cuestionamientos con respecto a los impactos ambientales. No existen parámetros claros para medir la cantidad de gases que se emiten y de cómo pueden estos contaminar. Además, las cenizas resultantes son altamente tóxicas.

La incineración es una técnica de tratamiento de residuos que permite reducir su volumen, su peso y modificar su composición. Consiste en someter los residuos a un proceso de oxidación a elevada temperatura. Funciona así: a través del calor, los componentes orgánicos de los desechos reaccionan con el oxígeno del aire y se transforman en dióxido

de carbono y agua. Es posible obtener de este proceso energía térmica y/o eléctrica, sin embargo, al mismo tiempo también se producen emisiones altamente tóxicas al aire y se liberan nanopartículas tóxicas. Las emisiones contaminantes producidas por los incineradores incluyen metales pesados tóxicos, dioxinas y furanos.

1.4 Residuos agroindustriales

Los residuos agroindustriales están considerados entre los recursos renovables más importantes para la obtención de productos de interés económico y social, siendo sometidas a procesos de transformación para poder reducir el impacto ambiental negativo de su emisión, vertimiento o descomposición. Según estos desechos poseen un alto potencial para ser aprovechados al máximo en diferentes procesos que incluyen elaboración de nuevos productos, también aportar valor agregado a los productos originales y recuperar condiciones ambientales alteradas ya que se puede convertir en algo positivo para el medio que nos rodea.

Siendo así de esta manera nos dice que se puede decir que los residuos agroindustriales son materia en estado sólido o líquido que se generan a partir del consumo directo de productos primarios o durante su industrialización, y que ya no son de utilidad para el proceso que fueron generados, pero que son susceptibles de aprovechamiento o transformación para generar otro producto con valor económico de interés comercial, social y ambiental.

1.4.1 Clasificación de residuos agroindustriales

- **Residuo inerte:** Son los residuos sólidos o pastosos que una vez depositados en un vertedero no experimentan transformaciones físico-químicas o biológicas significativas.
- **Residuos de alimentos:** Como cáscara de huevo y de frutos secos, restos de comida en mal estado, pieles, restos de verdura y fruta, huesos, restos de carne, restos de café e infusiones, restos de pescado y de mariscos.
- **Residuos de papel:** Pañuelos de papel, papel de cocina sucio, servilletas de papel sucias, restos de periódicos, libros en mal estado.
- **Restos de vegetales pequeños:** Como ramos, flores marchitas y hojas secas, hierbas malas, césped, ramas de poda y hojarasca.
- **Restos de materiales** que puedan servir para la composta, como bolsas, excrementos de caballo y de aves.
- **Restos de la naturaleza:** Como aserrín, restos de madera, de ramas de árboles en mal estado, de palmeras quemadas por el sol.

1.4.2 Caracterización y composición de los residuos Agroindustriales

Los residuos agroindustriales o desecho orgánicos se caracterizan por los factores importantes en la fertilidad del suelo, sin embargo, los residuos tienen alto contenido de metales pesados, principalmente

plomo y a menudo muestran una fuerte fitotoxicidad, atribuida a la presencia significativa de ácidos orgánicos (láctico y acético) y etanol. Una vez extraído los desechos (pastas sólidas/orujos) son utilizados como materia prima para la fermentación y producción de enzimas hidrolíticas (celulasas, xilasas y pectinasas), usando *Aspergillus awamori*, así como materia prima de procesos de compostaje, adversos, derivado de la liberación de varios productos de degradación que inhiben el crecimiento sobre el proceso de compostaje de residuos lignocelulósicos fraccionados en celulosa, hemicelulosa y lignina, que han demostrado la reducción fitotóxica en residuos agroindustriales.

Los residuos líquidos de la agroindustria también forman parte de esta lista y tienen gran cantidad de nutrientes y materia orgánica, por lo cual pueden ser utilizados como fertilizantes de suelos.

La caracterización y composición de los residuos agroindustriales es importante ya que de esta manera podremos saber cuál es el porcentaje de cada desecho obtenido, para ello se determina el contenido de sólidos totales, ceniza, lignina, holocelulosa, extractivos, pH, de carga cero y los grupos ácidos y básicos totales de los materiales.

Siendo de esta manera en la presente caso estudio se desarrolla una investigación con el fin de obtener el conocimiento necesario acerca de la caracterización del compost, para que pueda ser empleado de una manera sostenible en el suelo, y así poder obtener un suelo productivo, saludable y que con el tiempo no se degrade con algún tipo de fertilizante ya que el producto a obtener tiene que ser de procedencia natural, de esta manera se seleccionan los residuos agroindustriales según la

disponibilidad y los problemas ambientales que se da a partir de estos, según una vez realizada la selección de los residuos, se realiza la caracterización de los materiales, mediante los ensayos de densidad, masa unitaria (compactada y suelta).

1.4.3 Valorización para los residuos agroindustriales

Si bien es cierto la valorización para estos residuos se da de tres maneras que componen valorización química y biológica, ya que este nos permite efectuar la disposición final de los residuos orgánicos para obtener gases, y según entre los más comunes y usados para la obtención del compost son los procesos biológicos, ya que este producto es el un producto final obtenido mediante un proceso de descomposición biológica de la materia orgánica, en el que se controlan las condiciones de humedad y temperatura, que oscilan entre 50° y 70°C, provocando así la destrucción de los elementos patógenos y por tanto provocando la inocuidad del producto, este tipo de material obtenido puede ser utilizado con el fin de mejorar suelos o como un abono.

Los residuos cítricos agroindustriales, producto de la elaboración de alimentos y refrescos en el mundo, se ha convertido en una amenaza para el medio ambiente, si bien alrededor del 45% del fruto es pulpa y principal motivo por el cual esta fruta es cultivada, del mismo modo el sobrante debe ser dispuesto para nueva recirculación o aprovechamiento a fin de que este no genere dificultades en su disposición final terminando en rellenos sanitarios, lo cual produce mayor consumo de insumos y energía en el proceso incineración, uso de biodigestores por ende mayor riesgo de contaminación en los recursos naturales.

CAPÍTULO II

2 FUNDAMENTOS DEL COMPOSTAJE

2.1 Antecedentes del compostaje

Según manifiesta que el compostaje era practicado en la Antigüedad. Desde hace miles de años, los chinos han recogido y compostado todas las materias de sus jardines de sus campos y de sus casas, incluyendo materias fecales. En el Oriente Próximo, en las puertas de Jerusalén había lugares dispuestos para recoger las basuras urbanas: unos residuos se quemaban y con los otros se hacía compost. El descubrimiento, después de la Primera Guerra Mundial, de los abonos de síntesis populariza su utilización en la agricultura. En los últimos años se ha puesto de manifiesto que tales abonos químicos empobrecen la tierra a mediano plazo.

El compostaje es " La descomposición biológica aeróbica controlada de La materia orgánica en un producto estable, similar al humus, llamado compost es esencialmente el mismo proceso que la descomposición natural, excepto que es mejorado y acelerado mediante la mezcla de desechos orgánicos con otros ingredientes para optimizar el crecimiento microbiano".

El compostaje se realiza mediante la descomposición aeróbica esto se produce con la oxidación completa del material descompuesto, quedando este transformado en materia inorgánica.

Este proceso transforma de una manera segura la mayoría de residuos orgánicos en descomposición, que tienen que estar en condiciones aeróbicas para su proceso en insumos agrícolas que se emplean para mejorar la estructura del suelo y proporcionar nutrientes esenciales.

De acuerdo con la Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) el proceso de compostaje permite convertir la materia orgánica residual de procesos que se generan de las explotaciones agrícolas (restos de cosecha, estiércol, pasto, comidas entre otros), en abono orgánico de gran calidad que normalmente terminan en prácticas habituales, las cuales son la quema, el enterramiento o el abandono del material a la intemperie hasta su pudrición.

Es un proceso aeróbico (es el proceso biológico más frecuentemente utilizado para la conversión de la fracción orgánica a un material húmico estable conocido como compost) que mediante los microorganismos se convierte en un abono orgánico similar al humus.

Para dicha elaboración del compostaje el método más utilizado es el proceso aeróbico por la cual los microorganismos los convierten los residuos, en abono orgánico. Se trata de un producto de aspecto terroso, ausente de olores y libre de microorganismos patógenos y de semillas y que puede emplearse en múltiples aplicaciones como abono de fondo, sustituyendo a los fertilizantes químicos tradicionales, más agresivos con el medio. Los fertilizantes entregan dosis rápidas e intensas de nutrientes a las raíces de la planta, pero en el proceso pueden inhibir el desarrollo radicular; mientras que el suelo enriquecido con compost promueve el desarrollo radicular sano y abundante.

La palabra compost viene del latín componere, juntar; por lo tanto, es la reunión de un conjunto de restos orgánicos que sufre un proceso de fermentación y da un producto de color marrón oscuro, es decir, que en él el proceso de fermentación está esencialmente finalizado el abono resultante contiene materia orgánica, así como nutrientes: nitrógeno, fósforo, potasio, magnesio, calcio y hierro, necesarios para la vida de las plantas. El compost es un tipo de tierra hecha a base de desechos orgánicos se obtiene a partir de un proceso llamado compostaje, en el cuál, microorganismos van descomponiendo la materia orgánica hasta formar tierra, es rico en nutrientes para el desarrollo de la planta.

El compostaje era practicado en la antigüedad, desde hace miles de años, los chinos han recogido y compostado todas las materias de sus jardines de sus campos y de sus casas, incluyendo materias fecales mientras que, en el oriente, en las puertas de Jerusalén había lugares dispuestos para recoger las basuras urbanas: unos residuos se quemaban y con los otros se hacía compost.

De forma tradicional, durante años, los agricultores han reunido los desperdicios orgánicos para transformarlos en abono para sus tierras compostar dichos restos no es más que imitar el proceso de fermentación que ocurre normalmente en un suelo de un bosque, pero acelerado y dirigido el abono resultante proporciona a las tierras a las que se aplica prácticamente los mismos efectos beneficiosos que el humus para una tierra natural. El desarrollo de la técnica de compostaje a gran escala tiene su origen en la india con las experiencias llevadas a cabo por el inglés Albert Howard desde 1905 a 1947.

El compost se viene realizando desde la antigüedad ya que se lo realiza de los desperdicios domésticos, ramas, hojas de los jardines esto lo realizan los agricultores, de una forma tradicional para transformarlo de abono para sus tierras. El compostaje es un proceso aeróbico, productor de calor y controlado en qué los microorganismos convierten un sustrato orgánico mixto en CO₂, Agua, nutrientes inorgánicos y materia orgánica estabilizada.

El compost debe ser de alta calidad, es decir, estable, maduro y libre de salud y riesgos ambientales para ser considerado beneficioso para el suelo o para ser responsable de ventajas asociadas como la mejora de la capacidad nutritiva del suelo y la actividad supresora de enfermedades la calidad de la materia orgánica y de ahí la valor como fertilizante, las características físicas y la biología la estabilidad y la calidad de los compost dependen de parámetros multivariados, como la fuente de materia prima, las proporciones utilizadas, el procedimiento de compostaje y el tiempo de maduración. o las condiciones y el tiempo de compostaje, influyen en la madurez o la calidad de los compost.

El compost para ser de calidad debe cumplir todas sus etapas es decir tiene que estar estable y maduro para esto depende de los parámetros multivariados, como la fuente de materia prima, como se lo realiza el compostaje y sobre todo el tiempo.

2.2 ¿Beneficios tiene el compostaje doméstico?

El compostaje doméstico se realiza a nivel familiar, en el jardín, terraza, huerta o cualquier otro lugar apropiado, a partir de cantidades pequeñas

de residuos y mediante los sistemas más sencillos. Emprender la práctica de realizar compostaje doméstico significa una aportación individual importante de cara a la preservación del medio y sin duda, una satisfacción personal, porque nos permite cerrar el ciclo de la materia orgánica y colaborar en uno de los aspectos más conflictivos del tratamiento de residuos. Desarrollando esta actividad, somos consecuentes con la problemática creciente de generación de residuos.

El compostaje presenta numerosas ventajas, tanto el realizado en planta industrial, como el realizado a nivel doméstico. Estas ventajas son principalmente de tipo ambiental:

Cierre del ciclo de la materia orgánica.

- Recuperación y reciclaje de recursos naturales.
- Reducción de la cantidad de residuos sólidos urbanos destinados a vertedero e incineración, evitando así problemas de contaminación de suelos por lixiviados orgánicos y emisiones provenientes de la descomposición en vertederos y la quema en incineradoras.
- El compost fruto de este proceso favorece la productividad de la tierra sin contaminarla con químicos dañinos para los ecosistemas que acaban incorporándose a nuestra cadena alimentaria. Se trata de un fertilizante natural, corrector de la estructura del suelo, protector contra la erosión y sustrato de cultivo.

- También se puede utilizar en las zonas ajardinadas y de recreo para proteger y mejorar sus necesidades de fertilización.
- El compost inmaduro o triturado de restos de poda también se puede utilizar como acolchado en plazas municipales, alcorques, etc., dotando al municipio de espacios más en consonancia con la naturaleza.
- La calidad de compostaje doméstico es mejor que la de una planta industrial ya que la selección previa para el compostaje doméstico es más cuidadosa. Cada etapa del proceso es supervisada por el beneficiario de la obtención del compost final.
- El transporte de los residuos a planta no es necesario, por lo que se reduce la cantidad de camiones de la basura necesarios en cada municipio, y con ello las emisiones de los mismos.
- Reduce los residuos orgánicos y ayuda a las plantas.
- Reduce los olores y la cantidad de materia orgánica de la basura doméstica que va a los vertederos.
- Reduce costes a la comunidad.

La acumulación de los residuos orgánicos en los vertederos no solo causa malos olores, sino que contribuye a formación de líquidos peligrosos que contaminan las aguas y suelos, producen gases de efecto invernadero y ocupan espacio útil. Según las estadísticas de la Consejería de Medio Ambiente, casi la mitad de los residuos urbanos

son materia orgánica que puede reciclarse en compost. Cuantos más hogares produzcan compost, más se reducirán los costes de la recogida, transporte y tratamiento.

2.3 Métodos de compostaje

Existen dos métodos para elaborar el compost: Sobre el nivel del suelo, tenemos el Indore, Pain y Pfeiffer y bajo el nivel del suelo tenemos las fosas comunes”.

2.3.1 *El método Indore (aeróbico)*

Es uno de los métodos más conocidos para la elaboración de compost. Se llama así porque se originó en el estado Indio de Indore Darba. Este método se maneja de manera totalmente aeróbica. Para la elaboración de compost con este método se procede de la siguiente manera:

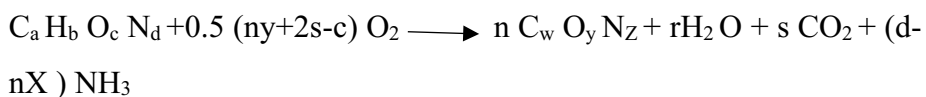
2.3.2 *Demarcación del terreno*

Las composteras deben hacerse en terrenos con una ligera pendiente para facilitar el escurrimiento en caso de exceso de humedad. Para la demarcación del área se utilizarán 4 estacas y 1 piola, teniéndose en cuenta los siguientes aspectos:

1. En pequeñas fincas las dimensiones recomendadas son entre 1 y 1,20 m de ancho, entre 2 y 5 m de largo y entre 0,80 y 1 m de alto.
2. Si la compostera es industrial las dimensiones recomendadas son entre 2 y 3 m de ancho, entre 10 y 25 m de largo y entre 1,50 y 2 m de alto.

3. Se deben colocar en el suelo estacas o cañas guadua de 1,40 m de alto por 10 cm de diámetro cada 1,50 m, sin forzarlas a fin de poder extraerlas al día siguiente (esto facilitará la entrada de aire a la mezcla de materiales). En las composteras industriales pueden colocarse de manera fija tubos de PVC de 5 cm de diámetro perforados para facilitar la circulación de aire (estos tubos solamente se retiran cuando se realizan los volteos del material).

El compostaje fue una práctica realizada desde los inicios de la civilización occidental (Roma y Grecia) donde los granjeros amontonaban estiércol para utilizarlo como fertilizante. Esta práctica continúa en la Edad Media y en el Renacimiento probablemente el Sr. Albert Howard fue el primer agricultor que tuvo un acercamiento científico al compostaje hace 75 años en la India, quien estableció que la elaboración de composta tenía por objeto digerir materiales frescos de origen agrícola, antes de ser incorporados, de tal manera que se evitara que las bacterias terminaran su proceso en el suelo, a expensas del nuevo cultivo.



A esta reacción se le conoce como la ecuación estequiométrica del compostaje, donde $C_a H_b O_c N_d$ presenta la materia orgánica y $C_w H_x O_y N_z$ la fracción de la materia orgánica resistente, no se considera la producción de células nuevas o de sulfato, $s = a - nw$ y $r = 0.5(b - nx - 3(d - nx))$; a, b, c, d describen la cantidad relativa molar de carbono, hidrogeno, oxígeno y nitrógeno respectivamente en la producción seca

inicial de la fracción de sólidos volátiles biodegradables. SVB ; w , x , y , x describen la cantidad relativa molar de carbono, hidrógeno, oxígeno y nitrógeno respectivamente en la porción seca de la fracción de SVB que no fueron degradados, y . el número de moléculas de los SVB no degradados.

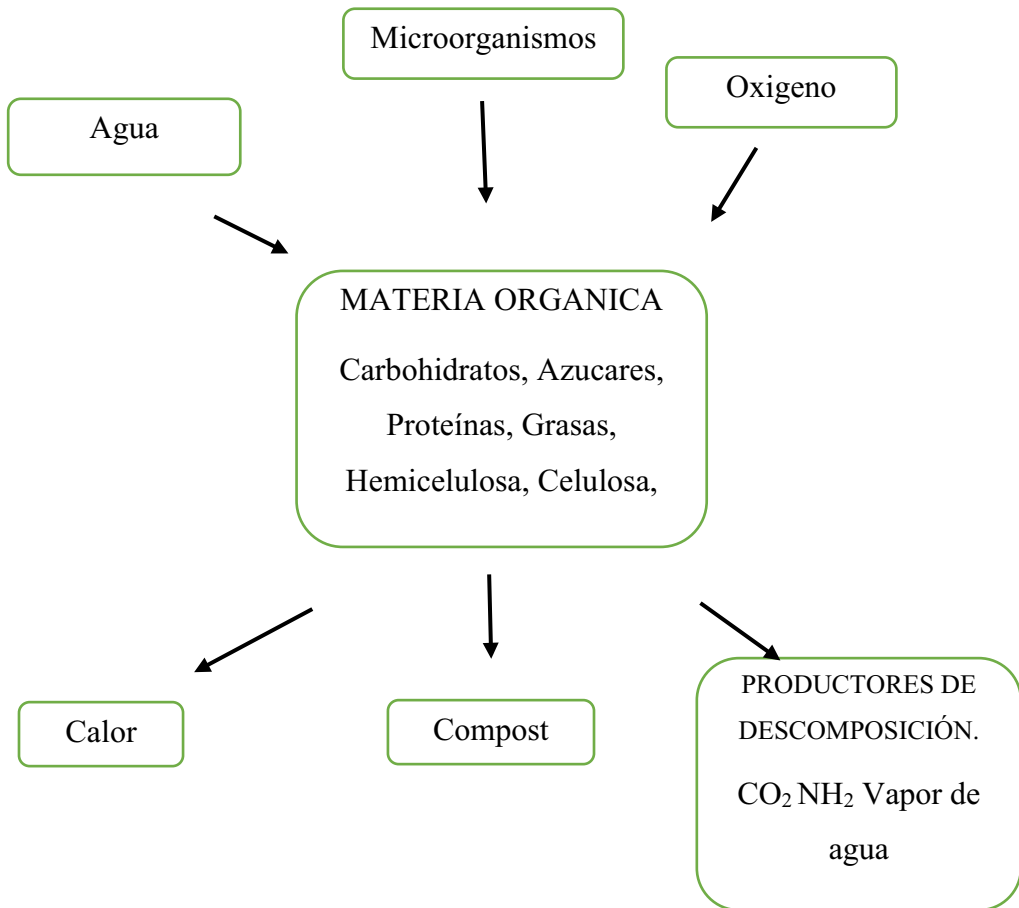
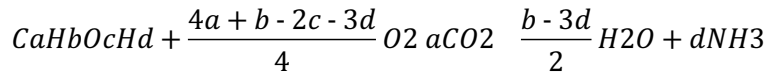


Figura 1. Esquema básico de un proceso de compostaje.

Si la degradación de los sólidos volátiles biodegradables fuera total, la ecuación estequiométrica queda de la siguiente forma:



Lo que indica que los sólidos biodegradables en combinación con oxígeno producen dióxido de carbono, agua y amoníaco. El dióxido de carbono y amoníaco se obtienen como gases, y el agua producida se mezcla con el material o se pierde por evaporación por el flujo de aire.

El proceso de compostaje es un proceso complicado debido a que es afectado por factores tanto físicos, químicos como biológicos. En la actualidad existen modelos que permiten predecir de manera aproximada el comportamiento de algunas variables del proceso.

Dentro de las variables de interés en el proceso de compostaje están: la velocidad de degradación del material (afectada por factores de temperatura, contenido de humedad, concentración de oxígeno, espacio de aire libre, principalmente).

La temperatura (afectada por la degradación del material, flujos de aire, evaporación, contenido de humedad y pérdidas de calor, principalmente).

Contenido de humedad (afectada por el arrastre de humedad en el aire, contenido de humedad de los materiales compostados y líquidos lixiviados).

Crecimiento microbiano (afectado por cantidad de materia orgánica disponible, muerte microbiana, temperatura, concentración de oxígeno, contenido de humedad, espacio libre, principalmente).

2.4 Etapas del proceso de compostaje

El proceso de compostaje puede dividirse en tres etapas, basado en la temperatura del material durante el proceso, que son: la etapa mesófila¹ inicial, etapa termófila² y etapa mesófila final.

EL compostaje es un proceso aerobio donde se tienen en cuenta diversos factores para que el producto final sea higiénico y asimilable por el medio ambiente. Estos son complejos ya que los microorganismos producen su propia biomasa al aprovechar el oxígeno, nitrógeno y carbono presentes. Existen 4 fases relacionadas a los cambios de temperaturas que se presencian en el proceso y son las siguientes:

Mesófila: así se conoce a la etapa del proceso de descomposición aerobia, en la cual se presentan las condiciones que permiten el crecimiento principalmente de organismos mesófilos y las temperaturas se encuentran en un intervalo de 10 a 40 °C. Durante esta fase la mezcla inicial presenta una temperatura ambiente baja, que en pocos días o incluso pocas horas, llega a aumentar hasta los 45° C. El rápido aumento de temperatura es producido por el trabajo de descomposición realizado por los microorganismos mesófilos, al utilizar el carbono y nitrógeno presente en la mezcla. Estos microorganismos generan calor mientras digieren los carbohidratos y sacáridos con bajo peso molecular, para obtener energía y terminan transformándolos en dióxido de carbono

(CO₂) y agua es frecuente encontrar una bajada del pH debida a la producción de compuestos de naturaleza ácida, produciéndose a continuación un aumento rápido de la actividad microbiana mesófila y de la temperatura de la masa, con lo que se alcanza la fase termófila (mayor de 40-45°C) que se caracteriza por la presencia de bacterias y hongos, que se multiplican y consumen los carbohidratos más fácilmente biodegradables, produciendo un leve aumento en la temperatura, desde la temperatura ambiente hasta unos 45°C.. Según la FAO el proceso inicia a temperatura ambiente y alcanza los 45°C, esto puede tardar algunos días (entre dos y ocho días) y la razón es debido a que los microorganismos comienzan su labor de generar calor al usar el carbono (C) y nitrógeno (N) que están presentes. Como se comienzan a producir ácidos orgánicos debido a la descomposición que sufren los compuestos solubles, se puede dar que el pH descienda hasta 4.0 o 4.5.

Termófila: La segunda fase del compostaje ocurre cuando la mezcla alcanza temperaturas mayores a los 45° C. Durante esta fase, los microorganismos mesófilos son reemplazados por otros que prosperan en mayores temperaturas, generalmente las bacterias termófilas, que facilitan la degradación de fuentes más complejas de carbono, como lo son la celulosa y la lignina estos microorganismos o bacterias termófilas transforman el nitrógeno en amoníaco, causando que el pH de la mezcla suba. Por otro lado, a partir de los 60° C comienzan a aparecer bacterias productoras de esporas y actinobacterias, que se encargan de descomponer las ceras, hemicelulosas y otros compuestos de carbono complejos. Así mismo, a esta fase también se le conoce como fase de higienización, ya que es durante esta etapa que las altas temperaturas

rebasan los 55° C y el calor destruye bacterias contaminantes, hongos fitopatógenos y semillas de malezas que pudieran encontrarse en el material de partida, así se conoce a la etapa del proceso de descomposición aerobia, en la cual se presentan las condiciones que permiten el crecimiento principalmente de organismos termófilos y la temperatura se encuentran en un intervalo de 40 a 70°C. A causa de la mayor actividad de las bacterias aeróbicas se genera calor y mayor cantidad de CO₂ por la descomposición de la materia orgánica, lo que se traduciría en una disminución del oxígeno, por lo que el compost se voltea para evitar la disminución de este, manteniéndolo en todo momento controlado por ser un proceso aeróbico cuando la concentración de oxígeno es suficiente, la temperatura aumenta, ya que se acelera la estabilidad y la madurez del compost.

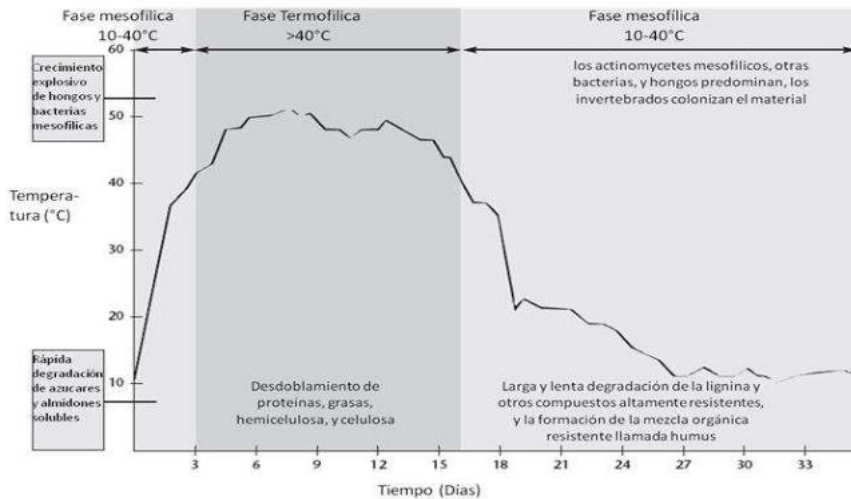


Figura 2. Representación gráfica de las tres fases del proceso de compostaje.

Etapa mesófila inicial: Etapa inicial del compostaje que dura aproximadamente de 2 a 3 días. Los organismos presentes en ella pueden

ser microorganismos que se desenvuelven a temperaturas medias (microorganismos mesófilos) son desplazados por aquellos que ascienden a mayores temperaturas, en su totalidad bacterias (termófilas), que intervienen proporcionando la degradación de fuentes más confusas de C, como la celulosa y la lignina. Los microorganismos intervienen evolucionando el nitrógeno en amoníaco por lo que el pH del medio escala. En específica, a partir de los 60 °C surgen las bacterias que ocasionan esporas y actino bacterias, que son las representantes de transformar las ceras, humicelulosas y otros mezclados de complejos. Este período consigue persistir a partir unos días hasta meses, como el material de traslado, las circunstancias climáticas y del lugar, otros factores. En este período de igual forma adopta el nombre de fase de higienización ya que el calor formado arruina bacterias y contaminantes de principio fecal como *Escherichia coli* y *Salmonella*. Este período es significativo porque las temperaturas por encima de los 55°C eliminan los quistes y huevos de helminto, esporas de hongos fitopatógenos y semillas de malezas que obtienen hallar en el material de partida, cambiando lugar a un producto higienizado. Las bacterias y hongos mesófilos que destruyen rápidamente los compuestos fácilmente degradables, y el calor producido causa que la temperatura del material aumente rápidamente. La tendencia ascendente de la temperatura de la composta hace que el material suba de una temperatura inicial, que puede ser de los 10 °C, a los 40 °C y cuando esta última es rebasada, comienza la siguiente etapa del proceso de compostaje.

Etapa termófila: Cuando el material consigue temperaturas mayores que los 45°C, los microorganismos que se desenvuelven a temperaturas medias (microorganismos mesófilos) son desplazados por aquellos que ascienden a mayores temperaturas, en su totalidad bacterias (termófilas), que intervienen proporcionando la degradación de fuentes más confusas de C, como la celulosa y la lignina. Los microorganismos intervienen evolucionando el nitrógeno en amoníaco por lo que el pH del medio escala. En específica, a partir de los 60 °C surgen las bacterias que ocasionan esporas y actino bacterias, que son las representantes de transformar las ceras, humicelulosas y otros mezclados de complejos. En esta etapa pueden alcanzarse temperaturas entre los 40 a 75 °C y en ella se eliminan la mayoría de los patógenos, larvas de mosca, y las semillas termo sensitivas de malezas. Las temperaturas elevadas aceleran la descomposición de proteínas, grasas, y polisacáridos como celulosa y hemicelulosa, la mayor estructura molecular de las plantas. En esta etapa, se alcanza la mayor degradación de la materia orgánica y la higienización de la misma, su duración depende de los materiales compostados, disposición y la cantidad de los mismos.

Etapa mesófila final: En esta etapa la temperatura descenderá paulatinamente de 40 °C hasta presentar valores cercanos a la temperatura ambiente. Cuando la temperatura alcanza la temperatura ambiente el material se presenta estable biológicamente y se da por culminado el proceso. Desde el punto de vista microbiológico la finalización del proceso de compostaje se caracteriza por la ausencia de actividad metabólica. Consumidas las fuentes de carbono y, en especial la de nitrógeno en el material de compostaje, la temperatura baja

nuevamente hasta los 40 - 45°C. Durante este periodo, se extiende la degradación de polímeros como la celulosa, y surgen algunos hongos evidentes a simple vista. Al bajar de 40°C, los cuerpos mesófilos reinician su movimiento y el pH del medio proviene levemente, aunque en general el pH se conserva sutilmente alcalino. Este periodo de congelación demanda de varias semanas y puede confundirse con la fase de maduración.

2.5 Condiciones requeridas para el compostaje

Los elementos de compostaje: Humedad, aire, materias orgánicas y nuestros amigos los microorganismos

Los materiales orgánicos se descomponen mejor cuando las condiciones son óptimas. Las variables más importantes a considerar cuando se hace compostaje son el porcentaje de humedad, la cantidad de aire, la temperatura y los tipos de nutrientes añadidos (restos alimenticios y podas). Es fácil, piense en sí mismo: ¿Qué necesitamos como humanos para sobrevivir? Agua, aire, comida, y una temperatura que no sea extrema.

La pila de compost necesita las mismas cosas que nosotros porque también está viva. Viva y con miles de microorganismos y organismos beneficiosos trabajando para transformar nuestros desechos a compost. Si los proveemos con lo que necesitan, estos organismos amigos, trabajarán y producirán el compost.

Los materiales orgánicos se descomponen mejor cuando las condiciones son óptimas. Las variables más importantes a considerar cuando se hace

compostaje son el porcentaje de humedad, la cantidad de aire, la temperatura y los tipos de nutrientes añadidos (restos alimenticios y podas). Es fácil, piense en sí mismo: ¿Qué necesitamos como humanos para sobrevivir? Agua, aire, comida, y una temperatura que no sea extrema.

Estos microorganismos demandan cuatro cosas: Humedad, aire, una temperatura agradable y comida.

Humedad: La humedad óptima está entre el 40 y el 60%. Una prueba simple para determinar si la humedad está dentro de este intervalo es coger el compost con la mano y exprimir la materia influyendo tanto en optimizar la eficiencia del proceso biológico como en evitar afecciones ambientales negativas. En la fase inicial, cuando se realizan los aportes, es fundamental mantener este parámetro en valores entre el 50-60% para evitar lixiviación y facilitar el inicio de la actividad de los microorganismos. Dependiendo de las características de los biorresiduos que se depositen en los módulos de compostaje, puede ser necesario considerar una corrección de la relación de carbono y nitrógeno biodegradables, aunque tenga ajustadas la porosidad y la humedad por el aporte inicial de material estructurante o complementario.

Está en buenas condiciones cuando esté húmeda al tacto, pero sin que se escurra agua. Si está seca, añadir agua y mezclar bien hasta que la humedad esté uniforme. De igual manera, si está demasiado húmeda añadir materiales secos como hojas, paja o periódicos/cartones

desmenuzados y mezclar hasta que esté uniforme. Demasiada agua puede provocar malos olores.

El volumen de proceso, los materiales de algunos compostadores y la exposición a las condiciones ambientales son los principales factores que influyen en que se dé una desviación de los valores óptimos de este parámetro durante el tiempo de proceso. Es imprescindible monitorizarlo regularmente y corregirlo en cuanto se desvíe del intervalo de valores óptimos. Es muy importante que la frecuencia de los aportes de materiales orgánicos frescos esté acorde con el volumen del módulo de compostaje y, a su vez, que la forma en que se dispongan estos materiales en el interior del módulo durante los primeros días tenga una relación superficie/volumen baja.

Aire: Una pila de compost debería tener materia con estructura, así como trocitos de ramas, hojas, estaquillas de madera. Estos tipos de materia permiten que entre aire en la pila y que no se compacten los materiales. También removiendo la pila con un palo, una horquilla o un removedor de compost se ayuda a la entrada de aire. Para pilas que sean muy grandes o si no tiene tiempo para removerlas, se pueden utilizar tubos de plástico con perforaciones, que facilitan la entrada de aire.

La ausencia de aire no sólo hace el proceso de compostaje más lento sino también contribuye a la aparición de malos olores. Cuando no hay aire, los microorganismos aerobios (los que respira aire) no pueden sobrevivir y son sustituidos por microorganismos anaerobios los cuales producen gases desagradables.

Temperatura: En cuanto empiecen los organismos a trabajar, sube la temperatura igual que un autobús lleno de gente en verano, la pila de compost llena de vida se vuelve calurosa en ciertas etapas. Ya que, con la entrada de aire nuevo, empiezan otra vez a trabajar los organismos (como en las paradas del bus). Y así se repite el ciclo de calor hasta que toda la materia este descompuesta en compost. Cuando la materia no se caliente más después de mezclarse, y se puede considerar que el compost está hecho y listo para utilizar. Siendo el parámetro que define las fases del proceso debe ser monitorizado de forma relativamente continuada durante todo el tiempo que dure el proceso.

El ajuste y mantenimiento de los demás parámetros indicados, así como un correcto seguimiento del protocolo de proceso, será lo que permita alcanzar valores termófilos de temperatura y mantenerlos el tiempo suficiente para garantizar la higienización del material.

Al principio, la materia sube la temperatura rápidamente por el compostaje de los materiales que se descomponen fácilmente pero como, con el calor las entra el sueño y baja su actividad, lo que los adormece, bajando con ello la temperatura para despertar a la pila del compost hay que mezclarla.

2.6 Ventajas del compostaje

Desde el punto de vista ecológico e industrial, la principal ventaja que presenta el uso del compostaje es que nos permite eliminar y reciclar de una forma segura muchos tipos de residuos orgánicos biodegradables en

insumos para la producción agrícola, evitando así problemas de contaminación ambiental que desencadenaría su abandono o vertido.

- Ahorro en abonos. Haciendo compost con nuestros restos no necesitaremos comprar abonos ni sustratos, ya que los tendremos en casa gratis y de gran calidad.
- Ahorramos en retiro de basuras. Se estima que entre el 40 y el 50% de una bolsa de basura doméstica está formada por desechos orgánicos.
- Contribuimos a reducir la contaminación. Cuanto más cerca aprovechemos los restos orgánicos más se reducirá el consumo de combustibles para el transporte, habrá menos acumulación de desechos en vertederos y contribuiremos a una notable reducción de sustancias tóxicas y gases nocivos en los mismos, puesto que en los vertederos los restos orgánicos se pudren (sistema anaerobio), envueltos con todo tipo de materiales inorgánicos.
- Mejoramos la salud de la tierra y de las plantas. El compost obtenido de nuestros desechos orgánicos se puede emplear para mejorar y fortalecer el suelo del césped, de los arbustos, de los árboles y del huerto, con una calidad de asimilación incomparablemente superior a la de sustancias químicas o sustratos de origen desconocido que compramos, ya que el compost vigoriza la tierra y favorece la actividad de la vida microbiana y favorece toda la actividad biológica de los suelos,

que es la mejor garantía para prevenir plagas y enfermedades en los vegetales.

Otras ventajas que nos aporta son:

- Permite dar un segundo uso a la materia orgánica, recuperándola y reciclándola.
- Se reduce la cantidad de residuos sólidos urbanos (RSU) que se destinan a vertederos y plantas de tratamiento, evitando así problemas de contaminación de suelos o la emisión de gases nocivos a la atmósfera.
- Con su uso, se favorece la productividad de la tierra sin necesidad de aplicar otros productos químicos de síntesis, por lo que produce una serie de efectos de repercusión agro-biológica muy favorable.
- La materia orgánica aportada contribuye favorablemente a mejorar la estabilidad de la estructura de los agregados del suelo agrícola, aumenta la permeabilidad hídrica y gaseosa, y contribuye a aumentar la capacidad de retención hídrica del suelo mediante la formación de agregados.
- Debido a que es un fertilizante 100% natural, libre de aditivos, contribuye a mejorar la estructura del suelo, protege contra la erosión y sirve como sustrato para cultivos, jardines, parques, etc., por lo que se puede decir que el compost mejora las propiedades fisicoquímicas del suelo, ya que, en el sentido químico, aporta

macronutrientes como el N, P y K, al igual que micronutrientes, y mejora la capacidad de intercambio catiónico del suelo.

- La utilización de compost contribuye a mejorar la actividad biológica del suelo, ya que la materia orgánica aportada supone una fuente de energía y nutrición para los microorganismos presentes en el suelo.
- No sólo se puede utilizar como abono parcial o total, sino que también se puede utilizar como acolchado en plazas municipales, parques, etc.
- Su uso requiere un menor consumo de terreno, menor impacto sobre el paisaje, el suelo y las aguas subterráneas ya que se reduce el volumen de residuos que se va al relleno.
- Es un producto comercializable, ya que son cada vez más los agricultores y particulares que deciden elegir el compostaje para aplicar en sus cultivos, jardines, pastizales, viveros, etc.
- Incremento de los ácidos húmicos y fúlvicos del suelo.
- Lucha contra el cambio climático mediante la fijación de dióxido de carbono en los suelos, los grandes sumideros de carbono.
- Se consolida como una buena forma de educación medioambiental
- Fomenta la participación ciudadana y valores como la responsabilidad, el trabajo en equipo o el respeto por otras personas

- Supone un ahorro en los gastos de recogida y gestión de los residuos orgánicos para municipios, ciudades, etc.

2.7 Desventajas del compostaje

- Una de las desventajas del compostaje es que se trata de un proceso para el cual hace falta una cierta inversión, ya que se necesitan una serie de equipos y en algunos casos, cierto tipo de instalaciones adecuadas para su proceso.
- Por otro lado, otra de las desventajas asociadas a este proceso es la disponibilidad de terreno, ya que el compostaje requiere de una serie de terrenos diferentes para poder llevar a cabo cada una de las diferentes fases del proceso.
- También están las desventajas asociadas a la climatología, ya que, si el clima es muy frío, el proceso se alarga debido a las bajas temperaturas e incluso a veces se detiene. Las lluvias también pueden afectar al proceso de compostaje originando encharcamientos y condiciones anaeróbicas si no existe un buen drenaje, etc.
- Asimismo, presenta una desventaja relacionada con el valor fertilizante que no es del todo cierta, y es la de que tiene fama de presentar un bajo contenido en nitrógeno y esto sólo ocurre en el caso de que se hayan producido pérdidas a lo largo del proceso como consecuencia de una mala práctica.

Por último, se requieren cantidades mayores de compost a aplicar en los cultivos que las que habría que aplicar cuando se utilizan fertilizantes químicos ya que los nutrientes presentes en el compost se encuentran en formas muy complejas y tardan más tiempo en ser asimilados por las plantas.

CAPÍTULO III

3 ASPECTOS TÉCNICOS EN EL CONTROL DEL PROCESO DE COMPOSTAJE

El compostaje es un proceso bioquímico y heterogéneo que involucra la mineralización de materia orgánica a CO₂, NH₃, H₂O y humificación incompleta que a través de parámetros controlados resulta en un producto final estabilizado con toxicidad reducida y organismos patógenos menciona que como acondicionador orgánico natural mejora a mediano y largo plazo las propiedades físicas, químicas y biológicas de los suelos, incrementa la porosidad, disminuye la densidad aparente, consolida la estructura y consistencia, aumenta la capacidad de intercambio catiónico, capacidad buffer, la concentración de algunos nutrientes esenciales y la actividad biológica del suelo. Opino que, para tratar los problemas de desechos, hay que tener en cuentas distintos parámetros debido a que el compostaje (producto final) tiene varias ventajas, que incluyen un tiempo de compostaje corto, bajos requisitos de espacio y control del proceso, la descomposición, la producción de calor, el balance de calor y la temperatura del material del compost se interrelacionan.

De acuerdo a lo mencionado anteriormente se dice que para la obtención de compost de calidad es fundamental el control y seguimiento de los parámetros que serán los encargados de determinar la calidad del mismo en cuanto al control de procesos, la descomposición, transferencia de humedad y calor, que se relacionarán en una oxidación controlada.

El proceso de obtención de abono de alta calidad se llevó a cabo a través del mezclado de diferentes materiales provenientes de la planta, como es la materia orgánica y residuos vegetales de áreas de jardines y restos de materia orgánica proveniente del comedor de la empresa, adicional se seleccionó los materiales que aumentaban o reforzaban la calidad del producto, obteniéndose de esa manera un abono de excelente calidad. Tal abono de calidad se obtuvo mediante el mezclado de materiales y la toma de muestras de las diferentes variables físicas y así determinar las más óptimas para ser aplicadas en la elaboración del compostaje. El compost sin un control de calidad de la autoridad competente puede generar efectos perjudiciales a los agroecosistemas y a la economía de los productores, por la baja capacidad fertilizante o por la presencia de sustancias fitotóxicas en elevadas concentraciones. Por tanto, su utilización es altamente riesgosa en los cultivos, frente a ello, sugieren cumplir con determinadas normas de calidad fijada por cada país, rangos que el material compostado debe cumplir. Sin embargo, Perú carece de una norma técnica específica para definir la calidad del compost y recurre a las principales normas de países vecinos como la norma técnica colombiana NTC 5167 y la Norma Oficial Chilena NOCh 2880 y, complementariamente, a los estándares de la OMS y la FAO. En este contexto, la investigación planteó como objetivo evaluar los indicadores fisicoquímicos y determinar la calidad, con base en la NOCh 2880, NTC 5167 y los estándares de la OMS, de los compost que se producen y comercializan en el distrito Rupa Rupa, región Huánuco, Perú.

Opina, el mundo del compost se enfrenta a diversas limitaciones, entre ellas una falta de conciencia sobre la eficiencia tecnología de ahorro de

mano de obra, y la ausencia en el control de procesos , parámetros en la producción de compostaje, en un estudio realizado en el Ecuador se encontró que solamente el 14% de los proyectos realiza un control técnico durante el proceso de compostaje y que el 86% restante únicamente realiza control manual o empírico, esta forma de manejo determinó que el 25% de los proyectos no consigan cumplir con los objetivos planteados y el 87,5% no vendan el producto final por no cumplir con parámetros de calidad de abonos. Menciona enmiendas orgánicas (compost a partir de desechos o estiércol) puede estabilizar la estructura del suelo y disminuir la densidad aparente del suelo, proporcionando un ambiente técnico de suelo saludable. Dice, que los residuos vegetales provienen del sistema de producción de cuarto rango, si se confieren en vertederos, pueden emitir gases de efecto invernadero con consecuencias para el balance de carbono, por su alto contenido de fenoles y cera que afectan la calidad del suelo y de las aguas subterráneas

3.1 Parámetros que se deben tener en cuenta para la preparación del compostaje

El compostaje de residuos orgánicos es un proceso biológico de descomposición aeróbica que por acción de organismos mesófilos y termófilos conduce a la producción de un residuo estable, que puede ser utilizado como enmienda orgánica. El desarrollo de una agricultura (enmienda sostenible), la velocidad y el alcance de estas transformaciones generalmente dependen de la naturaleza de los materiales de partida y de las condiciones de compostaje, en los últimos 15 años, se han llevado a cabo numerosas investigaciones para definir

las características químicas, físicas y microbiológicas del proceso de compostaje. Configuro los parámetros de compostaje de la siguiente manera: una fase de temperatura mesofílica durante 8 días a 29 ° C, una fase de temperatura termofílica durante 20 días a 50 ° C y una fase de temperatura mesofílica durante 92 días a 27 ° C, el aumento de la temperatura se debe a la intensa actividad de los microorganismos y a la ventilación adecuada en la mezcla que proporciona suficiente oxígeno para estimular la actividad biológica y mantener las condiciones aeróbicas. Agrega que la efectividad del proceso de compostaje está influenciada por factores tales como temperatura, suministro de oxígeno (O₂) (es decir, aireación), contenido de humedad, pH, relación C / N, tamaño de partícula y grado de compactación.

Como ya se ha mencionado el compostaje es una de las soluciones más viables para el tratamiento de residuos orgánicos, esto conlleva a la tener claro los parámetros para la producción de compost, especialmente el Ph, la temperatura, suministro de oxígeno, humedad, de estos parámetros dependerá la oxidación de los compuestos orgánicos y el tamaño de la población microbiana presente.

El compostaje proporciona la posibilidad de transformar de una manera segura los residuos en insumos para la producción agrícola. La FAO define como compostaje a la mezcla de materia orgánica en descomposición en condiciones aeróbicas que se emplea para mejorar la estructura del suelo y proporcionar nutrientes. Sin embargo, no todos los materiales que han sido transformados aeróbicamente son considerados compost. El proceso de compostaje incluye diferentes etapas que deben cumplirse para obtener compost de calidad. La utilización de un material

que no haya finalizado correctamente el proceso de compostaje puede acarrear riesgos como los siguientes:

- **Fitotoxicidad.** El compost que no ha pasado por un correcto proceso de compostaje contiene el nitrógeno en forma de amonio en vez de nitrato. El amonio en temperaturas elevadas y humedad se transforma en amoniaco, dando lugar a un medio tóxico y emitiendo malos olores.
- **Bloqueo biológico del nitrógeno.** Se da en materia orgánica en descomposición que no ha llegado a una relación Carbono-Nitrógeno equilibrada, la cual contiene más Carbono que Nitrógeno. En el suelo, los microorganismos consumen el C presente e incrementan el consumo de N, agotando las reservas de N en el suelo.
- **Reducción de oxígeno radicular.** Cuando no se realiza una correcta descomposición, los microorganismos utilizan el oxígeno presente en el suelo, el cual sigue con el proceso y agota el oxígeno, agotándolo y no dejándolo disponible para las plantas.

Exceso de amonio y nitratos en las plantas y contaminación de fuentes de agua. Un compost con exceso de nitrógeno que se transforma en amonio tiende a perderlo por infiltración en el suelo, lo cual afecta a la contaminación de aguas superficiales y subterráneas. También perjudica a las plantas debido a que existe nitrato en cantidades mayores; en consecuencia, perjudica la calidad del fruto.

3.2 Importancia del suministro de oxígeno

Dedujo que el suministro adecuado de O₂ es el aspecto más importante a considerar en el compostaje; por lo tanto, la aireación es crítica, la eficiencia del proceso de compostaje se ve fuertemente afectada por el nivel de O₂ porque el proceso de compostaje está directamente asociado con la dinámica de la población microbiana, en este sentido, la tasa de aireación afecta la calidad del compost y la actividad microbiana en el proceso de compostaje. También concluyeron que la aireación es el principal factor que afecta la estabilidad del compost, mientras que la relación C / N influyó en la madurez del compost. Dice, la relación C / N es importante para varios aspectos del compostaje, pero es particularmente crucial para el desarrollo de microorganismos durante el compostaje, ya que proporciona la fuente de carbono y nitrógeno necesaria para el crecimiento, limitar el contenido de N no es deseable porque genera una reducción en la tasa de consumo de C, mientras que un exceso en N puede generar la liberación de gas NH₃.

Opino con respecto a la aireación q se encuentra íntimamente ligada a la relación C/N, en este sentido, la relación C / N es una medida del grado de descomposición debido a la degradación del carbono a CO₂ durante la etapa de degradación de alta velocidad. luego, la relación C / N disminuye a lo largo del proceso de compostaje según lo informado por. Debido a que la tasa de degradación de C es mayor que la tasa de mineralización de N, Por lo tanto, un exceso de C / N se relaciona con una deficiencia de nutrientes en el microbiota, y una baja relación C / N implica la liberación de varios compuestos indeseables, tales como olores o sales, que son desfavorables para el crecimiento de las plantas.

Siendo el oxígeno el parámetro o suministro más importante a considerar debe ser controlado rigurosamente, caso contrario podría existir pérdida de humedad o liberación de compuestos indeseables como olores y lixiviados que afecten la estabilidad del compost, al ser aplicado en suelos no repercutirá los efectos deseados.

3.3 Fases del proceso de compostaje

Las fases están muy relacionadas con la temperatura es decir en la fase mesófila, que se produce a 40°C, se produce acidificación de materia, degradación de fracciones de carbono débiles los hongos mueren generando calor y CO₂, Se eleva T debido a la actividad metabólica, baja el pH.

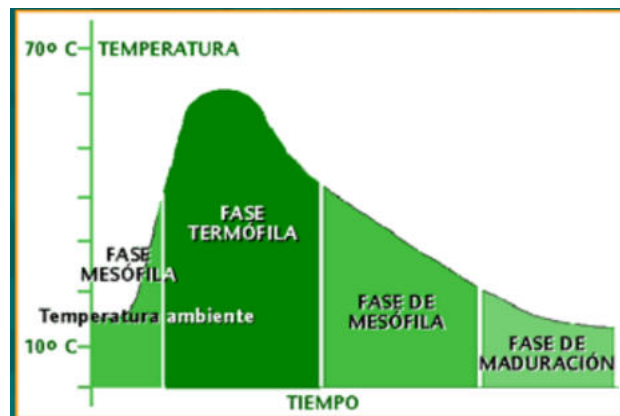


Figura 3. Fases del proceso de compostaje.

Va desde que se aportan los residuos a la pila o compostador hasta que estos alcanzan una temperatura de 60-70° C. Aquí la pila se va poblando de bacterias que empiezan a descomponer los residuos, la actividad microbiana comienza a generar calor. A esta temperatura se higieniza la

mezcla de residuos eliminando patógenos y semillas de malezas que estuvieran presentes para lo cual requiere temperatura sobre 55° C por a lo menos 5 días seguidos. En esta etapa los materiales disminuyen su volumen y pierden su aspecto original, la que dura alrededor de 4 semanas.

a) Acondicionamiento de la mezcla:

Está influenciado por varios parámetros, como el tamaño de partículas y el contenido de humedad, que influyen claramente en el contenido de O₂, estos parámetros determinan el rendimiento del proceso de compostaje, el proceso general de compostaje no es afectado negativamente, ya que el alto volumen de eliminación crea un aumento en la transferencia de calor, que a su vez disminuye la temperatura de la masa. Además, se menciona que el material participado puede afectar positiva o negativamente el proceso de compostaje esto dependerá de la humedad a la que se encuentre sometido el compostaje, de acuerdo a la transferencia de calor su temperatura aumentará o disminuirá en el centro del material orgánico.

3.4 Maduración del compost:

Menciona que la maduración del compost se caracteriza por el crecimiento de los organismos mesófilos y la humificación del compost, esta fase se realiza habitualmente con menos control y monitoreo el tiempo requerido para la fase de maduración está en función del sustrato y las condiciones ambientales y operativas de la instalación y puede variar desde unas pocas semanas hasta un año o dos. Agregan que la

fase de maduración se ha estudiado principalmente en términos de los parámetros fisicoquímicos y biológicos para determinar cuándo el compost es lo suficientemente maduro como para agregarlo al suelo al establecer criterios de madurez y estabilidad e índices del producto final. La maduración del compost se inicia cuando la pila alcanza temperatura ambiente y debe durar alrededor de 60 días. Los organismos presentes en esta etapa corresponden a invertebrados que terminan el proceso de descomposición y se obtiene el compost maduro, con textura granular, color oscuro y olor a tierra de los parámetros que determinan la calidad del mismo, debido a las condiciones físico químicas a las que fue sometido en su preparación y las condiciones en las que se encuentra en la fase final de maduración dependerá su acción en el momento de ser aplicado para un cultivo, además puede influir de manera altamente riesgosa las condiciones ambientales, en fase de maduración y en fase de aplicación

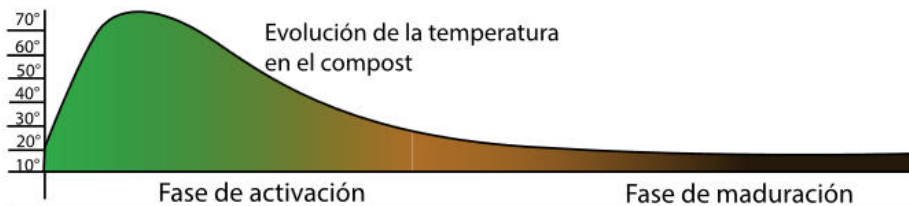


Figura 4. Evolución de la temperatura en el compost.

3.5 Aspectos técnicos en la maduración del compost

Mencionan que se realiza en dos etapas la primera en el tambor y la segunda en una pila de compostaje exterior, no existe una distinción precisa entre estas dos etapas, pero las altas tasas de (bio) reacción (es decir, la rápida biodegradación), las altas tasas de consumo de oxígeno

(OUR), las altas temperaturas y el alto potencial de producción de olores son esenciales para su determinación, aportando con lo anterior. Dicen que, en el proceso de compostaje con tambor rotativo, y la estabilización incompleta del compost tiene lugar dentro del reactor debido al corto tiempo de residencia en un sistema biológicamente activo, por lo tanto, la maduración del compost estabilizado primario requiere mayor espacio y mayor tiempo en comparación con la biodegradación de alta velocidad en los procesos del reactor. Dice que la optimización del período de maduración para el compost, estabilizado primario del tambor rotatorio es bastante limitada, y concluyo que el compost estabilizado primario del compostador requerirá un período más largo para la maduración, es decir, de 45 a 365 días en forma de montones, hileras y pilas, por ejemplo, la frecuencia de torneado afecta el nitrógeno total, el pH, el contenido de humedad, la relación C / N, la materia seca, el carbono total y la temperatura de las pilas de compostaje.

La descomposición de materia orgánica (compostaje) en etapa de maduración dependerá esencialmente de las condiciones proporcionadas para tal efecto, se entiende por las condiciones a; material orgánico de fácil degradación, el consumo de oxígeno (aireación), temperaturas, contenido de humedad. Reacción C/N, pH, lógicamente para su aplicación dependerá para qué tipo de cultivo, y el tiempo establecido para su degradación que puede ser 3656 días en montones o 90 días.

3.6 Propiedades de los parámetros de control en el proceso:

El compostaje es un proceso biológico en el cual las materias orgánicas se transforman en tierra de humus (abono orgánico) bajo el impacto de microorganismos, de tal manera que sean aseguradas las condiciones necesarias (especialmente temperatura, relación C: N, aireación y humedad) para la realización de la fermentación aeróbica de estas materias. En plantas de compostaje, este proceso natural es optimizado con ayuda de ingeniería. Después del compostaje completo, el producto - la tierra humus que se llama "compost" o "abono" - es impecable desde el punto de vista de la higiene y se puede utilizar para la horticultura, agricultura, silvicultura, el mejoramiento del suelo o la arquitectura del paisaje. Con la utilización de plantas de compostaje, la cantidad de basura destinada para la disposición final en un relleno o botadero se puede reducir a un 50%. Este porcentaje puede variar según la composición de la basura. En caso que los desechos reciclables sean recogidos separadamente y los desechos orgánicos sean compostados, el porcentaje de la basura descargada en el relleno puede reducirse a un 35 - 40 %.

3.7 Temperatura

La temperatura es uno de los principales parámetros para monitorear el proceso de compostaje. Al mismo tiempo, la temperatura también es una función del proceso. También se produce un gradiente de temperatura significativo en la pila de compostaje debido a los balances de masa y energía no lineales.

La temperatura durante el proceso de compostaje se debe a la gran actividad microbiana en la mineralización de los materiales orgánicos. La temperatura del compostaje puede ser manejada según los objetivos del productor de abonos orgánicos. Temperaturas mayores de 55°C maximizan la sanidad del proceso. Estas temperaturas son requisitos indispensables en el tratamiento de gallinaza para cumplir con la legislación de Costa Rica (Ley N.º 291145-MAG-S-MINAE) y para el tratamiento de todas las excretas animales frescas para cumplir con la normativa de Estados Unidos NOP (7 CFR Parte 205). Pero no son indispensables en ningún caso para el compostaje de desechos vegetales. Temperaturas de 45-55 °C favorecen la velocidad de descomposición y temperaturas menores de 45 °C favorecen la diversidad microbiana, así como disminuyen la volatilización de nitrógeno. El bocashi, por ejemplo, es un proceso de compostaje donde la temperatura no se deja pasar de los 45°C por estas dos razones.

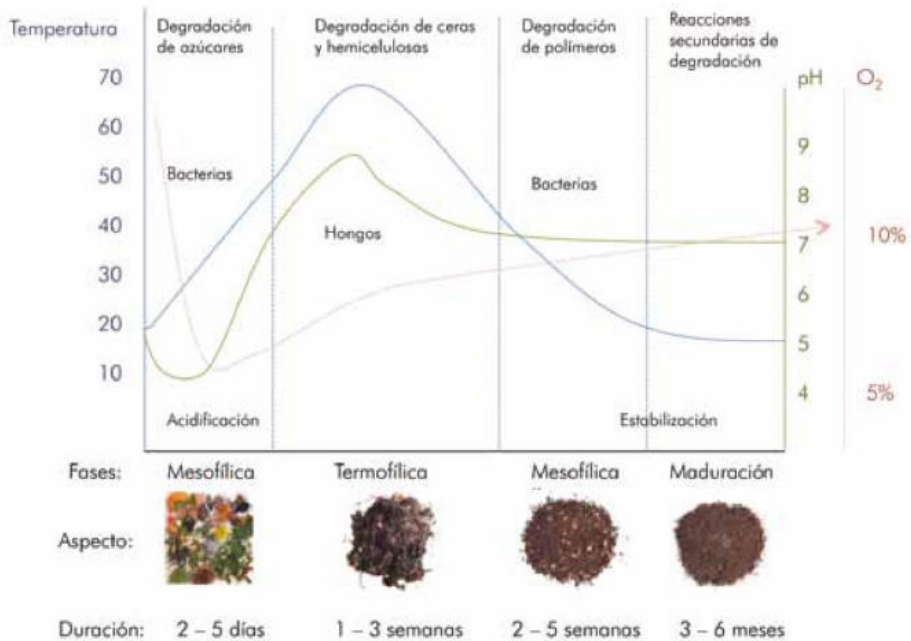


Figura 5. Temperatura, oxígeno y pH en el proceso de compostaje.

La eficiencia del proceso de compostaje disminuye a medida que aumenta la temperatura, la temperatura es un factor importante para determinar la ventaja relativa de alguna población microbiana sobre otra, esto podría atribuirse al efecto de la temperatura sobre las características fisicoquímicas de los compuestos y la biodisponibilidad posterior del sustrato para el microorganismo de compostaje. Propuso dos etapas de la evolución de la temperatura, la etapa termofílica (fase activa) y una etapa de maduración (caracterizada por una caída de la temperatura). Determino que las temperaturas superiores a 55 °C favorecen la eliminación de parásitos, patógenos y asegura las condiciones sanitarias máximas. Si la fase termófila dura más de tres días, el compost estará libre de semillas de malezas y agentes patógenos, y se podrían cumplir los requisitos de saneamiento.

Opinó que los regímenes de tiempo y temperatura requeridos para la eliminación de bacterias coliformes, escherichia coli y otros patógenos varían, (temperaturas entre 52 y 60°C), Cuidados considerados para mantener la mayor actividad termofílica en sistemas de comercialización. Señaló que la temperatura óptima es 40 - 65 ° C para el compostaje. Observaron el nivel más alto de actividad termofílica a 54 ° C que se encuentra en el rango establecido.

La alta temperatura y la cantidad excesiva de amoníaco pueden inhibir el crecimiento y la actividad de las bacterias nitrificantes en la fase, sin embargo, se debe tener cuidado de que las temperaturas no se eleven demasiado (es decir, a más de 71 ° C) porque el calor excesivo puede destruir las poblaciones microbianas termofílicas. Estableció que las temperaturas del compost no deben exceder 60 - 65 ° C ya que esto mataría a casi todos los microorganismos y haría que el proceso pare

La temperatura es uno de los parámetros más importantes en el compost, deduciendo así que mientras aumenta la temperatura, la eficiencia del proceso de compostaje disminuye, además según lo mencionado las temperaturas adecuadas para mantener la actividad termófila es de 52 – 60 °C, si se llegara a pasar este rango de temperaturas sería perjudicial para los microorganismos y el proceso se paralice (muerte microbiológica)

Oxígeno: El compostaje es un proceso aerobio y se debe mantener una aireación adecuada para permitir la respiración de los microorganismos, liberando a su vez dióxido de carbono (CO₂) a la atmosfera. Así mismo, la aireación evita que el material se compacte o se encharque. Las

necesidades de oxígeno varían durante el proceso, alcanzando la mayor tasa de consumo durante la fase termofílica. La saturación de oxígeno en el medio no debe bajar del 5%, siendo el nivel óptimo el 10%. Un exceso de aireación provocaría el descenso de temperatura y una mayor pérdida de la humedad por evaporación, haciendo que el proceso de descomposición se detenga por falta de agua. Las células de los microorganismos se deshidratan, algunos producen esporas y se detiene la actividad enzimática encargada de la degradación de los diferentes compuestos. Por el contrario, una baja aireación impide la suficiente evaporación de agua, generando exceso de humedad y un ambiente de anaerobiosis. Se producen entonces malos olores y acidez por la presencia de compuestos como el ácido acético, ácido sulfhídrico (H₂S) o metano (CH₄) en exceso.

3.8 Relación C / N

Observo que, durante el compostaje, los microbios descomponen los compuestos orgánicos para obtener energía para el metabolismo y adquieren nutrientes (como C, N, P, K) para mantener a sus poblaciones, considerando a estos los principales nutrientes que necesitan los microorganismos involucrados en el compostaje. Declaró que cuando la cantidad de N es limitante, el crecimiento microbiano disminuye y, por lo tanto, da como resultado una lenta descomposición del C disponible, también agregaron que, si la cantidad de N presente supera el requisito de la población microbiana, el exceso de N se volatiliza como amoníaco, gas, por lo tanto, la relación C/N es un indicador del grado de descomposición de una materia orgánica; como el C se pierde como CO₂ durante la biooxidación. Añade que es necesario un ajuste de las

materias primas para obtener una relación C / N de 25 - 30: siendo fundamental para el compostaje activo, aunque la relación inicial C / N de 20 - 40: ha dado regularmente un buen rendimiento de compostaje. Con una relación C / N más baja, el N estará disponible en exceso y se perderá como gas amoniac, con un olor indeseable resultante, la relación C / N más baja libera una gran cantidad de sal básica soluble, lo que hace que el suelo sea desfavorable para el crecimiento de las plantas. Observó que una baja relación C/N de inicio daba una característica maloliente en la materia prima de compost. Mientras tanto, una proporción más alta significa que hay una cantidad inadecuada de N para el crecimiento óptimo de microorganismos, de modo que el compost se mantiene relativamente fresco y la descomposición avanza a un ritmo lento.

La relación C/N se relaciona directamente con el olor emitido del compostaje, es decir mientras no exista una adecuada relación de C/N más fuerte será el olor de la materia orgánica a descomponerse y a mayor cantidad de N existe mayor población de microorganismos, disminuyendo el olor.

3.9 Contenido de humedad

El contenido de humedad del material a compostar es muy importante ya que los microorganismos solo pueden utilizar las moléculas orgánicas si están disueltas en agua. Además, el agua favorece la migración y la colonización microbiana. Si la humedad es baja, el proceso de compostaje reduce su velocidad llegando incluso a detenerse. La actividad biológica empieza a disminuir a niveles de humedad del 40%

por debajo del 20%no existe prácticamente actividad. Por el contrario, una humedad alta acompañada de una inadecuada porosidad origina la disminución de la transferencia de oxígeno, siendo este insuficiente para la demanda metabólica y reduciéndose, por lo tanto, la actividad microbiana aeróbica. Este hecho puede provocar la aparición de malos olores, la generación de lixiviados y la pérdida de nutrientes.

El contenido de humedad (MC) es un parámetro crítico en el proceso de compostaje. Influye en la tasa de absorción de oxígeno, el espacio de aire libre, la actividad microbiana y la temperatura del proceso aportando a lo dicho. Menciona, el MC óptimo para un compostaje efectivo depende del tipo o forma de desecho de tal que la materia prima con MC debería estar en 50 - 60%. Señaló que el MC óptimo requerido para la actividad biológica durante el compostaje es entre 40 y 70% del peso del compost, a medida que aumenta la MC, la velocidad de difusión del gas disminuye, y la tasa de absorción de oxígeno se vuelve inadecuada para satisfacer las demandas metabólicas de los microorganismos, el proceso de compostaje puede finalmente convertirse en anaeróbico debido a la actividad restringida.

La pérdida de humedad durante el proceso de compostaje se puede contar como una fuerte indicación de la tasa de descomposición, un MC muy bajo puede causar deshidratación temprana durante el compostaje y eso puede dificultar el proceso biológico. También declaró que el aumento de MC durante el compostaje podría formar registros de agua y esto podría dar lugar a condiciones anaeróbicas que detienen las actividades de composición activa.

El contenido de humedad es determinado de acuerdo a la materia prima a degradar, influyendo en la mayoría de etapas de descomposición, puede alterar la temperatura, la actividad microbiana, la cantidad de oxígeno disponible (aireación), dificulta el proceso biológico, puede convertir el proceso en anaeróbico.

3.10 Aireación

El objetivo de la aireación durante el proceso de compostaje es suministrar oxígeno para la degradación microbiana, controlar la temperatura y eliminar la humedad de la materia orgánica. Cuando existe una mala aireación en las pilas de compostaje, se producen condiciones favorables para el inicio de fermentaciones anaeróbicas (degradación por la vía de putrefacción) esta situación se diagnostica por la aparición de olores nauseabundos, o fuerte olor a amoníaco. Para asegurar una buena aireación, hay que agregar un cierto porcentaje de material grueso. Los materiales gruesos deben agregarse especialmente para estructurar la pila cuando la densidad de los desechos es demasiado alta ($> 700 \text{ kg/m}^3$) y, por consecuencia, no se realiza una libre circulación del aire.

Influencia de las características topográficas y geomórficas en aireación

3.11 Procesos de aireación

Las características topográficas y geomórficas del sitio incluyen tres partes:

(1) parte superior

(2) interior

(3) debajo de la superficie del suelo.

Cuando se usa de la misma manera para utilizar la tierra, las cualidades esenciales de la tierra, como el suelo, la hidrogeología, la topografía y el clima, etc. determinará cuál es mejor que el otro.

Concluyo que para el proceso de compostaje, el procedimiento más común para la aireación es a través del torneado del material de compost. esto hace que el material de compostaje esté fácilmente disponible para su uso microbiano y, por lo tanto, genere emisiones de gases. Dice que por lo tanto, la optimización del régimen de giro debe perseguirse para conservar los nutrientes relevantes o para lograr otros objetivos específicos, como una mayor tasa de higiene (reducción de patógenos) según la aireación proporciona suficiente O_2 necesario para la oxidación del material orgánico y evapora el exceso de humedad del sustrato explicó que muy poca aireación puede conducir a condiciones anaeróbicas, y también una aireación excesiva puede resultar en un enfriamiento excesivo, previniendo así las condiciones termofílicas requeridas para velocidades de descomposición óptimas de acuerdo a. el aumento de la aireación generalmente resulta en una mayor tasa de evaporación, un secado más rápido del compost y el enfriamiento del compost grande.

Señaló que en la aireación forzada, hay oxidación de carbono a CO_2 tras la liberación de calor. Señalaron además que también hay una absorción

de nitrógeno (N) y otros elementos biogénicos como nutrientes necesarios para el crecimiento microbiano, la reproducción y las reacciones metabólicas. En el compostaje de hileras de aireación forzada, la tubería perforada situada debajo de la pila de compost se utiliza para activar el flujo de aire en el material y suministrar O₂ a los microorganismos. Informaron el uso de aire forzado (a través de un soplador) para suministrar oxígeno a los microorganismos en sus trincheras de compost. También señalaron que la temperatura influye en el funcionamiento del soplador de aire. La aireación natural se ha utilizado con éxito en la contabilización. Informaron que el uso de pilas estáticas en el compostaje de excretas de animales bajo aireación natural es un proceso rentable y que requiere menos energía que el proceso de aireación forzada. Utilizo aireación natural en el compostaje doméstico de residuos biológicos. Lograron esto utilizando un compostador que tiene un fondo cilíndrico con canales, ranuras y un cono interno vertical con orificios que no obstruyen, y se colocaron ranuras adicionales en el borde superior y debajo de la tapa. Uso de una tasa de suministro de aire controlada en el compostaje de desechos sólidos municipales y estiércol de aves de corral.

El proceso de aireación más común es el torneado o virado de la materia orgánica, así como el compostaje se oxigena permitiendo que las poblaciones microbianas se incrementen liberando olores que afectan el desarrollo del proceso. La función primordial de la aireación en el compostaje es el aporte de oxígeno, también permite un control de la temperatura de la masa, la eliminación de agua y la evacuación de CO₂ y otros gases generados durante la biodegradación de la materia

orgánica. Es decir, una insuficiente aireación de la masa provoca un retardo del proceso de compostaje y, bajo condiciones anaerobias, se generan metabolitos responsables de malos olores, junto con otros que pueden resultar tóxicos para la microbiota y para las plantas en un proceso que ocurre bajo condiciones aeróbicas y por tanto, es necesario mantener una aireación adecuada y monitorizar los niveles de oxígeno en todo momento. Es por esto que la presencia de oxígeno es muy importante, ya que esta permite la respiración de los microorganismos una adecuada aireación mantiene la separación de la materia y así, se puede evitar que esta se compacte o encharque durante el proceso de oxidación, el carbono se transforma en biomasa y dióxido de carbono (CO₂). Además, la aireación es un proceso biooxidativo en el compostaje que causa una oxidación de los microorganismos del material orgánico con la falta de presencia de aire los residuos orgánicos se descomponen de manera anaerobia originándose dificultades antes citadas y tardándose la fermentación. Si existiera una abundancia de aire se enfriará la mezcla de materiales orgánicos a compostar retardando que logre la temperatura adecuada para la higienización del compost.

3.12 pH

El nivel de pH es un parámetro importante en el compostaje, afecta las actividades microbianas durante el compostaje. En general, el pH sigue un patrón de compostaje; disminución de los niveles de pH en las primeras etapas de compostaje y también la elevación de los niveles de pH en las últimas etapas de compostaje notaron que el aumento en el pH causó un aumento en NH₃ / NH₄ relación que resulta en mayores tasas de volatilización. Observaron una disminución en las actividades

microbianas durante el compostaje a niveles de pH muy bajos de 5. El pH cae durante las primeras etapas del proceso de compostaje y aumenta en las últimas.

Normalmente, en el proceso de compostaje, se da una caída del pH en la fase inicial, debido a la liberación de ácidos orgánicos de la materia orgánica. Conforme el proceso de descomposición continúa, estos ácidos orgánicos son descompuestos liberándose bases y altos contenidos de amoníaco que ayudan a elevar el pH. En el compostaje de broza de café, reportaron un incremento del pH desde 4.4 hasta 8.25 en el producto final (19). Estos incrementos pueden llegar a niveles como el reportado en compost de desechos de banano, donde encontraron pH finales hasta de 12.

Sin embargo de acuerdo con las causas anteriores o disminución del pH. también agregaron que la mineralización de compuestos de nitrógeno y fósforo también puede causar una disminución en el pH. El cuanto al aumento del pH. Menciona que puede resultar de la acumulación de amoníaco resultante de la degradación de las proteínas también mencionaron que la alcalinización de la materia orgánica puede dificultar la supervivencia de microorganismos sensibles al pH que contribuyen al saneamiento.

CAPÍTULO IV

4 MICROBIOLOGÍA DEL PROCESO DE COMPOSTAJE

4.1 Microbiología del proceso de compostaje

El compostaje es un proceso biológico donde los microorganismos presentes degradan y transforman la materia orgánica como fruto de su actividad dando finalmente lo que conocemos como compost un indicador de esta actividad es la evolución de la temperatura, la cual experimenta un claro comportamiento a lo largo del proceso que es común a todos los compostajes. Dentro del proceso microbiológico se siguen parámetros bien manejados que se tendrá un compost de buena calidad, con las siguientes características: libre de contaminación, higienizado, alto potencial fitosanitario, potencial de fertilización, potencial de capacidad de retención de agua, potencial de protección de erosión y libre de malos olores un indicador de la actividad microbiana, es la evolución de la temperatura, la cual experimenta un claro comportamiento a lo largo del proceso que es común en todos los compostajes.

a) Microbiología y compostaje

Durante el proceso de compostaje se lleva a cabo una compleja sucesión de poblaciones de microorganismos, que están en función de la evolución de la temperatura, disponibilidad de nutrientes, concentración de oxígeno, contenido de agua, pH y acumulación de compuestos antibióticos de estas las poblaciones las más importantes son: bacterias, actinomicetos y hongos filamentosos estos los microorganismos son los

grandes protagonistas de la degradación de la materia orgánica tienen un papel fundamental en todos los procesos y es por este motivo por el que vamos a dedicar una serie de entradas que nos permitan saber más sobre la microbiología del compostaje y como trabajar con ellos desde un punto de vista práctico.

b) Proceso microbiológico de compostaje

Para el proceso microbiológico durante el compostaje es necesario incorporar materias primas que favorezcan la vida de los microorganismos involucrados en el movimiento de nutrientes, las bacterias del compost son en su mayoría descomponedores, también conocidas como los saprofitos, pertenecientes al grupo de quimioorganotrofos, microorganismos, entre ellos, géneros bacterianos como *Pseudomonas Burkholderia Zymomonas Xanthomonas* y aerofijos de nitrógeno, Microorganismos colonizadores, Bacterias (44,6%), actinomicetos (32,3%), Hongos (23,1%), principalmente representados por los géneros *Bacillus, Steptomyces, Actinomyces, Pseudomonas* y *Azospirillum*. El conjunto de estos microorganismos que se desarrolla durante el compostaje puede afectar al proceso tanto positiva como negativamente al proceso o a la calidad del producto que son responsables en la generación de olores y patógenos

Durante el compostaje es necesario incorporar materias primas que favorezcan la vida de los microorganismos involucrados en el movimiento de nutrientes, las bacterias del compost son en su mayoría descomponedores, también conocidas como los saprofitos, pertenecientes al grupo de quimioorganotrofos, microorganismos, entre

ellos, géneros bacterianos como *Pseudomonas* *Burkholderia* *Zymomonas* *Xanthomonas* y aero-fijadores de nitrógeno.

4.2 Diversidad microbiana de la pila de compostaje

Se pueden encontrar bacterias quimiolitotrofos y bacterias nitrificantes que convierten el amonio en nitritos y nitratos, la más representativa géneros de este tipo son *Nitrosomonas* y *Nitrospira*, los hongos son descomponedores en la naturaleza y se pueden encontrar durante la primera y última fase del proceso de compostaje (primer mesófila fase y fase de maduración), la más representativa los géneros sentativos son *Aspergilo* *Acremonium*, *Chrysosporium*, *Fusarium*, *Mortierella*, *Penicillium* y *Tricoderma*, la diversidad microbiana en la pila de compostaje o compostera con estos microorganismos, tiene el objeto de disminuir el tiempo de elaboración del abono orgánico, obtener un material microbiológica y nutricionalmente mejorado.

En la pila se remueve periódicamente para homogenizar la mezcla a fin de eliminar el excesivo calor, controlar la humedad y aumentar la porosidad de la pila para mejorar la madurez del compost. y dependiendo de la forma de la pila el proceso de trituración debe determinar la estructura para conseguir un buen intercambio de gases y la altura correcta. Por lo general, los siguientes tipos de pilas se distinguen:

- Pila capa
- Pila delta

- Pila trapezoidal

4.3 Sucesión microbiana durante el proceso de compostaje

Dentro de esta sucesión de microorganismos fijadores de nitrógenos encontramos a dos grandes grupos: el primero representados por bacterias simbióticas y el segundo por bacterias de vida libre. Las principales especies del género *Rhizobium*, bacterias simbióticas que producen nódulos en diferentes especies de leguminosas, se encuentran: *Rhizobium meliloti*, *Rhizobium fredii*, *Rhizobium leguminosarum*, *Rhizobium tropici*, *Rhizobium etli*, *Rhizobium galegae*, *Rhizobium loti*, *Rhizobium huakuii*, *Bradyrhizobium japonicum*, *Bradyrhizobium elkanii* y *Azorhizobium caulinodans*. Por otro lado, dentro de las principales bacterias de vida libre que son capaces de dar el nitrógeno atmosférico, encontramos a los géneros: *Azotobacter*, *Azospirillum*, *Beijerinckia*, *Azoarcus*, *Burkholderia*, *Enterobacter*, *Klebsiella* y *Bacillus*. para que estos microorganismos puedan desarrollar una óptima actividad de descomposición se requieren (52 – 65 °C, contenido de humedad. De toda esta sucesión de microorganismos las más bacterias más importantes bacterias, Actinomycetes y hongos filamentosos, Las bacterias son las más numerosas en el proceso de compostaje, y constituyen entre el 80% y el 90% de los microorganismos existente en el compost que utilizan un amplio rango de enzimas que degradan químicamente una gran variedad de compuestos orgánicos. los Actinomycetes durante el proceso de modificación de la materia orgánica del compost es relevante, debido a la capacidad enzimática para degradar compuestos orgánicos complejos (celulosa, lignina, etc.),

Los hongos filamentosos pueden estar implicados durante el proceso de compostaje, participando en la degradación aeróbica de la materia orgánica debido a su alta capacidad lignocelulolítica.

La sucesión de estas poblaciones generalmente se asocia a la temperatura. De esta forma el proceso se ha descrito de la siguiente manera:

a) Fase mesófila

Considerado la primera fase de latencia o crecimiento, llamada también mesolítica o mesófito, en que los microbios se hallan adaptándose al medio putrefacto y comienza a multiplicarse, dura de 2 a 4 días durante esta fase la mezcla inicial presenta una temperatura ambiente baja, que en pocos días o incluso pocas horas, llega a aumentar hasta los 45° C. El rápido aumento de temperatura es producido por el trabajo de descomposición realizado por los microorganismos mesófilos, al utilizar el carbono y nitrógeno presente en la mezcla. Estos microorganismos generan calor mientras digieren los carbohidratos y sacáridos con bajo peso molecular, para obtener energía y terminan transformándolos en dióxido de carbono (CO₂) y agua.

En esta etapa predominan las bacterias, y los microorganismos oomicetos, zigomicetos, ascomicetos, basidiomicetos y hongos imperfectos se multiplican rápidamente por la actividad metabólica, que eleva la temperatura, produciendo ácidos orgánicos los que hacen bajar el pH. en este periodo son atacadas las sustancias carbonadas fácilmente oxidables como los glúcidos, almidón, aminoácidos y proteínas solubles

produciendo ácidos orgánicos que pueden bajar el pH hasta cerca de 4,0 o 4,5 es donde se produce la acidificación.

b) *Fase termófila*

La segunda fase del compostaje ocurre cuando la mezcla alcanza temperaturas mayores a los 45° C hasta 70°C durante esta fase, los microorganismos mesófilos son reemplazados por otros que prosperan en mayores temperaturas, generalmente las bacterias termófilas, que facilitan la degradación de fuentes más complejas de carbono, como lo son la celulosa y la lignina estos microorganismos o bacterias termófilas transforman el nitrógeno en amoníaco, causando que el pH de la mezcla suba. Por otro lado, a partir de los 60° C comienzan a aparecer bacterias productoras de esporas y actinobacterias, que se encargan de descomponer las ceras, hemicelulosas y otros compuestos de carbono complejos. Así mismo, a esta fase también se le conoce como fase de higienización, ya que es durante esta etapa que las altas temperaturas rebasan los 55° C y el calor destruye bacterias contaminantes, hongos fitopatógenos y semillas de malezas que pudieran encontrarse en el material de partida.

Otro aspecto fundamental de esta fase es la destrucción de bacterias y patógenos debido a las altas temperaturas del materia el calor generado destruye bacterias y contaminantes de origen fecal como *Escherichia coli* y *Salmonella spp*; además eliminan quistes, huevos de helminto, esporas de hongos y semillas de malezas el proceso tarda de una a ocho semanas según el ritmo de fermentación acelerado o lento, dependiendo de los especímenes que entran del medio, se hace una verdadera pasteurización

y excesiva mineralización. Además, transforma el nitrógeno en amoníaco y el pH alcalino. A 60°C los hongos termófilos desaparecen y surgen bacterias esporíferas y actinomicetos que descomponen las ceras, proteínas y hemicelulosas, la temperatura desciende a 40°C, habita en que reinician su actividad y desciende el pH.

Las altas temperaturas alcanzadas durante la fase termófila, se produce la higienización del material orgánico, eliminando aquellos agentes patógenos, parásitos o semillas de malas hierbas que puedan aportar algunos componentes de la mezcla y aparecen las poblaciones de microorganismos formadores de esporas en esta fase tiene lugar la maduración del material orgánico y la degradación de los polímeros más complejos a un ritmo menor que en etapas anteriores, produciéndose fundamentalmente la estabilización del material y la polimerización de compuestos, para dar lugar a sustancias presentes en el compost con características similares a las del humus afirma que una vez que se produce una disminución del volumen de los residuos orgánicos debido a la transformación de la materia orgánica por parte de los microorganismos, que la asimilan y la metabolizan se produce una liberación de CO₂ que se va a la atmósfera y una cantidad importante de nutrientes minerales que formaban parte de la matriz orgánica y que después de esta metabolización, se quedan en formas más disponibles.

Se debe controlar que no supere los 70°C, debido que poblaciones de microorganismos que intervienen en el proceso mueren. Se logra la higienización del material, se consigue eliminar la mayor cantidad de plagas, microorganismos patógenos y semillas de mala hierba.

c) Fase de enfriamiento

Durante esta fase las fuentes de carbono y nitrógeno comienzan a agotarse, dando paso al enfriamiento de la mezcla y las temperaturas descienden a los 40 - 45°C. Con las temperaturas dentro de este rango, incluso por debajo de los 40° C, los microorganismos mesófilos se reactivan produciendo que el pH descienda levemente, pero se mantiene dentro del rango alcalino esta fase generalmente puede tardar varias semanas antes de pasar a la cuarta y última fase del proceso de compostaje. Además, al agotarse las fuentes de C y N, la temperatura comienza a disminuir hasta llegar a los 40-45 °C. Sin embargo, continúa la degradación de celulosa, hemicelulosa y lignina, polímeros presentes en los residuos orgánicos y se observan algunos hongos. Sus porcentajes varían de acuerdo con el tipo de residuo e, igualmente, el pH se ve afectado al disminuir su valor.

Agotadas las fuentes de carbono y nitrógeno en el material de compostaje, la temperatura desciende hasta los 40-45°C se va consumiendo el material fácilmente degradable, desaparecen los hongos termófilos y el proceso continúa gracias a los organismos esporulados y actinomicetos cuando se inicia la etapa de enfriamiento, los hongos termófilos que resistieron en las zonas menos calientes del proceso realizan la degradación de la celulosa.

Lo característico de esta fase es el descenso paulatino de la temperatura < a 40°C y los microorganismos mesófilos se reactivan las bacterias y los hongos transforman otra parte de la celulosa como la lignina y

lignoproteína y se da la presencia de microorganismos e invertebrados y el pH desciende ligeramente entre 7.0 a 7.5.

d) Fase de maduración

Esta es una de las fases más lentas del proceso, ya que es una fase que puede tardar de 3 a 4 meses y es un período de fermentación muy lento en este período, aparecen microorganismos como hongos que continúan el proceso de descomposición y estabilización del compost. Finalmente, durante esta fase los componentes orgánicos comienzan a sintetizar los coloides húmicos, hormonas, vitaminas, antibióticos y otros compuestos que forman el compost que favorece el desarrollo vegetal.

En esta última etapa se degradan los compuestos más resistentes, la temperatura comienza a bajar hasta equilibrarse con el ambiente y se caracteriza por mantener una fermentación lenta normalmente la temperatura es de 15 a 20°C y el pH se mantiene neutro indica que es un parámetro importante es la madurez del compost los microorganismos mesofílicos las bacterias y los hongos consumen la lignina y disminuye la población de microorganismo.

4.4 Ecología microbiana del proceso de compostaje

4.4.1 *Sustrato o matriz*

Características físicas del sustrato tales como el tamaño de partícula y la porosidad, junto a las químicas, como son la mayor o menor biodegradabilidad de sus distintas fracciones orgánicas y la presencia de compuestos antimicrobianos, pueden condicionar en gran medida el

desarrollo del proceso de compostaje. El sustrato debe poseer una estructura física apropiada y un óptimo tamaño de partícula, de manera que se conjuguen diferentes aspectos tales como máxima superficie expuesta al ataque microbiano y una porosidad que favorezca un adecuado intercambio gaseoso.

El uso del compost como sustrato o componente de sustratos ha sido objeto de un excelente trabajo en el que se analizan los principales factores limitantes y se efectúan unas recomendaciones genéricas, que permitan obtener compost de calidad, con unas propiedades adecuadas para su empleo como sustrato o componente de sustratos de cultivo. El grado de madurez del compost es, juntamente con la salinidad, una de las características más importantes que condicionan la promoción del compost de biorresiduos, ya que los compost frescos, no suficientemente maduros, presentan fitotoxicidad residual, que puede afectar negativamente a la fisiología de las raíces y las plantas.

4.4.2 Temperatura

Las temperaturas que alcanza el sustrato durante el proceso de compostaje dependen del calor generado por la actividad microbiana y de la distribución y pérdida del mismo en el sistema. Elevadas temperaturas pueden tener efectos beneficiosos puesto que permiten eliminar organismos patógenos y parásitos termolábiles, pero también pueden tener efectos negativos sobre el progreso del compostaje al eliminar los organismos necesarios o beneficiosos para el proceso de compostaje. La evolución de la temperatura a lo largo del proceso debe permitir la conjunción entre tasas elevadas de biodegradación y la

higienización del material, alcanzando niveles térmicos que permitan un adecuado desarrollo de ambos procesos.

La temperatura es uno de los principales parámetros para monitorear el proceso de compostaje los regímenes de tiempo y temperatura requeridos para la eliminación de bacterias coliformes, *Escherichia coli* y otros patógenos varían, (temperaturas entre 52 y 60°C) considerados para mantener la mayor actividad termofílica en sistemas de comercialización. también la temperatura óptima es 40 - 65 ° C para el compostaje observando el nivel más alto de actividad termofílica a 54 ° C que se encuentra en el rango establecido.

La alta temperatura y la cantidad excesiva de amoníaco pueden inhibir el crecimiento y la actividad de las bacterias nitrificantes en la fase, sin embargo, se debe tener cuidado de que las temperaturas no se eleven demasiado (es decir, a más de 71 ° C) porque el calor excesivo puede destruir las poblaciones microbianas termofílicas, por lo tanto, las temperaturas del compost no deben exceder 60 - 65 ° C ya que esto mataría a casi todos los microorganismos y haría que el proceso pare.

La temperatura es uno de los parámetros más importantes en el compost, deduciendo así que mientras aumenta la temperatura, la eficiencia del proceso de compostaje disminuye, además según lo mencionado las temperaturas adecuadas para mantener la actividad termófila es de 52 – 60 °C, si se llegara a pasar este rango de temperaturas sería perjudicial para los microorganismos y el proceso se paralice (muerte microbiológica).

4.4.3 Aireación

Es sumamente importante que durante el proceso de compostaje exista una buena aireación y ventilación de los materiales, esto es debido a que se intenta favorecer la actividad de los microorganismos aeróbicos. Cabe destacar, que aun así es imposible que no ocurran reacciones anaeróbicas. Un correcto manejo de las pilas de compostaje intentará minimizar estas reacciones. Además indica que el objetivo de la aireación durante el proceso de compostaje es suministrar oxígeno para la degradación microbiana, controlar la temperatura y eliminar la humedad de la materia orgánica.

La aireación es un proceso biooxidativo en el compostaje que causa una oxidación de los microorganismos del material orgánico con la falta de presencia de aire los residuos orgánicos se descomponen de manera anaerobia originándose dificultades antes citadas y tardándose la fermentación. Si existiera una abundancia de aire se enfriará la mezcla de materiales orgánicos a compostar retardando que logre la temperatura adecuada para la higienización del compost.

La aireación en el compost es fundamental para los microorganismos y para la liberación del anhídrido carbónico, por eso es necesario proporcionar oxígeno, los niveles deben de estar entre 10 y 18%. Olores nauseabundos indican la falta de aireación y se produce respiración anaeróbica (la putrefacción genera di hidruro de azufre SH₂) con olor a amoniacado producto de la amonificación. Este fenómeno puede originarse por el exceso de agua o por compactación excesiva del material, se debe suspender el riego o remover el material.

La función primordial de la aireación en el compostaje es el aporte de oxígeno, también permite un control de la temperatura de la masa, la eliminación de agua y la evacuación de CO₂ y otros gases generados durante la biodegradación de la materia orgánica. Es decir una insuficiente aireación de la masa provoca un retardo del proceso de compostaje y, bajo condiciones anaerobias, se generan metabolitos responsables de malos olores, junto con otros que pueden resultar tóxicos para la microbiota y para las plantas.

la aireación proporciona suficiente CO₂ necesario para la oxidación del material orgánico y evapora el exceso de humedad del sustrato explicó que muy poca aireación puede conducir a condiciones anaeróbicas, y también una aireación excesiva puede resultar en un enfriamiento excesivo, previniendo así las condiciones termofílicas requeridas para velocidades de descomposición óptimas de acuerdo a el aumento de la aireación generalmente resulta en una mayor tasa de evaporación, un secado más rápido del compost y el enfriamiento del compost grande. El proceso de aireación más común es el torneado o virado de la materia orgánica, así como el compostaje se oxigena permitiendo que las poblaciones microbianas se incrementen liberando olores que afectan el desarrollo del proceso.

4.4.4 pH

El pH inicial suele ser de 5 - 7, durante los primeros días del desarrollo del compostaje el pH puede ser de 5 por la presencia de ácidos orgánicos de pequeño peso molecular y microorganismos mesofílicos. Pasado los tres días se inicia la etapa termofílica donde se evidencia incremento del

pH teniendo valores de 8.5 manteniéndose así durante todo el proceso. Por otro lado, cuando la T° no es adecuada en el proceso de compostaje el pH disminuye a 7.

La evolución del pH es uno de los parámetros más importantes para el progreso del compostaje y la calidad y estabilidad del producto final. Para la evaluación del proceso de compostaje y la calidad del compost, a más de valores de pH y de CE dentro de los límites previsibles, según lo establecido en la legislación española en donde se indica que valores de pH entre 6,5 a 8,5 son aceptables se deben considerar los contenidos de MO, relación Carbono/Nitrógeno C/N, macro y micronutrientes, índice de germinación y ausencia de patógenos cabe destacar que en el Ecuador no se dispone de normas regulatorias sobre la elaboración de biofertilizantes.

El nivel de pH es un parámetro importante en el compostaje, afecta las actividades microbianas durante el compostaje en general, el pH sigue un patrón de compostaje; disminución de los niveles de pH en las primeras etapas de compostaje y también la elevación de los niveles de pH en las últimas etapas de compostaje durante las primeras etapas del proceso de compostaje. el pH cambia varias veces durante el compostaje. Generalmente, hay cuatro fases :

- **Fase de génesis de los ácidos (I):** el pH disminuye, la flora produce mucho CO₂ y ácidos orgánicos al principio de la fase termófila,

- **Fase de alcalización (II):** con un pH creciente, hidrólisis bacterial de proteínas y nitrógeno orgánico produce amoníaco

Fase de estabilización del pH (III): La relación C/N se reduce, las reacciones se vuelven más lentas. El amoníaco se pierde por volatilización (especialmente con un pH > 8), y el nitrógeno es utilizado por los microbios para sintetizar nuevos compuestos húmicos.

CAPÍTULO V

5 CINÉTICA MATEMÁTICA DEL PROCESO DE COMPOSTAJE

5.1 Modelación matemática para el crecimiento microbiano (Fermentación aerobia)

Objetivo: La modelación matemática para el compostaje tiene por objeto la integración de los procesos: físicos, químicos y microbiológicos para la aproximación a la modelación para formular un logaritmo o ecuación matemática que permita la relación entre variables, la predicción, el diseño de un proceso óptimo para el compostaje

a) Modelo desarrollado para la fermentación aeróbica

Luini Hurtado en 2015 formó un modelo matemático de fermentación aeróbica, donde describe la dinámica de los procesos microbiológicos, físico y químicos básicos de un tratamiento de la materia orgánica expresada en la siguiente ecuación:

$$(1) \quad ds / dt = MxY - dp / dt,$$

$$(2) \quad dx / dt = Mx,$$

$$(3) \quad dp / dt = k_p Mx,$$

$$(4) \quad dT / dt = k_1 Mx - k_2 (T - T_0),$$

$$(5) \quad M = M^{max}_S / (K_S + s) / (1 + p / k_i)$$

Ecuación 1.- Modelo matemático para la fermentación aeróbica.

Donde:

x, s y p = Concentración de la biomasa microbológica, los fertilizantes orgánicos y los productos del metabolismo.

T y T_0 = Temperaturas del abono y del medio ambiente.

M^{max} y M = Velocidad máxima y específica de crecimiento de los microorganismos.

Y = Rendimiento de la biomasa sobre la base del sustrato.

K_s y K_i = Constante del sustrato y la constante de la inhibición del crecimiento

t = El tiempo

k_1, k_2 y k_p = Constantes.

5.2 Conceptos cinéticos

La cinética de crecimiento de la biomasa se basa en la tasa de crecimiento y la de utilización de un sustrato en cultivos por lotes existe una fase de crecimiento logarítmico exponencial, para óptimos resultados, debe tenerse un control en la velocidad de crecimiento y reproducción de las bacterias y está dada por la siguiente ecuación.

5.2.1 *Cinética de crecimiento microbiano*

Los modelos de inhibición de sustrato cinético se han utilizado para explicar el crecimiento del cultivo microbiano en presencia de fenol y cianuro en este estudio. La tasa de crecimiento específico del cultivo microbiano a diferentes concentraciones iniciales de fenol y cianuro se diseñó mediante la ecuación:

$$\mu_s = \frac{\ln(x_2 - x_1)}{(t_2 - t)}$$

Ecuación 2.- Cinética de crecimiento microbiano.

Donde:

x : es la concentración de la biomasa

t : tiempo durante el cual se concentra a biomasa.

μ_s : es la tasa de crecimiento específica.

5.2.2 *Crecimiento de microorganismos*

La curva clásica de crecimiento microbiano (número de células vivas N frente al tiempo, por lo que muestra cuatro fases:

1. Fase de retraso. No hay crecimiento, las células pueden usar alimentos para aumentar en masa pero no en número.

2. Fase logarítmica (logarítmica, exponencial). El número de células aumenta con el tiempo de forma exponencial.

3. Fase estacionaria. El número de células vivas permanece casi constante en el tiempo, esta fase generalmente se explica como una durante la cual la tasa de generación de nuevas células es igual a la tasa de muerte.

4. Rechazar. El número de células vivas disminuye con el tiempo, generalmente de manera exponencial.

La tasa de crecimiento microbiano sigue un patrón conocido como la "cinética de Monod. Dado que el crecimiento se produce como resultado de la división de una célula viva en dos, se puede suponer que la tasa de crecimiento en cualquier momento será proporcional al número de células vivas en ese momento:

$$\frac{dN}{dt} = \mu N \quad (3).$$

Ecuación 3.-Ecuación de la tasa de crecimiento microbiano.

La ecuación en realidad representa cinética de primer orden.

Donde:

La constante de velocidad μ se denomina tasa de crecimiento específica, una de las características interesantes de μ es su dependencia de la concentración de sustrato.

5.3 Modelo exponencial

$$\frac{dX}{dt} = \mu X$$

Ecuación 4.-Modelo exponencial.

Donde: $\frac{dX}{dt}$ es la variación del tiempo con el contenido de microorganismos X.

$t = \text{tiempo} = \text{concentración de microorganismos};$

$\mu = \text{a velocidad de crecimiento.}$

5.4 Modelo Cinético de Monod

Establecido por Monod en 1949, dedujo que la tasa crecimiento depende no solo de la concentración de, microorganismos sino también de la concentración del sustrato en la siguiente ecuación:

$$\mu = \mu_{\text{máx}} \frac{S}{K_s + S}$$

Ecuación 5. Modelo Cinético de Mond.

Donde:

μ : *es la velocidad de crecimiento de microorganismos;*

$\mu_{\text{máx}}$: *tasa maxima de crecimiento de microorganismos.*

S^n : *la concentraion del sustrato, $\frac{\text{masa}}{\text{unidad}}$ de volumen.*

K_s : *constante promedio de velocidad.*

5.5 Modelo de Moser

Propuesto por MOSER y Hermann en 1958, este modelo nació como una modificación al modelo de Monod en 1950, y se considera como una buena aproximación cuando la composición celular es independiente del tiempo de proceso 37. Se caracteriza porque en su formulación, está implícita la consideración del efecto de la propagación de especies mutantes en la población bacteriana.

$$\mu = \mu_{\text{máx}} \frac{S^n}{K_s + S^n} X$$

Ecuación 6.-Modelo de Moser

Donde:

μ : es la velocidad de crecimiento de microorganismos;

$\mu_{\text{máx}}$: tasa máxima de crecimiento de microorganismos.

S^n : la concentración del sustrato, $\frac{\text{masa}}{\text{unidad}}$ de volumen.

K_s : constante promedio de velocidad.

Acoplado a un balance de masa del sustrato para obtener todas las variables en función de la biomasa se deduce a:

$$\frac{dy}{dx} : \mu_{\text{máx}} \frac{(S_0 \frac{X_0 - X}{Y_{xs}})^n}{K_s + S^n}$$

Ecuación 7.-Modelo integrado de Moser

Este modelo considera las mismas variables que el modelo de Monod ecuación (2).

5.6 Modelo de Haldane

Este modelo fue desarrollado en 1930 por (HALDANE, J. B. S) con la finalidad de utilizarlo ampliamente en sistemas discontinuos, estudia las capacidades de adaptación de microorganismo al medio, para su desarrollo y es una buena representación de la presencia de sustratos inhibitorios en el medio.

$$\mu = \mu_{max} \frac{S}{K_m + S + (k_1 S^2)}$$

Ecuación 8.-Modelo de Haldane

Despejando S en un balance de sustrato para acoplarlo a un balance de masa no muestra la siguiente ecuación.

5.6.1 Modelo de Haldane para el crecimiento microbiano

$$\frac{dX}{dt} = \mu_{max} \frac{S_0 + \frac{X_0 - X}{Y_{XS}}}{K_s + S_0 + K_1 \left(S_0 + \frac{X_0 - X}{Y_{XS}} \right)^2} X$$

Cuya expresión integrada, es una función independiente de la biomasa descrita mediante la siguiente ecuación:

Expresión integrada del modelo de Haldane.

$$t = \frac{(S_0^2 K_1 + S_0 + K_s) Y_{XS}^2 + ((2S_0 K_1 + 1) X_0 Y_{XS} + K_1 X_0^2) \ln\left(\frac{X}{X_0}\right)}{S_0 Y_{XS}^2 + X_0 Y_{XS}} + \frac{K_s Y_{XS} \ln(X - S_0 Y_{XS} - X_0)}{S_0 Y_{XS} + X_0} \cdot \frac{\mu_{max}}{Y_{XS}} - \frac{K_1 X}{Y_{XS} \mu_{max}}$$

Ecuación 9.-Modelo de Haldane para el crecimiento microbiano.

Donde:

μ_{max} , S , K_s , K_l = tasa de crecimiento específico, concentración de sustrato (g/mL), constante de saturación (g/mL) y constante de inhibición por sustrato (g/mL).

5.7 Ecuación logística

Esta ecuación describe el comportamiento de la biomasa en distintos procesos de fermentación:

$$\frac{dX}{dt} = \mu X \left(1 - \frac{X}{X_m}\right)$$

Ecuación 10.-Ecuación Logística del proceso de fermentación.

Donde:

X_m = Concentración máxima de la biomasa en el proceso fermentativo

μ = Tasa de crecimiento específica

X = Concentración de biomasa

Al integrar la ecuación anterior en las condiciones de frontera $X = X_0$ y $t = t_0 = 0$, se obtiene la siguiente ecuación correspondiente al crecimiento de biomasa en función del tiempo.

5.7.1 Ecuación para el crecimiento de biomasa en función del tiempo

$$X = \frac{X_0 X_m e^{\mu t}}{X_m - X_0 + X_0 e^{\mu t}}$$

Ecuación 11.-Ecuación para el crecimiento de biomasa microbiana en función de tiempo.

5.8 Modelo de Teissier

Este modelo fue propuesto en 1936, previo al modelo de Monod y fundamentado en un punto de partida diferente al mismo, explicando el efecto de las hormonas en el crecimiento de ciertos cultivos, en donde se introdujo una hipótesis que resulto mostrando la relación semilogarítmica entre la velocidad de crecimiento y la concentración de biomasa.

Este modelo se presenta de la siguiente manera:

$$\mu = \mu_{max} \left(1 - e^{\left(\frac{-S}{K_s} \right)} \right)$$

Ecuación 12.-Modelo de Teissier.

De igual manera, el modelo de Teissier este acoplado a un balance de materia y sustrato, en donde se da la siguiente ecuación diferencial.

5.8.1 Modelos de Teissier para el crecimiento microbiano.

$$\frac{dX}{dt} = \mu_{max} \left(1 - e^{\left(\frac{-S_0 - \frac{X_0 - X}{Y_{XS}}}{K_m} \right)} \right) X$$

Ecuación 13.-Modelos de Teissier para el crecimiento microbiano.

Donde:

μ_{max} = Tasa de crecimiento específico (h^{-1}),

S = concentración de sustrato (g/mL)

K_m = constante de saturación (g/mL).

5.9 Modelo de Contois

Este modelo fue desarrollado en el año de 1959 por Contois, que ha sido ampliamente utilizado, para describir procesos de tipo anaeróbicos, para los casos principalmente donde la etapa de hidrólisis controla en mayor medida la velocidad del proceso fermentativo, debido a que se considera que la tasa de crecimiento específica depende de la densidad de población en el medio, el modelo está expresado de la siguiente manera:

$$\mu = \mu_{max} \frac{S}{K_S X + S}$$

La ecuación está acoplada a un balance de biomasa y sustrato, dando así la siguiente expresión:

5.9.1 *Modelo de Contois para crecimiento microbiano*

$$\frac{dX}{dt} = \mu_{max} \frac{S_0 + \frac{X_0 - X}{Y_{XS}}}{K_S X + S_0 + \frac{X_0 - X}{Y_{XS}}} X$$

Ecuación 14.-Modelo de Contois para crecimiento microbiano.

Mediante integración obtenemos una función independiente de la concentración de biomasa en el medio, la cual se obtiene la siguiente expresión:

Expresión integrada del modelo de Contois.

$$t = \frac{\ln\left(\frac{X}{X_0}\right) - K_S Y_{XS} \ln(X - S_0 Y_{XS} - X_0)}{\mu_{max}}$$

Ecuación 15.-Expresión integrada del modelo de Contois.

Donde:

μ_{max} = Tasa de crecimiento específico (h^{-1})

S = Concentración de sustrato (g/mL)

K_s = Constante de saturación (g/mL).

5.10 **Modelo de Amrane y Prigent**

Este modelo matemático fue creado en 1994 por Amrane y Prigent, plantearon un modelo cinético no estructurado para describir la producción de ácido láctico a partir de lactosa. Este modelo es

caracterizado por su simplicidad y fácil convergencia de los datos experimentales con los parámetros calculados cuando los valores iniciales de iteración son los acertados, el modelo esta expresado de la siguiente manera.

$$\mu = \mu_{max} \left(\frac{1}{1 + \frac{ce^{dt}}{\mu_{max} - c}} \right)$$

Ecuación 16.-Ecuación de Amrare y Prigent.

Esta expresión, se acopla a un balance de materia, ya que este modelo es independiente de la concentración de sustrato en el medio de cultivo y se expresa de la siguiente manera:

$$\frac{dX}{dt} = \mu_{max} \frac{1}{1 + \frac{ce^{dt}}{\mu_{max} - c}} X$$

Luego de realizar un método integral de análisis, se obtiene una ecuación integrada del modelo de Amrare y Prigent que esta expresada de la siguiente manera:

5.10.1 Expresión integrada de la ecuación de Amrare y Prigent

$$X = X_0 \exp \left\{ \mu_{max} \left[t - \frac{1}{d} \ln \left(1 + \frac{c}{\mu_{max}} (e^{dt} - 1) \right) \right] \right\}$$

Ecuación 17.-Ecuación integrada del modelo de Amrare y Prigent

Donde:

X = Representa biomasa (UFC/mL)

μ_{max} = Tasa de crecimiento específica (h^{-1})

t, d y c = constantes propias del modelo cinético y el proceso fermentativo.

5.11 Modelos de Powell

La Principal característica de este modelo cinético desarrollado en 1967, este acoplado a la transferencia de masa de sustrato a través de la celulosa a la ecuación de Monod 1950, donde contiene la difusividad del sustrato y la permeabilidad del mismo en la membrada. Se expresa de la siguiente manera:

$$\mu = \mu_{max} \frac{S}{(K_m + L) + S}$$

Ecuación 18.-Modelo de Powell.

Que acopla a un balance de materia y sustrato, dando paso a la ecuación diferencial que se expresa de la siguiente manera:

5.11.1 Modelos de Powell para crecimiento microbiano

$$\frac{dX}{dt} = \mu_{max} \frac{S_0 + \frac{X_0 - X}{Y_{XS}}}{(K_S + L) + S_0 + \frac{X_0 - X}{Y_{XS}}} X$$

Ecuación 19.-Modelo de Powell para crecimiento microbiano.

Cuya forma integrada en función de la biomasa, se representa mediante la siguiente expresión matemática:

$$t = \frac{\left(\ln\left(\frac{X}{X_0}\right)(X_0 + Y_{XS}(K_S + L + S_0)) - Y_{XS}(K_S + L) \ln(-X_0 - S_0 Y_{XS} + X) \right)}{\frac{X_0 + S_0 Y_{XS}}{\mu_{max}}}$$

Donde:

X , t , μ_{max} , S , K_S y L = representan la biomasa (UFC/mL), tiempo (h), tasa de crecimiento específica máxima (h^{-1}), concentración de sustrato (g/mL), constante de saturación (g/mL) y constante de difusión.

5.12 Cinética de Gompertz

Para el análisis de la cinética, se utilizaron 2 modelos de estudio de cinética, incluyendo la cinética de primer orden de Gompertz para evaluar las constantes de la tasa de degradación.

5.12.1 Cinética de 1er Orden

$$\ln M = -K * RT + B .$$

Ecuación 20.-Cinética de 1er orden de Gompertz

Donde:

M : es la concentración de compuestos orgánicos.

K : es la constante de hidrólisis de primer orden.

RT : es el tiempo de retención.

En cuanto a la cinética de primer orden estudio, cinética de degradación que incluye dos secciones (enumeradas como primera sección y segunda sección) y solo se aplicó una sola sección.

5.12.2 Cinética de Gompertz

$$P = A * \exp(B * \exp(C * RT))$$

Ecuación 21.-Cinética de Gompertz.

Donde:

P : es la concentración acumulada de compuestos orgánicos.

A : el potencial de concentración orgánica.

B : es la duración de la fase de retraso.

C : es la tasa de degradación máxima.

RT : es el tiempo de retención en el digestor anaeróbico.

5.13 Modelo Cinético de Michaelis Menten

La cinética de Michaelis Menten es un modelo bien conocido aplicado en el 2008 (Vavilin) de cinética enzimática, también se aplica para describir la tasa de hidrólisis en función de la enzima y concentraciones de sustrato para los microorganismos aerobios, expresadas en:

$$r_h = K_{max} \cdot S_e \frac{S}{K_{s,m} + S}$$

Ecuación 22.-Modelo Cinético de Michaelis Menten.

Donde:

r_h : hidrólisis de la cinética enzimática.

S y S_e : son las concentraciones de sustrato y enzima (g / L), respectivamente.

$K_{s,m}$: es el coeficiente de la tasa de media saturación (g / L).

5.14 Modelo cinético de crecimiento de Edwards

El modelo cinético de crecimiento posterior de Edwards, que era la forma mejorada del modelo Haldane, fue promovido por Edwards. Sin embargo, Edwards estableció que este modelo no indicaba mejores resultados comparados con el modelo de Haldane.

$$\mu_s = \frac{\mu_{max} S}{K_s + S + (S^2 / K_i)}$$

Ecuación 23.-Modelo cinético de crecimiento de Edwards.

Donde:

K_i : es la sustancia inhibidora de sustrato (mg / L) y es constante.

μ_s : es la tasa de crecimiento específica.

S : es la concentración del sustrato.

5.15 Modelo de Yano y Koga

Un modelo más preciso, Yano y Koga modelo, basado en el estudio de la cinética de inhibición de la degradación del sustrato a partir de los

datos de los inestables que se encuentran en un estado inicial más concentrado del sustrato.

$$\mu_s = \mu_{max} S / \left[S + K_s + \frac{S^2}{K_i} \left(1 + \frac{S}{K_i} \right) \right]$$

Ecuación 24.-Modelo de Yano y Koga.

Donde:

K_i :es una constante positiva

S:es la concentración del sustrato.

$\mu_{m\acute{a}x}$:tasa maxima de crecimiento de microorganismos.

5.16 Modelo de Cono

Por otro lado, investigadores como Pitt et al, El-Mashad (2013), Li et al. (2015) y Zahan et al. (2018), analizaron el modelo de cono. Este modelo describe la fermentación según la ecuacion.

$$M \frac{M_e}{1 + (k.t)^n}$$

Ecuación 25.-Modelo de Cono.

5.17 Modelo primario de Gipson para el crecimiento microbiano

Fue el primer modelo en ganar popularidad para la descripción de crecimiento fue el modelo log-logístico propuesto por Gibson et al. (1987). Debido a las dificultades para interpretar los parámetros de este modelo, Zwietering et al. (1990) lo reparametrizaron para darle un

significado microbiológico. La función resultante se muestra en la ecuación (32).

$$\ln \frac{N}{N_0} = A \cdot e^{-\exp\left(\frac{\mu_{\max}}{A}(\lambda - t) + 1\right)} .$$

Ecuación 26.-Modelo primario de Gipson para el crecimiento microbiano.

Donde:

N :indica el numero de microorganismos a tiempo t y N_0 ,es el valor de N en el momento de inoculación.

μ_{\max} y λ son los parametros del modelo.

A :es el tamaño maximo de la población microbiana.

5.18 Comparación de Modelos

Para la evaluación de los modelos, la mayoría de los investigadores usualmente usan dos estadísticas; a) coeficiente de determinación del ajuste (r^2), y b) raíz de la media de los cuadrados de los errores (RMSE) calculados por la ecuación (16), donde M_{model} es el valor de metano predicho por el modelo en un instante t , y M_{ob} es el valor del metano observado experimentalmente.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (M_{model} - M_{ob})^2}{n}}$$

Ecuación 27.-Comparación de Modelos Cinéticos.

Pitt et al., (1999), Ghufran y Charles (2004), El-Mashad (2013), Li et al., (2015) y Zahan et al. (2018) compararon el modelo de Gompertz modificado, el modelo cinético de primer orden, el modelo de función de transferencia y el modelo de cono, para diferentes tipos de sustratos y combinaciones en codigestión.

5.19 Modelo de Bergter

El modelo de Bergter desarrollado en 1983 por Bergter es una modificación del modelo de Monod modificado para considerar desaceleración durante la fase de retraso. El crecimiento bacteriano puede ser inhibido por ciertas concentraciones de sustrato, especialmente para mezclas de Cultivos de microorganismos en la siguiente ecuación:

$$\mu = \mu_{max} \frac{S}{K_s + S} \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{T}\right) \right]$$

Ecuación 28.-Modelo de Bergter.

Donde:

μ : tasa específica de crecimiento promedio(1/día).

μ_{max} : tasa específica de crecimiento máximo.

S : concentración del sustrato[g/L].

K_s : concentración del sustrato al 50% de la tasa específica de crecimiento máxima o constante de Michaelis-Menten [g/L].

t : tiempo.

T : tiempo de retardo.

5.20 Modelo de Chen y Hashimoto

Chen y Hashimoto modificaron un modelo de Contois, donde la concentración celular, que depende del nivel de degradación del sustrato, se incluye a través de la relación entre la concentración de sustrato y la concentración inicial de sustrato S_i . Sin embargo, la integración de la inhibición por sustrato o productos es limitada.

$$\mu = \mu_{max} \cdot \frac{\frac{S}{S_i}}{K + \frac{(1 - K) \cdot S}{S_i}}$$

Ecuación 29.-Modelo de Chen y Hashimoto.

Donde:

μ : tasa específica de crecimiento promedio.

μ_{max} : tasa específica de crecimiento máximo.

S : concentración del sustrato [g/L].

S_i : concentración inicial del sustrato [g/L].

K : constante de Michaelis-Menten [g/L].

5.21 Modelos Matemáticos de la Cinética de degradación del sustrato (Fermentación Aerobia)

5.21.1 *Cinética de degradación del sustrato*

En los procesos de biodegradación, aparte del sustrato es utilizado por la biomasa para producir nuevas células de biomasa y la otra parte se utiliza para lograr logros metabólicos independientemente del crecimiento. La biodegradación por cultivo mixto se modificó usando Modelos cinéticos de orden cero, primer orden, segundo orden y medio orden.

Este modelo se ha utilizado para estudiar la degradación de compuestos orgánicos usando microorganismos.

Las expresiones matemáticas de estos modelos se dan en la solicitud siguiente. ecuaciones:

5.21.2 *Modelo de cero orden*

$$S = S_0 - K_0 t$$

Ecuación 30.-Cinética de cero orden

5.21.3 *Modelo de primer orden*

$$S = S_0 \exp(-K_1 t)$$

Ecuación 31.-Cinética de primer orden

5.21.4 *Modelo de segundo orden*

$$K_s \ln \frac{S}{S_0} + S - S_0 = -K_2 t$$

Ecuación 32.-Cinética de segundo orden

5.21.5 *Modelo de tercer orden del modelo cinético*

$$Y = -K_{31} - \frac{K_{32}t}{2} = \frac{1}{t} \ln[S_0 - P + K_0 t / S_0]$$

$$P = S_0 - S + K_0 t$$

Ecuación 33.-Cinética de tercer orden

Donde, S_0 y K_0 son constantes de modelo de orden cero, k_1 y k_2 son constantes de tasa de primer y segundo orden, respectivamente, y X_0 es la concentración de biomasa (mg / L) en el tiempo $t=0$. P es la tasa de formación del producto, K_{31} y K_{32} son constantes de velocidad de tres órdenes.

5.22 **Cinética de consumo de sustrato**

La velocidad del consumo de sólidos volátiles se relacionó con la cinética de crecimiento utilizando un coeficiente de rendimiento de sustrato a biomasa constante, Y_S / X , como se presenta en la ecuación:

$$\frac{\partial s}{\partial t} = -Y_{s/x} \frac{\partial s}{\partial t}$$

Ecuación 34.-Cinética de consumo de sustrato

Con constante Y_S / X , ec (28), puede integrarse para obtener una relación algebraica entre el sustrato y la concentración de biomasa en la fase sólido-líquido.

$$S = S_0 - Y_{\frac{S}{X}}(X - X_0)$$

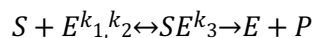
5.23 Modelación matemática de la fermentación anaeróbica

5.23.1 Modelos matemáticos de crecimiento bacteriano

La base para modelar la cinética del crecimiento bacteriano fue derivada por los dos bioquímicos alemanes Michaelis y Menten. Su modelo, que se publicó en 1913, describe la actividad enzimática dependiendo de la concentración del sustrato. Esta dependencia puede transferirse al crecimiento bacteriano, porque el crecimiento microbiano también es una reacción auto catalítica.

5.23.2 Modelado de fermentación y parametrización

Los mecanismos de reacción relacionados con la cinética enzimática, especialmente la cinética de Michaelis-Menten, han existido durante más de un siglo como herramienta matemática para describir la formación de un producto (P) resultante del proceso enzimático (E) que se une con un sustrato (S). Una forma típica de reacción enzimática se formula como:



Ecuación 35.-Ecuación de la reacción enzimática de la fermentación

Donde:

k_1 : describe la constante de velocidad para la reacción inversa.

k_2 y k_3 : describen la constante de velocidad para las reacciones directas correspondientes en cualquiera de los pasos.

Se puede llegar a una expresión para la tasa de formación de producto (r_p) como:

$$r = \frac{r_m C_s}{K_s + C_s} \quad (2).$$

Ecuación 36.-Ecuación para la tasa de formación del producto

Donde:

r : es la tasa de crecimiento específica de la biomasa.

r_m : es la tasa de crecimiento específica máxima de la biomasa.

K_s : es la constante de Monod.

5.24 Modelo de Mitsdörffer

En el modelo de Mitsdörffer (1991), la tasa de crecimiento específica depende, además de otros parámetros, de la producción de gas G_s (en m^3 / kg de materia seca orgánica).

$$\mu = \mu_{max} \frac{S^n}{S^n \cdot (1 + K_b \cdot G_s \cdot S^n)}$$

Ecuación 37.-Modelo de Mitsdörffer

Donde:

μ : tasa específica de crecimiento promedio.

μ_{max} : tasa específica de crecimiento máximo.

S : concentración del sustrato [g/L]

K_b : constante de Michaelis-Menten [g/L].

G_s : producción de gas (m³/kg).

n : parámetro que define la afinidad de las bacterias con el sustrato.

5.25 Modelos matemáticos para el crecimiento bacteriano con inhibición por concentración de sustratos

5.25.1 Inhibición por concentración de sustratos

La reducción del metabolismo de las células produce la modificación química de los sustratos o productos en la fermentación aeróbica, se reduce la permeabilidad de las células y varía la actividad química de algunas enzimas. A continuación, se los modelos desarrollados sobre el efecto inhibitorio de los sustratos.

5.26 Modelo de Grant

Según el modelo de Grant, la tasa de crecimiento específico disminuye casi linealmente a altas concentraciones del inhibidor de sustrato.

$$\mu = \mu_{max} \cdot \frac{1}{K_i + S}$$

Ecuación 38.-Modelo de Mitsdörffer.

Donde:

μ : tasa específica de crecimiento promedio.

μ_{max} : tasa específica de crecimiento máximo.

S : concentración del sustrato (g/L).

K_i : constante de inhibición (g/L).

5.27 Modelo de Andrews y Graef

Los primeros modelos matemáticos dinámicos de anaeróbico la digestión se basó en el supuesto de que una descripción del paso de limitación de velocidad. La primera dinámica del modelo matemático se basó en Andrews (1969), el modelo describe la generación de metano, Andrews y Graef (1971) luego procedieron a incorporar interacciones entre ácidos volátiles, pH, alcalinidad, gas tasa de producción y composición del gas.

$$r_s = \frac{\mu_{max} \cdot c(HA_c) \cdot c_B}{Y_{B/S} \cdot \left(K_{HAC} + c(HA_c) + \frac{c^2(HA_c)}{K_{iHAC}} \right)}$$

Ecuación 39.-Modelo de Andrews y Graef

Donde:

r_s : es la tasa de degradación del sustrato (g COD L⁻¹ día⁻¹).

μ_{max} : es la tasa de crecimiento específica máxima (día⁻¹).

c_B : es la concentración de bacterias (g COD L⁻¹).

$c(HA_C)$: es la concentración del ácido acético no disociado (g COD L⁻¹).

$Y_{B/S}$: es el coeficiente de rendimiento (g COD g COD⁻¹).

K_{HAC} : es la constante de semi-saturación del ácido acético (g COD L⁻¹), y K_{iHAC} es la constante de inhibición (g COD L⁻¹).

5.28 Modelo de Webb

$$\mu = \mu_{max} \cdot \frac{S \left(1 + \frac{\beta \cdot S}{K_i} \right)}{\left(S + K_s + \frac{S^2}{K_i} \right)}$$

Ecuación 40.-Modelo de Webb

Donde:

μ : tasa específica de crecimiento promedio [1/día]

μ_{max} : tasa específica de crecimiento máximo [1/día]

S : concentración del sustrato.

K_s : constante de Michaelis-Menten.

K_i : constante de inhibición.

β : parámetro definido por la velocidad de reacción.

5.29 Modelo de Aiba

El modelo de Aiba es una correlación empírica. Sin embargo, los datos simulados con inhibición de sustrato concuerdan bien con los datos empíricos de experimentos de laboratorio. Webb derivó su modelo de la cinética enzimática e integró un efecto alostérico con β como velocidad de reacción.

$$\mu = \mu_{max} \cdot \frac{S}{(K_s + S)} \cdot \exp\left(\frac{-S}{K_i}\right)$$

Ecuación 41.-Modelo de Aiba

Donde:

μ : tasa específica de crecimiento promedio

μ_{max} : tasa específica de crecimiento máximo.

S : concentración del sustrato

K_s : constante de Michaelis-Menten

K_i : constante de inhibición.

5.30 Modelo de Ierusalimsky

Fue propuesto en 1967, la cinética de crecimiento de *C. acetobutylicum* se caracteriza por inhibición de productos, la expresión implica que las células pueden tener un finito, aunque pequeña, tasa de crecimiento incluso a concentraciones de producto muy grandes.

$$\mu = \mu_{max} \cdot \frac{S}{K_s + S} \cdot \frac{K_p}{K_p + P}$$

Ecuación 42.-Modelo de Ierusalimsky

Donde:

μ : tasa específica de crecimiento promedio.

μ_{max} : tasa específica de crecimiento máximo.

K_s : Constante de Michaelis-Menten

S : concentración del sustrato

K_p : Constante de inhibición.

5.31 Modelo de Holzberg

Desarrollado en 1967.

$$\mu = \mu_{max} - K_1 \cdot (P - K_2)$$

Ecuación 43.-Modelo de Holzberg

Donde:

μ : tasa específica de crecimiento promedio.

μ_{max} : tasa específica de crecimiento máximo.

K_1 : Constantes de crecimiento y K_2

5.32 Modelo de Bazua & Wilke

Desarrollada en 1977 por Bazua & Wilke.

$$\mu = \frac{S}{K_s + S} \cdot \left(\mu_{max, P=0} \frac{a \cdot P}{b - P} \right)$$

Ecuación 44.-Modelo de Bazua & Wilke

Donde:

μ : tasa específica de crecimiento promedio.

K_s : Constante de Michaelis-Menten

S : concentración del sustrato

$\mu_{max, P=0}$: tasa específica de crecimiento máximo.

5.33 Modelo de Ghose & Tyagi

Propuesto en 1979.

$$\mu = \mu_{max} \cdot \left(1 - \frac{P}{P^*} \right) \cdot \frac{S}{S + K_s + S^2 / K_i}$$

Ecuación 45.-Modelo de Ghose & Tyagi

Donde:

μ : tasa específica de crecimiento promedio.

μ_{max} : tasa específica de crecimiento máximo [1/día].

S : concentración del sustrato.

K_s : Constante de Michaelis-Menten.

5.34 Dagley & Hinshelwood

Propuesto por Dagley & Hinshelwood en 1983.

$$\mu = \frac{S}{K_s + S} \cdot (1 - K \cdot P)$$

Ecuación 46.-Dagley & Hinshelwood

Donde:

μ : tasa específica de crecimiento promedio.

S : concentración del sustrato.

K_s : Constante de Michaelis-Menten.

5.35 Modelo de Han & Levenspiel

Los modelos se han definido por analogía con la inhibición enzimática, pero todo puede ser modelado por una extensión del modelo Monod propuesto por Han y Levenspiel en 1988. En este modelo, una forma generalizada se propuso la cinética de Monod para explicar la inhibición del producto, la célula y el sustrato. El modelo supone que existe un inhibidor crítico concentración por encima de la cual las células no pueden crecer, y que las constantes de la ecuación de Monod son funciones de este inhibidor limitante.

$$\mu = \mu_{max} \cdot \left(1 - \frac{P}{P^*}\right)^n \cdot \left[\frac{C_s}{k_s \left(1 - C_1 / C_1^*\right)^m + C_s} \right]$$

Ecuación 47.-Modelo de Han & Levenspiel

Donde:

μ_{max} : es la tasa de crecimiento específica máxima.

k_s : es el coeficiente de media saturación.

C_1^* : es la concentración de inhibidor que causa todos los microbios

C_s : es la limitante concentración de sustrato.

CAPÍTULO VI

6 MANEJO, DOSIFICACIÓN Y GESTIÓN AGRONÓMICA DEL COMPOST

El manejo del compost se determina en base a sus características físicas y químicas como contenido de materia orgánica, nitrógeno, fósforo, potasio, humedad, pH, relación C/N, contenido de sales, presencia de metales pesados, entre otros. Si estos parámetros son bien manejados se tendrá un compost de buena calidad, con las siguientes características: libre de contaminación, higienizado, alto potencial fitosanitario, potencial de fertilización, potencial de capacidad de retención de agua, potencial de protección de erosión, libre de malos olores y estabilidad microbiológica.

La dosis recomendable en aplicar esta entre 1 y 2 kg por metro cuadrado al año. En cultivos de leguminosas se requiere al menos 3 ton/há de compost. En zanahoria, cebolla, ajo, betarraga y en frutales es apropiada una dosis de 6 ton/ há. Para cultivos más exigentes como maíz, trigo y hortalizas como acelga, repollos y zapallos, la dosis debe ser de 10 y 20 ton/há. Para abonar bien los cultivos extensivos se requiere de 6 a 10 ton/há/año y hasta 20 ton/há/año en suelos más pobres. Para suelos erosionados es recomendable concentrar las aplicaciones en áreas específicas como camellones, surcos permanentes, tazas de los árboles, etc.

Las Gestión del Compost se deben seguir en relación con el:

Almacenamiento, el lugar de almacenamiento debe estar protegido de la humedad, para lo cual debe estar aislado del suelo por una cubierta impermeable el compost debe estar ubicado a una distancia igual o superior a 20 metros de cuerpos de aguas superficiales como ríos, lagos, vertientes, canales de riego o drenaje en su defecto, se deberán tomar todas las medidas pertinentes para evitarlo.

Transporte, los vehículos utilizados para el transporte del compost deberán ser cerrados en el fondo y los costados, para evitar los derrames.

Aplicación del compost, el compost puede ser aplicado al voleo en cultivos extensivos o directamente será sobre praderas establecidas o en preparación de suelos para cultivos, También se puede aplicar colocando una capa alrededor de cada planta o bien sobre el surco de riego antes de aporcar no se debe aplicar en épocas de lluvia, e debe evitar la sobre fertilización del suelo al aplicar compost, para lo cual es importante equilibrar la demanda del cultivo con los nutrientes presentes en el suelo y los aportados con el compost.

6.1 Valor fertilizante

Al principio del siglo XIX, la introducción de los fertilizantes químicos en lugar de abono ocasionó que estas prácticas de reutilización o compostaje de residuos orgánicos ampliamente utilizados en la India y China perdieran importancia y parecieran primitivas ante la modernidad y eficacia de los fertilizantes artificiales.

El fertilizante tiene efecto a corto plazo, debido probablemente a que se realiza una sola aplicación al momento de establecerse el cultivo

empleando principalmente superfosfato simple o triple a razón de 100 a 200 Kg ha⁻¹ de P por año, siendo estos fertilizantes las fuentes más solubles y de fácil asimilación para las plantas, aunque tienen efectos negativos al incrementar la degradación de los suelos, impacta en los procesos de transformación química, física y biológica.

Se recomienda, antes de hacer aplicaciones de fertilizante se realice un análisis de suelo para controlar los niveles de nutrientes y ajustar la fertilización en función de la liberación que se produzca y de las necesidades del cultivo para la toma de decisiones a la hora de aplicar compost como fertilizante orgánico, así como para aplicarlo en nutrición integrada con fertilizantes minerales, se debe tener en cuenta: Necesidades del cultivo en cuanto a fertilización (análisis de suelo y foliares), Acceso y disponibilidad de ambos fertilizantes localmente, y el coste de ambos fertilizantes.

Al incorporar compost adicionamos fertilidad, es decir incorporamos nutrientes faltantes al suelo y lograremos mejor rendimiento debido a que contiene más microorganismos y energía (materia anabólica) al mismo tiempo se aumenta el “potencial antifitogénico”, es decir, ciertos tipos de bacterias y organismos del suelo se producen más numerosamente. Como resultado, la resistencia del suelo contra los parásitos inherente se incrementa y el riesgo de cultivo se reduce como consecuencia la pulverización de insecticidas puede ser reducida.

6.2 Composición en nutrientes de los compost

Durante el compostaje, el C, el N y el K son los principales nutrientes que necesitan los microorganismos algunos de los nutrientes necesarios en mayor cantidad (macronutrientes) son el carbono (C), nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K). El C es utilizado como fuente principal de energía y junto con el N contribuye a la síntesis de proteínas y al crecimiento microbiano. P y K son esenciales a nivel metabólico y, al igual que C y N, durante el proceso de división celular.

Otros nutrientes utilizados por los microorganismos en cantidades mínimas son el boro, calcio, cloro, cobalto, cobre, hierro, magnesio, manganeso, molibdeno, selenio, sodio y zinc el papel principal de estos elementos es favorecer que se lleve a cabo la asimilación correcta del resto de nutrientes.

Cada cultivo necesita una cantidad específica de nutrientes, y esta cantidad depende en parte del rendimiento esperado del cultivo para calcular el requerimiento real de fertilizantes se debe tener en cuenta otros factores tales como las reservas de nutrientes del suelo, y la inmovilización o pérdida del nutriente cuando se aplica, ya sea por fijación o lixiviación.

El contenido en nutrientes del compost tiene una gran variabilidad ya que depende de los materiales de origen.

Tabla 1. Contenido de N, P, K en el compost.

Nutriente	% de Compost
Nitrógeno	0,3%-1,5% (3 g a 15 g por kg de compost)
Fosforo	0,1%-1,0% (1 g a 10 g por kg de compost)
Potasio	0,3%-1,0% (3 g a 10 g por kg de compost)

6.3 Dinámica de los nutrientes en el sistema del suelo

Reacción del suelo (pH): Es una propiedad que tiene influencia indirecta en los procesos químicos, disponibilidad de nutrientes, procesos biológicos y actividad microbiana. Es definido como el logaritmo inverso de la actividad de iones hidrógeno en la solución suelo. Normalmente el rango de pH de los suelos varía entre 3.5 a 9.0, la razón por la que no se alcanza valores extremos de 1 o 14 se debe a que la solución suelos no es una solución verdadera, sino una solución coloidal.

El pH es un parámetro que indica el buen desarrollo del proceso y la actividad microbiana. el pH inicial de materiales digeribles, basuras, estiércol, varía generalmente de 4,5 a 6 (fase mesofílica); éste empieza a incrementarse debido a la pérdida de ácidos orgánicos, a través de la volatilización (fase termofílica), a la descomposición microbiana y a la liberación de energía después el pH se ajusta a la neutralidad (fase de

maduración), en un rango entre 6.5 – 7.5 indica la estabilización del compost y por tanto un producto apto para el uso agrícola.

Es uno de los parámetros importante para el desarrollo de los microorganismos degradadores, siendo los más adecuados los comprendidos entre 6 y 8, sin embargo los valores extremos de pH pueden inhibir el crecimiento, en caso de que los valores de pH de los compuestos utilizados se encuentren bajo el óptimo, pueden mezclarse con otros materiales con pH más elevados, los microorganismos como los hongos toleran un amplio rango de pH de 5 a 8, mientras que las bacterias se caracterizan por un margen más estrecho de 6 a 7,5. El valor de pH, al igual que el de la temperatura varía con el tiempo de 5 a 9 dependiendo de la etapa de compostaje.

Un suelo con valores de pH entre los 5.0 - 6.5, permite una condición donde la mayor parte de los nutrientes suelen estar en forma de compuestos químicos directamente asimilables para la mayor parte de los vegetales. Sin embargo, cuando se exceden los valores de pH 6.5, la formación de precipitados puede causar importantes problemas de nutrición vegetal, mientras que para pH inferiores a 5 el sistema radicular corre graves riesgos de ser dañado.

En las etapas iniciales del proceso el pH suele disminuir debido a la degradación de las formas más lábiles de la materia orgánica y a la formación de ácidos libres a medida que el compostaje avanza los valores aumentan, por la mineralización de aminoácidos y proteínas, volviendo a disminuir durante las fases de enfriamiento y madurez, debido a la nitrificación y la formación de compuestos húmicos.

Las Arcillas del Suelo: La fracción mineral de los suelos lo constituyen las arcillas. Si bien desde el punto de vista de su tamaño, adoptan ese nombre las partículas < 2 mm de diámetro es mucho más trascendente el comportamiento coloidal que exhiben, es decir la capacidad de mostrar cargas negativas en donde se absorben los cationes que constituyen la posibilidad de reserva de nutrientes.

Las arcillas pertenecen a un grupo mineralógico muy amplio de materiales de naturaleza química silícea denominados silicatos. Dentro de estos, en función de la distribución de los tetraedros de SiO_4^{4-} se clasifican sistemáticamente dentro de los Filosilicatos o silicatos laminares. Así, a grandes rasgos y en función del tipo de arcilla, entre lámina y lámina, se emplazarán en mayor o menor medida las moléculas de agua que producirán el hinchamiento.

La actividad microbiana está relacionada con el tamaño de la partícula, esto es, con la facilidad de acceso al sustrato. Si las partículas son pequeñas, hay una mayor superficie específica, lo cual facilita el acceso al sustrato. El tamaño ideal de los materiales para comenzar el compostaje es de 5 a 20 cm.

El tamaño apropiado es de 2 a 5 centímetros, esto se hace con el objetivo de facilitar que los microorganismos ataquen la materia orgánica y aumente la velocidad del proceso de compostaje si el tamaño de los residuos es demasiado grande la degradación disminuye, porque crea canales de aireación donde reduce la temperatura y si es demasiado pequeña los poros se llenan de agua y se compactan creando una descomposición anaerobia.

Algunos materiales deben ser triturados hasta obtener un tamaño de partículas susceptibles al ataque microbiano esta operación acelera notablemente la mayoría de procesos de compostaje, amor tamaño de partículas mayor es la superficie de contacto con los microorganismos y consecuentemente se facilita la degradación de la materia orgánica además un tamaño de partícula pequeña facilita la homogenización y mezcla de los materiales y favorece el aislamiento térmico lo que ayuda al mantenimiento de ls temperaturas optimas durante todas las etapas del proceso no obstante un tamaño de partícula excesivamente pequeño puede provocar la compactación del material y po tanto generar condiciones de anoxia.

6.4 Características químicas del suelo

La capacidad de intercambio catiónico (CIC) son las cargas eléctricas negativas de los coloides de suelo formados por la materia orgánica y las arcillas. La CIC es sumamente importante porque determina la capacidad de taponización del suelo y la retención de los cationes (cargas eléctricas positivas), reduciendo la lixiviación de ellos. A mayor contenido de estos componentes habrá más capacidad de intercambio catiónico, o sea un suelo con el 19,70% de materia orgánica tendrá mayor CIC que un suelo con 2,68%, y un suelo franco tendrá más que un suelo arenoso estima los sitios de carga de las arcillas, tanto las cargas permanentes, como las cargas dependientes de pH. Estos sitios de intercambio retienen por fuerzas electrostáticas a los cationes. La CIC es un indicador indirecto de la capacidad amortiguadora de los suelos y que es función de la cantidad y tipo de arcilla.

Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC): Es una propiedad química que designa los procesos de:

- a. Adsorción de cationes por el complejo de cambio desde la solución suelo
- b. Liberación de cationes desde el complejo de cambio hacia la solución suelo. Esta propiedad es atribuida a la arcilla (coloide mineral) y al humus (coloide orgánico), de manera que la CIC, está influenciada por: la cantidad y tipo de arcilla, la cantidad de humus, el pH o reacción del suelo.

Los procesos de transformación de los desechos son muy complejos entre ellos según tenemos los siguientes:

Transformación química inicial es un proceso que sufren los restos vegetales antes de caer al suelo. Las hojas son atacadas por los microorganismos para la elaboración de nuevos derivados, en la misma planta, y se producen importantes transformaciones en su composición y estructura. Consiste en pérdida de sustancias orgánicas y elementos minerales como P, N, K, Na.

Alteración química. En esta etapa se produce una intensa transformación de los materiales orgánicos y su mezcla e infiltración en el suelo. Los restos orgánicos en el suelo pierden rápidamente su estructura celular y se alteran a un material amorfo que va adquiriendo un color cada vez más negro, con una constitución y composición absolutamente distintas de los originales. Poco a poco los restos

transformados se van desintegrando, difuminándose en el suelo y finalmente se integran totalmente con la fracción mineral.

6.5 Características biológicas

La parte biológica del suelo la conforman los organismos vivos que representan el 60% de un suelo saludable, su importancia dentro de la biota es la de permitir la entrada y el almacenamiento de agua, ayudar a resistir la erosión, permitir la nutrición de las plantas y la descomposición de la materia orgánica estos organismos se clasifican como: macrofauna, mesofauna y microfauna, macrofauna, viven total o parcialmente dentro del suelo o sobre él. Dentro de estos se pueden encontrar los órdenes: Blattodea, Coleoptera, Hymenoptera, Dermaptera, Haplotoxida, Isopoda, Diplopoda y Chilopoda, entre otras mientras la mesofauna, son organismos que abarcan una longitud de 100 μm a 2 mm y son representados por ácaros, colémbolos y diplura, la microfauna son organismos cuya medida está dentro de los 5 y 100 μm y por tal motivo se requiere del uso de microscopio, la actividad de esta fauna se ve representada principalmente por grupos como las micorrizas, organismos solubilizadores de fosfatos, fijadores de nitrógeno, microorganismos aminolíticos, proteolíticos, celulolíticos.

Además, los ciclos biológicos favorecen las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, mejorando la estructura, incrementando la actividad microbiana, la dinámica de descomposición de la materia orgánica, el intercambio de agua y gases en el suelo.

6.6 Criterios de dosificación

Aplicación de compost (m^3) implica la aplicación y distribución de un mínimo de 20 (m^3 / ha) de compost la dosis será bonificada en aquellos planes de manejo que cumplan, entre otras, con las siguientes condiciones:

- Que la dosis propuesta sea al menos de 20 $m^3 / ha/año$.
- Que la dosis propuesta no genere problemas de contaminación al medio ambiente.

No obstante, el uso del compost en forma excesiva puede impactar negativamente en el medio ambiente, por lo cual la dosis a aplicar debe considerar los impactos negativos que generen y las altas cantidades de nutrientes la dosis de composta inferiores es típicamente usada como “dosis de mantención” las dosis apropiadas de composta pueden ser influenciadas por las condiciones de suelo existentes, las características de la composta y los requerimientos nutricionales del cultivo.

a) Concentración de nutrientes

La concentraciones de nutrientes y oligoelementos del compost varia entres estos elementos (Al, As, P, B, Be, Bi, Ca, Cd, Co, Cu, Fe, Li, Ni, P, Pb, Sb, Se, Ti, Tl, V y Zn), sin embargo los nutrientes más esenciales son (materia orgánica y N: P: K). Este parámetro está directamente relacionado con la disponibilidad de nutrientes. Es decir, a pH ácidos ($pH < 6.5$) disminuyen la disponibilidad especialmente de Fosforo, Azufre, Nitrógeno, Molibdeno y cationes (Calcio, Potasio y Sodio).

Mientras que a pH básicos ($\text{pH} > 7.3$) disminuyen la disponibilidad de Fosforo y Micronutrientes (Boro, Aluminio, Manganeso, Hierro, Cobre y Zinc).

Además, la concentración de nutrientes varía de acuerdo con la composición del compost, es decir si el compost proviene de materia prima vegetal o de estiércol de diferentes animales la disponibilidad de un suministro de nutrientes constante, es decir una cantidad suficiente de carbono y nitrógeno, debe estar asegurada para los microorganismos activos durante la primera fase de descomposición.

Los nutrientes son ricos especialmente en proteínas y minerales y restaura las propiedades físicas y químicas de los suelos que han sido alteradas por las actividades agrícolas, también ayuda a disminuir el uso de agroquímicos, disminuyendo así la toxicidad y evitando la erosión y degradación de los suelos y la concentración de nutrientes varía de acuerdo con la composición del compost, es decir si el compost proviene de materia prima vegetal o de estiércol de diferentes animales.

6.7 Criterio materia orgánica

El contenido en materia orgánica del suelo es importante no solo por la fertilidad sino además que de esto dependen otras propiedades como la densidad aparente, la porosidad total y aeración, la capacidad del suelo para retener cationes, humedad, coeficiente de dispersión de las partículas, actividad biológica, contenido en nutrientes sobre todo en nitrógeno, etc. una de las principales características de la calidad del suelo es la estructura y de ella depende el contenido en materia orgánica.

También tiene una función protectora al fijar los contaminantes ya sean orgánicos como los pesticidas o minerales como los metales pesados. por tanto, del carbono del suelo depende no solamente de las condiciones naturales en que se forma sino además del manejo a que ha estado sometido.

Si el compostaje avanza correctamente el contenido de materia orgánica (MO) disminuye, debido a la mineralización de los compuestos orgánicos más lábiles y a la pérdida de carbono como dióxido de carbono. Esto genera una reducción en el peso de la pila y una disminución de la relación C/N. La tasa de degradación disminuye a medida que avanza el proceso, debido a que se reducen las fuentes de carbono disponible.

Las alteraciones que se dan durante el desarrollo de compostaje se realiza la modificación bioquímica de materia orgánica por microorganismos, en fase acuosa junto con enzimas. en la materia orgánica soluble y las actividades enzimáticas son útiles para determinar la estabilidad y madurez del compost la rapidez de la degradación de la materia orgánica es influida por la proporción C/N de los residuos vegetales y por la capacidad que presenta en materiales resistentes a la descomposición.

Durante el compostaje la materia orgánica tiende a descender debido a su mineralización y a la consiguiente pérdida de carbono en forma de anhídrido carbónico; estas pérdidas pueden llegar a representar casi el 20% en peso de la masa compostada. este descenso de materia orgánica transcurre en dos etapas fundamentalmente. En la primera se produce

un rápido decrecimiento de los carbohidratos, transformándose las cadenas carbonadas largas en otras más cortas con la producción de compuestos simples; algunos de los cuales se reagrupan para formar moléculas complejas dando lugar a los compuestos húmicos. En la segunda etapa, una vez consumidos los compuestos lábiles, otros materiales más resistentes como las ligninas se van degradando lentamente y/o transformando en compuestos húmicos generalmente no finaliza durante el tiempo que dura el compostaje y la velocidad de transformación de materia orgánica depende de su naturaleza física y química, de los microorganismos que intervienen y de las condiciones fisico-químicas del proceso (humedad, aireación, temperatura y pH).

6.8 Los abonos órgano-minerales

Los abonos órgano-minerales pueden ser considerados como una fuente alternativa para la fertilización de los cultivos; esta combinación no solo influye en el aporte de nutrientes al suelo, sino que incide sobre la actividad microbiana y la movilización de distintos elementos minerales abonos órganos-minerales se han referido a mezcla de abonos orgánicos con fertilizantes minerales industriales A finales de la década del 90 se incrementó el empleo de los abonos órgano-minerales, mezclándose en los mismos 25 % de fertilizante mineral y 75 % de abono orgánico para los diferentes cultivos,

Los abonos orgánicos-mineral casi en su totalidad, tienen alto contenido de nitrógeno mineral y grandes cantidades de otros elementos nutritivos para las plantas. Conforme se va usando el abono, este va a aumentar el contenido de materia orgánica, lo cual conlleva a que haya una mejor

retención de humedad, evitando así el uso excesivo de agua en algunos cultivos; el abono, también aporta micronutrientes, tales como potasio, calcio y magnesio. Además, ayuda a mejorar las propiedades físicas del suelo como la infiltración de agua, la retención de humedad, disminuyen la densidad aparente y la tasa de evaporación, la estructura del suelo y la conductividad hidráulica; adicional a esto, provee un mejor estado fitosanitario de los cultivos.

También, se le puede llamar compost o humus al abono orgánico que se obtiene a partir de la descomposición controlada de la materia orgánica mediante el proceso de compostaje y una vez obtenido es un abono de muy buena calidad, gracias a los microorganismos que contiene, contribuyentes de vitaminas, enzimas y otras sustancias que son muy útil para que el suelo gocé de un equilibrio biótico.

6.9 Aplicación en el campo del compost

6.9.1 *Humedad*

Para la obtención de un compost óptimo debe existir un porcentaje adecuado de humedad mediante el desarrollo del compostaje. Por lo que la humedad se encuentra entre 40 – 60 %. Si la humedad supera los rangos de la producción de compost, el proceso de compostaje se convierte en un medio anaerobio, ocasionando la saturación de los poros evitando que el material a compostar se oxigene, generando la formación de gases tales como: metano, sulfuro de hidrógeno, amoniaco, entre otros. Caso contrario si la humedad está por debajo de los rangos establecidos, el desarrollo de degradación de la materia

orgánica se retrasa cabe mencionar que la humedad adecuada es de 55 % dependiendo del estado de físico y del tamaño de la materia prima a compostar. Si la humedad reduce sus niveles por abajo de 45%, el crecimiento de microorganismos será interrumpido.

El exceso de humedad puede ser reducido con una mayor aireación y a su vez, con un buen control de la humedad y de la aireación, puede llevarse a cabo el control de la temperatura esto es debido a que durante el proceso de compostaje se debe llegar a un equilibrio entre los huecos entre partículas (de tamaño variable) que pueden llenarse de aire o de agua. El agua ocupará todos los poros y por lo tanto el proceso se volvería anaeróbico, es decir se produciría una putrefacción de la materia orgánica si la humedad es excesivamente baja se disminuye la actividad de los microorganismos y el proceso es más lento, el contenido de humedad dependerá de las materias primas empleadas para materiales fibrosos o residuos forestales gruesos la humedad máxima permisible es del 75-85% mientras que, para material vegetal fresco, ésta oscila entre 50-60%.

El contenido de humedad es un parámetro crítico en el proceso de compostaje influye en la tasa de absorción de oxígeno, el espacio de aire libre, la actividad microbiana y la temperatura del proceso aportando a lo dicho. Menciona que la humedad óptima para un compostaje efectivo depende del tipo o forma de desecho de la materia prima debería estar en 50 - 60% la humedad óptima requerido para la actividad biológica durante el compostaje es entre 40 y 70% del peso del compost, a medida que aumenta la velocidad de difusión del gas disminuye, y la tasa de absorción de oxígeno se vuelve inadecuada lo al proceso de compostaje

puede finalmente convertirse en anaeróbico debido a la actividad restringida.

Además, el contenido de humedad es determinado de acuerdo con la materia prima a degradar, influyendo en la mayoría de las etapas de descomposición, puede alterar la temperatura, la actividad microbiana, la cantidad de oxígeno disponible (aireación), dificulta el proceso biológico, puede convertir el proceso en anaeróbico.

6.9.2 *Condiciones atmosféricas*

El suministro de aire al momento de compostar es muy importante, debido a que los microorganismos que están degradando los residuos necesitan aire para realizar las reacciones metabólicas, y así poder realizar el compost. Según el desarrollo del procedimiento de compostaje es importante afirmar la presencia de oxígeno, puesto que los microorganismos que forman parte de él son aerobios.

La concentración de oxígeno dependerá del tipo de material, textura, humedad, frecuencia de volteo y de la presencia o ausencia de aireación forzada. El oxígeno es necesario para que se dé un proceso de descomposición aeróbica, la actividad de los microorganismos y para oxidar determinadas moléculas orgánicas del sustrato incrementan los niveles de CO₂ mientras que el oxígeno disminuye; el consumo de éste está relacionado con la actividad microbiana de acuerdo con los cambios de temperatura y humedad.

Los organismos que intervienen en el proceso son aerobios, es decir, necesitan oxígeno para crecer y desarrollarse, por eso el residuo o

mezcla de residuos que se desea compostar debe poseer una cierta porosidad que asegure la existencia en su interior del suficiente espacio para el aire. La concentración de oxígeno dependerá del tipo de material, textura, humedad, frecuencia de volteo y de la presencia o ausencia de aireación forzada.

El oxígeno es uno de los elementos clave en un buen proceso de compostaje de hecho, el consumo de oxígeno por parte de la pila de compost está estrechamente relacionado con la actividad de los microorganismos aeróbicos las bacterias y los hongos aeróbicos absorben y utilizan el oxígeno como combustible y fuente de energía para desarrollarse y trabajar.

Los requerimientos de oxígeno son diferentes en cada fase del compostaje cuanto mayor sea la actividad microbiana más elevado es el consumo de tal elemento, así en la primera fase mesófila e inicio de termófila se produce un crecimiento microbiano más rápido y la suplementación de oxígeno debe ser mayor para evitar su agotamiento, en la fase de maduración tal elemento no suele constituir un factor limitante ya que la actividad y el crecimiento de los microorganismos se reduce notablemente por agotamiento de los nutrientes fácilmente admisibles.

6.9.3 Granulometría

Los productos que se derivan de este compost de diferentes granulometrías, así como fertilizantes y enmiendas obtenidas al mezclar el compost con otros materiales ajenos al proceso de compostaje todos

estos productos, a granel o ya envasados, deben almacenarse hasta su comercialización o hasta que lleguen a su destino final.

La actividad microbiana está relacionada con el tamaño de la partícula, esto es, con la facilidad de acceso al sustrato si las partículas son pequeñas, hay mayor superficie específica, lo cual facilita el acceso al sustrato. El tamaño ideal de los materiales para comenzar el compostaje es de 5 a 20 cm. La densidad del material, y por lo tanto la aireación de la pila o la retención de humedad, están estrechamente relacionados con el tamaño de la partícula, siendo la densidad aproximadamente 150 – 250 kg /m³ conforme avanza el proceso de compostaje, el tamaño disminuye y, por tanto, la densidad aumenta, 600 – 700 kg /m³.

El tamaño apropiado facilita a que los microorganismos ataquen la materia orgánica y aumente la velocidad del proceso de compostaje, pero si el tamaño de los residuos es demasiado grande la degradación disminuye, porque crea canales de aireación donde reduce la temperatura y si es demasiado pequeña los poros se llenan de agua y se compactan creando una descomposición anaerobia.

6.10 Equipos y maquinaria

Como es lógico la maquinaria que se necesitan en una planta de compostaje dependerán del sistema que se elija para realizar el proceso, para esto necesitamos:

6.10.1 Trituradora

El material estructurante que se aporta a la mezcla normalmente debe ser triturado previamente para que se optimice su función. Así, puede contarse con trituradoras de campo que recogen en suelo restos de poda acomodados en hileras o que se alimentan a la altura de carga del equipo con estos subproductos ya sea manualmente o con ayuda de maquinaria de apoyo. Son maquinarias que consiste en un cono con movimiento rotatorio excéntrico, que gira dentro de otro fijo, aproximándose y separándose periódicamente, estas máquinas tienen una amplia utilización para reducir el volumen de grandes cantidades de materia orgánica.

6.11 Mezcladora de materias iniciales

6.11.1 Tractor con pala

La FAO, indica que en estos sistemas pueden usarse dos tipos de herramientas para realizar la tarea de volteo. La primera es usando un volteador lateral de tornillo adaptado a un tractor, donde la altura de la pila dependerá exclusivamente de la altura de dicho dispositivo y la segunda es mediante el uso de una pala frontal y las pilas pueden medir hasta tres metros de altura, aunque la altura que se desea para que el volteo sea realizado de manera adecuada es de 1.5 metros también se usan palas cargadoras para voltear el compost, si bien hay cada vez más maquinaria especializada en el volteo del compost con el objeto de obtener un producto de la máxima calidad. El volteo debe hacerse evitando que los equipos pasen por encima de la pila y la compacten esto

se utilizan en pilas dinámicas este un proceso muy versátil y con escasas complicaciones ya que se logran buenos resultados con una amplia variedad de residuos orgánicos y funciona satisfactoriamente mientras sean mantenidas las condiciones aerobias y el contenido de humedad. Las operaciones de compostaje pueden continuar durante el invierno, pero se ralentizan como resultado del frío.

6.11.2 *Volteadoras*

Son equipos que gracias a mecanismos diversos trasladan el compost de lugar, permitiendo su correcta aireación muchos de ellos se basan en un eje rotor acanalado o dentado, que remueve el producto a lo largo de la pila, sin destruir su estructura.

Estas máquinas mediante diversos mecanismos remueven o trasladan el compost permitiendo su correcta aireación muchos de ellos se basan en un eje rotor acanalado o dentado, remueven a lo largo de la pila, sin destruir su estructura. Existen diversos modelos con diferentes diseños, adaptados a distintos tamaños de pilas, autopropulsados o bien acoplables a la toma de fuerza de un tractor para realizar su función.

6.11.3 *Línea de cribado*

Las cribas tienen la función de refinar el compost madurado dándole una forma esponjosa, homogénea y de granulometría apropiada para la aplicación a la que se destine la parte gruesa, constituida básicamente por materiales leñosos más resistentes a la descomposición, se recirculará en el proceso como estructurante, con la propiedad de estar inoculado con los microorganismos que deben iniciar la colonización.

Una vez completado el proceso de compostaje puede ser necesario que el material adquiera una estructura y granulometría adecuadas para lograr una mayor calidad dándole una forma esponjosa, homogénea y de granulometría apropiada para la aplicación a la que se destine.

6.11.4 *Ensacadora*

La utilización de estos equipos dependerá del proceso para fabricar el compost, debido a que en algunos procesos no es necesario la utilización de todos estos equipos, más bien lo realizan en forma más práctica y artesanal, pero si se decide que el compost lo realiza de forma mecánica es necesario utilizar los equipos mencionados para cada proceso. Ya que cuando se ha obtenido un compost de calidad, es preciso darle una adecuada presentación y que éste sea envasado en sacos para su posterior venta o aprovechamiento. Lo más común es utilizar una máquina de dosificación con alimentación por gravedad destinada a productos de flujo fácil. Para constituir la dosis, la tolva receptora está equipada en su extremidad con una válvula. En un primer tiempo, la válvula está totalmente abierta en gran caudal para llenar lo más rápidamente posible.

6.12 Uso del compost como sustrato

El tipo de sustrato y sus características físicas, químicas y microbiológicas son propiedades importantes en la producción de plántulas, como sustratos se utilizan diversos materiales, entre ellos, musgos, agro litas, perlitas, biosólidos, suelo y residuos de la industria agropecuaria entre las características que debe cumplir un buen sustrato

se pueden citar: porosidad > 85%, capacidad de aeración entre 10 y 30%, agua fácilmente asimilable entre 20 y 30%, textura de media a gruesa, con una distribución de partículas de 0.25 a 5.0 mm retención de humedad entre el 55 y 70% y una densidad aparente entre 0.15 y 0.45 g/cm³.

Por otro lado, el compost suele emplearse como componente de sustratos y enmiendas orgánicas en mezclas con otros ingredientes, con los que puede presentar interacciones tanto físicas como químicas y biológicas, dependiendo de la naturaleza de dichos ingredientes así, en una mezcla de compost con un material más denso pero química y biológicamente inerte, como una arena silíceo, las interacciones serán solamente físicas si la arena es caliza, podrán presentarse además interacciones químicas, derivadas del elevado pH de la arena.

Si utilizamos el compost como sustrato estamos permitiendo que el suelo adquiera mayor porcentaje de nutrientes, macronutrientes y demás componentes que el compost contenga, el compost bien hecho tiene buenas propiedades agronómicas y es un material fácil de elaborar, puede utilizarse como sustituto de otros elementos orgánicos no renovables, la importancia de utilizar el compost como sustrato se debe a que las hortalizas, verduras, frutas y tubérculos pueden crecer en cualquier sustrato, por lo que la incorporación de este ayudara a crecer de manera más progresiva y de mayor calidad cuando el sustrato en el suelo está disponible, la actividad microbiana del suelo aumenta exponencialmente con la temperatura del suelo, y la actividad microbiana a menudo se duplica con un aumento de temperatura de 10 °C.

CAPÍTULO VII

7 IMPACTO AMBIENTAL DEL COMPOSTAJE: EMISIONES GASEOSAS Y SU MITIGACIÓN

7.1 Origen de los contaminantes atmosféricos del compostaje

La contaminación atmosférica es un problema que tiene efectos adversos sobre la salud humana y el medio ambiente todos los seres vivos y, por tanto, también las plantas (que son la base de los ecosistemas terrestres) sufren alteraciones importantes a causa de una amplia variedad de contaminantes que se han dispersado por el medio. Desde los metales pesados, emitidos por las centrales térmicas y otras actividades industriales, hasta los compuestos orgánicos persistentes liberados al medio por acción de los seres humanos, son muchos los contaminantes que provocan modificaciones en la fisiología vegetal y que, por su enorme variedad son de muy difícil evaluación solo se hace referencia a los daños que con carácter más global afectan a la vegetación, ocasionados por acción del ozono troposférico y de otros contaminantes (óxidos de nitrógeno y de azufre principalmente) que provocan acidificación y un aporte excesivo, con el consiguiente efecto perjudicial para la agricultura.

La producción, el desarrollo del transporte y el uso de a partir de la Revolución Industrial ha disparado los niveles de dióxido de carbono y otros gases contaminantes en la atmósfera. Esto ha provocado que la contaminación en el aire sea ya un problema ambiental global.

Los contaminantes atmosféricos, normalmente medidos en la atmósfera urbana, provienen de fuentes móviles (tráfico rodado) y de fuentes fijas de combustión (industrias, usos residenciales -climatización-, y procesos de eliminación de residuos). Se distingue entre contaminantes primarios y secundarios. Los primeros son los que proceden directamente de la fuente de emisión. El tratamiento de residuos orgánicos es una importante alternativa para reducir el impacto ambiental, cuyo producto, a la vez, resulta en un agente con múltiples aplicaciones en la agricultura. En el proceso tecnológico de compostaje se utilizan microorganismos que degradan la materia orgánica bajo unas condiciones óptimas. Experimentos diseñados y realizados por el Departamento de Ingeniería Química, Biológica y Ambiental en colaboración con otras instituciones, muestran que el compost que se obtiene es muy versátil en cuanto a las diversas formas de uso, lo que le permite ir más allá de su aplicación como fertilizante, como por ejemplo la mejora de suelos, su uso en agricultura por su efecto supresor de plagas o la biorremediación de suelos contaminados. Uno de los impactos más importantes del proceso de compostaje son las emisiones de gases contaminantes y olorosos, que son causa de contaminación atmosférica y rechazo social. Entre estas emisiones, la más destacada es la de amoníaco, que normalmente proviene de una proporción inadecuada de los elementos Carbono y Nitrógeno (la cual se conoce como relación C/N). Muchas veces hay más nitrógeno del requerido por los microorganismos responsables de degradar los sustratos la atmosférica es una de las principales preocupaciones sociales actuales. Se considera como la alteración de la composición del aire generada por la acumulación de gases, partículas sólidas o líquidas que dañan a los

seres vivos. Así la parte biodegradable de los residuos sólidos orgánicos es altamente descomponible y emite mal olor al ambiente sino se gestionan adecuadamente. El desperdicio de alimentos (DA) comprende la fracción principal del (45%) del total de desechos sólidos municipales en Europa. El compostaje es un método de degradación biológica ampliamente aplicado para tratar Fracción orgánica biodegradable de residuos sólidos. Este porcentaje promedia el 55% en los países de desarrollo. En otros países, han considerado métodos más sostenibles para el manejo de desechos y han desarrollado una nueva legislación con respecto a la disposición final de desechos sólidos, que implica la valorización material de (DA). La contaminación en origen de las materias brutas. Si bien la contaminación biológica se elimina en el proceso otros contaminantes, como los metales pesados pueden aumentar su concentración relativa durante el compostaje. Los contaminantes de tipo físico (vidrio, metales, textiles) podrían ser eliminados en destino, pero resulta más económico y seguro separarlos también en origen. La contaminación del aire es un grave problema de salud pública y ambiental. Entre las causas más relevantes de la mala calidad del aire que respiramos destacan el tráfico motorizado y la contaminación industrial, además de otros agentes de menor importancia cualitativa. El uso de fertilizantes químicos, la quema al aire libre de residuos agrícolas y la ganadería industrial aportaron en 2018 unas emisiones totales de 65.800 toneladas, respectivamente el 8,6% y el 26,2% del total de cada contaminante del compostaje y sin contar la maquinaria agrícola. Pero, además, la ganadería industrial concentró tres quintas partes de las emisiones de metano (CH₄), contaminante precursor del ozono troposférico a la vez que gas de efecto

invernadero. En nuestro país la contaminación hace que se genere una importante cantidad de fango en las estaciones depuradoras de aguas residuales o el cual es necesario valorizar para no acumular esos grandes volúmenes de residuos. Los fangos tienen numerosos beneficios en la agricultura, pero para poder ser usados deben someterse previamente a un proceso de estabilización para reducir el contenido de patógenos y controlar las concentraciones de nutrientes y metales pesados que aportan a los suelos, el compostaje es un proceso biológico aerobio, es decir, que tiene lugar en presencia de oxígeno. Bajo condiciones controladas de aireación, humedad y temperatura, los residuos orgánicos degradables se descomponen gracias a la actividad de microorganismos como los hongos y bacterias, transformándose en compost, un material estable e higienizado, libre de fitotoxinas y patógenos con propiedades húmicas, que se puede utilizar como enmienda orgánica, ya que es beneficioso para el suelo y el crecimiento de las plantas. Dicha higienización se consigue gracias al incremento de la temperatura, lo que hace que los agentes patógenos finales sean mínimos, conociéndose como lodo higienizado aquel que se ha tratado de forma que los patógenos finales no sean detectables. Por otra parte, el grado de estabilidad es la medida en la que se ha descompuesto la materia orgánica fácilmente biodegradable. El sistema de recolección y clasificación también influye en la composición de (DA), el proceso de compostaje y la calidad del producto final porque los componentes no orgánicos iniciales en el (DA) determinarán el contenido de impurezas al final del proceso. Además, los niveles del contenido de impurezas son muy variables según el sistema de recolección utilizado, como los receptáculos residenciales individuales, los contenedores de la calle y

otros contenedores. La separación en la fuente de la fracción orgánica de los residuos sólidos municipales (OFMSW) es un proceso clave porque reduce el contenido no orgánico en los residuos biológicos y, por lo tanto, las impurezas como los metales pesados y los pesticidas en el compost.

Es necesario comprender los factores que afectan la presencia de impurezas no orgánicas en los residuos biológicos para evitar efectos negativos, como mayores costos de tratamiento, menor capacidad de la planta y menor calidad del compost.

7.2 Nitrógeno

Es uno de los factores más importantes a la hora de iniciar un proceso de compostaje. Esta relación viene dada por la materia orgánica inicial que utilizaremos en el sistema la relación varía a lo largo del proceso, siendo una reducción continua, desde 35:1 a 15:1; asimismo acotan que si la relación es mayor a 35:1 existe un exceso de carbono y por ende el proceso tiende a enfriarse y a ralentizarse. Si la relación es menor a 15:1, en la mezcla hay una mayor cantidad de material rico en nitrógeno y por ende el proceso tiende a calentarse en exceso y se generan malos olores por el amoníaco liberado. Teniendo en cuenta los olores derivados de compuestos nitrogenados, los más importantes. El contaminante generado en el compostaje FW es el amoníaco (NH_3), su liberación favorecida por la baja relación C/N de FW. La liberación de NH_3 depende en gran medida del pH y la temperatura de la pila de compostaje y se ve favorecida por las altas temperaturas (termofílicas) y las condiciones alcalinas. Otro olor derivado del nitrógeno que se informan

que se produce en el compostaje de (DA) es la trimetilamina, que normalmente se produce en las plantas de tratamiento de (DA) a escala industrial. Este compuesto es importante porque tiene un umbral de olor bajo, lo que implica una contribución sustancial a la contaminación olorosa. Mencionan que el nitrógeno en forma de amoníaco es uno de los gases que se pueden desprender de las pilas del compostaje, del punto de vista agrícola y medio ambiental

7.2.1 Formas del nitrógeno

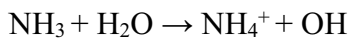
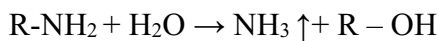
Respecto a la relación carbono-nitrógeno (C/N), se evidenció una disminución durante todo el proceso debido a la dinámica del carbono, el cual tiende a disminuir como consecuencia de la oxidación. Esta relación se considera adecuada en tanto el valor inicial es el óptimo según varios autores. El valor promedio final de la relación de C/N a los 60 días es el mínimo alcanzado, sin embargo, es importante haber llegado al periodo de maduración del compost, estableciéndose así una relación lineal respecto a los días de compostaje.

El Nitrógeno presente en el suelo bajo formas orgánicas tampoco está disponible como tal para las plantas, sino que para ser absorbido tiene que pasar a formas inorgánicas. El N inorgánico representa un 2% del N total del suelo, encontrándose en formas de nitrato (NO_3^-), amonio (NH_4^+) y nitrito (NO_2^-). Estas formas inorgánicas son transitorias en el suelo, por lo cual las cantidades de N inorgánico del suelo son extremadamente variables, pudiendo existir desde unos pocos gramos hasta más de 100 kg. ha⁻¹ de N. Debido a que ésta es la forma en que el N es absorbido por las plantas, el N inorgánico es muy importante para

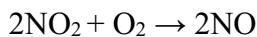
la nutrición vegetal. Por lo tanto, se puede decir que en la naturaleza existe una relación inversa entre la cantidad y la disponibilidad para las plantas de las distintas formas de N. Sin embargo, la baja disponibilidad del N orgánico del suelo asegura la existencia de una fuente de reserva de ese nutriente para la planta.

El nitrógeno es asimilado en su forma inorgánica (CNH_4^+ , NO_3^-), el nitrógeno posee residuos en fracción orgánica en forma de proteínas y péptidos. Por lo que es importante para el crecimiento de las plantas dedicadas al compostaje.

7.2.2 *Amomificación*



Nitrificación



Desnitrificación



Ajuste de la reacción C/N

La relación C/N representa el cociente entre el contenido en carbono y nitrógeno del sustrato orgánico a compostaje esta relación influye en la

velocidad del proceso, ya que si es excesivamente alta la actividad biológica disminuye debido a un déficit de nutrientes, esto ocurre con relaciones superiores a 40. 36 La relación C/N al iniciarse el proceso debe estar comprendida entre 25 y 30, siendo el valor óptimo de 25. Una vez transcurrido el compostaje, el compost ya madurado tiene una relación C/N en torno a 10. Por otro lado, las relaciones C/P y N/P tienen rango óptimo entre 75-150 y 5- 20, respectivamente. El carbono-nitrógeno es un enlace covalente entre carbono y nitrógeno y uno de los más abundantes en la química orgánica y la bioquímica. El nitrógeno tiene cinco electrones de valencia, y en las aminas simples es trivalente, formando los dos electrones sobrantes un par solitario. El C/N, expresa las unidades de Carbono por unidades de Nitrógeno que contiene un material. El Carbono es una fuente de energía para los microorganismos y el Nitrógeno es un elemento necesario para la síntesis proteica. Una relación adecuada entre estos dos nutrientes, favorecerá un buen crecimiento y reproducción. Con ese par, el nitrógeno puede formar un enlace adicional con hidrógeno, resultando así tetravalente, con una carga positiva en las sales de amonio. Muchos compuestos de nitrógeno pueden por tanto ser básicos, pero su grado de basicidad depende en su configuración: el átomo de nitrógeno de las amidas no es básico debido a la deslocalización del par solitario en un enlace doble, y en el caso del pirrol el par solitario es parte de un sexteto aromático. Si la relación C_{OT}/N_T es muy baja, el exceso de nitrógeno se pierde como amoníaco y no será utilizado por los microorganismos, Cabe señalar que la importancia de esta relación está en que el proceso de compostaje se desarrolle de forma adecuada ya que se puede cometer errores al añadir

un material complementario que en la práctica no vaya a aumentar la relación.

7.3 Influencia del pH, temperatura y la humedad

A lo largo del proceso el pH varía según la fase en la que se encuentre el compostado, como ya que los valores altos están relacionados con la emisión de nitrógeno amoniacal y la producción de carbonatos solubles y los bajos con la formación de ácidos orgánicos fase Mesófila Inicial: En esta fase se producen ácidos orgánicos por la acción de los microorganismos sobre la materia orgánica, por lo que el pH disminuye hasta acidificar el medio considerablemente. Fase Termófila: Hay más actividad metabólica, por lo que se genera amoniaco a partir de amonio. Esto hace que el pH sea más alcalino. Fase mesófila final o de enfriamiento: Se forman compuestos húmicos con propiedades tampón, por lo que el pH se vuelve neutro. El rango óptimo está comprendido entre 6 y 8, siendo los valores comprendidos entre 6 y 7 los considerados óptimos para una mayor actividad bacteriana y entre 5,5 y 8 para una mayor actividad fúngica. Si al finalizar el proceso de compostaje el pH se encuentre entre 7 y 8 es sinónimo de una aireación apropiada y, si por el contrario este es menor, el producto no estará maduro aún.

La temperatura siempre se considera uno de los parámetros más importantes de seguimiento, ya que es el indicio más evidente de que el compostaje se está desarrollando de forma adecuada por darse fases claramente diferenciadas en cuanto a la variación de este parámetro. Además, también es importante para analizar los microorganismos implicados en cada fase: 32 - Fase mesófila inicial: La temperatura

aumenta desde el ambiente hasta aproximadamente 40 °C. - Fase termófila: En esta fase la temperatura aumenta desde 40-45 °C hasta que la generación de calor se iguala a la pérdida de este, alcanzándose así la temperatura máxima del proceso, lo que ocurre aproximadamente a unos 80 °C, donde finaliza esta fase. A causa de la mayor actividad de las bacterias aeróbicas se genera calor y mayor cantidad de CO₂ por la descomposición de la materia orgánica, lo que se traduciría en una disminución del oxígeno, por lo que el compost se voltea para evitar la disminución de este, manteniéndolo en todo momento controlado por ser un proceso aeróbico. Cuando la concentración de oxígeno es suficiente, la temperatura aumenta, ya que se acelera la estabilidad y la madurez del compost. - Fase mesófila final o de enfriamiento: Comienza al alcanzarse la temperatura máxima en la fase termófila. A partir de ella, la temperatura comienza a descender desde una temperatura que oscila en torno a 80 °C hasta algo menos de los 30 °C. - Fase de maduración: Al finalizar el proceso, los valores de la temperatura se igualan a los del ambiente, a no ser que el compost no esté maduro completamente, lo cual se debería a una humedad demasiado baja. Hay que mantener la temperatura controlada porque las bajas temperaturas se traducen en una transformación lenta de los residuos y las que son demasiado altas higienizan, pero secan la pila, reduciendo la actividad biológica. Por otra parte, cada tipo de microorganismo tiene su propio intervalo de temperaturas óptimas para el cual hay una mejora actividad.

La humedad es un parámetro es muy importante ya que los microorganismos necesitan agua para poder degradar la materia orgánica, es decir, es imprescindible para el proceso biológico. Este

valor es importante controlarlo durante todo el proceso ya que un exceso de humedad produciría la obstrucción de los poros del compostado, no dejando transferirse al oxígeno ni a los gases resultantes de la reacción. Consecuentemente, se generarían condiciones de anaerobiosis, por lo que el proceso se vería ralentizado, empeorando la calidad del compost y emitiéndose malos olores. Este exceso puede corregirse proporcionando una mayor aireación, pero el proceso no estaría siendo económicamente óptimo. 33 Por el contrario, las humedades bajas favorecen el transporte, pero, también hacen que el desarrollo sea incompleto al disminuir la velocidad de la actividad microbiana. Este déficit de humedad se solventa regando las pilas. Los valores óptimos para la humedad inicial deben estar comprendidos entre el 40 y el 60% y entre 50 y 65% para otros.

El pH en el compost aumenta durante el proceso de compostaje debido a la descomposición de los ácidos orgánicos y a la formación de bases amoniacales procedentes de la mineralización de las proteínas, así pues, este incremento favorece la formación del amoníaco y su pérdida por volatilización, así, aunque el compostaje puede desarrollarse dentro de un amplio rango de pH (3-11), se consideran como valores óptimos los comprendidos entre 5 y 8,4. Con lo que conlleva a decir que el pH es un parámetro que puede condicionar la actividad biológica que degrada la materia orgánica y puede seleccionar a las poblaciones microbianas presentes en cada momento. Durante el proceso de compostaje hay que controlar la temperatura. En las primeras fases del proceso la temperatura debe alcanzar valores próximos a los 65°C. No debe superar valores mayores, ya que pueden morir muchos microorganismos. Y la

humedad se define como el contenido de agua que hay en el compostador con respecto a toda la materia que hay en el interior. Es mucho más habitual expresarla en porcentaje, ya que indicará cuál es la proporción de agua respecto a toda la masa de compost. Siempre hay que comprobar la humedad en el centro del compost.

Tabla 2. Factores que influyen en el compost.

Factores	Rango	Óptimo
pH	5	8,4
Temperatura	3-35°C	18-25°C
Humedad	50-90%	70-80%

El pH es la forma en que se expresa la acidez o alcalinidad de una sustancia a partir de su concentración molar de protones o potencial de hidrógeno. Esto quiere decir que se utiliza como una unidad de medida para expresar la concentración de hidrones en una sustancia.

La temperatura se mide con un termómetro. Para medir la temperatura, se utilizan principalmente dos escalas: La escala de temperatura centígrada Celsius (° C) y la escala Kelvin.

Instrumento de medida. El grado o cantidad de humedad de aire se mide con el higrómetro. Cuando el higrómetro marca el 100 % se dice que el aire está saturado, es decir, contiene el máximo de humedad que puede tener a la temperatura actual.

7.3.1 *Evolución de la humedad durante el compostaje*

Como muestra la, durante todo el proceso de compostaje la humedad se mantuvo en los valores que favorecen el crecimiento microbiano (50 a 70 %), estos valores han sido definidos por diferentes autores como humedad óptima del proceso

Considerando el carácter aerobio del método de compostaje empleado, con estos valores de humedad en la mezcla se garantizó la circulación del oxígeno y de los gases propios del proceso. A pesar de eso, la humedad óptima ha sido relacionada a la naturaleza de la materia prima denotándose incrementos de la misma para residuos de cereales y madera.

7.4 *Propiedades químicas y físicas del compost*

Las propiedades químicas y físicas que caracterizan el compost fueron determinadas luego de finalizar el proceso de maduración. El pH final obtenido en el compost muestra una tendencia a la alcalinización. La evolución del potencial de hidrógeno durante el compostaje es afectada por la pérdida de ácidos orgánicos y la generación de amoníaco, originadas por la descomposición de las proteínas. Los valores de pH entre 7,5 y 8,5 son considerados como un indicador indirecto de condiciones adecuadas de aireación, donde no prolifera la biodigestión anaeróbica y la liberación adicional de ácidos orgánicos.

7.4.1 Los olores

Los olores son subproductos inherentes del proceso de compostaje, independientemente del material orgánico inicial o la condición del proceso. Los olores contribuyen claramente al impacto ambiental de las instalaciones de compostaje y causan preocupación social que, en muchos casos, resulta en el cierre de la planta o la implementación de medidas de prevención. En los últimos años, se ha realizado un gran esfuerzo en la identificación y cuantificación de los odorantes emitidos, cuya fuente principal son los compuestos orgánicos volátiles (COV). A lo largo del proceso biológico se produce una reducción progresiva de la complejidad de las emisiones de COV, incluida la cantidad y la diversidad. Aunque la abundancia relativa de estos contaminantes puede variar, las familias de COV que se emiten con mayor frecuencia son los terpenos, los carbonos alifáticos, los hidrocarburos aromáticos, las cetonas y los ésteres.

El proceso de degradación natural de los productos de origen orgánico de olores en presencia de oxígeno es lo que se conoce como compostaje, que en materia de disposición de residuos se aplica específicamente al tratamiento biológico de degradación al que se someten los residuos orgánicos ordinarios, los cuales pueden ser de origen domiciliar, de restaurantes, o bien de procesos agroindustriales; en todo caso este proceso finaliza con la producción de compost, material que de acuerdo con sus características se puede aprovechar como abono orgánico, pues el producto posee una apariencia similar a la “tierra negra”, posee un alto porcentaje de materia orgánica, es libre de olores y patógenos, por

lo que su uso en agricultura, jardinería y recuperación de suelos es altamente deseable.

Este problema es uno de los más frecuentes y molestos, así no sólo es un factor molesto para el poseedor del compostador, sino que puede ser un grave problema para los vecinos. Las causas de que se produzca el mal olor suelen ser la falta de oxígeno, que hay demasiada humedad o que existe una sobrecarga de nitrógeno. Sin embargo, este problema no tiene solución ya que añadiendo materiales secos de forma uniforme podemos alcanzar una humedad óptima. Hecho esto, debemos mezclar bien la pila para conseguir una humedad uniforme.

7.4.2 *Compuestos productores de olores*

Los olores es una parte de interés principal en el proceso del compostaje, en especial si la planta se encuentra ubicada cerca a zonas residenciales, debe contar con una buena gestión que evite o reduzca al máximo los olores, existen varios métodos, como lo son: la infiltración, la destrucción térmica y el proceso químico. En las plantas manuales no se necesita de un tratamiento de control de olores, ya que en las primeras fases de la descomposición se retira el material con el propósito de disminuir impactos negativos, se propone manejar estos impactos con metodologías sencillas y económicas, como cubrir las pilas con pasto con una capa de (5-10cm) y/o abono y listo de la capa gruesa, esto 30 sirve como filtro biológico y se puede mezclar al material a comportar ya finalizado su proceso

Los compuestos de olores indica la aplicación de microorganismos eficaces es una alternativa óptima de tratamiento de estiércol y malezas, que contribuye al control de patógenos, amortiguación de olores, al desarrollo de una práctica mejorado y a un ambiente saludable en comparación con el método convencional que durante el proceso se genera olores desagradables. Para determinar la calidad del compost evaluó las características químicas del compost aplicando microorganismos eficientes partir de residuos orgánicos tales pruebas como materia orgánica, nitrógeno, fósforo, potasio, calcio y magnesio.

Los compuestos que producen olores también dependen mucho de las condiciones de la pila y la fase del proceso del compostaje. De este modo, los olores emitidos en condiciones anaerobias son diferentes de los emitidos en condiciones aeróbicas. No existe un mal olor que sea razonable, y es difícil de juzgar ante un tribunal. En la práctica el contaminador puede tener que reducir el olor casi a cero para defenderse de reiteradas denuncias. Tanto el olor de la especie humana como el de los animales, se debe a los excrementos, y no es razonable esperar una producción especialmente ganadera sin olores molestos. Compuestos potenciales generadores de malos olores en compostaje Los barros residuales, camas de animales estabulados, residuos agroindustriales, etc., generan olores pronunciados a partir de proteínas, grasas y carbohidratos. Los microorganismos degradan estos compuestos con o sin oxígeno, siendo este último proceso el generador de la mayor producción de malos olores. El amonio, derivados del azufre orgánico e inorgánico, grasas, aminos y algunos compuestos de anillo bencénico cerrado, son intensos, y se enmascaran con otros. Olores característicos.

El amonio es un ejemplo de olores intensos, pero es fácil de diluir y se hace rápidamente (unas cien veces en poco tiempo), en cambio no podrían detectarse los más penetrantes, pero que fueron enmascarados por el más intenso y menos penetrante como es el amonio. Un olor penetrante es aquel que puede detectarse aún muy diluido (por ejemplo un millón de veces). Un ejemplo es el sulfuro de metilo, característico de animales muertos. Este olor puede ser detectado fuera del lugar de producido, pero nunca en la presencia de amonio concentrado. El amonio es de un olor muy fuerte y aplastante al sentido olfativo. Si no se conoce del efecto de enmascaramiento, se podría pensar fuera del sitio, que el olor se debe a animales muertos y no a un proceso de compostaje en el lugar.

Tabla 3. Compuestos identificados como emisores de olores en el compostaje.

Compuesto	Identificación del olor	Umbral ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)		
		Bajo ¹	Alto	VR ²
COMPUESTOS DE AZUFRE				
Sulfuro de hidrogeno	Huevos podridos	0.7	14	6,7
Oxísulfuro de cabono	Picante	-	-	-
Oxísulfuro de carbano	Picante	24,3	23.000	665
Sulfuro de dimetilo	Desagradable, dulce	2,5	50,8	2,5

Disulfuro de dimetilo	Col podrida	0,1	346	-
Trisulfuro de dimetilo	Sulfuro	6,2	6,2	-
Metanotiol	Sulfuro	0,04	82	4,2
Etanotiol	Sulfuro, picante	0,032	92	2,6
	Sulfuro, a tierra			
COMPUESTOS QUE CONTINEN AMONIO Y NITROGENO	Picante, penetrante	26,6	39.600	33.100
Amoniaco		25,2	12.000	-
Aminometano	A pescado, picante	84,6	84,6	88,1
Dimetilamina	A pescado, a amina	0,8	0,8	0,52
Trimetilamina		4,0 x 10 ⁻⁵	268	-
3- Metilindol (escatol)	A pescado, picante			
	Heces, chocolate			
ACIDOS GRASOS VOLÁTILES				
Metanoico (fórmico)	Penetrante, picante	45,0	37.800	-
		2.500	250.000	2.500

Etanoico (acético)	A vinagre	84,0	60.000	-
Propanoico (propiónico)	Rancio, picante	1,0	9.000	3,7
Butanoico (butírico)	Rancio	2,6	2,6	-
Pentanoico (valérico)	Desagradable	52,8	52,8	-
3- Metilbutanoico (isovalérico)	Queso rancio			
CETONAS				
Propanona (acetona)	Fragante, mentolado	47.500	1,6x10 ⁶	241.000
Butanona (MEK)		737	147.000	30.000
2-Pentanona (MPK)	Fragante, acetona	28,000	45.000	-
	Fragante			
OTROS COMPUESTOS				
Benzotiazol	Penetrante	442	2.210	-
Etanol (acetaldehído)	Fragante, a hierba	0,2	4.140	385
Fenol	medicinal	178	2.240	184

Umbral abajo indica el menor límite de detección para las personas más sensibles. Umbral alto significa que es percibido por la mayoría de las

personas. Valores recalculados a partir de los datos de Volumen/volumen asumiendo 20°C y 1 atmósfera.

Tratamiento de emisiones del proceso del compostaje.

7.5 Características generales de los gases del proceso de compostaje

Las principales características de propiedades de un compost elaborado a partir de bagazo, cachaza y ceniza, obtenidos del proceso de fabricación de azúcar. Para la elaboración de la mezcla se realizó una caracterización de la materia prima en función de las propiedades relacionadas al proceso de compostaje. Durante el proceso de biodigestión anaeróbica se realizó el control de los principales parámetros de seguimiento hasta alcanzar la maduración de la misma. En la materia prima utilizada se encontró una densidad aparente de 0,12 a 0,48 g cm⁻³, el pH de la misma osciló entre 5,2 y 8,7, mientras que la conductividad eléctrica estuvo en el rango de 0,4 a 0,9 μ m⁻¹. Por su parte los contenidos de P, K, Ca y Mg mostraron valores entre 0,3 y 2,8 %. Finalmente, en el compost se obtuvo una densidad aparente de 0,5 g cm⁻³. La relación carbono-nitrógeno (C/N) mostró una dependencia lineal al tiempo de compostaje, mostrando una adecuada maduración de la mezcla. Se constató además la presencia de N, P, K, Ca y Mg con valores de % respectivamente. Al evaluar los resultados se concluye que el compost muestra una composición adecuada para ser empleado como abono orgánico en la agricultura. Señala que las características de los gases emitidos en un proceso de compostaje van a variar en función de muchos parámetros propios de cada proceso como el tipo de residuo

compostado, la relación C/N. En este sentido en otro texto el autor hace especial mención que las características deben incluir tanto aspectos de composición química como también otros de tipo más generales (caudal, temperatura, humedad relativa etc.). Por lo tanto, para el correcto tratamiento de los gases procedentes del proceso de compostaje, es evidente que en un primer punto a tener en cuenta es el conocimiento, de la forma más detallada posible.

Sin embargo, existen algunas características que son comunes a la mayoría de los procesos de compostaje, y que es interesante mencionar ya que los cita.

- El caudal a tratar suele ser elevado
- La concentración de contaminantes suele ser baja
- La temperatura suele estar ligeramente por encima de la ambiental
- La presión es similar a la atmosférica
- El nivel de humedad es elevado
- El nivel de olor es elevado

Estos factores, condicionan en gran medida la selección de los sistemas de tratamiento de los gases aplicables a la mayoría de los procesos de compostaje.

7.5.1 Sistemas de tratamientos fisicoquímicos

En este grupo, se recoge aquellas tecnologías de tratamiento cuyas bases es la reactividad química del contaminante o su interacción física con algún material. Tal parece que las siguientes técnicas en el campo del

compostaje que se detallarán a continuación, serán aplicables a casos específicos.

Los tratamientos físico-químicos constituyen un conjunto de procesos destinados a disminuir o en su caso eliminar aquellos componentes de un flujo residual de origen industrial, que le confieren el adjetivo de peligroso.

a) Oxidación

En este apartado se incluyen un grupo de tecnologías (oxidación térmica, combustión térmica, oxidación catalítica, etc.). Por lo cual, se menciona que la base es la reactividad del contaminante con oxígeno en distintas condiciones de temperatura y presión se trataría de una tecnología cara por los procesos de tratamiento de residuos, dada la baja concentración de contaminantes encontrada en las emisiones de los gases del proceso del compostaje.

La oxidación y el azufre elemental a sulfatos se realiza en aerobiosis por acción de las bacterias quimioautótrofas incoloras del azufre en anaerobiosis por bacterias fotosintéticas verdes y purpúreas, Como estas oxidaciones dan lugar a la formación de iones hidrógeno, producen la acidificación del medio de la contaminación.

b) Absorción

La absorción en el caso de los gases del proceso de compostaje las dos fases a considerar son el aire para la fase gaseosa y agua para la fase líquida. Por este motivo, se menciona que la absorción solo será aplicable en aquellos contaminantes que sean altamente solubles en

agua, además recalca que se debe recordar que la absorción implica dos inconvenientes para el compostaje.

Su efectividad se limita a compuestos altamente solubles en agua.

En la absorción, el contaminante no es eliminado, sino transferido a otra fase, que posteriormente tendrá que ser tratada.

c) Adsorción

El mecanismo de adsorción se suele presentar en forma de isothermas, que son representaciones de las concentraciones en equilibrio entre las fases gas y sólido. Aunque la adsorción es muy utilizada en procesos de ingeniería, su aplicación en el campo del compostaje es muy limitada, básicamente a causa del elevado coste y duración limitada de los materiales adsorbentes. La adsorción solo supone una transferencia entre fases y no a una eliminación real de contaminantes.

7.6 Sistemas de tratamientos biológicos

Los tratamientos biológicos son la base de la mayoría de sistemas implementados para la depuración de gases procedentes del compostaje. En estos sistemas, el gas contaminado es forzado a pasar a través de un material de soporte sólido que contiene una biomasa activa de microorganismos capaces de degradar los contaminantes. Dentro de los sistemas biológicos, el más popular por su utilización en procesos del compostaje es la Biofiltración.

Los tratamientos biológicos son operaciones de tratamiento por biodegradación de materia orgánica tanto recogida de forma separada

como de la presente en la fracción resto donde no hay dicha recogida separada, combinándose en este último caso con tratamientos mecánicos complementarios. es un proceso biológico aerobio (con presencia de oxígeno) que, bajo condiciones de ventilación, humedad y temperatura controladas, transforma los residuos orgánicos degradables en un material estable e higienizado llamado compost, que se puede utilizar como enmienda orgánica.

7.7 Biofiltración

En los biofiltros percoladores de LIKUSTA (también denominados: reactores de filtro percolador biológico o cuerpo de goteo biológico) se utilizan microorganismos para el tratamiento de gases de escape con el objetivo de eliminar las emisiones procedentes de corrientes de aire contaminadas por sustancias tóxicas y olorosas. A diferencia de los materiales de soporte biológicos utilizados tradicionalmente en los filtros biológicos, los biofiltros percoladores utilizan materiales de soporte inertes en los que se cultivan los microorganismos. Pueden oxidar los enlaces gaseosos orgánicos e inorgánicos con procesos bioquímicos en condiciones aerobias y convertirlos en conexiones de bajo peso molecular, atóxicas, inodoras e imperceptibles como dióxido de carbono o agua.

La humedad y los nutrientes necesarios se llevan al cuerpo de goteo biológico mediante un rociado. A diferencia del proceso tradicional de filtrado biológico, los materiales portantes son inertes, es decir, no se descomponen en el proceso. Los biofiltros percoladores son adecuados para la limpieza tanto de disolventes como de gases de escape cargados

de olores con concentraciones de hasta 1.000 mg/m³. La biofiltración de efluentes gaseosos se define como un proceso biológico utilizado para el control o tratamiento de compuestos volátiles orgánicos e inorgánicos presentes en la fase gaseosa. En la biofiltración, los microorganismos son los responsables de la degradación biológica de los contaminantes volátiles contenidos en corrientes de aire contaminado. Por lo que menciona que, durante el proceso de biofiltración, el aire pasa a través de los poros del material filtrante que sirve de soporte a bacterias en crecimiento. Mientras que otro autor explica que la degradación de los contaminantes ocurre previa transferencia del aire a un medio líquido en donde es utilizado como fuente de carbono y energía (compuestos orgánicos) o como fuente de energía (compuestos inorgánicos). La utilización implica producción de biomasa y la oxidación parcial o total del contaminante. A su vez, la biomasa, bajo ciertas condiciones sufre una oxidación por respiración endógena. De esta manera, los procesos de biofiltración dan lugar a una descomposición completa de los contaminantes, creando productos no peligrosos.

7.7.1 Medios de biofiltración

a) Biofiltro de lecho fijo

Los biofiltros de lecho fijo constan de un material filtrante, que puede ser sintético, que sirve como soporte para los microorganismos y en el caso de los orgánicos como fuente de nutrientes para el crecimiento microbiano. Ejemplos de materiales filtrantes utilizados en este tipo de filtros son rocas porosas, tierra de diatomeas, perlita, tierra, trozos de maderas, diferentes tipos de compost, residuos orgánicos tales como

cáscaras de cacahuete, de arroz o cortezas de pino, entre otros. El principio de los biofiltros de lecho fijo consiste en hacer pasar la corriente gaseosa saturada de humedad que contiene al contaminante a través del lecho en donde los contaminantes son degradados por los microorganismos. Una característica importante de este tipo es la ausencia de la fase acuosa móvil que los hace convenientes para tratar contaminantes muy poco solubles en agua.

b) Biofiltro de recirculación de líquido

La utilización de la tecnología en el tratamiento del agua tiene como ventajas: un monitoreo y control constante de las variables físico-químicas y sanitarias del agua, la reutilización del agua, producciones de altas densidades, y como desventajas: el alto costo y necesidad de mano de obra calificada. Sistema y método de filtración de líquidos El presente invento se refiere a un sistema y a un método para la filtración de líquidos. Más particularmente, se refiere a un sistema y a un método para la filtración de líquidos que pueden tener altos contenidos de sólidos tales como cerveza, vino, agua y zumos de fruta, o flujos biológicos tales como de biorreactores que comprenden proteínas o enzimas policlonales, monoclonales u otras.

El biofiltro de recirculación de líquido consiste de una columna empacada con un soporte inerte (usualmente de material cerámico o plástico) donde se desarrolla la bio película. A través del lecho se alimenta una corriente gaseosa que contiene el contaminante y una corriente líquida que es comúnmente reciclada a través del lecho y que tiene la función de aportar nutrientes esenciales a la bio película, así

como de remover los productos de degradación de los microorganismos. Estos sistemas se recomiendan para compuestos solubles en agua. Son los utilizados en tratamiento de aguas residuales.

CAPÍTULO VIII

8 EFECTO DE LA APLICACIÓN DEL COMPOST SOBRE LAS PROPIEDADES BIOLÓGICAS DEL SUELO

Los recursos biológicos se refieren al gran número de actividades que desarrollan organismos vivos del suelo para impactar en el potencial productivo. El componente biológico del suelo lo constituyen los microorganismos que habitan en él, y las raíces; afectan tanto las características químicas como físicas de un suelo. Los microorganismos son responsables de la descomposición de los residuos vegetales y pueden controlar los nutrientes liberados durante la descomposición. Bajo cargas elevadas de residuos, los microorganismos pueden inmovilizar los nutrientes disponibles en las plantas para aumentar su propia población. Los nutrientes están ligados a la población microbiana hasta que los niveles de residuos disminuyen y los nutrientes están disponibles para las plantas. El suelo desempeña un papel vital para el sostenimiento de los ecosistemas de la Tierra, por lo tanto, el manejo del suelo afectará la productividad de la tierra y la sostenibilidad ambiental. Algunas de las actividades en las que interviene el suelo, y que proporcionan beneficios al medio ambiente circundante: el suelo provee a las plantas un punto de apoyo para sus raíces y contiene los nutrientes necesarios para que crezcan, filtra el agua lluvia evitando inundaciones, tiene la capacidad de almacenar grandes cantidades de carbono orgánico, protege la calidad del agua subterránea; suministra materiales de construcción y fabricación esenciales al hombre, además de las diversas aplicaciones agrícolas y alimenticias.

El recurso suelo ha sido estimulado por la creciente conciencia de que el suelo es un componente crítico de la biosfera y que no solo funciona en la producción de alimentos, sino también en el mantenimiento de la calidad ambiental, una de las principales prioridades de investigación agrícola es mantener la productividad del suelo y desarrollar mejores métodos para monitorear los cambios, como lo demuestran las prácticas de manejo, en las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, según los residuos urbanos se utilizan cada vez más en los productos orgánicos programas de enmienda del suelo en un intento de aliviar los graves problemas ambientales y de salud causados por su acumulación, el uso de la fracción orgánica de residuos urbanos como enmiendas orgánicas al suelo puede ser una solución para mejorar el bajo contenido de materia orgánica de los suelos mediterráneos, estos residuos son ricos en materia orgánica que es capaz de estimular la actividad microbiana del suelo aportando a lo mencionado, dice que aunque la fertilidad del suelo depende de la física, química, y factores biológicos, los factores biológicos nunca se han utilizado ampliamente como indicadores de la fertilidad del suelo, a pesar del hecho de que algunos parámetros biológicos, como la actividad microbiana, pueden estar estrechamente relacionados con la disponibilidad de nutrientes y, por lo tanto, con la fertilidad del suelo

Las afectaciones a las que se ve expuesto el suelo han hecho que la producción de alimentos se altere, dando como uno de los resultados alimentos con alteraciones físicas y químicas, tanto en su aspecto morfológico como en su estructura interna. Es por ello que una de las

prioridades es realizar una correcta inserción de nutrientes al suelo para incrementar su calidad y por ende su productividad.

Transformación del compost en beneficio para el suelo

Beneficios del compost en el suelo en cuanto a las propiedades físicas, mejoran la infiltración de agua, la estructura del suelo y la conductividad hidráulica; disminuyen la densidad aparente y la tasa de evaporación, así como promueven un mejor estado fitosanitario de las plantas. El compost es el resultado de una descomposición de la materia orgánica para su transformación en humus. Producido en condiciones controladas, normalmente aeróbicas y termófilas. Es una transformación higiénica de los residuos orgánicos en un “alimento” homogéneo y altamente asimilable por nuestros suelos. En beneficio para el suelo el compostaje es un económico y ambiental proceso biológico amigable de degradación microbiana termófila aeróbica de desechos por poblaciones de microorganismos nativos, que pueden convertir desechos orgánicos en una enmienda de suelo rica en sustancias húmicas y nutrientes, mitigando la contaminación del agua subterránea y reducir la contaminación del aire y las emisiones de gases de efecto invernadero. La materia orgánica se transforma parcialmente en macromoléculas más estables y complejas, como las sustancias húmicas, en el proceso biológico de compostaje. Menciona que la actividad microbiana del suelo tiene una influencia directa en la estabilidad y fertilidad de un ecosistema, ya que los microorganismos desempeñan un papel fundamental en el establecimiento de ciclos biogeoquímicos, además, la actividad microbiana está involucrada en la formación de la estructura del suelo. La calidad del compost depende principalmente de la

estabilidad y madurez de la materia orgánica dado que la transformación bioquímica de la materia orgánica a través del metabolismo microbiano siempre ocurre en la fase soluble en agua, la materia orgánica extraíble en agua puede influir significativamente en la transformación de la materia orgánica durante el compostaje acotando a esto. Menciona que comprender las características de las sustancias húmicas formadas durante el compostaje es relevante porque constituyen una fracción estable de carbono, regulando así el ciclo del carbono y la liberación de nutrientes, como nitrógeno, fósforo y azufre después de la aplicación al suelo, desempeñan un papel importante en el ciclo global del carbono y en la regulación de la movilidad y el destino de los contaminantes ambientales y también tienen muchos beneficios positivos en la creación de un medio adecuado para el crecimiento de las plantas. Para la obtención de compost de buena calidad se dice que este dependerá de la calidad de materia prima a descomponerse, así como de la madurez o el tiempo determinado para la actividad microbiológica en las etapas de degradación del compostaje, haciendo que la materia orgánica se transforme en macromoléculas estables lo que favorece a la formación de las estructuras del suelo.

8.1 Efectos de las comunidades microbianas en el compost y en el suelo

Durante el proceso de compostaje se lleva a cabo una compleja sucesión de poblaciones de microorganismos. El compost, es el producto final de la descomposición biológica de sustratos orgánicos bajo condiciones de alta temperatura. Una amplia diversidad de microorganismos mesófilos y termófilos conforman las poblaciones mixtas que degradan la materia

orgánica, siendo las más importantes las bacterias, Actinomycetes y hongos filamentosos. El tipo de sustrato utilizado, la población del microbiota inicial y la evolución de la temperatura, son los factores principales que condicionan la sucesión de microorganismos a través del proceso de compostaje. Los efectos beneficiosos en la utilización de un compost son diversos: aporta nutrientes y microorganismos beneficiosos al suelo, estimula el desarrollo radicular e incrementa el microbiota rizosférica con efecto biocontrolador. El monitoreo de la sucesión microbiana es importante en el manejo efectivo del proceso de compostaje, ya que los microorganismos desempeñan un papel clave en el proceso y la aparición de algunos microorganismos refleja la calidad del compost en maduración y de acuerdo a ello se establecerá la aplicabilidad al suelo. Para ello aclara que existe una variedad de métodos que se han utilizado hasta ahora para investigar, los microorganismos durante el compostaje, estos incluyen el uso de placas tradicionales y la identificación de microorganismos cultivables para determinar la diversidad microbiana durante el compostaje investigo que uno de los métodos más recientes que dan una indicación de la composición de la comunidad microbiana, sin el cultivo de organismos en medios de agar, son el análisis directo del ácido graso fosfolípido.

También se observó que no se podían detectar organismos similares con un enfoque clásico (cultivo) y con un enfoque molecular (análisis de ADN), en consecuencia, las metodologías tradicionales siguen siendo útiles en microbiología ambiental. Determino la diferenciación entre levaduras y hongos que se evidencia en las características morfológicas

de las placas inoculadas con la dilución más alta y que muestran el crecimiento de colonias separadas.

Para la efectividad del compostaje es necesario el monitoreo de la actividad microbiana, y los diferentes métodos de identificación de microorganismos, principalmente en la etapa de maduración que es en donde existe la mayor proliferación de microorganismo, quienes son los responsables de la degradación del material orgánico y de ello dependerá la calidad del compostaje.

8.2 Efecto de la actividad metabólica del compost

Las actividades metabólicas del compostaje es un proceso biooxidativo que da lugar a un producto orgánico altamente estable. Se puede definir como la mineralización y humificación parcial de las sustancias orgánicas mediante reacciones microbianas. Estas reacciones se realizan bajo condiciones óptimas durante un periodo determinado y relativamente corto. La transformación microbiana de la fracción orgánica 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 mesofílicos y termofílicos. Aunque se considera que los microorganismos mesófilos 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. El compost es fundamentalmente una materia orgánica

estabilizada por procesos biológicos (claramente diferenciada de la que generan otro tipo de procesos como la esterilización o desecación) e higienizada, con propiedades relativamente similares al humus, asociado siempre al proceso de compostaje, por lo que su aplicación al suelo confiere a éste generalmente una mejora en las propiedades físicas, químicas y biológicas, a la vez que aporta de forma gradual elementos nutritivos y aumenta su disponibilidad para las plantas y los organismos del suelo. En función de las características del compost, éste puede emplearse en agricultura bien como mediante orgánico actuando exclusivamente sobre las propiedades fisico-químicas y biológicas del suelo, o como abono (además actúa sobre la nutrición mineral de las plantas). También puede utilizarse como sustrato en el ámbito de la horticultura o para el cultivo de hongos comestibles, como medio de crecimiento en viveros (hortícolas, forestales, floricultura, etc.) y quizás de forma más clara también puede emplearse en agricultura biológica o ecológica. Para la producción de la composta se requiere degradar la materia orgánica lignocelulosa, la cual está formada con diferentes compuestos y diversos microorganismos que a su vez poseen enzimas. Para tener una composta estabilizada, se requiere una compleja sucesión de actividades enzimáticas de microorganismos degradadores que permitan descomponer la materia y proporcionar una composta de buena calidad con nutrientes inocuos que acceda a su aplicación en sistemas agrícolas. Para disminuir la gran cantidad de materia lignocelulósica que se produce a diario, se requiere de un proceso de compostaje que permita aprovechar a los microorganismos con beneficiosos al suelo, estimulando el desarrollo radicular e incrementando la microbiota rizosférica con efecto biocontrolador. La

evaluación del proceso de compostaje para la estabilidad (madurez) y la calidad se basa en parámetros físicos y químicos del producto final que depende de la actividad metabólica de los microorganismos involucrados en la descomposición. El estiércol compostado ha sido reconocido como una forma efectiva de resolver parcialmente la creciente preocupación por el manejo de los desechos sólidos al reducir el volumen y el peso de los desechos orgánicos, así como al controlar los patógenos del suelo. Sin embargo, los compuestos inmaduros pueden contener sustancias que inhiben el crecimiento, como sales, amoníaco libre, sustancias fenólicas, metales pesados y ácidos orgánicos, sin embargo, dice que los compuestos inmaduros pueden contener sustancias que inhiben el crecimiento, como sales, amoníaco libre, sustancias fenólicas, metales pesados y ácidos orgánicos. Aunque hay varios informes disponibles sobre la composición química y la dinámica de la microflora durante el compostaje aporta que los microorganismos desempeñan un papel clave en el proceso, el control de la sucesión microbiana es importante para la gestión eficaz del proceso de compostaje.

8.3 Efecto de la aplicación de compost en el suelo

El compost puede ser aplicado al voleo en cultivos extensivos o directamente sobre praderas establecidas o en preparación de suelos para cultivos, su uso en forma localizada, se realiza en chacras y hortalizas, en líneas de plantación, o al preparar camas altas, camellones y almacigueras. El compost es una rica fuente de materia orgánica, una sustancia vital para el aire, la humedad y la retención de nutrientes. La materia orgánica del suelo juega un papel importante en el

mantenimiento de la fertilidad del suelo y, por tanto, en la producción agrícola sostenible. Además de ser una fuente de nutrientes para las plantas como nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K), mejora las propiedades físico-químicas y biológicas del suelo. Tal vez, una de las formas más eficaces de utilizar alimentos desperdiciados es el reciclaje a través del compostaje. Transformando los desperdicios en compost podemos devolver valiosos nutrientes al suelo mientras reducimos y reutilizamos los residuos producidos en casa y colectivamente en los vertederos. El compostaje es el proceso natural de putrefacción o descomposición de la materia orgánica, como residuos, desechos animales y restos de alimentos por los microorganismos, en condiciones controladas. El compost es importante porque mejora la salud del suelo en general y su resiliencia ante las crisis, como la sequía, incluyendo la adaptación al cambio climático.

Como ha sido señalado anteriormente, el compost, está considerado como mejorador de las propiedades físicas del suelo y por consiguiente su efecto fertilizante es secundario en relación a los objetivos perseguidos por el SIRSD. No obstante, el uso del compost en forma excesiva puede impactar negativamente en el medio ambiente, por lo cual la dosis a aplicar debe considerar los impactos negativos que generen en el medio ambiente la incorporación al suelo de altas cantidades de nutrientes. la calidad del compost, mediante la presentación de los análisis, los cuales deberán estar disponibles, en caso de su fiscalización, según los términos establecidos en el artículo 46 del Reglamento. Deberá cumplir con los siguientes niveles: Relación Carbono/Nitrógeno: Menor a 30 pH : entre 5,0 y 8,5.

Las sustancias húmicas del suelo se consideran la parte más recalcitrante y estable de la materia orgánica del suelo (MOS) y contribuyen a la sostenibilidad agrícola a largo plazo mediante el aumento de la productividad de los cultivos y la fertilidad del suelo. En este trabajo, se evaluó la influencia del manejo orgánico del suelo durante 5 años sobre el ciclo del carbono y la estructura química de los ácidos húmicos del suelo agrícola. El experimento se realizó con dos enmiendas diferentes: i) la incorporación de los residuos vegetales o biomasa del cultivo, producidos dentro de la parcela (hojarasca, residuos de poda y siega de la hierba), (S+V) y ii) la aplicación de estiércol compostado además de la incorporación de la vegetación espontánea y restos de poda (S+V+C). Después de 5 años, en relación a la influencia sobre la calidad del suelo y el ciclo del carbono, el aporte continuado con compost muestra un aumento en el contenido de materia orgánica (de 0,95% a 2,46%) así como de la fracción de carbono soluble en agua (47%). Con respecto a las características de los ácidos húmicos del suelo el 1º y 5º año, analizados con resonancia magnética nuclear de ^{13}C (^{13}C -RMN), se muestra una evolución de la estructura hacia formas más estables en ambos suelos (S+V y S+V+C), debido al proceso de biodegradación y humificación de la materia orgánica. Especialmente el aumento de grupos funcionales en el complejo húmico tipo grupos aromáticos y carboxílicos, reforzando el carácter recalcitrante de los ácidos húmicos, se observa más claramente en los suelos tratados con compost (S+V+C). La aplicación de compost mejora a largo plazo la fertilidad del suelo.

El compostaje ayuda a mejorar la composición fisicoquímica de los suelos, puede llegar a reabastecerlos de nutrientes perdidos por la

erosión (química, mecánica, potencial o de otro tipo), contribuye, en buena medida, a la aeración y a su capacidad para mantener la humedad, el compostaje, en específico, la producida con residuos de jardinería ha sido empleada en la eliminación de algunas enfermedades provocadas por Rhizoctonia. Tanto el proceso de compostaje como el uso del compost maduro, son una solución de bajo costo y tecnológicamente efectiva para remediar suelos contaminados por residuos orgánicos peligrosos como los hidrocarburos totales del petróleo, solventes, explosivos, pesticidas e hidrocarburos aromáticos poli cíclicos.

Demostraron que la aplicación de compost proporcionó una cantidad mayor de nitrógeno (N) y materia orgánica (MO), en comparación con tratamientos con fertilizantes químicos. De igual forma demostraron que una aplicación alta de composta no ayuda a mejorar el rendimiento de los cultivos después de que el suelo adquiere su fertilidad óptima menciona algunos efectos relevantes para la regeneración del suelo:

- Estimula la diversidad y actividad microbial en el suelo.
- Mejora la estructura del suelo.
- Incrementa la estabilidad de los agregados.
- Mejora la porosidad total, la penetración del agua, el movimiento a través del suelo y el crecimiento de las raíces.
- La actividad de los microbios presentes en el compost reduce la de los microbios patógenos a las plantas como los nemátodos.
- Contiene muchos macro y micronutrientes esenciales para el crecimiento de las plantas.

- Provoca la formación de humus, complejo más estable de la materia orgánica que se encuentra sólo en el suelo y es el responsable de su fertilidad natural.

La aplicación de residuos vegetales al suelo se considera una buena práctica de manejo porque estimula el crecimiento microbiano del suelo, y actividad, con la subsiguiente mineralización de nutrientes vegetales y aumenta la fertilidad del suelo. Es por esta razón, su uso en la restauración de zonas degradadas es prometedor. Sin embargo, la influencia de la materia orgánica en las propiedades del suelo depende de la cantidad, tipo y tamaño de los materiales orgánicos agregados. El efecto de un residuo vegetal en particular en las propiedades del suelo depende de su componente dominante. Los composts contienen elementos fertilizantes en proporción baja respecto a los fertilizantes minerales de síntesis. En primera instancia, esto conlleva que el coste de aplicación del compost sea considerablemente mayor que el derivado de la aplicación de abonos inorgánicos. Por otra parte, los composts presentan un contenido de materia orgánica alto. Esto supone múltiples ventajas en la aplicación agrícola ya que contribuye a la mejora del medio edáfico (propiedades físicas, químicas y biológicas), hecho imprescindible para garantizar la sostenibilidad de los sistemas agrícolas. En el caso de la utilización como sustrato, el mismo compost sirve de soporte físico de las plantas, circunstancia que -por otra parte- hace aumentar significativamente la exigencia de calidad que se le debe pedir al compost. Otro aspecto a tener en cuenta en cuanto a la fertilidad propia de los composts es la forma en que estos nutrientes están disponibles en él y, además, cómo se van a ir liberando a lo largo del

tiempo. Los composts poseen la mayor parte del nitrógeno (N) en forma orgánica y éste se irá mineralizando en función de las condiciones del suelo en el que se aplique. Desde este punto de vista, la aplicación de compost como fertilizante origina incertidumbre en cuanto a la disponibilidad de nutrientes para las plantas. Por ello, una vez que el compost se incorpora, es necesario analizar el suelo para controlar los niveles de nutrientes y ajustar la fertilización en función de la liberación que se produzca y de las necesidades del cultivo.

Dado que muchas enzimas responden a cambios en el estado de fertilidad del suelo, se pueden utilizar como indicadores potenciales de la calidad del suelo. Determino las propiedades químicas (relación C / N) y biológicas del suelo como la biomasa microbiana del suelo, la respiración del suelo y las actividades enzimáticas del suelo (deshidrogenasa, ureasa, b-glucosidasa, fosfato y arilsulfatasa) en un agroecosistema mediterráneo semiárido.

CAPÍTULO IX

9 EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DEL COMPOST

9.1.1 *Evaluación de la calidad del compost*

El compostaje en calidad es el que permite la transformación de la materia orgánica (MO) en un producto con precursores de sustancias húmicas a través de la descomposición aeróbica, los residuos deben mezclarse en proporciones tales que la relación carbono e nitrógeno (C/N), la humedad (40-60 %) y la aireación sean adecuadas para la actividad microbiana, con el fin de que ésta permita la modificación de la estructura de los materiales para que los nutrientes estén disponibles. Compost también se entiende como tal, al producto resultante de la transformación biológica, mediante microorganismos, del material orgánico procedente de distintas fuentes tales como estiércol, residuos de cultivos, hojarasca de bosques y material leñoso, componentes orgánicos contenidos en los residuos sólidos urbanos y como también fertilizantes en una dosis más alta indica que el compost puede reemplazar parcialmente a los fertilizantes químicos convencionales.

El compostaje aeróbico ha sido reconocido como una estrategia eficaz para la eliminación y el reciclaje de estiércol de ganado, y numerosos estudios han demostrado que el compostaje redujo los antibióticos y ARG en los productos, por lo general el productos del compostaje depende de su contenido nutricional inicial, composición de la población de bacterias, material de partida utilizado por su generación, la edad y el proceso por el cual se produce. El compost que tiene un valor de

comercialización para la agricultura debe estar libre de metales pesados como plomo, cobre, zinc, cadmio, mercurio, cromo y níquel, ya que, la toxicidad del compost, es el aspecto más importante de su calidad. Por lo tanto, el nitrógeno en el compostaje, respectivamente. No solo causan problemas ambientales graves, como la emisión de olores, el calentamiento global y el agotamiento del ozono, sino que también reducen la calidad de los productos de compost. Los aditivos pueden reducir la pérdida de nitrógeno que se produce durante el compostaje al adsorber $\text{NH}_3 / \text{NH}_4^+$, reducir el pH de la pila de compostaje formar estradita y mejorar la nitrificación. Sin embargo, debido a que se ha investigado una amplia gama de aditivos para reducir la pérdida de nitrógeno durante el compostaje, los aditivos tienden a ser diversificados y complicados. En este documento, revisamos la literatura reciente sobre la retención de nitrógeno del proceso de compostaje realizado con aditivos y clasificamos los aditivos en físicos, químicos y microbianos en función de sus características y mecanismo de conservación de nitrógeno.

Los principales factores que afectan la calidad del proceso de compostaje son de la siguiente manera: relación C/N, humedad, naturaleza de las materias primas, disponibilidad de oxígeno, y tecnología de compostaje. Las relaciones C/N llevan a una extensión del tiempo de proceso, es decir que, la humedad es muy alta, el paso del aire a través de la pila puede ser interrumpido ya que el agua puede llenar los espacios aéreos necesarios favoreciendo la fermentación anaeróbica. Por otro lado, si la humedad es demasiado baja, los microorganismos no pueden crecer y desarrollar la bioquímica típica y el uso de algunos

aditivos orgánicos mejoraría el proceso de compostaje, así como su calidad. Siendo el suelo un medio frágil y vulnerable, que se encuentra en equilibrio con factores formadores resultado de su evolución puede verse afectado con una inadecuada utilización de productos orgánicos procedentes del compostaje sin un control, sin evaluación de su calidad y que no cumplan la legislación lo que podría derivar, no sólo en no mejorar las propiedades del suelo, sino también, comprometer el medio edáfico de manera irreversible.

La agricultura urbana presenta una oportunidad para explorar otros medios de producción sostenible de alimentos así como la gestión de residuos orgánicos en las ciudades y la calidad del compost, como la estabilidad y la madurez, debe ser comprobado antes de la aplicación del compost en tierra, pues el compost inestable y/o inmaduro puede tener efectos adversos en la germinación de las semillas, el crecimiento de las plantas y el medio ambiente del suelo debido a la disminución del suministro de oxígeno y/o nitrógeno disponible, como también a la presencia de fitotóxicos. Ya que, no todos los materiales que han sido transformados aeróbicamente, son compost. El proceso de compostaje incluye diferentes etapas que deben cumplirse para obtener compost de calidad. La utilización de un material que no haya finalizado correctamente el proceso de compostaje puede acarrear riesgos como:

9.2 Fitotoxicidad

En un material que no haya terminado el proceso de compostaje correctamente, el nitrógeno está más en forma de amonio en lugar de nitrato. El amonio en condiciones de calor y humedad se transforma en

amoníaco, creando un medio tóxico para el crecimiento de la planta y dando lugar a malos olores. Asimismo. La calidad del compost puede ser ajustada a través de la incorporación de agentes optimizadores. La selección de los agentes debe hacerse en forma cuidadosa para efectos de garantizar la seguridad del compost maduro. Las pruebas de fitotoxicidad son un mecanismo económico, rápido y confiable para detectar en el compost la presencia de sustancias tóxicas inhibitoras de la germinación y el crecimiento de cultivos.

9.2.1 Bloqueo biológico del nitrógeno

Ocurre en materiales que no han llegado a una relación C/N equilibrada, y que tienen material mucho más rico en carbono que en nitrógeno. Cuando se aplica al suelo, los microorganismos consumen el C presente en el material, y rápidamente incrementan el consumo de N, agotando las reservas de N en el suelo. Si la relación C/N del compost es demasiado alta cuando se aplica la tierra, los microorganismos del suelo compiten con las plantas por el nitrógeno del suelo disponible, y la inmovilización del nitrógeno resultante puede afectar negativamente el crecimiento de las plantas. También este elemento es uno de los más limitantes para la agricultura. Aunque es el componente principal de la atmósfera que respiramos (un 70%), está en forma poco disponible para las plantas. Por suerte conocemos que algunos microorganismos del suelo en simbiosis con plantas leguminosas pueden transformarlo en una forma asimilable.

9.2.2 Reducción de oxígeno radicular

Cuando se aplica al suelo un material que aún está en fase de descomposición, los microorganismos utilizarán el oxígeno presente en el suelo para continuar con el proceso, agotándolo y no dejándolo disponible para las plantas.

9.2.3 Exceso de amonio y nitratos en las plantas y contaminación de fuentes de agua

Un material con exceso de nitrógeno en forma de amonio, tiende a perderlo por infiltración en el suelo o volatilización y contribuye a la contaminación de aguas superficiales y subterráneas. El nitrógeno (N) es considerado el nutriente más importante para la producción vegetal, por lo que se requiere fertilizar con cantidades del mismo que permitan garantizar el adecuado desarrollo de los cultivos. Actualmente, los fertilizantes de síntesis química con amonio (NH_4^+), nitrato (NO_3^-) o urea ($\text{CO}(\text{NH}_2)_2$), son los más utilizados; sin embargo, se dosifican y aplican a los suelos de forma incorrecta empleando cantidades elevadas con poca eficiencia, causando problemas de salinidad, toxicidad y de contaminación en suelos y aguas, lo que a su vez tiene efectos en los ecosistemas y la salud. Teniendo en cuenta la necesidad de continuar generando tanto productos, como mecanismos, que permitan garantizar la productividad de los sistemas agrícolas y su aporte a la economía y seguridad alimentaria de los países de forma sostenible, se han planteado soluciones variadas al respecto, el nivel de actividad microbiana es demasiado alto (el compost debe considerarse estable), el grado de madurez del compost también afecta a sus cualidades supresoras de

enfermedades; su inmadurez, los compost inmaduros promueven patógenos y pueden resultar en un aumento de las enfermedades.

Tabla 4. Parámetros para evaluar la calidad de un compost dependiendo del uso.

Parámetro de calidad	Uso			
	Sustrato para semillero	Venta como sustrato	Enmienda o abono orgánico	Mulch
Respuesta al crecimiento	++	++	++	-
Contenido de nutrientes	-	+	+	-
pH/Sales solubles	++	++	+	-
Color/Olor	++	++	+	+
Presencia de inertes	+	++	-	+
Maduración/Estabilidad	++	++	+	-
Tamaño de partículas	++	+	+	+

(-) baja importancia; (+) moderada importancia; (++) alta importancia

Tabla 5. Parámetros clave para la certificación de calidad de un compost.

Parámetro de calidad	Uso					
	Sustrato semillero	Sustrato contenido	Enmienda jardines	Mezcla a suelo	Mulch	Fertilizante natural
pH/Humedad	*	*	*	*	*	*
Índice de maduración	*	*	*	*		
Materia orgánica	*	*	*	*	*	
Sales solubles	*	*	*	*	*	
Minerales	*	*	*			*
Densidad	*	*			*	*
Crecimiento cultivo	*	*	*	*		*

9.3 Parámetros ambientales

La temperatura se analizó consecutivamente durante los primeros 15 días, mientras que el pH y la humedad durante 11 días; las siguientes evaluaciones se registraron cada 15 días, tomándose muestras del sustrato en cinco puntos equidistantes de la pila de compost y posteriormente las muestras fueron trasladadas al laboratorio de Biología Molecular. Las técnicas empleadas se mencionan a continuación: (Andrade Loor, 2020)

- **Temperatura:** para determinar la temperatura se colocó directamente el termómetro punzón en cinco puntos equidistantes de la pila.
- **pH (Potencial Hidrógeno):** a partir de las muestras tomadas de los tratamientos en estudio se procedió a pesar 10 g del sustrato y se mezcló en 50 mL de agua destilada (relación 1:5 p/v), posteriormente se dejaron en reposo durante 5 minutos, a continuación, se determinó el pH empleando el potenciómetro.
- **Humedad:** para determinar el % de humedad se procedió a pesar 1,5 g de la muestra del sustrato, a continuación, las muestras se ubicaron en la estufa durante 4 horas a 105°C. Transcurrido este tiempo se obtuvo el peso seco de la muestra, determinándose el porcentaje (%) de humedad mediante la siguiente ecuación:

$$\% \textit{ humedad} = (M1 * M2) * 100/M$$

Dónde:

M1: Peso del crisol muestra húmeda

M2: Peso del crisol más muestra seca

M: Peso de la muestra (1,50 g)

La OMS (Organización Mundial de la Salud), ha establecido rangos normales para la calidad de un compost en sus componentes de: humedad entre 30 – 50%, materia orgánica entre 10 – 30%, materia inerte entre 30 – 70%, pH (acidez) entre 6 – 9, y un tamaño de las partículas de entre 2 – 10 mm. En la actualidad, se siguen manejando estos rangos para evaluar un compost de buena calidad.

CAPÍTULO X

10 EFECTOS DE LA APLICACIÓN DEL COMPOST SOBRE LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS DEL SUELO

El compost es un fertilizante orgánico que puede constituir una alternativa factible, que posibilita el incremento productivo sin efectos adversos para el ambiente, el compost se define como una mezcla de materiales orgánicos (con agua o sin ella), suelo o fertilizantes que han sufrido descomposición biológica principalmente bajo condiciones aeróbicas y termófilas. Los suelos agrícolas presentan efectos nocivos que afectan su estructura y composición debido al uso indiscriminado de fertilizantes, lo que ha favorecido la presencia de suelos con alta salinidad y agotamiento de sus recursos minerales. Generando una amenaza a los suelos agrícolas de todo el mundo Adicionalmente a esto, se debe mencionar el cambio climático y el mal uso y exceso de plaguicidas donde este último los hace susceptibles a la acumulación de estos debido a los procesos de adsorción por la materia orgánica y la retención en agua. Sobre las propiedades de los suelos agrícolas con el propósito de generar estrategias de manejo capaces de contribuir a la mejora de su calidad.

El color del suelo refleja algunas de las propiedades físicas, químicas y biológicas del mismo y está influido por el contenido de materia orgánica, el material parental, el clima, el drenaje y la aireación. El color afecta directamente a la temperatura y al grado de humedad del suelo e indirectamente al crecimiento de las plantas, a la actividad microbiana y a la estructura del suelo. Además, puede ser utilizado como un indicador

de las condiciones y fuerzas que operan durante la formación de los suelos o para predecir la capacidad productiva de los mismos. Dice que el compost es un fertilizante que sirve para enriquecer los suelos es decir que contenga todos los nutrientes y se lo puede obtener mejor con la presencia de humedad para obtener buenos resultados.

Durante el compostaje, otros desechos deben ser mezclados en proporciones tales que la relación carbono/nitrógeno (C/N), la humedad y la aireación sean adecuadas para que estimulen una actividad microbiana intensiva, que modifique la estructura química y física de los materiales, cambiando la especiación química para que los nutrimentos sean disponibles, Sin embargo, varios aspectos específicos del proceso como el balance de nutrientes no han sido explorados siguiendo un modelo científico adecuado

10.1 Las propiedades físico-químicas del suelo

10.1.1 Textura

La textura del suelo se determina por el material mineral presente, se definen tres tamaños de partículas minerales existente que son: arena, arcilla y limo. La textura es la combinación de las proporciones en que se encuentran estas partículas que forman el suelo, permitiendo así, determinar su funcionalidad, retención de nutrientes, fertilidad, drenaje, aireación, entre otros. Por lo tanto, los suelos con textura arenosa presentan 70% o más de partículas de arena, son permeables al agua, aire y fácilmente trabajables con reserva de nutrientes muy bajas. Los suelos arcillosos contienen más del 40% de partículas de arcilla, en

cambio son pedregosos si están húmedos y muy duros cuando están secos, ricos en nutrientes, pueden formar agregados, pudiendo ser impermeables y asfixiantes. Los suelos francos o de texturas medias con un 45% de arena, 40% de limo y 15% de arcilla; por lo que presenta un equilibrio entre ellas y sus condiciones físicas y químicas son las mejores, haciendo el más apto para el cultivo.

10.1.2 Densidad aparente

Masa de suelo por unidad de volumen (g/cm³ o t/m³) que describe la compactación del suelo, representando la relación entre sólidos y espacio poroso. Es una forma de evaluar la resistencia del suelo a la elongación de las raíces.

10.1.3 Importancia de la materia orgánica en el suelo

La materia orgánica cumple un papel fundamental e importantes servicios eco sistémicos como:

- En la estructura del suelo participa en la formación de agregados o terrones del suelo.
- Permite mayor resistencia del suelo a la erosión hídrica y eólica.
- Mejora la capacidad de infiltración, retención y almacenamiento del agua.
- Ayuda en la fertilidad del suelo, en la disponibilidad de nutrientes para las plantas.

- Captura y secuestra una parte importante del carbono presente en la atmósfera.
- Aumenta la capacidad de retención de agua y el intercambio catiónico.
- Es una fuente de reserva alimenticia para la planta.
- Favorece y aumenta la diversidad de especies microbiológicas (microorganismos).
- Aumenta la absorción solar al dar una coloración más oscura al suelo (cama caliente).

10.1.4 Índice óptimo de pH

El pH del suelo se considera una de las variables más importantes ya que controla varios procesos químicos, afectando principalmente la disponibilidad de los nutrientes en las plantas, mediante el control de las formas químicas de los nutrientes. En lo que se refiere al rango óptimo del pH en la mayoría de las plantas oscila entre 5.5 y 6.5; sin embargo, varias plantas se han adaptado para crecer en valores fuera del rango del pH.

Los valores extremos causan problemas a los suelos y a la vegetación. Cuando el pH es menor de 5.5 el suelo tiene problemas asociados a toxicidad de aluminio, fijación de fósforo, deficiencia de calcio y magnesio entre otros. Cuando el pH es mayor de 6.5; los problemas que

resultan están relacionados con la deficiencia de micronutrientes en el suelo

10.1.5 Micronutrientes

Son necesarios para el desarrollo de los organismos vegetales y constituyen un 0.05% de la materia seca de las plantas; son esenciales para el funcionamiento fisiológico normal de las células en las plantas. Los micronutrientes son: Cloro (Cl), Cobre (Cu), Hierro (Fe), Manganeso (Mn), Boro (B) y Zinc (Zn).

10.2 Estrategias para la recuperación y manejo de suelos de ecosistemas agrícolas

10.2.1 Abono verde

Se entiende por abonos verdes, el uso de determinadas plantas, tanto individualmente como mezcladas, generalmente de crecimiento rápido, que preceden o suceden a los cultivos comerciales, con el fin de mejorar las condiciones físicas, químicas y biológicas del suelo. Normalmente usamos los abonos verdes como si fueran a sustituir una abonada mineral y esperamos de ellos que nos proporcionen resultados espectaculares en el siguiente cultivo. Si se usan leguminosas, éstas fijan el nitrógeno y luego incorporan su material vegetativo, se incorporan al suelo cuando comienzan a florecer de 60 - 90 días antes de la siembra del cultivo principal.

10.2.2 Abono orgánico compostado

Se origina mediante la descomposición del estiércol que se mezcla con los residuos vegetales y otros residuos orgánicos, que mediante los microorganismos como bacterias, lombrices y hongos descomponen los tejidos de los residuos, permitiendo obtener más nutrientes para el suelo Fondo de Cooperación para el Desarrollo Social.

Fondo de Cooperación para el Desarrollo Social también especifica algunas de las ventajas que presenta la implementación del compost en el suelo las cuales son:

- Aumento de la producción de cultivos, mejorando su resistencia a las plagas, heladas, enfermedades y sucesos extremos del clima.
- Facilita la absorción de los nutrientes y el agua a la planta.
- Es amigable con el ambiente, dado que permite el reciclaje de los desechos orgánicos en tanto reduce la contaminación del suelo.
- Permite la utilización de insumos de la chacra.
- Se puede usar en todos los cultivos, de preferencia en la siembra.

10.2.3 Humus de lombriz

Fondo de Cooperación para el Desarrollo Social aclara que el humus de lombriz resulta de la digestión de la materia orgánica por lombrices para obtener uno de los abonos orgánicos de mejor calidad. La producción del humus puede ser desde el nivel del mar hasta los 3800 m.s.n.m. El

humus es portador de nutrientes al suelo (nitrógeno, fósforo y potasio) que mejora la calidad física química y biológica; contribuyendo a incrementar la productividad y producción de los cultivos.

Las principales ventajas del humus de lombriz según Fondo de Cooperación para el Desarrollo Social son:

- Aportan más cantidad de nitrógeno, fósforo y potasio que otros abonos orgánicos; estos nutrientes son absorbidos una parte por las plantas y otra queda como reserva en el suelo.
- Beneficia al suelo con millones de microorganismos que procesan los nutrientes y ayuda a la incrementación de producción de cultivos.
- Ayuda en el aumento entre 5 a 30% de capacidad de retención de agua en el suelo.
- Permite la neutralización de los contaminantes, como los insecticidas por su color oscuro que permite la absorción de calor por el suelo.
- La estructura del suelo es mejorada notablemente.

El compost tiene sus principales componentes que son el carbono y el nitrógeno para entrar en un proceso de descomposición biológica dependiendo de la humedad y aireación para poder estimular las actividades microbianas y concuerda con la idea de que el agua es uno de los factores importantes en la descomposición o formación del

compost el desarrollo de lombrices de tierra presentan un efecto beneficioso sobre la fertilidad del suelo, contribuyen al crecimiento vegetal e incrementan la productividad de los cultivos de forma sostenible, el uso de compost también puede ser una alternativa factible para el control de la pudrición de raíces, al aumentar el vigor de la planta y su resistencia a los patógenos del suelo.

Según autores nombrados podemos decir que el compost es uno de los principales nutrientes para el suelo debido que el compost forma parte de los componentes que están presentes en el suelo y a este tipo de fertilizante se los conoce como residuos orgánicos. Argumenta que el compost favorece al desarrollo de microorganismos al igual que corrobora hipolito según su investigación por lo que presenta un sinnúmero de efectos beneficiosos sobre la fertilidad del suelo.

10.3 Compostaje de residuos verdes

Entre los MS se encuentran materiales como aserrín, residuos verdes, cascarilla de arroz, paja, entre otros. El uso de residuos verdes es ampliamente documentado en la literatura indican que el uso de este residuo puede incrementar el tiempo de proceso debido a la presencia de compuestos lignocelulíticos; no obstante, favorece la formación de sustancias húmicas que incrementan el valor agrícola del producto final y mejorar el compostaje de BOM con residuos verdes, además de evaluar diferentes proporciones de mezcla, es recomendable considerar la aplicación de una frecuencia de volteo constante durante las fases activas del proceso (mesofílica y termofílica) y de enfriamiento, lo que puede contribuir a optimizar el proceso de compostaje y mejorar la

calidad del producto final, ampliando sus potenciales usos en la agricultura. Adicionalmente, son limitados los estudios que consideran este aspecto, representa una alternativa prometedora y respetuosa con el medio ambiente que proporciona productos con impacto positivo de suelo y plantas, la calidad de los productos de compostaje, determina su aplicación y depende del material de desecho particular y parámetros de proceso del compostaje.

Se logró resolver que a pesar de del enfoque global el compost nos ayuda a la recuperación de la fertilidad de los suelos.

10.3.1 Efecto sobre la compactación del suelo

La compactación del suelo (pérdida de volumen por eliminación de macro poros) es una característica básica que se considera como fundamental para establecer la calidad del suelo, como referencia a la investigación realizada en el año 2011 se entiende que la compactación del suelo que es un proceso degradativo utilizadas para un buen manejo al laboreo del suelo por lo que depende de la textura de la mineralogía del suelo y su contenido de materia orgánica.

La comparación de enmiendas orgánicas en forma de Compost en el suelo de monocultivo tiene un efecto positivo en las características físicas y químicas, de manera beneficiosa a las plantas da una mejora en la absorción foliar de fósforo, potasio, magnesio y azufre de tratamientos con enmiendas orgánicas son superiores al tratamiento.

10.4 Efectos de la compactación en el espacio poroso del suelo

Los cambios que la compactación induce en el espacio poroso de los suelos son los mismos, ya sea que la compactación se deba al cultivo prolongado, al tránsito de las ruedas del tractor, paso de gente o pisoteo de animales, la compactación del suelo produce:

- Aumento en el espacio de micro poros
- Disminución en el espacio de macro poros
- Disminución en el espacio poroso total.

Según efectos de compactación del suelo nos dice que la compactación se lo da por varios factores como son la influencia de maquinarias por su respectivo peso, personas y animales por lo que esto nos va a conducir a una reducción en la aireación del sustrato aumentando las dificultades mecánicas para la penetración de las raíces por lo que habrá inconvenientes graves al momento de realizar cualquier cultivo, las propiedades físicas, la emisión de gases de efecto invernadero y el rendimiento de cultivos agrícolas, tanto en las sendas de tránsito como en las zonas adyacentes a las mismas en suelos arcilloso de textura franco-limosa.

10.4.1 Efecto sobre los micronutrientes

El compost incorporado al suelo impacta la abundancia microbiana, composición de la comunidad microbiana y actividad microbiana, algunas razones pueden ser responsables del aumento de microbios en abundancia, como mayor disponibilidad de nutrientes, orgánicos lábiles,

la mayor retención de agua y la aireación, y como fuente de nutrientes se ha vuelto obsoleta en la mayoría de las áreas rurales, debido a la separación del cultivo de la tierra de las operaciones pecuarias, los agricultores han agregado grandes cantidades de fertilizantes minerales P durante muchos años para aumentar los rendimientos de los cultivos.

Una alternativa para reducir la superficie agrícola compactada consiste en realizar un manejo eficiente del tránsito dentro de los lotes agrícolas. El sistema de tránsito controlado de la maquinaria agrícola establece dos zonas con diferentes condiciones de suelo: i) sendas de tránsito permanente que pueden o no ser sembradas y ii) zonas de cultivo permanente sin tránsito de maquinaria.

10.5 Efecto sobre la retención y el almacenamiento del agua y suelo

La distribución espacial y temporal del agua del suelo es un insumo clave para monitorear el balance hídrico del suelo y el ciclo hidrológico global, comprende un gran número de procesos hidrológicos de superficie y subsuelo, para probar el rendimiento de varias cubiertas diseñadas y validación de modelos climáticos e hidrológicos del suelo, y una razón clave por la que los cultivos rara vez se acercan a su potencial genético de rendimiento, al mismo tiempo, las limitaciones de la humedad del suelo en los agro ecosistemas se verán agravadas por el aumento del cambio climático en la frecuencia y magnitud de la sequía en muchas regiones, y los acuíferos de riego se están reduciendo a tasas insostenibles, aumento de la concentración atmosférica de CO₂ en las plantas han sido muy importantes para el manejo de bosques, botánica, agronomía y manejo del agua en la investigación agrícola.

10.5.1 Efectos sobre la infiltración la escorrentía y la erosión hídrica del suelo

La erosión inducida por la lluvia implica el desprendimiento de partículas del suelo por el impacto de la gota de lluvia y su transporte por la acción combinada de la escorrentía superficial, la intensidad (patrón) durante las tormentas naturales es un fenómeno común para comprender sus efectos en la escorrentía y los procesos de erosión inducida por la lluvia, durante el transcurso de la lluvia puede disminuir la porosidad del suelo afectando a la aireación y a la infiltración es decir implica el desprendimiento del suelo con la infiltración de agua en suelos repelentes al agua puede retrasarse severamente cuando las partículas del suelo están recubiertas con sustancias orgánicas hidrófobas, que disminuyen la humectabilidad del suelo, esto tiene implicaciones para el runo superficial y la erosión, el almacenamiento de agua, el exceso de agua se acumula en la superficie del suelo en depresiones, formando charcos y produciéndose la infiltración en el suelo.

Las tormentas locales fuertes pero breves, el uso irracional de la tierra, los suelos blandos y sueltos son responsables de la erosión del suelo, por lo tanto deben identificarse para las lluvias intensas o continuas ya que las reducciones de runo y la acerosión han sido importantes componentes de los cambios ambientales por lo que comprender los mecanismos detrás de estos cambios es crucial para desarrollar planes estratégicos para el manejo sostenible de la erosión del suelo, sobre las propiedades del suelo y con la hidrología del suelo, La partición de la lluvia en la infiltración y el runo es relevante para comprender la

generación de runos, la infiltración y la erosión del suelo, la labranza gestiona las propiedades de la superficie del suelo y genera ásperas del suelo que afectan a la partición de la lluvia, en las zonas áridas, el agua de lluvia es la principal fuente de agua del suelo.

10.6 Efecto sobre la capacidad de intercambio iónico

Se define el cambio iónico como los procesos reversibles por los cuales las partículas sólidas del suelo adsorben iones de la fase acuosa liberando al mismo tiempo otros iones en cantidades equivalentes, estableciéndose el equilibrio entre ambas fases que son fase sólida y líquida, los coloides cargados negativamente atraen cationes de la solución del suelo y los retienen en cambio los cationes retenidos por los coloides del suelo pueden ser reemplazados por otros cationes intercambiables.

10.6.1 Efecto sobre la nutrición nitrogenada

La nutrición ha sido una práctica fundamental de la producción agrícola, a lo largo de la historia humana durante muchos siglos agrícola la producción se basó en el reciclaje de residuos orgánicos, la fertilización permitió que el verdadero potencial de la fertilización con N fuera la realización, y producción industrial de fertilizantes inorgánicos los macronutrientes están generalmente presentes en tejido vegetal en concentraciones superiores al 0,2%, mientras que micronutrientes están presentes por debajo del 0,01% base en peso seco, la concentración y/o la captación total de micronutrientes al promover el desarrollo de brotes y raíces y las cubiertas más grandes con tasas más altas de fotosíntesis y

transpiración, la fertilización con nitrógeno también puede influir en la cantidad total de carbono (C/N) y micronutrientes devueltos a la superficie del suelo, con cultivos a largo plazo que pueden alterar los micronutrientes totales y / o disponibles en el suelo.

Comenta que uno de los factores claves es la relación de carbono nitrógeno se considera optima cuando se sitúa en valores de 30:1 a 35:1 por lo que el ph influye en la actividad que esta encargada de la amonificacion, la nitrificacion en relacion a C nos dise que el nitrogeno es un verdadero potencial en la fertilizacion los nutrimentos suficientes para la obtención de suelos aptos, alto rendimiento esta expuestos porque promueven el incremento de la materia orgánica del suelo, la actividad microbiana y una liberación gradual de nutrientes.

10.7 Efectos sobre la regulación del pH y la retención de iones

El pH del fluido, la concentración de iones, la temperatura y la difusión está en función de la dimensión del ion, carga electrostática y temperatura, las pérdidas de cationes en profundidad por acción del drenaje o permeabilidad de los suelos contribuyen a aumentar la acidez, el proceso de nitrificación libera hidrógeno en la solución del suelo lo que lleva a una acidificación, el factor más importante de acidificación es la remoción diferencial de calcio y magnesio que han provocado los sistemas de producción o por la extracción de la totalidad de la planta, el pH tiene una influencia directa en el compostaje debido a su acción sobre la dinámica de los procesos microbianos, sin embargo, su medida, que se realiza en el laboratorio sobre el extracto acuoso de las muestras tomadas en las pilas, es sólo una aproximación del pH “in situ”

El pH que nos informa sobre la proporción relativa de hidrogeno ya que el pH del suelo es elevado cuando el complejo está saturado que tiene una influencia directa en el compost lo que nos permite que tenga acides o basicidad, en general los compost maduros tienden a estabilizarse en valores de pH por lo que el pH se puede obtener una medida indirecta del control de la aireación y la mezcla, si en algún momento se crean condiciones anaeróbicas se liberan ácidos orgánicos que provocan el descenso del pH.

10.8 Efectos sobre la nutrición fosfórica potásica cálcica y magnésica

La roca fosfórica (RP) es la principal fuente natural inorgánica de fósforo (P) en el mundo, es usada para sinterizar fertilizantes fosfóricos solubles (90%) y P elemental (10%) para la industria química de alimentos y de detergentes, esta consiste en un fosfato de calcio insoluble conocido genéricamente como apatita ($\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{OH},\text{F}$), en la síntesis de nuevas paredes celulares, particularmente en la lámina media que separa las nuevas células divididas; se requiere para un normal funcionamiento de las membranas vegetales y ha sido implicado como segundo mensajero en diferentes respuestas de las plantas tanto en señales ambientales como hormonales.

10.8.1 Efecto sobre la productividad agrícola

Los sistemas agrícolas orgánicos se basan en enmiendas orgánicas para lograr los requisitos de fertilidad de los cultivos, y el control de las malezas debe lograrse sin herbicidas sintéticos, los sistemas agrícolas se

encuentra los efectos del crecimiento de la productividad agrícola, por lo que, en los sectores rurales, ha sido un tema muy importante en la economía que se lo considera que el crecimiento del rendimiento agrícola es un factor importante, detrás de la reducción de la pobreza. Y el Numerosos estudios orientan que los efectos de productividad agrícola nos demuestran que la aplicación de residuos puede tener un efecto positivo sobre la nutrición que se basan en residuos orgánicos por lo que el sector rural ha sido un factor importante en la productividad.

10.8.2 Efectos del compost en el suelo

- Mejora la estructura del suelo: y con ello el laboreo, la aireación y la conservación de humedad.
- Provee nutrientes a las plantas: el suelo se hace más saludable y produce plantas sanas.
- Proporciona a las plantas mayor resistencia a las plagas y a las enfermedades: en general los insectos se alimentan de plantas débiles o enfermas.

10.9 Consideraciones para la mejora del compost y la prevención de efectos negativos

El uso del compost Mejora las propiedades químicas, la materia orgánica aporta macronutrientes N, P, K y micronutrientes, y mejora la capacidad de intercambio de cationes del suelo, esta propiedad consiste en absorber los nutrientes catiónicos del suelo, poniéndolos más adelante a disposición de las plantas, evitándose de esta forma la

lixiviación, es la transformación biológica controlada de residuos orgánicos bajo aeróbicos, es decir, en presencia de oxígeno, por microorganismos indígenas tales como bacterias, actinomicetos, levaduras y hongos, la degradación de la materia orgánica conduce a la liberación de CO₂, H₂O, y el calor y la producción de minerales, biomasa y humus disponibles para las plantas.

Ando una forma efectiva a reducir la masa de digerido, así como producir un patógeno, la madurez biológica de un compost puede expresarse mediante el uso de un indicador basado en el nematodo común la agricultura ecológica es una alternativa que permite, además de sustituir los insumos tradicionales, mantener y mejorar la calidad del suelo.

10.9.1 Efectos sobre la estabilidad de los agregados del suelo

Para determinar la estabilización de SOC, muchos parámetros diferentes tienen se ha utilizado para indicar la estabilidad de OC, los indicadores más comunes son compartimentos lábiles y refractarios, como los orgánicos disueltos carbonos, carbono orgánico soluble en agua, carbono orgánico fácilmente oxidable por lo que la calidad del suelo, reduce los rendimientos de los cultivos e incluso puede aumentar la emisión de carbono, del suelo a la atmósfera.

Los efectos de los agregados al suelo no tienen una estabilidad porque algunos agregados son fácilmente oxidables y puede reducir los rendimientos del cultivo debido a la presencia de la actividad microbiana por lo que es muy importante porque consta de la presencia de carbono

orgánico. que los agregados depende de la diversidad y composición microbiana del suelo los factores más importantes la estabilización del carbono orgánico del suelo y la estabilidad de los agregados depende de la diversidad y composición microbiana del suelo, interacciones entre el suelo, la comunidad bacteriana y contenido de SOC en agregados de suelo, y la dosis de enmienda orgánica debe ser suficiente a las dosis bajas para que la agregación al suelo sea de calidad por lo que la degradación del suelo es una de las mayores amenazas este hecho también se podría producir durante el compostaje de algunas enmiendas orgánicas.

La degradación del suelo es una de las mayores amenazas para el desarrollo sostenible, las tierras degradadas pueden prevenir una mayor degradación al controlar el suelo y erosión hídrica jugando un papel clave en la mejora del nitrógeno del suelo (N), las distribuciones del tamaño agregado del suelo cambian rápidamente en el uso de la tierra y pueden servir como indicadores de la calidad del suelo

CAPÍTULO XI

11 INDICADORES DE LA ESTABILIDAD Y MADUREZ DEL COMPOST

11.1 Introducción (Estabilidad Biológica “Humidificación” y Madurez)

El compostaje consiste en la transformación aerobia de la materia orgánica por parte de diferentes tipos de agentes microbianos como bacterias y hongos; razón por la que es indispensable mencionar los factores físicos, químicos y biológicos, que influyen sobre su metabolismo, con el objetivo de acelerar la descomposición de los residuos utilizados para la obtención de un producto estable de excelente calidad biológica y química. Por lo tanto, es un proceso biotecnológico que combina las fases mesófilas y termófilas, sumamente eficaz en la descomposición y estabilización de la materia orgánica como consecuencia de las actividades metabólicas de los microorganismos, sus crecimientos están relacionado por la concentración de O₂ y Temperatura. Es decir, es una técnica viable en la degradación de residuos orgánicos que, de acuerdo a las materias utilizadas, sus características están relacionadas con el producto final, el abono orgánico prehumificado, que resulta de la descomposición y transformación biológica aeróbica de residuos orgánicos, con una provisión de humedad y volteos adecuados para facilitar el trabajo de los microorganismos. En este proceso tecnológico de compostaje se utilizan microorganismos que degradan la materia orgánica bajo unas condiciones óptimas. Experimentos diseñados y realizados por el

Departamento de Ingeniería Química, Biológica y Ambiental en colaboración con otras instituciones, muestran que el compost que se obtiene es muy versátil en cuanto a las diversas formas de uso, lo que le permite ir más allá de su aplicación como fertilizante, como por ejemplo la mejora de suelos, su uso en agricultura por su efecto supresor de plagas o la biorremediación de suelos contaminados.

La estabilidad biológica del compost está relacionada con la disminución de carbono (C) degradable y actividad microbiana (a mayor estabilidad, menor degradabilidad y actividad microbiológica). Los indicadores de estabilidad incluyen: disminución de la temperatura de la pila a temperatura ambiente, cambio en el olor (pasa de desagradable a olor a tierra mojada), y el cambio de color (del original a oscuro). además de estos, es necesario tener en cuenta indicadores más precisos como la producción de CO_2 , la biomasa microbiana, grado de humificación, entre otros. Dentro del conjunto de indicadores, la producción de CO_2 se considera una medida de la actividad biológica, por lo tanto, se utiliza para estimar la estabilidad relativa de un compost. Se basa en que los microorganismos utilizan O_2 y generan CO_2 durante la descomposición aeróbica de la materia orgánica (Mo). los microorganismos respiran a tasas elevadas en compost biológicamente inestables y consumen más O_2 y generan más CO_2 que en compost estables. La humedad (H) óptima para el desarrollo bacteriano está dentro del 50-70%; la actividad biológica decrece cuando la H está por debajo del 30%; y por encima del 70% ocurre una saturación de los espacios libres por agua, disminuyendo la transferencia de O_2 y provocando anaerobiosis. Por este motivo para medir la actividad

biológica se debe ajustar la H para que las bacterias presentes se desarrollen adecuadamente, y por lo tanto, produzcan Co₂. un compost se considera estable cuando la cantidad de Co₂ expresado en mg/g MO x día es igual o inferior a 8 según lo establecido en la norma NCh2880.Of2004.

La estabilidad se define en términos de biodisponibilidad de la materia orgánica, refiriéndose a su grado de descomposición. Por lo tanto, la estabilidad describe las condiciones en las que se encuentra el material, y es una propiedad objetiva y relativamente fácil de medir y cuantificar. El grado de estabilidad se puede determinar directamente a partir del contaje de grupos microbianos o de medidas de la actividad metabólica o bien, indirectamente, por medio del estudio de los constituyentes fácilmente biodegradables o susceptibles a la degradación.

11.1.1 La humidificación del compost

La humificación es el paso final en la degradación de la materia orgánica, la cual es básicamente el clivaje de moléculas de gran peso molecular en complejos coloides amorfos que contienen grupos fenólicos. La mayoría de los procesos de humificación es debido a los microorganismos del suelo, sin embargo, es acentuado por actividades de invertebrados como los nemátodos y artrópodos. El humus es una mezcla de compuestos complejos y no un material único, estos compuestos son materiales resistentes, algo modificados a partir del tejido originario, o compuestos sintetizados de tejido microbiano con restos de organismos muertos. Actualmente se acepta la definición: “El humus es un complejo, o mejor, una mezcla de sustancias oscuras o

negruzcas, amorfas y coloidales que se han modificado a partir de los tejidos originarios o han sido sintetizadas por los varios organismos del suelo”. Sin embargo, el término humus es muchas veces sinónimo de materia orgánica del suelo, aunque otros autores distinguen entre materia orgánica total en el suelo y el humus. El humus es uno de los elementos que conforman el compost maduro, este humus es la materia que queda de la descomposición de los restos vegetales como hojas o flores, es la parte orgánica reestructurada, que además posee características importantes.

En cuanto al mejoramiento de cultivos como son la elongación foliar, aumento del tamaño radicular, mayor permeabilidad celular y por consiguiente, mejora en la calidad del suelo.

La humedad y la aireación están íntimamente relacionadas, pues el aire de los intersticios es desplazado por el agua, pudiendo alterar el estado de agregación y estructura del material de partida. Resulta muy difícil establecer una humedad óptima, ya que, en este factor, al igual que en los considerados antes, influye el tamaño y estado físico de las partículas, así como el sistema empleado en la realización del compostaje. La humedad debe de ser alta durante la etapa de descomposición, en la que prevalecen las bacterias. Si esta humedad desciende por debajo del 35-40%, la actividad microbiana desciende, pudiendo llegar hasta la inhibición. En la etapa de estabilización, el contenido en humedad requerido es menor, puesto que lo que prevalecen son actinomicetos y hongos. Por encima del 60%, el agua desplaza al aire de los espacios libres existentes y las condiciones se hacen anaerobias, produciéndose la emisión de malos olores y disminuyendo

la velocidad del proceso. Se cree que una humedad óptima oscila entre el 50-60%, dependiendo del material empleado. En la práctica, el exceso de humedad puede ser reducido con la aireación por volteos. Una humedad menor del 40% reduce la actividad de los microorganismos, principalmente de las bacterias, y si es menor del 30% se convierte en un factor limitante para la descomposición; por debajo del 12% cesa, prácticamente, toda la actividad biológica, siendo el proceso extremadamente lento.

11.2 La madurez del compost

Se refiere a la finalización efectiva del proceso de compostaje en un producto sin sustancias fitotóxicas que puedan afectar el crecimiento vegetal, es decir son condiciones que a menudo son usadas para describir la proporción de la descomposición y la transformación de la materia orgánica en el compost, por otro la madurez, está asociada a la ausencia de sustancias fitotóxicas para el crecimiento de las plantas. Sin embargo, depende del uso al que se le vaya a dar al material, por tanto, requiere de una valoración sobre si el compost producido es apropiado o no para el uso al que se destina. De todas formas, no hay que perder de vista que todos los usos del compost requieren un producto estable y libre de componentes tóxicos. Los indicadores de madurez se basan en estudios de fitotoxicidad directos como ensayos con plantas e indirectos como la medición de productos potencialmente fitotóxicos (amonio, fenoles y ácidos grasos volátiles). Son parámetros complementarios fundamentales por medio de los cuales se puede determinar la calidad de un compost para su utilización como enmienda orgánica.

Se menciona que la madurez del compost es uno de los parámetros más importante para evaluar la calidad del mismo, el grado de madurez se expresa como el estado de degradación, transformación y síntesis microbiana en que se encuentra el material compostado y se plantea con relación al proceso de compostaje y aplicación del producto obtenido al suelo. El compost maduro se define como el producto estabilizado y saneado de compostaje que se caracteriza por contener los nutrientes en formas fácilmente disponibles para las plantas, posee aspecto de una tierra suelta, ligeramente húmeda, que no mancha mucho las manos al contacto, de color marrón oscuro o negro, de olor agradable y temperatura similar a la ambiental, donde los constituyentes iniciales no son reconocibles y la degradación posterior se hace imperceptible.

La evaluación de la maduración del compost ha sido reconocida como el más importante problema concerniente a su utilización agronómica, ya que la aplicación a los suelos de cultivo de un compost inmaduro es una de las causas más frecuentes de los fracasos observados en ocasiones en el rendimiento de los cultivos. La determinación correcta del grado de madurez de la materia orgánica, constituye en la actualidad un problema pendiente en relación al control del proceso de compostaje, para la obtención de compost de alta calidad. Numerosos métodos y criterios (físicos, químicos y biológicos) han sido propuestos pero la mayoría, aisladamente, no son operativos para su aplicación práctica a todo tipo de materiales.

Los métodos para definir la madurez del compost se basan en la combinación de diferentes métodos de estudios, desde los más simples hasta los más laboriosos, entre estos se incluyen el crecimiento de

plantas, ensayos de fitotoxicidad, estudios de germinación de semillas, viabilidad de semillas de malezas, desarrollo de olores, entre otros.

11.2.1 Efectos del compost inmaduro en sistema suelo-planta

Un compost inmaduro permanece aún caliente, tiene olor similar al del amoníaco y se pueden observar todavía los componentes orgánicos de los cuales se partía en un principio contiene inhibidores del crecimiento vegetal y un contenido en sales solubles bastante alto. La aplicación de compost inmaduro e inestable puede afectar la inmovilización de nitrógeno en el suelo, restringir el crecimiento de la planta y causar efectos fitotóxicos. El efecto supresor de los abonos sobre patógenos de plantas varía de acuerdo al tipo de abono y al sistema planta-patógeno. Un factor a considerar en el uso de abonos para el control de enfermedades es que abonos maduros muy estabilizados podrían tener poblaciones de microorganismos poco activas y con poco efecto supresor como en el caso de CBM y el VBM, o una capacidad limitada para sostener la actividad de la biomasa microbiana en el suelo. Es de vital importancia disponer de un compost con una alta estabilidad y una relación C/N equilibrada. Efectivamente, en compost con contenido de N muy bajo y materia orgánica inestable se puede producir inmovilización de N. Dicha inmovilización consiste en que, el compost, al ser inmaduro, evoluciona si las condiciones son óptimas para el desarrollo microbiano (disponibilidad de agua, de oxígeno y de nitrógeno); así, si el medio no dispone de suficiente N, el que debería estar disponible para el crecimiento vegetal, es utilizado por los microorganismos para llevar a cabo su actividad biológica de

descomposición de la materia orgánica. Esta utilización conlleva que las plantas vean reducido su crecimiento y se vuelvan cloróticas.

El uso de compost inmaduro como enmienda orgánica de suelos puede tener las siguientes consecuencias:

- Provoca una disminución de la concentración de oxígeno en las raíces.
- Produce una elevación de la temperatura en el medio, que puede llegar a valores incompatibles con el desarrollo normal de las plantas.
- En el caso de emplear un producto con alta relación C/N, puede producirse lo que se conoce como “hambre de nitrógeno”.
- Permite la acumulación de ácidos orgánicos de bajo peso molecular y de otros metabolitos orgánicos considerados como sustancias fitotóxicas.
- Asimismo, puede que no se haya conseguido destruir en gran medida los organismos patógenos.

Se menciona que un compost inmaduro, con un alto contenido de C, promueve un rápido y espectacular incremento de la actividad microbiana, lo cual puede provocar un aumento de la tasa de mineralización de la materia orgánica nativa del suelo, fenómeno descrito como “priming effect”. No obstante, que actualmente se asume en general que este fenómeno causado por la materia orgánica fresca no tiene demasiada trascendencia, al menos a medio plazo, ya que se tiende a restablecer las condiciones iniciales rápidamente. No se conocen bien

las causas de esta reversión, pero se adscribe a lo que se denominado como “soil resilience” capacidad de recuperación del suelo.

Sim embargo, la aplicación de un compost con un grado de inmadurez insuficiente provoca como efecto más sobresaliente un bloqueo bilógico del nitrógeno asimilable del suelo por las poblaciones de los microorganismos, lo cual puede dar lugar a graves deficiencias de N en la planta y por lo tanto a un efecto depresivo en el rendimiento de los cultivos. La inmovilización del N mineral se produce como consecuencia del elevado ratio C/N que normalmente caracteriza al compost inmaduro lo cual ocasiona un aumento considerable microbiota edáfica que descompone el exceso de compuestos hidrocarburoados lábiles, produciendo una fuerte competencia por el nitrógeno asimilable entre los microorganismos y la planta.

La incorporación de materias orgánicas insuficientes estabilizadas puede provocar no solo una inmovilización de N, sino también de otros nutrientes esenciales, como S; P; Ca o Mg. Este fenómeno, que ha sido documentado en los suelos de regiones frías, en los que el suministro de nutrientes depende estrechamente de la mineralización de la materia orgánica, puede también ocurrir como consecuencia del incremento de biomasa microbiana que se produce al incorporar una fuente de C al suelo, como puede ser un compost inmaduro.

La rápida descomposición del compost no estabilizado provoca un rápido descenso de la concentración de O₂ a nivel de la raíz en el suelo y por lo tanto la creación de condiciones reductoras y fuertemente anaerobias a nivel de la rizosfera. Además de un descenso en la

velocidad de nitrificación y pérdidas de N por desnitrificación, la creación de estas condiciones anoxicas, junto con el descenso del pH asociado a la producción de ácido carbónico, da lugar a un incremento del grado de biodisponibilidad de los metales pesados potencialmente fitotóxicos aportados por ciertos residuos, como RSU o lodos de depuración pudiendo alcanzar niveles fitotóxicos en planta.

11.2.2 Criterios y métodos propuestos para la determinación del grado de madurez

La madurez del compost es uno de los parámetros más importante para evaluar la calidad del mismo, el grado de madurez se expresa como el estado de degradación, transformación y síntesis microbiana en que se encuentra el material compostado y se plantea con relación al proceso de compostaje y aplicación del producto obtenido al suelo.

La evolución de estos parámetros durante el compostaje mantiene normalmente una tendencia similar independiente del tipo y del origen de la materia orgánica original, por lo que estos parámetros son aplicables a la determinación del grado de madurez durante el compostaje. Sin embargo, determinados parámetros considerados individualmente no son suficientes para establecer el grado de madurez de los compostajes comerciales.

La evaluación de la madurez del compost constituye un problema relevante, desde el punto de vista de su utilización agronómica, ya que la aplicación de un compost inmaduro a los suelos de cultivo (con una relación Carbono/Nitrógeno elevada) puede causar la inmovilización del

N mineral, pues se produce un aumento de la microflora que utiliza parte del N presente en el suelo para la formación de estructuras celulares. Por otra parte, la aplicación al suelo de materia orgánica insuficientemente estabilizada da lugar a una descomposición posterior de la misma, provocando un descenso del nivel de oxígeno y del Eh, así como un aumento de la temperatura, que afectan negativamente al desarrollo de las plantas.

La importancia de la determinación del grado de madurez del compost ha dado lugar en los últimos años a un importante cúmulo de información, muy dispersa. Gran parte de estos métodos o criterios han sido recogidos o sistematizados. En general los test o métodos propuestos para la evaluación del grado de madurez pueden agruparse en cinco tipos según la naturaleza del parámetro que lo evalúan.

- Parámetros sensoriales de la madurez (test o criterios de tipo físico)
- Evolución de parámetros de la biomasa microbiana.
- Estudio de la materia orgánica “humidificada”
- Indicadores químicos de la madurez
- Métodos biológicos (test de fitotoxicidad).

11.3 Indicadores sensoriales de madurez (test de tipo físico)

Los indicadores de madurez se basan en estudios de fitotoxicidad directos como ensayos con plantas e indirectos como la medición de

productos potencialmente fitotóxicos (amonio, fenoles y ácidos grasos volátiles). Cambios en el color y el olor de compost se puede observar cómo abono estabiliza y madura. El compost se oscurece generalmente (aunque esto es, en cierto grado, una función de la materia prima) y los olores se vuelven menos ofensivo, cambiando de entrada y amoníaco-desea rico y terroso. Aunque estos indicadores sensoriales no son métodos particularmente sensibles para determinar la estabilidad o la madurez, se pueden utilizar para identificar los compost que son inestables o inmaduros. Cuando se utilizan conjuntamente, estos dos índices, incluso puede proporcionar una estimación muy aproximada de la estabilidad y la madurez. Los métodos normalizados de prueba están disponibles para la determinación del color y el olor de compost, y un método relativamente nuevo para el análisis de cuatro propiedades de color de abono, el espacio de color CIELAB, ha demostrado su potencial como un indicador de la estabilidad, la estabilización de las variables de color indica la estabilidad de compost. Sin embargo, se requiere más investigación en la utilidad de CIELAB, y ni el color ni el olor se debe utilizar como único indicador de la madurez.

Se aplica comúnmente porque dan una idea aproximada del grado de maduración del compost y son meramente orientados, no siempre son suficientes para una aplicación de la practica en plantas de compostaje.

11.3.1 Temperatura (test de autocalentamiento)

Uno de los factores muy importantes acerca del tratamiento de residuos orgánicos mediante compostaje es que durante el proceso y debido fundamentalmente a la actividad biológica que causa la degradación de

la materia orgánica, se alcanzan temperaturas que pueden rondar los 55°-60°C (o incluso más) manteniéndose estas a lo largo del tiempo que dura la conocida fase termófila. Este régimen de calor puede afectar seriamente a la biodiversidad microbiana que hay en los sustratos de compostaje, consiguiendo el famoso proceso de «higienización» del compost, o eliminación de la gran parte de los patógenos humanos como E. Coli. Es conocido desde hace mucho tiempo que tal biodiversidad evoluciona a lo largo del proceso y que, en base a la temperatura, microorganismos clave en procesos como la degradación de la lignina actúan mejor o simplemente no existen o se mueren.

Las temperaturas que alcanza el sustrato durante el proceso de compostaje dependen del calor generado por la actividad microbiana y de la distribución y pérdida del mismo en el sistema. Durante el proceso de compostaje la temperatura ejerce una selección progresiva de las especies microbianas responsables de la degradación y transformación del sustrato. Elevadas temperaturas pueden tener efectos beneficiosos puesto que permiten eliminar organismos patógenos y parásitos termolábiles, pero también pueden tener efectos negativos sobre el progreso del compostaje al eliminar los organismos necesarios o beneficiosos para el proceso de compostaje.

11.3.2 Olor (ausencia de ácidos grasos de bajo peso molecular)

El olor característico de algunos residuos se debe mayoritariamente a la presencia de ácidos orgánicos de bajo peso molecular, fundamentalmente ácido acético y en medida ácido propiónico, butírico, valerico y caproico, cuya concentración total disminuye durante el

compostaje. Una de las peculiaridades del compost es su olor durante la maduración. Un compost maduro, con independencia del residuo del que proceda, suele oler a tierra húmeda, mojada, a “suelo de bosque” como dicen los agricultores. Este olor es un reflejo indirecto de que el compostaje se ha realizado correctamente, ya que, si todavía huele al residuo del que procede, el compost no está bien hecho, este olor se lo debemos en parte a un compuesto llamado Geosmina, un metabolito secundario que generan numerosos hongos, cianobacterias y actinomicetos. Es un compuesto orgánico de bajo peso molecular, volátil y fácilmente perceptible por nuestros órganos sensoriales, en especial el olfato. Por lo visto, los microorganismos lo generan cuando sufren alguna deficiencia nutricional que les impide su correcto crecimiento y proliferación.

Esto se constituye por la mayor presencia de ácidos orgánicos, especialmente ácido acético y otros ácidos cuya concentración total disminuye el compostaje. Durante la fase mesofila se forman ácidos grasos volátiles como los metabolitos intermediarios seguidos por los aldehídos alcoholes y cetonas.

11.3.3 Color (grado de luminosidad valor Y)

Se menciona que un compost bien hecho es de color oscuro y no se reconocen los componentes originales. Si reconocemos los componentes, el compost está demasiado fresco. Una coloración blanquecina o grisácea, indica sequedad u hongos. Así como también los residuos orgánicos tienen su proceso de oscurecimiento o melanización del material como consecuencia de la rápida humificación,

después de un largo periodo el producto final se presentará un color pardo oscuro o casi negro debido a la formación de grupos cromóforos fundamentalmente de compuestos con dobles enlaces. El compost maduro tiene un color marrón oscuro o negruzco, un aroma a bosque o a tierra, el producto final; mejora las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, además permite la reducción de la fertilización tradicional sin afectar significativamente el rendimiento de los cultivos agrícolas.

11.4 Métodos basados para el método de la evolución de parámetros de biomasa microbiana

La biomasa microbiana ha sido considerada como un indicador de cambios en la materia orgánica del suelo por lo que resulta muy útil para estudiar la respuesta del suelo con cultivo ecológico ante aportes orgánicos de distinta naturaleza. La determinación del mayor número posible de parámetros (físicos, fisicoquímicos, químicos y cfbiológicos) no lleva a definir mejor la calidad del producto final de un proceso de compostaje. Se trata de seleccionar aquellos parámetros que mejor definan las características del compost en función del uso que se le dé al mismo. Para valorar la calidad de un compost es necesario evaluar detalladamente una serie de parámetros específicos medidos tanto a lo largo del proceso de compostaje como en el producto final, con el fin de establecer la mejor aplicación de dicho compost, ya sea como enmienda orgánica del suelo (mejorador del suelo), sustrato o componente de sustratos de cultivo, u otro tipo de usos o aplicaciones. Los parámetros a considerar contemplan las propiedades físicas,

químicas y biológicas del compost, que permiten conocer el comportamiento de dicho compost en la aplicación elegida.

Tanto en la fase de fermentación como en el enfriamiento se pueden medir las variaciones que experimentan ciertos parámetros bioquímicos como son la actividad enzimática (enzimas hidrolíticas) o la concentración de ATP. Estos parámetros tienden a decrecer con el tiempo de compostaje, este decrecimiento ocurre durante la etapa termogénica y se completa cuando la temperatura se sitúa entre 50 y 60 °C. Otras medidas referentes a la biomasa microbiana se ocupan de la determinación del contenido en fosfolípidos de la membrana celular.

11.5 Cuantificación de la microbiota y biomarcadores de la diversidad microbiana

La medición de la biomasa microbiana se ha utilizado como un indicador de la fertilidad del suelo. La medición de biomasa microbiana puede utilizarse también en monitoreo ambiental, ya que los microorganismos pueden actuar también como indicador sensible de contaminación por metales pesados o bifenildiclorados.

La transformación microbiana de la fracción orgánica 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 mesofílicos y termofílicos. Aunque se considera que los microorganismos mesófilos 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.

Sin embargo, la biomasa microbiana siempre decrece al final del compostaje según lo que alcance su maduración por la degradación paulatina de las moléculas lábiles. Por lo tanto, el recuento total de microorganismos puede constituir un buen test del estado de maduración del compost, son muy importantes los estudios sobre la evolución de distintos grupos de microorganismos.

11.5.1 Respirometria (consume de O₂ y emisión de CO₂)

Las técnicas respirométricas son procedimientos que se realizan con el objetivo de medir el consumo de oxígeno por parte de los microorganismos durante su actividad en el proceso de biodegradabilidad aerobia. Los métodos basados en el consumo de O₂, ya que el oxígeno es directamente responsable de la oxidación de la materia orgánica, mientras que para la determinación de la producción de CO₂ se asume una proporción molar de 1 entre el O₂ y el CO₂, situación que no es real, ya que esta relación es dependiente del grado de oxidación del carbono orgánico.

Estas técnicas consisten en la medida del O₂ consumido o el CO₂ producido por los microorganismos heterótrofos aerobios que hay en el compost, y en consecuencia son indicadoras de la actividad biológica de un material.

Son más utilizados para establecer de forma más o menos rápida el grado de estabilidad del compost, es considerada como la técnica más fiable como indicador de madurez para todo tipo de residuos. La más sencilla medición cuantitativa de la respiración es determinar la evolución CO₂ durante el periodo de incubación variable.

11.5.2 Parámetros bioquímicos de la actividad microbiana (ATP, actividades enzimáticas)

La evaluación de los parámetros bioquímicos tiene mucha importancia, debido a que su cuantificación permite obtener información sobre la actividad metabólica del suelo. Esta provee información para entender procesos como la mineralización y humificación de la materia orgánica (MO), procesos donde intervienen algunos elementos fundamentales como el fósforo, carbono, nitrógeno y el azufre, así como todas las transformaciones de la biomasa microbiana. La cuantificación de estos parámetros tiene especial utilidad en estudios naturales donde los procesos microbianos claves pueden monitorearse en estudios relativos a sistemas agrícolas, en la evaluación de problemas de contaminación, en seguimientos de la incorporación de residuos agrícolas, entre otros.

El contenido en carbono en la biomasa microbiana refleja el tamaño de la población microbiana total del suelo. Este índice ha sido frecuentemente estudiado porque responde de forma muy rápida y sensible a los cambios que se producen en el suelo y a la vez está influenciada por diversos factores tales como humedad, temperatura, luz, contenido en materia orgánica y tratamiento agrícola. Con respecto a otros parámetros microbiológicos de calidad, que nos dan información

sobre el tamaño y actividad de la población microbiana, podemos citar el ATP que nos informa sobre qué parte de la biomasa microbiana está activa. Así como también, sirven para dar información más completa dentro de los procesos involucrados en el compostaje de los residuos orgánicos, y también los test respirometricos se complementan con estudios bioquímicos con la concentración de ATP, y también se correlaciona con la evolución de la temperatura y con los enzimas hidrolíticos que constituyen métodos válidos para el grado de madurez del compost.

11.5.3 Análisis de constituyentes fácilmente biodegradables

Un residuo es biodegradable cuando tiene la propiedad de desintegrarse y descomponerse por la acción de microorganismos que se encuentran en la naturaleza –como hongos, bacterias y algas–, y convertirse en CO₂, agua y biomasa (o en condiciones de ausencia de oxígeno, otros elementos, como metano o alcoholes). En cualquier elemento de origen orgánico el tiempo de biodegradación puede variar mucho en función de la composición del material y de las condiciones del entorno (temperatura, grado de humedad, pH, aporte de oxígeno). En materia de reciclaje, pues, no nos interesa una biodegradabilidad a escala geológica, sino a corto plazo, es decir, a escala de los procesos que se utilizan para tratar los residuos. El parámetro se caracteriza en mayor medida el estado de maduración del compost que tiene una relación entre el carbono total esto representa los compuestos inorgánicos del compost, y el porcentaje de carbohidratos solubles en agua calientes y estos son os compuestos orgánicos más fácilmente metabolizados y estos propone como criterio de madurez y como un índice de degradabilidad. El

método propuesto es científicamente sólido aplicable universalmente para todo tipo de compost, relacionado esto es más barato y no necesita personal muy cualificado.

11.6 Parámetros basados en el estudio de la materia orgánica unificada del compost

Se conoce como proceso de humificación al proceso que consiste en conseguir un producto más estable (sustancias húmicas) por medio de transformaciones de la materia orgánica bajo condiciones termofílicas producidas por la actividad biológica. Las sustancias húmicas asocian moléculas pequeñas y otros polímeros heterogéneos a través de interacciones hidrofóbicas como las fuerzas de Vander Waals, π - π y CH- π y/o enlaces de hidrógeno, estas sustancias húmicas en el suelo contribuyen a mejorar la actividad microbiana del mismo (bacterias, hongos y actinomicetos), lo cual resulta en mejores condiciones para el establecimiento de las raíces y consecuentemente de la planta. El tipo de materia orgánica condiciona el proceso de compostaje, por ello, es necesario conocer las características de los residuos orgánicos, para valorar la idoneidad de su uso posterior. El contenido en MO (y su estabilidad) dependerá de cómo se ha llevado a cabo el proceso, ya que puede tener más o menos fitonutrientes dependiendo de los contenidos iniciales en los materiales de partida o de las posibles pérdidas o transformaciones a lo largo del proceso.

La investigación sobre la naturaleza y composición de las fracciones húmicas del compost constituye sin duda el criterio más exacto para establecer el grado de evolución de la materia orgánica. De acuerdo a

los estudios realizados se puede deducir que la naturaleza de los componentes húmicos extraídos del compost.

11.6.1 Carbono extraíble

CEX es el carbono orgánico extraíble con disolución alcalina, COT el carbono orgánico total en muestra sólida, CAH el carbono orgánico de ácidos húmicos y CAF el carbono orgánico de ácidos fúlvicos. Las sustancias húmicas se componen de ácidos húmicos, ácidos fúlvicos y huminas. Su formación dependerá de factores como: el tipo de materia prima, los aditivos del compost, la actividad microbiana, la temperatura, el pH, el contenido de humedad de la relación C/N, el contenido de oxígeno y el tamaño de las partículas [5, 6].

Dentro de los residuos agrícolas y estiércoles normalmente se observa un incremento en la riqueza de carbono húmico especialmente dentro de la fase de maduración y su característica en el caso de compostaje de RSU y lodos es la tasa de extracción de carbono único total y pertenece prácticamente constante durante todo el proceso.

11.6.2 Ratio AH/ a AF

El humus del suelo se compone principalmente de ácido húmico del suelo (HA) y ácido fúlvico del suelo (FA). Está altamente disponible en el suelo, se descompone y mineraliza fácilmente por los microbios del suelo y afecta directamente el suministro de nutrientes en las plantas. Se puede asumir como la teoría más plausible que la policondensación en el medio natural se produce mediante oxidación enzimática de los fenoles, por medio de enzimas polifenol oxidasas a través de

semiquinonas hasta quinonas, y la interacción de estas con aminoácidos y péptidos en el caso de compost.

11.7 Indicadores químicos de la madurez

11.7.1 Ratio C/N (fase sólida, cot/not)

Ratio C/N (Fase sólida, Cot/Not): Tiene que oscilar entre 30 en el material original y en torno a 15 en el producto final. Los microorganismos utilizan el carbono y el nitrógeno contenidos en la materia orgánica como fuente de energía para llevar a cabo actividades de descomposición. El principio del compostaje es reducir la relación C / N de materia orgánica o cerca de la relación C / N del suelo (<20). El compostaje es un proceso aeróbico que requiere oxígeno, contenido de humedad y porosidad óptimos para estabilizar la materia orgánica, y está influenciado por la temperatura, el oxígeno y la humedad.

Establece el grado de madurez del compost y define la calidad agronómica del mismo, siendo necesario 30 en el material inicial y menor de 15 en el producto final, también esto no puede ser utilizado como material absoluto del estado de maduración, ya que este presenta una gran variabilidad en materiales bien compostados dependiendo del sustrato original o también puede encontrar compost maduros en valores superiores.

11.7.2 Ratio C/N (fase soluble en agua, Cw/Nw y Cw/Not)

Ratio C/N (En fase soluble en agua; Cw/Nw y Cw/Not): Los compuestos solubles son asimilados directamente por el microbiota del

compost y los insolubles, generalmente polímeros de alto peso tienen que ser degradados por exoenzimas pasando a la fase acuosa del suelo, mediante el estudio de los cambios bioquímicos a lo largo del compostaje en extractos en agua es posible deducir el estado de maduración del compost. Normalmente, la concentración de aminoácidos, péptidos, ácidos grasos y polisacáridos de bajo peso molecular decrece de forma importante durante el proceso. Por el contrario, se observa en la fase acuosa un incremento relativo de compuestos de alto peso molecular, dentro de este proceso de compostaje produce una descomposición bioquímica de la materia orgánica produciendo reacciones degradativas fundamentalmente en la fase de acuosa, y estos compuestos son asimilados directamente por el microbiota del compost y los insolubles normalmente polímeros de alto peso molecular, son degradados por las exoenzimas hasta moléculas solubles que son absorbidas por las moléculas microbianas.

11.7.3 Carbón orgánico soluble en agua (Cw)

– **Cw:** Desciende con el compostaje hasta un valor donde permanece estable. El problema es que este valor es muy variable. Existen muchos parámetros que nos indican la madurez y calidad de un compost como abono orgánico. Los hay de naturaleza química, biológica e incluso bioquímica. Uno muy utilizado es el contenido en carbono orgánico hidrosoluble, que nos indica la materia orgánica que está más fácilmente disponible para los microorganismos presentes en las pilas de compostaje. Así, cuanto mayor sea este carbono mayor será la actividad biológica de las muestras, cosa que ocurre sobre todo al principio del proceso y cuando se alcanzan las mayores temperaturas (fase termófila).

Propuesto como alternativa de la relación C/N como en fase soluble en agua y la determinación de C_w como simple índice de madurez se observa en un descenso paulatino durante el compostaje, hasta una práctica de estabilización, pero sin embargo los valores límites propuestos varían considerablemente dependiendo del material inicial.

11.7.4 Capacidad de intercambio catiónico

La capacidad de intercambio (CIC) de una determinada masa de zeolita es la cantidad de equivalentes de un catión retenido por intercambio iónico, mientras que el número de equivalentes intercambiables por masa en una celda unitaria es la capacidad teórica de intercambio iónico máximo. La capacidad teórica de intercambio no siempre es alcanzada y se halla limitada por la presencia de lugares de intercambio de difícil acceso.

Ocurre al igual que en el compostaje de residuos orgánicos y está estrechamente relacionado con la CIC, porque aumenta progresivamente a medida que la humificación de la materia orgánica en progreso ya que el incremento de proliferación provoca un aumento de la superficie específica de las macromoléculas húmicas y aumento progresivo de grupos carboxílicos.

11.7.5 Ratio N-NH₄/ N-NO₃

El nitrógeno amoniacal N-NH₄ desciende como resultado de la inmovilización por microorganismos, así como la formación de N-NO₃. Los nitratos están ausentes al inicio del proceso de compostaje debido a que en la fase termofílica las altas temperaturas y las excesivas

concentraciones de amonio inhiben las bacterias nitrificantes, entre las semanas 3 y 5 se incrementa su concentración.

Se define en términos de nitrificación es decir cuando en el proceso de compostaje aparecen cantidades apreciables de nitratos y nitritos y esto se puede considerar que el compost está suficientemente maduro.

11.7.6 Presencia de compuestos reductores

El amoniaco es un compuesto nitrogenado gaseoso que se produce en mayores cantidades que el óxido nitroso durante el compostaje, esto debido a que los factores de este último, tales como aireación, pH alcalino y contenido de agua de alrededor de 60%, favorecen la emisión de NH_3 . El amonio es liberado a través de descomposición de la materia orgánica contenida en las deyecciones de los animales. En el proceso de la nitrificación el amonio (NH_4^+) se oxida por la acción microbiana en el suelo a nitrato (NO_3^-) en condiciones aerobias, en el proceso de los microorganismos anaerobios transforman los nitratos (NO_3^-) a nitrógeno molecular (N_2), en donde el N_2O es liberado a la atmósfera en forma de gas por difusión.

La presencia de estos compuestos de tipo amoniaco o sulfhídrico con características de un potencial de redox inadecuado del material es indicativo al igual que un pH ácido de procesos anaerobios y muestran que los residuos se encuentran en periodo de intensa descomposición. Por tanto, la presencia de estos compuestos es indicativa de inmadurez del compost.

11.7.7 La fitotoxicidad como indicador de madurez (métodos biológicos)

Los indicadores de madurez se basan en estudios de fitotoxicidad directos como ensayos con plantas e indirectos como la medición de productos potencialmente fitotóxicos (amonio, fenoles y ácidos grasos volátiles). Un compost maduro contiene inhibidores del crecimiento vegetal y un contenido en sales solubles bastante alto. Los métodos para definir la madurez del compost se basan en la combinación de diferentes métodos de estudios, desde los más simples hasta los más laboriosos, entre estos se incluyen el crecimiento de plantas, ensayos de fitotoxicidad, estudios de germinación de semillas, viabilidad de semillas de malezas, desarrollo de olores, entre otros.

Se entiende como la condición o cualidad del compost que influye negativamente en el crecimiento vegetal, y por lo tanto todas las aplicaciones potenciales del compost contemplan el contacto de las plantas la fitoxidad que es uno de los criterios más importantes para evaluar la calidad y la adecuación para los fines agrícolas y la restauración ambiental. La producción de estos compuestos presenta una situación transitoria durante el compostaje, es elevada en el estado inicial y por ello produce una rápida degradación de la materia orgánica

11.7.8 Germinación y elongación de raíces

El efecto tóxico germinativo del compost, por medio de la aplicación de la metodología del índice de germinación (IG), se calcula teniendo como base el porcentaje de germinación relativa (PGR) y al crecimiento

radicular relativo (CRR) de un determinado número de semillas en contacto con extractos acuosos de compost, con respecto a un control en agua destilada.

La principal ventaja de la germinación es que requieren de poco equipamiento de laboratorio para obtener los extractos y una estufa de incubación y pueden mantener las semillas colocadas en las placas Petri, algunos describieron el test de germinación con semillas de berro en contacto con extractos de compost determinando la comparación de raíces con las que obtuvieron en agua destilada.

11.7.9 Siembra directa

El compost se puede aplicar semi maduro o ya maduro. El compost semi maduro tiene una elevada actividad biológica y el porcentaje de nutrientes fácilmente asimilables por las plantas es mayor que en el compost maduro. Por otro lado, al tener un pH no estable aún (tendiendo a la acidez), puede afectar negativamente a la germinación, por lo que este compost no se usa para germinar semillas, ni en plantas delicadas. Antes de hacer aplicaciones tanto de compost o materia orgánica, como de fertilizantes minerales, realizar un análisis de suelo para controlar los niveles de nutrientes y ajustar la fertilización en función de la liberación que se produzca.

Se basa en la germinación de semillas depositadas directamente sobre un sustrato constituido por compost puede ser solo o mezclado con otros componentes puede ser en un suelo de referencia, y en muchos casos la siembra de las plantas se puede realizar cortando y pesando la parte

aérea calculando la producción en términos relativos respecto al control y se puede producir un mayor desarrollo de las especies vegetales en compost maduro que en compost inmaduro.

11.8 Cultivo de plantas

El uso del compost en cultivos hortícolas o florícolas en invernaderos es la mejor alternativa para la regeneración de suelos degradados y poco fértiles. El compost puede ser aplicado al voleo en cultivos extensivos o directamente sobre praderas establecidas o en preparación de suelos para cultivos, su uso en forma localizada, se realiza en chacras y hortalizas, en líneas de plantación, o al preparar camas altas, camellones y almacigueras. También se puede aplicar colocando una capa alrededor de cada planta o bien sobre el surco de riego antes de aporcar. En árboles frutales se aplica en la fuente y bajo la gota en el riego por goteo- La topografía del terreno debe presentar una pendiente menor a 15%.

Estos se aproximan más a una prueba real de crecimiento porque son experimentados de mayor duración y se pueden determinar el peso fresco o seco de las plantas en, acetos conteniendo mezclas de compost con suelo o sustratos comerciales. Para realizar el cultivo en un contenedor usan berro, pepino cebada rábano entre otras sustancias que presenta diversa tolerancia a sales solubles y a otras sustancias orgánicas potencialmente tóxicas del compost y estas pruebas son bastgg.

11.8.1 Técnicas instrumentación avanzada

Se puede utilizar un reactor en el que han colocado una bolsa de plástico en la parte superior para controlar la atmósfera de la mezcla y la

oxigenación del proceso. De esta manera consiguen mejorar el proceso y controlar la emisión de gases de interés como el amonio.

11.8.2 Espectroscopia infrarroja mediante transformada de Fourier (FT-IR)

En esta técnica, la absorción energética se debe a movimientos de vibración y rotación de los enlaces y grupos en la molécula, pudiendo clasificar la resonancia vibracional en dos grupos:

- Stretching: la distancia de enlace varía mediante alargamiento o estrechamiento.
- Bending: la disposición de los átomos varía en relación al eje de enlace.

Con esta técnica, podremos obtener información sobre la transformación y maduración en un proceso de compostaje de la materia orgánica, siendo válida para establecer algunos parámetros para estimar el grado de madurez del compost.

11.8.3 Resonancia magnética nuclear de alto campo (rmn)

Esta técnica espectroscópica, proporciona información directa de la estructura y conformación de compuestos orgánicos. La ventaja que representa esta técnica al trabajar con muestras de compost, se debe a que la presencia de impurezas de carácter paramagnético es baja y el contenido de materia orgánica elevado. Los núcleos más estudiados con RMN son los de C e H, aunque también existen estudios con el P. También se ha utilizado la RMN para estudiar la composición, transformación y degradación de sustancias húmicas.

Se están introduciendo de forma creciente en el ámbito del compostaje técnicas instrumentales avanzadas de uso común en otras áreas, que facilitan y mejoran la interpretación del proceso y la evaluación de procesos finales tales como:

- Espectroscopia de fluorescencia
- Espectroscopia de resonancia magnética nuclear de sólidos
- Espectroscopia de infrarrojo mediante transformada de Fourier
- Termo gravimetría
- Pirolisis analítica y termoquimiólisis con TMAH

11.8.4 Espectroscopia de fluorescencia

La espectroscopia de fluorescencia es un fenómeno fotoluminiscente que ocurre cuando una molécula es excitada por medio de una radiación electromagnética. Posteriormente se relaja volviendo al estado fundamental y emitiendo el exceso de energía. La fluorescencia del compuesto puede depender de una serie de aspectos como son la estructura molecular o el entorno químico, afectando también a la intensidad de emisión que se detecta. La fluorescencia es la propiedad de ciertas moléculas orgánicas e inorgánicas de liberar energía en forma de luz cuando son excitadas por una fuente de alta energía, la cual eleva los niveles de energía de los electrones dentro de la molécula. Los compuestos orgánicos aromáticos pueden ser estudiados por

espectroscopia de fluorescencia (EF) debido a su nivel de energía, estructura de pares de electrones y el anillo de carbón.

Es decir, la fluorescencia es una técnica muy útil para la detección de grupos cromóforos con una gran cantidad de electrones, tales como compuestos aromáticos y semiquinonas, compuestos que aparecen durante los procesos de compostaje, aunque en menor medida en relación a los compuestos alifáticos mayoritarios en la materia orgánica humidificada del compost. El uso de diferentes técnicas avanzadas de fluorescencia, como la medida de diferentes espectros de emisión a longitudes de onda de excitación fijas, que permiten la obtención de un mapa de contorno que nos proporciona una visión global de todas las especies fluorescentes existentes dentro de un rango espectral determinado.

Se han utilizado para estudiar la materia orgánica soluble tanto en medios naturales (suelo y medios acuáticos), como en procesos de compostaje y evaluación de la calidad del compost. Espectroscopia de fluorescencia es una técnica basada en la emisión de la luz asociada con el movimiento de electrones desde un estado excitado al estado fundamental. Esta técnica se considera más sensible que la espectroscopia absorbancia UV-visible.

11.8.5 Espectroscopia de resonancia magnética nuclear de sólidos

La espectroscopía de resonancia magnética nuclear en las últimas décadas, ha proporcionado la clave para hacerse una idea de los detalles estructurales de las sustancias húmicas. Es una técnica que permite

analizar los diferentes componentes de la materia orgánica de un suelo, enmienda o cualquier material orgánico. Un espectro de RMN puede proporcionar “huellas dactilares” de carbono o hidrógeno según sea el caso en diversas muestras orgánicas, los cuales permiten elucidar los compuestos orgánicos y sus mezclas.

Es una de las técnicas poderosas más poderosas de análisis para proporcionar información directa de las características estructurales en estudio de materia orgánica. En muestras derivadas de proceso de compostaje, que el contenido en materia orgánica es elevado la presencia de impurezas paramagnéticas que la materia orgánica proveniente de suelo. Menciona también que la técnica de la RMN de sólidos es compleja, la información que proporciona es muy valiosa para poder evaluar la calidad y el grado de madurez de un compost, siendo esta información difícil de obtener por otras técnicas.

11.8.6 Espectroscopia de infrarrojo mediante transformada de Fourier (FT-IR)

Los espectros de infrarrojo de sustancias húmicas o de compost contienen una variedad de bandas que son características de estructuras específicas de las moléculas que la componen, tanto moléculas orgánicas como inorgánicas. Por ello esta técnica espectroscópica nos pueden dar información valiosa sobre el proceso de transformación y maduración de la materia orgánica durante el proceso de compostaje.

Una de estas técnicas es la microespectroscopía de infrarrojo con transformada de Fourier (FTIRM por sus siglas en inglés), que surgió

de la integración de la microscopía óptica y la espectroscopia de infrarrojo con transformada de Fourier (FTIR por sus siglas en inglés), permite realizar un análisis global del estado bioquímico de la célula, monitoreando los niveles de las principales biomoléculas presentes en el interior. En esta técnica, la absorción energética se debe a movimientos de vibración y rotación de los enlaces y grupos en la molécula, pudiendo clasificar la resonancia vibracional en dos grupos:

- Stretching: la distancia de enlace varía mediante alargamiento o estrechamiento.
- Bending: la disposición de los átomos varía en relación al eje de enlace.

Con esta técnica, podremos obtener información sobre la transformación y maduración en un proceso de compostaje de la materia orgánica, siendo válida para establecer algunos parámetros para estimar el grado de madurez del compost.

11.8.7 Termo gravimetría

Es un parámetro importante para evaluar el grado de madurez del compost está en relación entre la pérdida de masa del material más estable térmicamente respecto al menos estable, una pequeña muestra de comparación con una muestra inerte sujeta al mismo programa de temperaturas.

Las técnicas termogravimétrico (TGA) son comúnmente utilizadas para investigar las características pirolíticas y cinéticas de materias primas sólidas. El análisis termogravimétrico demostró que el incremento en la temperatura de fabricación del té de compost, de 10 a 20°C favorece la

aparición de compuestos estructuralmente más complejos, a su vez reduce el contenido de carbonatos presentes en el mismo. Ha quedado demostrado que, si se utilizan como abonos o enmiendas orgánicas productos de buena calidad, con un bajo contenido en metales pesados, y ausencia de microorganismos nocivos, no se origina acumulación de metales pesados en el producto cosechado, ni el incremento del contenido edáfico de microorganismos nocivos. Uno de los problemas en la producción ecológica es la falta de productos fertilizantes orgánicos de características estandarizadas en cuanto al ritmo de liberación de los nutrientes en forma asimilable. Estas técnicas han sido aplicadas con el fin de elucidar las características estructurales de la materia orgánica natural. Ya que, durante la fase de estabilización y maduración del compost, una parte de la materia orgánica se transforma en producto con una energía libre total más baja, este permite considerar el proceso de maduración.

11.8.8 Pirolisis analítica y termoquimiólisis con TMAH

Para el análisis de la materia orgánica implica una separación cromatografía de los productos de la pirolisis y datos de los espectros de masa para cada componente, la interpretación de los datos requiere un detallado conocimiento del comportamiento durante la pirolisis de los compuestos pirolizados. Durante este proceso se han de controlar los distintos factores que aseguren una correcta proliferación microbiana y, por consiguiente, una adecuada mineralización de la materia orgánica.

CAPÍTULO XII

12 FACTORES QUE AECTAN EL COMPOSTAJE

Se conoce que el compostaje es una descomposición biológica a partir de microorganismos, existen diversos factores que afectan su reproducción y crecimiento, y por ende la tasa de descomposición durante el proceso. Dichos factores incluyen la temperatura, humedad, oxígeno y relación C. N. Debido a la actividad de estos, en el proceso de descomposición, se reduce el oxígeno y se produce dióxido de carbono, calor y agua, como resultado se obtiene un producto final estable, libre de patógenos y semillas que se puede aplicar al suelo para mejorar las propiedades físicas, químicas y biológicas del mismo.

Entre los factores de seguimiento se encuentran: temperatura, humedad, pH, aireación y espacio de aire libre. Entre los relativos a la naturaleza del sustrato: tamaño de partícula, relaciones C/N y C/P, nutrientes, materia orgánica y conductividad eléctrica. Los valores o intervalos óptimos están influenciados por las condiciones ambientales, el tipo de residuo a tratar y el sistema de compostaje elegido. Durante este proceso se han de controlar los distintos factores que aseguren una correcta proliferación microbiana y, por consiguiente, una adecuada mineralización de la materia orgánica. El hecho de que el compostaje sea biooxidativo exige una condición biológica que lo hace diferente de procesos físicos y químicos, así como de aquellos que no se realicen de forma aeróbica.

12.1.1 Temperatura

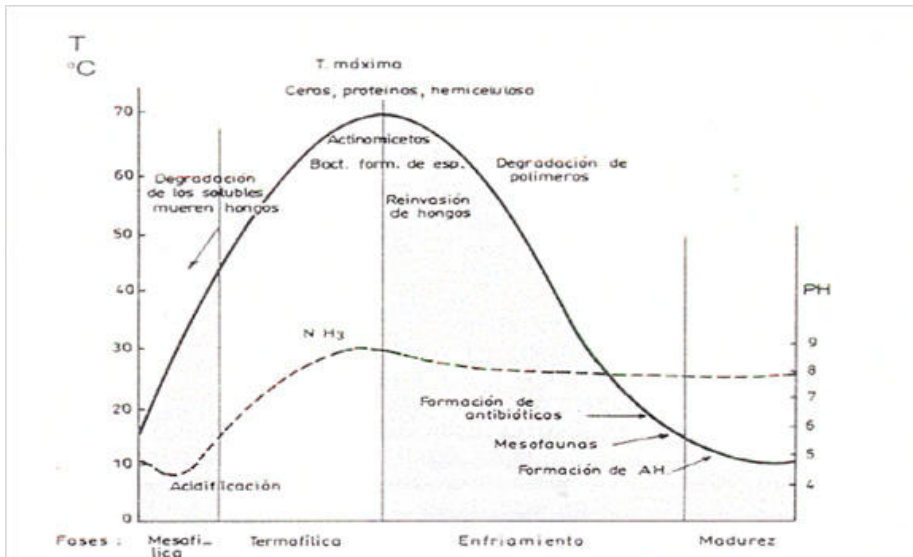
La temperatura durante el proceso de compostaje se debe a la gran actividad microbiana en la mineralización de los materiales orgánicos. La temperatura del compostaje puede ser manejada según los objetivos del productor de abonos orgánicos. Temperaturas mayores de 55°C maximizan la sanidad del proceso. Pero no son indispensables en ningún caso para el compostaje de desechos vegetales. Temperaturas de 45-55°C favorecen la velocidad de descomposición y temperaturas menores de 45°C favorecen la diversidad microbiana, así como disminuyen la volatilización de nitrógeno y la variación de la temperatura iniciando en la fase Mesofílica donde la temperatura es baja, en la fase Termofílica se incrementa y en la fase Mesofílica y de Maduración va descendiendo.

Cabe recalcar que la temperatura es un factor importante que varía en función de la actividad biológica de los microorganismos. Presenta cuatro fases: mesófila I, termófila, mesófila II y maduración, y constituye una de las condiciones ambientales determinantes durante el proceso de compostaje, También hay que tener en cuenta las condiciones óptimas de temperatura (50-60 °C), humedad y oxigenación necesarias para obtener un producto de calidad. La principal característica del compost es su capacidad de aplicación y utilización en todo tipo de suelos, incluyendo zonas áridas y semiáridas, así como ecosistemas afectados por incendios y sequías. De este modo los requerimientos durante el compostaje, en términos de temperatura, deben conjugar: higienización (mayor que 55 °C), máxima degradación (45-55 °C) y máxima diversidad microbiana (35-40 °C), lo que ha sido ampliamente discutido en numerosos estudios, sin embargo, existe poco

consenso sobre el mejor régimen o condiciones operativas a utilizar durante el compostaje. El rango de temperaturas comprendido entre los 35 y los 55 °C se considera óptimo para el proceso de compostaje.

Las altas temperaturas inhiben el crecimiento de la diversidad microscópica o conocido como el suicidio microbiano. Durante el compostaje se desarrollan tres fases puntuales propias de la descomposición aeróbica: mesófila inicial (donde, Temperatura < 45°C) en donde se originan los ácidos orgánicos; termófila (Temperatura > 45°C) y finalmente la mesófila, en la cual se da por culminado el compostaje cuando se iguala a la temperatura ambiental.

Es decir, a temperaturas superiores a 40°C, la actividad mesofílica cesa y la degradación entra en la fase termofílica. A 60°C los hongos termófilos mueren y la reacción se lleva a cabo por las bacterias formadoras de esporas y los actinomicetos. Aunque a estas temperaturas la celulosa y la lignina se atacan muy poco, las ceras, proteínas y hemicelulosas se degradan rápidamente. Conforme se consumen los materiales fácilmente degradables, la reacción se ralentiza y el calor que se genera es menor que el que se pierde, comenzándose a enfriar la masa, Cuando la temperatura desciende de 60°C, los hongos termófilos de los lugares menos calientes de la pila reinvasan la masa y comienza el ataque de la celulosa. La hidrólisis y subsiguiente asimilación de polímeros por los microorganismos es un proceso relativamente lento y, por tanto, la generación de calor decrece hasta alcanzar la temperatura del medio ambiente. Alrededor de los 40°C los organismos mesófilos reemprenden su actividad.



12.1.2 Aireación

Los microorganismos que degradan la materia orgánica para convertirla en compost son aerobios, es decir, necesitan oxígeno. Para que toda la pila de compost esté bien aireada, conviene:

- Mezclar bien materiales finos y gruesos.
- Voltar el material cuando la pila esté demasiado compacta o muy húmeda.

Para un óptimo desarrollo del compostaje es primordial proporcionar oxígeno, puesto que los microorganismos presentes en el proceso son aerobios. El porcentaje de oxígeno es variable en las pilas de compostaje en sus espacios libres: la zona externa contiene entre 18-20% de oxígeno; al interior de la pila la concentración de oxígeno es menor, a medida que el de dióxido de carbono se incrementa, hasta que a profundidades mayores que 60 cm se encuentra entre 0,5% y 2% de

oxígeno. El compostaje es un proceso aerobio y se debe mantener una aireación adecuada para permitir la respiración de los microorganismos, liberando a su vez, dióxido de carbono (CO₂). Así mismo, la aireación evita que el material se compacte o se encharque. Las necesidades de oxígeno varían durante el proceso, alcanzando la mayor tasa de consumo durante la fase termofílica. “Una aireación insuficiente provoca una sustitución de los microorganismos aerobios por anaerobios, con el consiguiente retardo en la descomposición, la aparición de sulfuro de hidrógeno y la producción de malos olores” La aireación del compostaje es la técnica de control más usado en el desarrollo de la calidad del mismo. Se usa para modificar las condiciones de la masa evitando condiciones que son desfavorables para el crecimiento, desarrollo de los microorganismos. El oxígeno es esencial para el metabolismo y la respiración de los microorganismos aerobios y para oxidar las moléculas presentes en los residuos orgánicos.

La función primordial de la aireación en el compostaje es el aporte de oxígeno, también permite un control de la temperatura de la masa, la eliminación de agua y la evacuación de CO₂ y otros gases generados durante la biodegradación de la materia orgánica. Una insuficiente aireación de la masa provoca un retardo del proceso de compostaje y, bajo condiciones anaerobias, se generan metabolitos responsables de malos olores, junto con otros que pueden resultar tóxicos para el microbiota y para las plantas. La demanda de oxígeno cambia a lo largo del compostaje, de forma que, al inicio del proceso y durante la fase termófila, existe mayor demanda debido al rápido crecimiento de las distintas poblaciones microbianas y en la mayoría de los casos resulta

ser el factor limitante del mismo. Una concentración de oxígeno comprendida entre el 15 y el 20% se considera óptimo.

12.1.3 Humedad

La humedad es un factor importante en el proceso del compostaje, ya que no debe superar dentro de los límites establecidos que van desde 40 a 60% incluyendo desde la etapa inicial y final del proceso. Cuando la humedad supera los rangos máximos (>60%) el agua provoca una podredumbre en la materia orgánica que interacciona en el proceso de compostaje, y a su vez se torna anaeróbico provocando olores incómodos y lentitud en la velocidad del proceso; pero, al contrario, cuando los rangos son menores a los ideales, el proceso se vuelve lento, pero no por la putrefacción de los residuos sino por la actividad microbiana que disminuye, sin dejar de mencionar que los niveles óptimos de humedad dependen de la cantidad de residuos a compostar. Un exceso de agua, mayor al 60%, interfiere con la disponibilidad del oxígeno y la aireación; se lixivian los nutrientes y se incrementa el olor debido a la descomposición anaerobio. Se puede hacer el control de la humedad en campo con la llamada “técnica del puño”, esta consiste en introducir una mano en la pila, sacar un puñado de material y abrir la mano, el material debe quedar apelmazado y sin escurrir agua ni desmenuzarse. Durante el proceso de estabilización es importante evitar la humedad excesiva, porque el oxígeno es desplazado de los espacios y el proceso pasa a ser anaerobio.

Los microorganismos requieren del agua para cubrir sus necesidades fisiológicas ya que es el medio por el cual asimilan sustancias solubles

las cuales son fuente de energía y por la cual generan productos de deshecho de las reacciones que se desarrollan, un adecuado porcentaje se encuentra en el rango de 50-70%, puesto que la actividad microbiana disminuye si la humedad presenta valores inferiores al 30%. Sin embargo, valores mayores al 70%, ocasionan que el agua reemplace al aire dentro de los espacios libres en la masa de compost, produciéndose anaerobiosis lo que provoca los malos olores y retrasa la velocidad del proceso. Sin embargo, una pila de composta con valores muy bajos de humedad, forma polvo que resulta nocivo para la actividad microbiana y transmite malos olores debido a patógenos como el *Aspergillus fumigatus*. Es por ello, que es importante conservar el nivel de humedad entre 40% y 60% ya que aminora dichos inconvenientes. Durante el compostaje es necesario alcanzar el equilibrio entre los orificios de las partículas de diámetro variable, ya que pueden bloquearse por aire o agua. La humedad óptima varía de acuerdo al tipo de residuo; por ejemplo, en el caso de los cereales (75% - 85%), astillas de madera (75% -90%) y residuos sólidos urbanos (50% - 55%).

Es decir, la humedad es requerida por los microorganismos para el desarrollo de la actividad metabólicas, además, es utilizado como medio de transporte de nutrientes. Sin embargo, una deficiente humedad afectaría a la actividad fisiológica de los microorganismos, así mismo la humedad excesiva de la cavidad intersticial, provoca el enfriamiento y dificultando la difusión del oxígeno. Para ello la humedad óptima en la pila de compostaje es de 50 – 70 %. El contenido en humedad de los residuos orgánicos es muy variable tal es el caso de las excretas y estiércoles, donde el contenido en humedad está íntimamente

relacionado con la dieta. La humedad óptima depende del tipo de residuo y el tamaño. Sin embargo, El exceso de humedad puede ser reducido con una buena aireación y buen control de la humedad y la aireación, los camellones de compostaje deben tener un equilibrio entre los espacios porosos de los sustratos que a su vez pueden llenarse de aire o de agua.

Sin un mínimo de humedad, la mayor parte de los microorganismos no pueden vivir, una excesiva humedad tapona los poros y limita el intercambio de gases y el aporte de oxígeno, dando lugar esto último al predominio de las condiciones anaerobias en la masa de compostaje, lo que se traduce en fenómenos de putrefacción, malos olores, etc. Además, un exceso de humedad combinado con una escasa retención hídrica del sustrato originará con toda probabilidad fenómenos de lixiviación, repercutiendo en pérdidas de agua y elementos nutritivos del sustrato, así como la necesidad de un control de los mismos para evitar la contaminación de las zonas adyacentes al área de tratamiento. El exceso de agua produce encharcamientos e impide que haya aire en la pila. El material se pudre, provocando malos olores. Los niveles óptimos de humedad están entre un 40 y un 60%. Para comprobar si hay suficiente humedad, se puede coger un puñado de compost y apretarlo con la mano. Si al apretarlo se humedece la mano, pero no escurre agua entre los dedos, la humedad es óptima. Para un buen compostaje los microorganismos presentes necesitan humedad (agua) con el fin de disolver y transportar los nutrientes. Esto puede atribuirse a los diferentes sustratos de cada tratamiento y a la cantidad de agua utilizada en los riegos.

La humedad debe de ser alta durante la etapa de descomposición, en la que prevalecen las bacterias. Si esta humedad desciende por debajo del 35-40%, la actividad microbiana desciende, pudiendo llegar hasta la inhibición. En la etapa de estabilización, el contenido en humedad requerido es menor, puesto que lo que prevalecen son actinomicetos y hongos. Por encima del 60%, el agua desplaza al aire de los espacios libres existentes y las condiciones se hacen anaerobias, produciéndose la emisión de malos olores y disminuyendo la velocidad del proceso. Se cree que una humedad óptima oscila entre el 50-60%, dependiendo del material empleado. Una humedad menor del 40% reduce la actividad de los microorganismos, principalmente de las bacterias, y si es menor del 30% se convierte en un factor limitante para la descomposición; por debajo del 12% cesa, prácticamente, toda la actividad biológica, siendo el proceso extremadamente lento.

12.1.4 pH

La evolución del pH en extractos acuosos de compost es muy importante al darnos información sobre los procesos químicos que se desarrollan durante el compostaje. El pH de la mezcla de compostaje puede experimentar una bajada al inicio del proceso debido a la formación de ácidos orgánicos durante el proceso de degradación de las fracciones de materia orgánica más lábiles. Con posterioridad, el pH aumentará debido a la degradación de compuestos de naturaleza ácida y a la mineralización de compuestos nitrogenados hasta la forma de amoníaco, actuando también el proceso de amonificación como un importante sumidero de protones y, por tanto, favoreciendo al aumento del pH. Debido a esta conducta y a su variación durante el proceso de

compostaje, el pH se ha tomado como parámetro indicativo de la buena evolución del proceso. Cabe señalar que altas temperaturas y los valores de pH básicos favorecen la pérdida de amoníaco en forma gaseosa, repercutiendo estas pérdidas en el valor fertilizante final del compost. Además, este amoníaco libre puede resultar tóxico para los microorganismos y para las plantas siendo, además, muy reactivo con un gran número de compuestos orgánicos.

Se consideran valores óptimos de pH los comprendidos entre 5,5 y 8,0. El pH condiciona el desarrollo microbiano, actuando como un factor selectivo para las poblaciones microbianas, y además controla las pérdidas de nitrógeno durante el proceso (pH mayor que 7,5 favorecen la pérdida de este nutriente por volatilización de amoníaco). A medida que el pH aumentaba con el tiempo durante el compostaje, se ejerció una presión negativa sobre las levaduras. Las sustancias húmicas concentradas se utilizan en forma sólida o líquida. Generalmente la forma sólida se maneja directamente al suelo, siendo la principal fuente las compostas o los estiércoles maduros.

En los primeros momentos del proceso de compostaje, el pH inicial puede sufrir un descenso, debido a que los microorganismos actúan sobre la materia orgánica más lábil, produciéndose una liberación de ácidos orgánicos. Posteriormente tiene lugar una subida del pH como consecuencia de un aumento en la concentración del ión amonio. Conviene tener presente que un gran aumento del pH, acompañado de fuertes subidas de temperatura, puede suponer la pérdida de nitrógeno en forma de amoníaco. Conforme se estabiliza el material, los valores de pH suelen situarse entre 7 y 8. En general, se pueden compostar

materiales dentro de un amplio rango de valores de pH (desde 3 hasta 11) sin embargo, los comprendidos entre 5 y 8 son los que se consideran óptimos. Mientras que las bacterias prefieren un pH cercano al neutro, los hongos se desarrollan mejor en medio ácido. En los primeros momentos del proceso de compostaje, el pH inicial puede sufrir un descenso, debido a que los microorganismos actúan sobre la materia orgánica más lábil, produciéndose una liberación de ácidos orgánicos. Posteriormente tiene lugar una subida del pH como consecuencia de un aumento en la concentración del ión amonio. Conviene tener presente que un gran aumento del pH, acompañado de fuertes subidas de temperatura, puede suponer la pérdida de nitrógeno en forma de amoníaco. Conforme se estabiliza el material, los valores de pH suelen situarse entre 7 y 8.

El pH es un valor que nos indica si un producto o material es ácido (pH inferior a 7), alcalino (pH superior a 7) o neutro (pH igual a 7). Conviene que el compost sea lo más neutro posible porque los microorganismos responsables de la descomposición de los restos orgánicos no toleran valores muy alejados del 7. Si esto se produjese, el proceso de compostaje se detendría o se ralentizaría notablemente. En general, los restos de munda de los cítricos (naranjas, limones, mandarinas, etc.) y las hojas secas de los pinos, entre otros materiales, suelen aportar valores bajos de pH al ser ricos en ácidos orgánicos. En cambio, el césped, los restos verdes de cocina o de jardín i las cenizas de maderas o leñas naturales pueden incrementar el pH, puesto que liberan compuestos alcalinos. Los restos vegetales frescos (los de cocina, del jardín o del huerto, el césped, etc.) son ricos en nitrógeno. Cuando se descomponen,

este elemento puede escaparse del compost (y por tanto perderse) en forma de amoníaco (NH_3), que es un gas de marcado carácter alcalino y cuyo olor característico le delata cuando se forma en el compostador.

12.2 Parámetros relativos a la naturaleza del sustrato

12.2.1 Tamaño de partícula

En el compostaje el tamaño de partícula y la homogeneización de la mezcla inicial son dos factores fundamentales para que el proceso se inicie rápidamente y se produzca un incremento de la temperatura. **Así,** cuanto más pequeño es el tamaño del material, más área habrá disponible para los microorganismos que degradan la materia orgánica. Por otro lado, si usamos varios residuos para laborar una mezcla para compostar, es conveniente mezclarlos correctamente y en las proporciones adecuadas, sobre todo si son grandes cantidades. En el compostaje el tamaño de partícula y la homogeneización de la mezcla inicial son dos factores fundamentales para que el proceso se inicie rápidamente y se produzca un incremento de la temperatura. Así, cuanto más pequeño es el tamaño del material, más área habrá disponible para los microorganismos que degradan la materia orgánica. Un sustrato es cualquier material sólido y poroso diferente del suelo *in situ* que se encuentra dentro de un recipiente, sirve de anclaje a las raíces de la planta y permite una libre circulación del agua y de los gases. Para que estas funciones se cumplan se deben utilizar para su formulación materiales adecuados. Estos materiales serán seleccionados teniendo en cuenta una serie de propiedades físicas y químicas que están condicionadas por el sistema de cultivo, es decir, si se cultiva fuera o

bajo invernáculo; la altura, volumen y forma del recipiente; tipo de sistema de riego y características del agua de riego.

El sustrato es el material usado para cultivar las plantas sea del tipo que sea. Un ejemplo sería turba, compost, perlita, arena, vermiculita, fibra de coco o la mezcla de todos ellos. En gran medida, el uso de materiales compostados permite reemplazar la utilización de recursos no renovables (ej. turba), y transformar en sustrato aprovechable desechos orgánicos que eventualmente contaminan el medio ambiente. De este modo se favorece el crecimiento de los plantines a través de un aporte de micro y macronutrientes que de otra forma deberían ser incorporados mediante fertilización. La incorporación de nutrientes en forma mineral en las mezclas de sustratos puede mejorar su disponibilidad inmediata, contrarrestando el efecto de inmovilización transitoria ocasionada por los componentes orgánicos del sustrato (C: N, C:P). Más aun, puede disminuir o evitar la necesidad de agregar compost o suelo.

Así también, el sustrato debe poseer una estructura física apropiada y un óptimo tamaño de partícula, de manera que se conjuguen diferentes aspectos tales como máxima superficie expuesta al ataque microbiano y una porosidad que favorezca un adecuado intercambio gaseoso.

12.3 Relaciones C/N y C/P

La relación Carbono-Nitrógeno del compost es un indicador muy útil para evaluar el desarrollo y calidad de nuestro compostaje. El valor de esta relación C/N varía según los autores, y se encuentra estimada entre 25:1 y 40:1. Esto quiere decir que existen 25 o 40 partes de carbono por

1 de nitrógeno. Si el compostaje almacena demasiada cantidad de elementos con contenido en carbono, se producirá una evacuación en forma de dióxido de carbono a la atmósfera. La fermentación en este caso será lenta y de temperatura baja y tardaremos más tiempo en obtener el compost final. En el caso de exceso de contenido en nitrógeno, se producirá una evacuación de amoníaco a la atmósfera, emisión de olores desfavorables y temperaturas altas.

Existen unos parámetros definidos para identificar y controlar la relación carbono-nitrógeno del compost. Uno de ellos lo hemos comentado antes.

- La temperatura del compost es muy alta. La relación C/N es baja (alto contenido en nitrógeno).
- La pila de compost desprende un olor desagradable a amoníaco. La relación C/N es baja.
- Gran presencia de fauna. Gusanos, moscas y otros insectos. La relación C/N es baja.
- El proceso de compostaje es lento, casi detenido. La relación C/N es alta (alto contenido en carbono).

Uno de los parámetros más importantes para que una pila de compostaje funcione correctamente es la relación inicial entre el carbono y el nitrógeno. De forma experimental se conoce que para que haya crecimiento microbiano, se necesita que esta relación esté entre 20 y 30, es decir, 20-30 átomos de carbono por cada átomo de nitrógeno. Del

carbono necesario para que los microorganismos de una pila de compostaje crezcan, una parte se dedica a la obtención de energía metabólica dando como resultado la emisión de CO₂. La parte restante la incorporan en su propia estructura celular junto al nitrógeno (10/1).

Estas relaciones de Carbono (C) y Nitrógeno (N), son fundamentales para obtener una muy buena calidad de compostaje, los microorganismos utilizan generalmente 30 partes de C por cada una de N, el intervalo de C/N teóricamente óptimo para el compostaje de un producto es de 25-35, la relación C/N ideal para un compost totalmente maduro es cercana a 10. El fósforo es el nutriente más importante, después del C y el N, por lo que también debe estar presente en unas cantidades mínimas para que el proceso se lleve a cabo correctamente. La relación C/P para el compostaje es óptima entre 75 y 150, mientras que la relación N/P debe estar entre 5 y 20.

El compostaje y el vermicompostaje son procesos utilizados para la estabilización biológica de los desechos orgánicos. En el compostaje, los microorganismos degradan la materia orgánica (MO) y la transforman en un producto útil para la propagación de plantas y el cultivo de hortalizas; en el vermicompostaje, lombrices de tierra como *Eisenia fétida*.

Y la acción microbiana reducen el tiempo de degradación de la MO. La lombriz actúa como un molino mecánico tritura la MO, modifica sus características físicas y químicas por la reducción gradual de la relación C: N e incrementa el área superficial expuesta.

Durante el compostaje es necesario mantener un equilibrio entre los nutrientes de modo que el sustrato disponga de aquellos elementos esenciales para los microorganismos. En especial la relación entre el carbono orgánico y el nitrógeno total (relación COT/NT) del sustrato tiene un notable interés para controlar la dinámica del compostaje, de forma que valores bajos de la relación incrementan las pérdidas de nitrógeno por volatilización del amoníaco, especialmente a valores altos de pH y temperatura. Por el contrario, valores elevados de la relación COT/NT (mayores de 35), propician numerosos ciclos vitales de microorganismos para degradar el exceso de carbono, con apreciable retardo del proceso de compostaje. Se acepta generalmente que valores de la relación comprendidos entre 25 y 35 en el material de partida pueden considerarse adecuados para el compostaje. Aunque la relación óptima dependerá de la composición del material y fundamentalmente de la biodisponibilidad del carbono presente en el mismo.

BIBLIOGRAFÍA

AbdulMajeed, A. N.-U.-H. (26 de July de 2018). Influence of P-enriched compost application on economics and P use efficiency of a maize–wheat rotation system. *The Crop Journal*, pages 28-123.

Acevedo, P., Taboada, O., & Cruz, J. (2020). Caracterización de fertilizantes orgánicos y estiércoles para uso como componentes de sustrato. *Acra agronomica*, 234-240.

Acosta, P. J. (2019). Índice de humificación y prueba de fitotoxicidad en residuos orgánicos de uso agrícola potencial. *Revista de la Facultad de Agronomía*, 21(4), 185-194. Obtenido de http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0378-78182004000400008

Adele Muscolo, T. P. (2018). Are raw materials or composting conditions and time that most influence the. *Journal of Cleaner Production*, 56.

Adele Muscolo. (2018). Are raw materials or composting conditions. *Journal of Cleaner Production*, 34.

Agapiou, A., Vasileiou, A., Stylianou, M., Mikedi, K., & Zorpas, A. (2019). Waste aroma profile in the framework of food waste management through household composting. *Journal Pre-proof*.

Albarracín, Parra, Ortega & Montañez. (2 de 1 de 2018). Obtenido de <https://digital.csic.es/bitstream/10261/20837/3/Factores%20que%20afectan%20al%20proceso%20de%20compostaje.pdf>

Albuquerque, J. G. (2012). Effects of bulking agent on the composting of “alperujo”, the solid by-product of the two-phase centrifugation method for olive oil extraction. *Process Biochem*, 127-132.

Alcocer, P. (2019). Mejoramiento de la gestión integral de los residuos sólidos urbanos en el cantón de Quevedo, Ecuador.

Alejandra Cerda, A. A. (2017). Composting of food wastes. *Bioresource Technology*, 14-16.

Alejandra Cerda, A. A. (2017). Composting of food wastes: Status and challenges. *Bioresource Technology*, 1-2.

Alexis M. Troschinetz, J. R. (2010). Sustainable recycling of municipal solid waste in developing countries. *Waste Management*, 29(2), 915-923.

AL-Saedi, Z. Z. (2019). Aerobic Municipal Solid Waste Compost Quality According to Different Layers of Composting Bioreactor. *Association of Arab Universities Journal of Engineering Sciences*, 26(3), 7-16. Obtenido de <https://www.jaaru.org/index.php/auisseng/article/view/322>

Álvarez-Sánchez, A. R. (2021). Efecto de sustancias azucaradas en la descomposición de sustratos orgánicos para la elaboración de compost. *TERRA Latinoamérica*. Obtenido de <https://terralatinoamericana.org.mx/index.php/terra/article/view/916>

Álvaro G, J. (2019). Ventajas y desventajas del compostaje. <https://www.fertibox.net/single-post/ventajas-compost>.

Amari Sarmiento, J., & Gómez Samaniego, C. (2020). Utilización de residuos agropecuarios para la producción de compost en una unidad productiva de hortalizas, San Ignacio, Cajamarca. Chiclayo - Perú.

Ambientum. (2017). Obtenido de https://www.ambientum.com/enciclopedia_medioambiental/suelos/tipos_de_fermentacion.asp#:~:text=La%20transformaci%C3%B3n%20anaerobia%2C%20o%20fermentaci%C3%B3n,cantidad%20de%20elementos%3A%20CO2%2C%20NH3

Andrade Loor, D. M. (2020). Inoculación de un consorcio microbiano autóctono encapsulado con capacidad celulolítica para la producción de compost de calidad en Manabí-Ecuador. Manabí: Calceta: ESPAM MFL.

Ansorena, J., Batalla, E., & Merino, D. (2019). Evaluación de la calidad y usos del compost como componente de sustratos, enmiendas y abonos orgánicos. España.

Antonio, J. (2019). Relación Carbono-Nitrógeno en el compost. Obtenido de <https://www.agromaticas.es/relacion-cn-en-el-compost/>

Aranam, I., Orruño, M., & Barcina, I. (2016). Departamento Inmunología, Microbiología y Parasitología Universidad del País Vasco/Euskal Herriko Unibertsitatea . Obtenido de https://ocw.ehu.es/file.php/48/Tema_4._calculo_de_los_parametros_que_definen_el_crecimiento_bacteriano.pdf

Argueta, C. R. (2020). Prácticas para la mejora en el proceso de compostaje de abonos orgánicos elaborados a base de estiércol y su efecto en el suelo: Revisión de literatura. Honduras. Obtenido de <https://bdigital.zamorano.edu/bitstream/11036/6802/1/CPA-2020-T083.pdf>

Armado, A. (2020). Caracterización Espectroscópica Por Resonancia Magnética Nuclear De Sustancias Húmicas De Composts: Una Revisión. Obtenido de <http://servicio.bc.uc.edu.ve/facyt/v1n2/1-2-1.pdf>

Awasthi, M., Wang, Q., Awasthi, S., Zhao, J., Ren, X., Wang, M., . . . Zhang, Z. (2018). Feasibility of medical stone amendment for sewage sludge co-composting and production of nutrient-rich compost. *Journal of Environmental Management*, 216, 49-61.

Ayala, A. M. (2021). Optimización De Mecanismos De Aireación Para La Producción De Compost A Partir De Residuos Orgánicos Municipales. Obtenido de <https://repositorio.cientifica.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12805/1703/TB-Vargas%20A.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Bailón-Rojas, M. R. (2021). Caracterización y calidad de los compost producidos y comercializados en Rupa Rupa-Huánuco. Scielo.

Bailón-Rojas, M. R.-R. (2021). Caracterización y calidad de los compost producidos y comercializados en Rupa Rupa-Huánuco. *Enfoque UTE*, 12(1), 1-11. Obtenido de http://scielo.senescyt.gob.ec/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1390-65422021000100001

Ballesteros, M., Hernández, M., Gómez, I., Sala, C., & León, C. (2019). Crecimiento microbiano en pilas de compostaje de residuos orgánicos y biosólidos después de la aireación. *Centro Azúcar*, 45, 1-10.

Baquero, Y. R. (2021). *La Creación de una Planta de Compostaje para el aprovechamiento de los residuos sólidos orgánicos generados en el sector urbano del Municipio De Chipaque Cundinamarca Ingeniería Ambiental*. Bogotá : Acribia .

Barbado, L., Karlanian, M., Rizzo, P., & Riera, N. (2019). Caracterización de diferentes compost para su uso como componentes de sustrato. *Chilean J. Agric. Anim. Sci., ex Agro-Ciencia*, 126-136.

Bari, Q. (2011). A mathematical model for forced aeration composting: effect of air reuse. *Khulna University of Engineering and Technology, Khulna, Bangladesh*, 57-68.

Bautista, L. V. (2020). Evaluación de los parámetros operacionales para la obtención de celulasas mediante fermentación en estado sólido en biorreactores para la valorización de residuos orgánicos. *Germina. . Revista Anual de Investigación Formativa*, 3(3), 43-59.

Beckerman, R., Wriugh, R., & Brockhurts, M. (2020). Eco-evolutionary Dynamics Set the Tempo and Trajectory of Metabolic Evolution in Multispecies Communities. *Current Biology*, 4984–4988.

Beffa, T. (2019). Taxonomic and Taxonomic and metabolic microbial diversity during composting. In: *The science of composting* (Ed.

Bertoldi, M., Sequi, P., Lemmes, B. and Papi, T.), Blackie Academic & Reino Unido: Acribia .

Beffa. (2013). Factores que afectan al proceso de Compostaje. *Medical Mycology*, 137-145.

Bermúdez, A. (2018). Inova ciencia Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales Calidad del aire. Disponible en <http://www.ideam.gov.co/web/contaminacion-y-calidad-ambiental/calidad-del-aire>. Consultado octubre. Colombia: Acribia.

Berna, M. P. (2016). Current Approaches and Future. *Environmental, and Human Health Benefits*.

Bernal, A., Hernández, A., Mesa, M., Rodríguez, O., & González, P. (2019). Características de los suelos y sus factores limitantes de la región de murgas, Provincia la Habana. *cultivos tropicales*, 36(2), 30-40.

Bertoldi, M. d. (2017). *The Biology of Composting*. *Waste Management & Research*, 12.

Bidlingmaier. (2009). Odour emissions from composting plants. 12.

Bohórquez, S. (2019). Manual para hacer composta Aeróbica. <http://www.munistgo.info/medioambiente/wp-content/uploads/2019/09/COMPOSTAJE-Y-LOMBRICULTURA-2019.pdf>.

Bonilla, C., Diaz, J., Gil , C., Giron , K., & León , M. (2020). Dinámica de la descomposición de residuos orgánicos. *Suelos ecuatoriales*, 31-39.

Botello, R. D. (2021). Desarrollo de la Primera Fase. Efecto de Aplicación de Materia Orgánica como Agente de Recuperación de Algunas Propiedades Químicas de los Suelos . Cúcuta: Acribia.

Bourguignon, C. (2021). El compostaje de materias orgánicas. In Congreso de Agricultura Biológica. Ponencias y Comunicaciones. Centro de Naturaleza. Pag. 63-69. Madrid: Acribia.

Bravo , C. (2017). Evolución del contenido de metales pesados en un suelo fertilizado con lodos de depuradora y residuos sólidos urbanos. ResearchGate, 1-8. Obtenido de [282605167_EVOLUCION_DEL_CONTENIDO_DE_METALES_PESADOS_EN_UN_SUELO_FERTILIZADO_CON_LODOS_DE_DEPURADORA_Y_RESIDUOS_SOLIDOS_URBANOS](https://www.researchgate.net/publication/282605167_EVOLUCION_DEL_CONTENIDO_DE_METALES_PESADOS_EN_UN_SUELO_FERTILIZADO_CON_LODOS_DE_DEPURADORA_Y_RESIDUOS_SOLIDOS_URBANOS)

Bremner, J. M. (2016). Evaluation of compost. Waste Management & Research, 11.

Bueno Márquez, P., Díaz Blanco, M., & Cabrera Capitán, F. (2019). Factores que afectan al proceso de Compostaje. Sevilla. .

C Chocano, M. H. (2020). La actividad microbiana como indicador de calidad del suelo en cultivos de ciruelo ecológico. Obtenido de https://www.agroecologia.net/recursos/publicaciones/publicaciones-online/2009/eventos-seae/cds/congresos/actas-bullas/seae_bullas/verd/posters/9%20P.%20FER/1.pdf

Calderón Vargas, J. (10 de 11 de 2017). repository.uamerica.edu.co. Obtenido de

<https://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/6598/1/6121940-2017-2-IQ.pdf>

Calderón Vargas, J. (2017). Ajuste de un modelo cinético para el crecimiento de *Lactobacillus*. Proyecto integral de grado para optar por el título de ingeniero químico. FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA, Bogotá. Obtenido de <https://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/6598/1/6121940-2017-2-IQ.pdf>

Canellas, L. (30 de November de 2015). Humic and fulvic acids as biostimulants in horticulture. *Scientia Horticulturae*, Volume 196, 15-27.

Carnes y Lossin, & al, N. e. (1982).

Carnes y Lossin, & al, N. e. (2012).

Casas Flores, R. (2020). Programa Piloto de Gestion Recopilacio y Tratamiento de los Residuos Vegetales Producidos por los Centros UPM. Acondicionamiento Paisajístico de las Instalaciones de Compostaje de la ETSIAAB. Madrid.

Casey, G. P., & Ingledew, W. (2018). A kinetic study of the alcoholic fermentation of grape juice. *Biotechnología y bioingeniería*, 7.

Castaldi P. (1997).

Castaldi P. (2010).

CCA. (2017). Caracterización y gestión de los residuos orgánicos en América del Norte .

Ceballos, M. Á. (2020). La calidad del aire en el Estado español durante 2019 y Control de la contaminación atmosférica en la Zona Metropolitana del Valle de México. Medellín: Ecologistas en Acción.

Cerda, A. A. (2017). Composting of food. Bioresource Technology.

Cerda, A. A. (2019). Composting of food. Bioresource Technology.

Céspedes, F. C. (2019). Fitotoxicidad de compost producido con cultivos de microorganismos de montaña y lodos de biodigestor. Artículo UNED.

Cevallos, E. (2019). Análisis de los problemas ambientales en el cantón la concordia, Provincia Santo Domingo de los Tsáchilas, Ecuador. Investigación y Saberes, 4(1), 1-16, 1-15. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/309458055_ANALISIS_DE_LOS_PROBLEMAS_AMBIENTALES_EN_EL_CANTON_LA_CONCORDIA_PROVINCIA_SANTO_DOMINGO_DE_LOS_TSACHILAS_ECUADOR_ANALYSIS_OF_ENVIRONMENTAL_PROBLEMS_EN

Chela, J. (28 de Mayo de 2017). Dspace. Obtenido de Repositorio general:

<http://dspace.ueb.edu.ec/bitstream/123456789/1508/1/ENTREGA%20-%20DESECHOS.pdf>

Chen, B. (2021). Aditivos para reducir la pérdida de nitrógeno durante el compostaje: una revisión. *ELSAIVER Revista de la producción más limpia*, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127308>.

Christa, S. (2016). Nitrogenase activity in composting horse bedding and leaves. Christa R. Schwintzer, John D. Tjepkema & Bill Seekins. *Plant and Soil* 242: 277–282. Acribia.

Chukwudi O. Onwosi*, V. C. (2017). Composting technology in waste stabilization: On the methods. *Journal of Environmental Management*, 140-157.

CIFUENTES, A. J. (2019). “Tratamiento de residuos orgánicos generados en el bioterio de la Facultad de Ciencias de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo mediante compostaje. Riobamba –Ecuador. Obtenido de <http://dspace.esPOCH.edu.ec/bitstream/123456789/13202/1/236T0461.PDF>

Coca Sanz, M. (2021). Diseño de una instalación de compostaje de residuos orgánicos . Vallolet: Acribia.

Colín-Navarro, V. (2020). Propiedades químicas y microbiológicas del estiércol de caprino durante el compostaje y vermicompostaje. Obtenido de <https://www.agrociencia-colpos.mx/index.php/agrociencia/article/view/1758/1758>

Colon, J. C. (2012). Determination of the energy and environmental burdens associated with the biological treatment of source-separated Municipal Solid Wastes. *Energy & Environmental Science*, 5731-5741.

Compost., C. h. (2019). Cómo hacer compost [Manual práctico del agricultor] (en línea, sitio web). . <https://estoesagricultura.com/como-hacer-compost/>.

Conjre, L. (2008). Factores que intervienen en el compostaje. *Scielo*, 19.

Córdoba, V. (2018). Análisis del potencial energético de lodos de planta depuradora. *ResearchGate*, 1-5. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/332058645_Analisis_del_potencial_energetico_de_lodos_de_planta_depuradora

Corrales , I., Vila, L., & Chávez, P. (2019). La aplicación de abono organo-mineral: una alternativa para la producción de maíz (zea mays l.), en suelos pardos con carbonatos. *agrisost*, 19(2).

Cotrina-Cabello, V. R. (2020). Efecto de abonos orgánicos en suelo agrícola de Purupampa. Perú: Centro de Investigaciones Agropecuarias Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas.

Cruz, W., Rodríguez, L., Salas , M., Hernández, V., & Campos, R. (2020). Efecto de la materia orgánica y la capacidad de intercambio catiónico en la acidez de suelos cultivados con maíz en dos regiones de Chiapas, México. *Scielo*, 475-480.

D.J. Batstone, J. Keller, I. Angelidaki, S.V. Kalyuzhnyi, S.G. Pavlostathis, A. Rozzi, W.T.M. Sanders, H. Siegrist, V.A. Vavilin.

(2002). *Anaerobic Digestion Model No 1 (ADM1)*. London: IWA Publishing.

Delgado Arroyo, M. d. (2019). Evaluación del proceso de compostaje de residuos avícolas empleando diferentes mezclas de sustratos. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 965-977. .

Delgado Arroyo, M. d. (2019). Evaluación del proceso de compostaje de residuos avícolas empleando diferentes mezclas de sustratos. *Revista internacional de contaminación ambiental*. DOI: <https://doi.org/10.20937/rica.2019.35.04.15>

Delgado, M., Mendoza, K., Gonzales, M., Tadeo, J., & Sánchez, J. (2019). Evaluación del proceso de compostaje de residuos avícolas empleando diferentes mezclas del sustrato. *Int. Contam. Ambie*, 965-977.

Dinca, M. N., Ferdes, M., Paraschiv, G., Ungureanu, N., Zabava, B., Ionescu, M., & Moiceanu, G. (2019). Recovery of organic waste through composting process. ResearchGate.

E. D' Adam, G. L. (1 de November de 2018). Influence of long-term nitrogen fertilization on crop and soil micronutrients in a no-till maize cropping system. *Field Crops Research*, Volume 228, Pages 170-182.

Ebeling, T. (2018). *Sistemas de Recirculación para la Acuicultura*. Editado por Fundación Chile. pp. 207-258; 278- 279. Santiago Chile.: Acribia.

Edafología, m. e. (2020). Propiedades físicas y químicas del suelo. Universidad Intercultural Del Estado De México.

Eljaiek, M. (2016). Generación y composición de los residuos sólidos urbanos en América latina y el caribe. ResearchGate, 1_13. doi:10.20937/RICA.2016.32.05.02

Emir Cabrera Rodríguez, V. L. (2016). Caracterización de residuos agroindustriales con vistas a su aprovechamiento . Centro Azúcar , 27-35.

Escalante, L. H. (2019). "Evaluación técnica –económica del sistema de volteo automatizado para reactor". Arequipa. Obtenido de https://repositorio.utp.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12867/2409/Lizbeth%20Huanca_Trabajo%20de%20Investigacion_Bachiller_2019.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Escobar , M., Navas, A., Medina, C., Corrales, J., Tenjo, A., & Borrás, L. (2020). Efecto de prácticas agroecológicas sobre características del suelo en un sistema de lechería especializada del trópico alto colombiano. ResearchGate.

Escobar Vidriales, G., Tamayo Rentería, R., Alatríste Mondragón, F., Ortega, Á., & González, O. (2017). Mathematical modeling of a composting process in a small-scale tubular bioreactor. Chemical Engineering Research and Design, 28.

Espinoza, L. F., Saldaña, T. S., & Arenas, G. E. (2016). Bioetanol a partir de desechos agroindustriales. Académica Española.

Espinoza, V. C. (2019). propuesta para el manejo de aves muertas mediante la implementación de compostaje En el galpón experimental De La Facultad De Ciencias Veterinarias –UMSS. Cochabamba - Bolivia. Obtenido de <http://ddigital.umss.edu.bo:8080/jspui/bitstream/123456789/20768/1/VERONICA%20CASTRO%20ESPINOZA.pdf>

Estrada, D. C. (2019). elaboración de compost acelerado utilizando cuatro activadores en la localidad de Carabuco. La Paz-Bolivia. Obtenido de <https://repositorio.umsa.bo/bitstream/handle/123456789/23075/T-2685.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

F. H. Allen, O. (2019). Kennard, D. G. Watson, L. Brammer, A. G. Orpen. Tablas de longitudes de enlace determinadas por rayos X y difracción de neutrones. Parte 1. Longitudes de enlaces en compuestos orgánicos. J. Chem. Soc. Perkin Trans. II - S19. Acribia .

Fabio, N., Giuseppe, O., María Elena, R., & Antonio, M. (2012). Continuous lactose fermentation by *Clostridium acetobutylicum* – Assessment. Bioresource Technology, 7. doi: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.09.004>

Fabrice Abunde Neba, N. Y., & Asiedu, J. M. (2019). A novel simulation model, BK_BiogaSim for design of onsite. Journal Pre-proof, 46.

FAO. (2019). Food And Agriculture Organization of The United Nations. Obtenido de Farmer's Compost Handwork Experiences in Latin America: <http://www.fao.org/publications/card/en/c/I3388E>

Farinango-Guzmán, W., Ulcuango-Echeverría, B., Gualavisi-Cachiguango, O., Reinoso-Quishpe, D., Espinosa-Cuzco, G., & Andrade-Muñoz, L. (2020). Evaluación de la variabilidad de cuatro propiedades del suelo al incorporar dos fuentes de compost a tres dosis. *Ciencias técnicas y aplicadas*, 860-882.

Favio, A. (2012). Determinación de la Capacidad de Intercambio Cationico. UNNOVA.

Favio, A. (2019). Determinación de la Capacidad de Intercambio Cationico. UNNOVA.

Fernanda Lizbeth. (2020). Evaluación de propiedades físico-químicas en suelos agrícolas mediante abonos orgánicos en cultivo de papa (*Solanum Tuberosum L.*) en Santa Martha de Cuba, Carchi. Tulcan Ecuador: Recursos Naturales Renovables.

Finstein, M. a. (2019). Microbiology of municipal solid waste composting. *Appl. Microbiol.* 19: 113-151. Acribia.

Fitzpatrick, G. (2007). Historical development of composting.

Foronda-Zapata, K. (2020). Efecto de la incorporación de pasto estrella sobre el mejoramiento del proceso y la calidad del producto del compostaje de biorresiduos. *Revista EIA*, 1-11.

G.J, Á. (2019). Producción de compost. Obtenido de <https://www.fertibox.net/single-post/compost-proceso>

Galindo, L. A., Rivas, A. C., Melendez, J. P., & Mayorquín, N. (2020). Alternativas microbiológicas para la remediación de suelos y aguas contaminados con fertilizantes nitrogenados. Fundación Universitaria Horizonte, Colombia, 172-183.

Gallego , L. (17 de Marzo de 2019). www.retema.es. Obtenido de <https://www.retema.es/articulo/residuos-agricolas-de-invernadero-como-biocombustible-para-la-industria-almeria-fuent-8bKl>

Gallegos, C, C. (2020). Determinación de los parámetros cinéticos en la fermentación ácido-láctica mediante un enfoque termodinámico. Proyecto previo a la obtención del título de ingeniero. Escuela Politécnica Nacional, Quito. Obtenido de <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/20712/1/CD%2010225.pdf>

Ganjyal G, H. M. (2002). Review of residence time distribution (RTD) in food extruders.

García Céspedes, D. C. (2019). Métodos y parámetros para determinar la madurez en el composta nivel de fincas. Obtenido de <http://ama.redciencia.cu/articulos/26.03.pdf>

García, R. (2019). Ministerio para la Transición Ecológica del Programa Nacional de Control de la Contaminación Atmosférica de del Dirección General de Biodiversidad y Calidad Ambiental. España: Acribia.

Garcia, V. P. (20115). Composting of domestic refuse and sewage. Elsevier Science Publishers, 14.

Garcia, V. P. (2016). Evolution of carbon and some "humification" indexes. Elsevier Science Publishers, 14.

Ginkel., J. V. (1996). Physical and biochemical processes in composting material, Doctoral thesis. Wageningen University.

Girbet, Y., Martinez, R., & Ordaz, A. (2019). Evaluación de la expansividad de las arcillas en la ciudad de Pinar del Río. Dialnet, 79-88.

Giulia, B., Joeke, P., & Lijbert, B. (2019). Soil suppressiveness to *Pythium ultimum* in ten European long-term field experiments and its relation with soil parameters. *Soil Biology and Biochemistry*.

Golueke, C. (1998). Composting. A Review of rationales principles and public health. *Compost Sci*.

Golueke, C. (2016). Composting. A Review of rationales principles and public health. *Compost Sci*.

Golueke. (1975).

Golueke. (2015).

Gómez Capuz, M. D. (2019). “Aplicación de diferentes dosis de ácidos húmicos, fúlvicos en tres híbridos de maíz (*Zea mays* L.), en la zona de Pueblo Viejo. Obtenido de <http://dspace.utb.edu.ec/handle/49000/6141>

Gómez, J. A. (2019). Residuos urbanos, agrícolas y pecuarios en el contexto de las biorrefinerías. redalyc.org.

Gompertz. (1825). On the nature of the function expressive of the law of human mortality, and on a new mode on determining the value of live contingencies. Recuperado el 29 de 11 de 30

Gonzales, Y., & Villalobos, J. (2021). Manejo ambiental de residuos orgánicos: estado del arte de la generación de compostaje a partir de residuos sólidos provenientes de sistemas de trampas de grasa y aceite. Tecnología en marcha, 11-22.

González Sierra, R. P. (2019). Guía práctica para la implementación del compostaje comunitario como alternativa para la gestión local de los biorresiduos. FeA,

<https://contrataciondelestado.es/wps/wcm/connect/3808babc-0271-4fe6-829a-ff0eeddd37de/DOC20190507094243anexo+XXIV++Guia+compostaje+comunitario++FEA.pdf?MOD=AJPERES>.

Gordillo, F., Peralta, E., Chávez, E., Contreras, V., Campuzano, A., & Ruiz, O. (2019). Producción y evaluación del proceso de compostaje a partir de desechos agroindustriales de *Saccharum officinarum* (caña de azúcar). RIA. Revista de Investigaciones Agropecuarias, 141.

Gutiérrez, P. (2013). Estudio del cultivo y concentración de una cepa *Lactobacillus plantarum* autóctona empleando un reactor y membranas semipermeables. Secado y estabilización de biomasa. Facultad de Ingeniería - Doctorado en Ciencias de la Ingeniería con mención en

Ingeniería Química. Universidad de Concepción, Chile. Obtenido de http://repositorio.udec.cl/bitstream/11594/1526/1/Tesis_Estudio_del_Cultivo_y_Concentracion_de_una_Cepa.Image.Marked.pdf

Gutiérrez, E. (2020). La contaminación por ozono en el Estado español durante 2020 . España: Ecologistas en Acción .

H.M. Keener, C. Marugg, R.C. Hansen, H.A.J. Hoitink. (1993). Optimizing the efficiency of the composting process. Science and Engineering of Composting Design, Environmental, Microbiological, and Utilization Aspects, Renaissance Publications, 59-94.

HASSEN, A. e. (2016). Microbial characterization during composting of municipal solid waste. Technol, 217-225.

Hauck, R. (2019). Nitrogen fertilizer effects in nitrogen cycle processes. p.551-562. Acribia.

Hauck, R. D. (2019). Nitrogen fertilizer effects in nitrogen cycle processes. p.551-562. Acribia.

Haydee Peña 1, H. M. (2020). Parameter Selection for the Evaluation of Compost Quality. agronomy. Obtenido de <file:///C:/Users/USER/AppData/Local/Temp/agronomy-10-01567.pdf>

Hedegaard, M. K. (1996). Composting of agricultural wastes in Denmark in respect of.

Heida, H. e. (2017). Occupational exposure and indoor air quality monitoring in a composting facility. Total Environ, 458-479.

Herrera, R. (2016). Evolución temporal de las emisiones nacionales inventariadas para los contaminantes atmosféricos contemplados del compostaje. Islas Canarias: Acribia.

Huaman Flores, K. L. (2020). Residuos de cocina y juguería enriquecidos con melaza y microorganismos eficaces para compost-
Chongos Bajo – Junín 2020. Obtenido de <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/60903>

Huaman, L. C. (2020). Evaluación de la calidad del compost obtenido a partir de residuos orgánicos y microorganismos eficaces (. Huancayo: Universidad Continental.

Huaman, L. C. (2020). Evaluación de la calidad del compost obtenido a partir de residuos orgánicos y microorganismos eficaces (EM) en el distrito de Huayucachi, Huancayo, 2019. Huancayo. Obtenido de https://repositorio.continental.edu.pe/bitstream/20.500.12394/8245/1/I_V_FIN_107_TE_Castillo_Huaman_2020.pdf

Huanca Z, P. K. (2019). Estudio de la modificación hidrotermal de un mineral Ignimbrítico para obtener zeolita sintética de alta capacidad de intercambio catiónico. Revista Boliviana de Química, 36(4), 173-179. Recuperado en 17 de julio de 2021. Obtenido de http://www.scielo.org.bo/scielo.php?pid=S0250-54602019000400003&script=sci_arttext

Huerta Quinchoker , C. M., & Treviño Huerta , E. L. (2021). Determinación de la calidad del compostaje producido por ventilación forzada y por pilas (cielo abierto) a partir de los residuos orgánicos del

comedor universitario de la Universidad Peruana Unión . Lima: Universidad Peruana Unión Facultad de Ingeniería y Arquitectura Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental.

Humami, C., Tuleda, J., & Huamami, A. (2020). Gestión de residuos sólidos de la ciudad de Juliaca - Puno -Perú. Scielo, 49-56.

Hurtado , L. (2015). Sistema de control para procesos de fermentación de caña de azúcar en la producción de alcohol carburante. ResearchGate. doi:10.26564/19001355.276

Hygienists, A. C. (2015). Threshold Limit Values and Biological. Cincinnati.

Ibarra., F. (2019). Compost Stability Assessment Using a Secondary Metabolite: Geosmin, Environmental Technology, 25:11, 1305-1312, DOI: 10.1080/09593332508618374. Higuchi: Acribia.

Igbokwe, V. C. (2016). Composting technology in waste stabilization. Journal of Environmental Management, 18.

Imhoff., S. (2020). Propagación lateral de la compactación por tránsito de la maquinaria agrícola: ¿afecta la calidad del suelo, el intercambio gaseoso y la productividad de los cultivos? .

Indap, S. (2019). Pauta Técnica para la Aplicación de Compost. Santiago, Chile.

Ing. Daniel Sztern, M. (2020). Manual para la elaboración de compost bases conceptuales y procedimientos. Chiclayo: Acribia.

Iroh, I. N. (2018). *Journal of Environmental Management*. Elsevier, 18.

J.M. Agnew, J. Leonard. (2003). *The physical properties of compost*. *Compost Sci. Útil*.

J. M. McGrath. J. Spargo C. J. Penn. (2014). *Soil Fertility and Plant Nutrition*. *Agriculture and Food Systems*, Pages 166-184.

J.M.McGrathJ.SpargoC.J.Penn. (2018). *Soil Fertility and Plant Nutrition*. *Agriculture and Food Systems*, Pages 166-184.

Jacinto Vázquez, M. A.-V.-A. (2020). *La incorporación de enmiendas orgánicas en forma de compost y vermicompost reduce los efectos negativos del monocultivo en suelos*. *Scientia Agropecuaria*.

Jafari, J. ((2020)). *La eficacia de eliminar el metronidazol y antibióticos de ciprofloxacina como desechos farmacéuticos durante el proceso de compostaje*. Brasil: Acribia.

Jamil, C. (23 de 06 de 2018). *El compostaje como tecnología para el tratamiento de residuos*. Obtenido de <https://www.ministeriodesalud.go.cr/index.php/investigacion-y-tecnologia-en-salud/inventarios/inventario-de-tecnologias-en-girs/valorizacion/compostaje/1352-compostaje/file>

Jara, J., Gallegos , J., & Pullopaxi, A. (2020). *Biotransformación de residuos orgánicos generados en la escuela superior politécnica de Chimborazo-Ecuador mediante compostaje*. Scielo.

Jeris, M. (2001). Factores que influyen en el proceso de compostaje. *International Journal of Intercultural Relations*, 64(2678), 21.

Jesus, D., Gutiérrez, E., Jiménez, G., Huayhua, L., & Utcani, R. (2020). Estudio de prefactinilidad para la elaboración de fertilizantes orgánicos a base de azolla. *Ingeniería Ambiental*. Universidad San Ignacio de Loyola, Lima.

Jhorar. (1990).

Jhorar. (2005).

Jiaqi, X., & Jianga, Z. (2019). A compost-derived thermophilic microbial consortium enhances the humification process and alters the microbial diversity during composting. *Journal of Environmental Management*.

Jiménez, E. I. (2017). *Resources, Conservation and Recycling*. Elsevier Science Publishers, 15.

Jimenez, N. (2020). La gestión de los residuos sólidos urbanos en tiempos del COVID-19. *Researchgate*, 1-7. DOI: 10.22201/crim.001r.2020.27

Joya, L. M. (2020). *Medioambiente Filtro biológico de la UNAL captaría los olores contaminantes de aguas residuales*. Bogotá : Acribia.

Joyce N. Odimba. (2017). Composting technology in waste stabilization: On the methods. *Journal of Environmental Management*, 18.

Juares, D. (2020). Programa piloto de gestión, recopilación de tratamiento de los residuos vegetales producidos por los centros UPM. acondicionamientos paisajísticos de las instalaciones de compostaje. Riobamba: UPM sostenibles.

Juárez, D. (2020). Programa piloto de Gestión, Recopilación y Tratamiento de los Residuos Vegetales Producidos por los centros UPM. Acondicionamiento Paisajístico de las Instalaciones de Compostaje de la ETSIAAB. Madrid.

Jun, M., Lingxue, X., Suyun, F., Weiwei, C., & Xiaoke, H. (2019). Microbial degradation kinetics and molecular mechanism of 2,6-dichloro-4-nitrophenol by a *Cupriavidus* strain. *Lourna Pre-proof*, 35.

Kiehl. (1996).

Kiely, G. (2019). Ministerio del Medio Ambiente. Planes de descontaminación atmosférica. Chile: Acribia.

Konijnenburg, I. A. (2007). El compost. *Agricultura Orgánica*, 7-17.

Laich, F. (2019). El papel de los microorganismos en el proceso de compostaje. *Environ. Microbiol.*, 906-913.

Lander, J. (2020). El proceso de tratamiento de aguas residuales y eliminación de contaminantes emergentes. *Iagua*.

Lara, A. (2019). Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL). (. Desafíos e innovaciones en la gestión ambiental: actas del

seminario internacional «Experiencia latinoamericana en manejo ambiental». .: Santiago, Chile: Acribia.

Las Yaras, d. T. (2019). Influencia del tamaño de partícula con agregado de estiércol en el tiempo de compostaje de la fracción orgánica de residuos sólidos urbanos generados en Sama Las Yaras, departamento de Tacna. TACNA-PERÚ. Obtenido de http://www.repositorio.unjbg.edu.pe/bitstream/handle/UNJBG/3817/1681_2019_carhuapoma_rosales_ra_faci_biologia_microbiologia.pdf?sequence=1&isAllowed=y

León, A. (2018). Manual de compost. Magallanes: ISBN: 978-956-7189-75-5.

León, D. (2012). Temperatura. Jhuanuares, 12.

Levi-Minzi, R. (2016). EVALUATION OF COMPOST. IVaste Management & Research, 9.

leyva, S., Rodriguez, Y., Rodriguez, T., & Cadena, J. (2019). Manejo de raquis generado en las extractoras de palma aceitera para la elaboración del compost. Ciencia económica .

Lia, Y., Jina, Y., Lia, J., Lic, H., Yud, Z., & Yongfeng, N. (2017). Effects of thermal pretreatment on degradation kinetics of organics during kitchen waste anaerobic digestion. Energy, 10.

Lilia C. Carvalhais, F. M.-H.-C. (2018). Plant growth in Arabidopsis is assisted by compost soil-derived microbial communities. Frontiers in Plant Science, 1-15.

Lizbeth, F. (2020). Evaluación de propiedades físico-químicas en suelos agrícolas mediante abonos orgánicos en cultivo de papa (*Solanum Tuberosum* L.) en Santa Martha de Cuba, Carchi. Tulcan Ecuador: Recursos Naturales Renovables.

Lointd, M. (2011). Temperatura del compostaje. 15.

Loncin Merson. (1979). Cinética de reacción. Ingeniería y Tecnología de Procesos Alimentarios, 9.

López, E. G., & Moreno, S. C. (2019). Evaluating the influence of raw materials on the behavior of nitrogen fractions in composting processes on an industrial scale. Journal Pre-proofs.

Lossin y Carnes, R. (1970). An investigation of the pH characteristics of compost. Compost Sci.

Lossin y Carnes, R. (2015). An investigation of the pH characteristics of compost. Compost Sci.

Lübken, M., Gehring, T., & Wichern, M. (2011). Microbiological fermentation of lignocellulosic biomass: Appl Microbiol Biotechnol, 10. doi: DOI 10.1007/s00253-009-2365-1

Luisa Villalba, J. P. (2021). Algunos parámetros biológicos en la evaluación de la estabilidad y la madurez de dos compost. Rev. Fac. Agron. (LUZ). Obtenido de <https://produccioncientificaluz.org/index.php/agronomia/article/view/34725/36635>

M, M. T. (2017). índices de fitotoxicidad en residuos orgánicos. Suelo Nutr, 12.

M, T. (2018). .Sistemas de Recirculación para la Acuicultura. Editado por Fundación Chile. pp. 207-258; 278- 279. Santiago Chile: Acribia.

M.J. NEGRO, F. V. (2007). Producción y generación del compost. CIEMAT, 40-78.

M.J. Negro, F. V. (2019). Producción y generación del compost. CIEMAT, 40-78.

Madigan, M. (2017). Biología de los Microorganismos. Waste Manager.

MAE. (18 de Febrero de 2018). Ministerio del Medio Ambiente. Obtenido de ambiente.gob.ec: <https://www.ambiente.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2019/10/PNGIDS-OCTUBRE-2019.pdf>

Magalys, R.-N. (2020). Calidad física y química de tres compost, elaborados con residuos de jardinería, pergamino de café y bora (. Revista Ciencia UNEMI, Vol. 13, N° 32, Enero-Abril 2020. Obtenido de <http://ojs.unemi.edu.ec/index.php/cienciaunemi/article/view/1007/1015>

Magalys, Rivas-Nichorzon. (2020). Calidad física y química de tres compost, elaborados con residuos de jardinería, pergamino de café y bora (. Revista Ciencia UNEMI, Vol. 13, N° 32, Enero-Abril 2020. Obtenido de <http://ojs.unemi.edu.ec/index.php/cienciaunemi/article/view/1007/1015>

Magrí Aloy, A., Flotats i Ripoll, X., Illa Alibés, J., & Mauri Sole, F. (2016). Estudio de procesos biológicos de tratamiento de residuos basado en la modelización. Portal Universitat Politècnica De Catalunya, 24. Obtenido de <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/2016/2006%20Residuos.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Magri, L. (2020). Manejo de residuos de cama profunda en un sistema de producción porcina mediante el compostaje. Magister en Manejo y Conservación de Recursos Naturales. Universidad Nacional del Rosario, Rosario.

MAMANI, B. K. (2020). Evaluación del proceso de compostaje de residuos orgánicos, aplicando microorganismos eficaces. Puno – Perú. Obtenido de http://repositorio.unap.edu.pe/bitstream/handle/UNAP/14508/Pillco_Mamani_Katia.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Mamani, K. P. (2020). Evaluación del proceso de compostaje de residuos orgánicos, aplicando microorganismos eficaces . Perú.

Manchala, K. R., Yewei Sun, D. Z., & Wang, Z.-W. (2017). Anaerobic Digestion Modelling. En V. T. States, Anaerobic Digestion Modelling (pág. 73). United States of América.

Marcos, V. (2021). Diseño de una instalación de compostaje de residuos orgánicos para obtener fertilizantes de uso agrícola. valladolid: Acribia.

María Juliana Torti¹, M. B. (2019). Evolución de los indicadores de madurez y estabilidad biológica en compost de residuos de incubación. Argentina. Obtenido de https://repositorio.inta.gob.ar/bitstream/handle/20.500.12123/5162/INTA_CRBsAsNorte_EEAPergamino_Torti_Mar%c3%ada_Evolucion_de_los_indicadores_de_madurez_y_estabilidad_biologica_en_compost_de_residuos_de_incubacion.pdf?sequence=1&isAllowed=y

María Soto-Herranz¹, M. S.-B.-R.-C. (2019). Estudio de un proceso de compostaje de estiércol de conejo mediante técnicas espectroscópica análisis de ácidos húmicos y fúlvicos y. Huesca. Obtenido de <https://zaguan.unizar.es/record/84472/files/3430.pdf>

Mariuxi, M., & Mora, M. (2019). Microorganismos eficientes, propiedades funcionales y aplicaciones agrícolas. Centro agrícola, 93-103.

Márquez, P., Díaz, M., & Capitán, F. (2019). Factores que afectan al proceso de Compostaje. Sevilla: (IRNAS).

Masola, I. A. (2020). Propagación lateral de la compactación por tránsito de la maquinaria agrícola: ¿afecta la calidad del suelo, el intercambio gaseoso y la productividad de los cultivos? Esperanza Santa Fe.

Mata, J. M. (2019). Empleo de técnicas avanzadas y de herramientas quimiométricas para el estudio de residuos y de compost. Obtenido de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=60921>

Maulini-Duran, C. A. (2014). Gaseous emissions in municipal wastes composting: effect of the bulking agent. *Bioresource Technology*, 172, 260-8.

Michel, F. (2004). Mass and nutrient losses during the composting of dairy manure amended with sawdust or straw. *Didacticae*, 12.

Midbri-k uh, k. (2017). *Ferment. Technol. clear production*, 14.

Mikate, D. (2001). *Temperatura el compostaje*. 15.

Miller, W. y. (2012). *The practical handbook of compost*. *Bioresource Technology*.

Mnady, G., & Roland, S. (2009). An analysis of available mathematical models for anaerobic digestion of organic substances for production of biogas. *Researchgate*, 31. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/283518957_An_analysis_of_available_mathematical_models_for_anaerobic_digestion_of_organic_substances_for_production_of_biogas

Molina, M. (2021). Efecto de la aplicación de compost en algunas propiedades químicas de un suelo Typic haplustoll en el Valle del Cauca. *Acta Agronómica*. Colombia: Acribia.

Molina, N. F., Tarifa, O. I., & Mendoza, L. V. (2015). Residuos agroindustriales como adiciones en la elaboración de bloques de concreto no estructural. *SciElo*, 99-119.

Monetta, P., Paroldi, H., & Miguel, R. (2019). II Simposio de Residuos Agropecuarios y agroindustriales de NOA y Cuyo. San Juan, Argentina: INTA.

Montes, C. (2019). Generación y manejo de residuos durante la pandemia del COVID-19.

Montoya, S. (10 de Febrero de 2018). Compost supplementation with nutrients and microorganisms. *Waste Management*, 195-199.

Moreno Casco, J. (2008). *Compostaje*. España: Mundi-Prensa.

Moreno, J., & Moral, R. (2019). *Compostaje*. Barcelona: Editores Científicos.

Moron, V. E. (2019). Aprovechamiento de residuos orgánicos residenciales para la generación de abono en Bogotá. Bogotá: <https://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/7254/1/811710-2019-I-GA.pdf>.

Mosquera, M. A. (2019). Manejo de desechos sólidos y su incidencia en la producción de compost en los mercados públicos de la ciudad de Santo Domingo De Los Tsáchilas. *Revista Caribeña De Ciencias Sociales*. Obtenido de <https://www.eumed.net/rev/caribe/2019/12/manejo-desechos-solidos.pdf>

Ms.C. David Ramos Agüero, I, D. E. (2020). Generalidades de los abonos orgánicos: Importancia del Bocashi como alternativa nutricional para suelos y plantas. Obtenido de

http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0258-59362014000400007

Muhammad, A., Shi, A., Muhammad, A., & Muhammad, S. (2020). Optimization of pilot-scale in-vessel composting process for various agricultural wastes on elevated temperature by using taguchi technique and compost quality assessment. *Process Safety and Environmental Protection*.

Muñoz, G. T. (08 de Enero de 2021). Trabajo en la Estación Experimental del Zaidín (EEZ-CSIC). Uso el compostaje para obtener abonos orgánicos, e investigo como reducir la emisión del gas invernadero óxido nitroso (N₂O) en la agricultura con la simbiosis rhizobium-leguminoso. *Compostando Ciencia*, págs. <http://www.compostandociencia.com/2021/01/empezamos-nuestro-experimento-elaboracion-de-un-abono-organico-casero-y-unobiologico-usando-leguminosas/>.

Muñoz, M. (2019). *Perspectiva de la Gestión de Residuos en América Latina y el Caribe*.

Muñoz, M. d. (2019). *Gestión de residuos sólidos urbanos en América Latina : un análisis desde la perspectiva de la generación*.

Myatake, L. (2004). *Compostaje. Didacticae*, 23.

N. Morisaki, C.G. Phae, K. Nakasaki, M. Shoda, H. Kubota. (1989). Nitrogen transformation during thermophilic composting. *J. Ferment. Bioeng.*

Nakasaka, K. (2005). Microbial succession associated with organic matter. 12.

Nakasaka. (2005). Compost. Scielo, 12.

Neave, I. F. (2019). Sustancias Húmicas: Origen, Caracterización Y Uso En La Agricultura. Obtenido de <https://www.intagri.com/articulos/nutricion-vegetal/acidos-humicos-fulvicos-nutricion-vegetal>

Nedra, A., Walid, F., Moktar, H., & Hassib, B. (2019). Large scale composting og poultry slaughterhouse processing waste: Microbial removal and agricultural biofertilizer application. Process Safety and Environmental Protection.

Neetu, S., & Chandrajit, B. (2016). Batchgrowthkineticstudiesforeliminationofphenolandcyanideusingmix edmicrobialculture. Journal of Water Process Engineering, 8.

NN Menyuka, M. S. (2021). Percepciones de los desafíos y oportunidades de la utilización de desechos orgánicos a través de la agricultura urbana en la Cuenca Sur de Durban. En t. J. Environ. Res. Publ. Salud, pág. 1158 , 10.3390 / ijerph17041158.

Noble R. and Roberts S.J., . (2019). Eradication of plant pathogens and nematodes during composting. Plant Patology, 53, 548-548.

Noble, R., & Robert, S. (2017). Eradication of plant pathogens and nematodes during composting. Plant Patology, 53, 548-548.

Noriega Flores, R., & Peña Suplihuiche, R. (2020). Aprovechamiento de los residuos sólidos orgánicos domiciliarios para la producción de compost en el caserío Bajo Potrerillo, provincia de San Ignacio. Chiclayo – Peru.

Ocana, E. R. (2019). Influencia de la frecuencia de volteo para el control de la humedad de los sustratos en el compostaje de biorresiduos. Mexico: Acribia.

Orellana, R. (2014). Fitotoxicidad en residuos orgánicos. Suelo Nutr, 10.

Ortiz A., C. R. (2020). Prácticas para la mejora en el proceso de compostaje de abonos orgánicos elaborados a base de estiércol y su efecto en el suelo: Revisión de literatura. Obtenido de <https://bdigital.zamorano.edu/handle/11036/6802>

Oscar Huerta-Pujol a, *. M. (2010). Heavy metal content in rubbish bags used for separate collection of biowaste. Waste Management, 30 (8-9), 1450-1456.

Ospina, D. (10 de Febrero de 2017). Compost supplementation with nutrients and microorganisms in composting process. Waste Management.

Oviedo Ocaña, E. R.-L. (2017). Avances en investigación sobre el compostaje de biorresiduos en municipios menores de países en desarrollo. Lecciones desde Colombia. Ingeniería, investigación y tecnología, 18(1), 31-42. Recuperado en 23 de julio de 2021,. Obtenido

de

http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-77432017000100031

Pablo, B. (2020). I plan nacional de compostaje. costa rica: Acribia.

Paccini Sánchez, A. L. (2019). Determinación de la fitotoxicidad del compost de la planta de tratamiento de residuos sólidos municipales de Carhuaz, utilizando el cultivo de trigo como indicador, Carhuaz - Ancash, 2017. Obtenido de <http://repositorio.unasam.edu.pe/handle/UNASAM/3426>

Pacha, E. (2019). Aplicación de microorganismos para acelerar la transformación de desechos orgánicos en compost”. Ambato - Ecuador.

Pagans, E. B. (2016). Ammonia emissions from the composting of different organic wastes. Dependency on process temperature. *Chemosphere*, 62(9), 1534-1542.

Pang, W. (2020). Using thermal balance Using thermal balance model to determine optimal reactor volume and insulation material needed in laboratory- scale composting reactor. *Bioresource Technology*. Acriba.

Papalia, T. (2017). Are raw materials or composting conditions. *Journal of Cleaner Production*, 19. doi: 10.1016/j.jclepro.2018.05.204

Papalia, T. (2018). Are raw materials or composting conditions and time that most influence the maturity and/or quality of composts? *Journal of Cleaner Production*, 13. doi: 10.1016/j.jclepro.2018.05.204

Parts, E. (2019). Guía de Compostaje. España.

Patiño Criado, A. (2019). Efecto de un inoculante comercial sobre las características físicas, químicas y biológicas a lo largo proceso de co-compostaje de porquinaza, pulpa de café y aserrín (Bachelor's thesis, Uniandes). Obtenido de <https://repositorio.uniandes.edu.co/handle/1992/45189>

Pedraza, S., & Hernandez, L. (2019). Disminución del tiempo de obtención de abono orgánico mediante vermicompostaje como método de estabilización de un residuo en proceso de compostaje. Dialnet. doi:<https://doi.org/10.18041/1794-4953/avances.1.5439>

Pedro Bueno Márquez1, M. J. (2019). Factores que afectan al proceso de Compostaje. Obtenido de <https://digital.csic.es/bitstream/10261/20837/3/Factores%20que%20afectan%20al%20proceso%20de%20compostaje.pdf>

PEDRO JESÚS, G. R. (2021). “Elaboración de compost utilizando corteza de Ceiba pentandra(L.) Gaertn.(lupuna blanca) y Guazumacrinita Mart.(bolaina blanca) en un sistema cerrado horizontal con rotación en Pucallpa –Ucayali”. Pucallpa –Perú. Obtenido de http://repositorio.unu.edu.pe/bitstream/handle/UNU/4844/UNU_FORESTAL_2021_T_PEDRO-GONZALES-RAMIREZ.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Pera, A. (2016). Evaluation Of Compost. IVaste Management & Research, 12.

Perez Mendez, M., Sanchez Hernandez, A., Palma Lopez, R., & Salgado Garcia, S. (2011). Caracterización Química Del Compostaje De Residuos De Caña De Azúcar En El Sureste De México. Redalyc.org, 36, 45-52. doi:SSN 0378-1844.

Perez, J. (2018). Dioxinas En Procesos De Incineración De Desechos. Research, 1-12. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/237217692_DIOXINAS_EN_PROCESOS_DE_INCINERACION_DE_DESECHOS

Pérez, J. F. (2019). Generación de Energía a partir de Residuos Sólidos Urbanos. Estrategias Termodinámicas para Optimizar el Desempeño de Centrales Térmicas. Scielo.

Pilarski, D. W., & Gerogiorgis, D. I. (2019). Progress and modelling of cold contact fermentation for. *journal of food engineering*, 32.

Pilco Mamani, K. (2020). Evaluación del proceso de compostaje de residuos orgánicos aplicando microorganismos eficaces. Puno – Perú.

Pilco Mamani, K. (2020). Evaluación Del Proceso De Compostaje De Residuos Orgánicos, Aplicando Microorganismos Eficaces. Puno – Perú.

Pinguil, N., & Jaramillo, M. (2019). Obtención de compost a partir de activadores biológicos. Cuenca-Ecuador.

Poincelot, R. (2008). A scientific examination of the principles and practice of composting. *Compost Sci*.

Polo, J. F. (2020). El tratamiento de efluentes biológico aprovecha la acción de bacterias y de otros microorganismos para limpiar el agua . Valencia: Editorial de la UPV.

portalfruticola. (2020). Diferencias entre: Estiércol, humus, sustrato, turba y compost. Obtenido de <https://www.portalfruticola.com/noticias/2020/02/17/diferencias-entre-estiercol-humus-sustrato-turba-y-compost/>

Posas, J. (2021). Agroecología. Mexico.

Puig-Ventosa, I. F.-G.-S. (2013). Determining factors for the presence of impurities in selectively collected biowaste. *Waste Management & ,* 31, 510–517.

R.H. Perry, D.W. Green. (1997). *Perry's Chemical Engineers' Handbook*, McGraw Hill. New York: Handbook.

Ramos, P. (2016). Aprovechamiento agrícola del lodo generado en la PTAR de Puente Piedra - Lima. Researchgate, 1-12. Obtenido de <file:///C:/Users/RONALD%20QUINATO/Downloads/a08v77n1Apr ovechamientoagricoladelododePTARPuentePiedra-2011.pdf>

Report, T., & Alvarez, J. (2016). *Compostaje para Agricultura Ecológica José M a Álvarez de la Puente*. Mexico. doi:10.13140/RG.2.2.20182.24647

Resman, S. G. (2019). The effectiveness of compost, humic acid and pure fulvate on improvement of ultisol soil chemical properties. *EPRA International Journal of Multidisciplinary Research (IJMR)-Peer*

Reviewed Journal. Obtenido de
<https://eprajournals.org/index.php/IJMR/article/view/116/101>

Riboh, Abuza and. (1982). Theory and application of Arrhenius kinetics to the prediction. *Ingeniería y Tecnología de Procesos Alimentarios*, 6.

Riffaldi, R. (2014). Evaluation of compost maturity. *IVaste Management & Research*, 10.

Rincon, A. (2018). Cinética De Crecimiento De *Gluconacetobacter*. *SciELO*. doi:10.15446/abc.v24n1.70857

Robert, M. (2009). Aireacion del Compostaje. *Didacticae*, 10.

Robles & Castañeda , M. (4 de 1 de 2018). Obtenido de
<https://digital.csic.es/bitstream/10261/20837/3/Factores%20que%20afectan%20al%20proceso%20de%20compostaje.pdf>

Rodríguez Castro, J. S. (2019). Obtención de composta a base de residuos orgánicos caseros. Obtenido de
<https://repositorioinstitucional.buap.mx/handle/20.500.12371/4582>

Rodriguez, B. (2019). Evaluación de *Penicillium* sp como degradador de celulosa en el proceso de compostaje de residuos orgánicos de origen vegetal en la localidad 20 de Bogotá. *Researchgate*, 1-11. Obtenido de
https://www.researchgate.net/publication/325575033_Evaluacion_de_Penicillium_sp_como_degradador_de_celulosa_en_el_proceso_de_compostaje_de_residuos_organicos_de_origen_vegetal_en_la_localidad_20_de_Bogota

Rodríguez, J. C. (2019). Eficacia de la biodesinfección de suelos de invernadero de Almería sobre la microbiota edáfica, en función de las fechas y tiempos de aplicación. Almería. Obtenido de http://repositorio.ual.es/bitstream/handle/10835/8174/TFM_JIMENEZ%20RODRIGUEZ,%20JEZABEL%20DEL%20CARMEN.pdf?sequence=1

Roig, M. C.-M. (December de 2016). The use of elemental sulphur as organic. (I. 9, Ed.) The use of elemental sulphur as organic alternative to control pH during composting of olive mill wastes., Volume 57, 1099–1105.

Rojas, J. E. (2020). Aprovechamiento de los desechos orgánicos sólidos generados por los restaurantes ubicados en Chapinero, Bogotá, Colombia. Mediante el método de vermicompostaje. . Bogota: <https://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/8185/4/6141322-2020-2-IQ.pdf>.

Rojas, S. P. (2018). “Elaboración de compost a partir de los residuos orgánicos generados en la limpieza de planta de la empresa Copeinca SAC”. Piura, Perú : Universidad Nacional De Piura.

Rojas-Valencia, M. (2018). Gestión y coprocesamiento de residuos sólidos urbanos. Researchgate, 1-6. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/326657680_Gestion_y_coprocesamiento_de_residuos_solidos_urbanos

Román, P., Martínez, M., & Pantoja, A. (2019). Manual de Compostaje del Agricultor. Santiago de Chile.

Roncal , M. R., & Díaz, E. D. (2019). Efecto de los microorganismos eficaces en la descomposición de los desechos sólidos orgánicos más estiércol de ganado vacuno en el distrito de José Gálvez. Cajamarca - Perú.

Rosales, R. S. (2019). Modelos de predicción del índice de madurez de abonos orgánicos producidos con tres procesos de transformación. ITEA, información técnica económica agraria: revista de la Asociación Interprofesional para el Desarrollo Agrario (AIDA), 115(3), 198-212. Obtenido de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7207818>

Rosero & Melendez, R. (4 de 5 de 2018). Obtenido de <https://digital.csic.es/bitstream/10261/20837/3/Factores%20que%20afectan%20al%20proceso%20de%20compostaje.pdf>

Rosero, D. O. (2019). Descomposición microbiológica de desechos orgánicos vegetales. Quito.

Ruiz Mg., M. (2015). El Comportamiento del consumidor y la cultura de. Revista digital de medio ambiente, 1-15. Obtenido de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5363003>

Salazar Perez, M., & Morales Mosquera, P. (2019). Manejo de Desechos Sólidos y su Incidencia en la Producción de Composten los Mercados Publicas de la Ciudad de Santo Domingo de los Tsáchilas. Revista Brasileira de ciencias sociales.

Salazar, M., & Morales, P. (2019). Manejo de desechos sólidos y su incidencia en la producción de compost en los mercados públicos en la

ciudad de Santo Domingo de los Tsáchilas. Revista caribeña de ciencias sociales.

Samaniego, J. (2017). Composting as sustainable strategy for municipal solid waste management in the Chimborazo Region, Ecuador: Suitability of the obtained composts for seedling production. *Journal of cleaner production*, 141, 1349-1358, 1-41. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.09.178>

Sánchez, Ó. J. (2017). Compost supplementation with nutrients and microorganisms in composting process. *Waste Management*.

Sánchez, R., Pita, D., Gonzales, K., & Hormaza, J. (2019). Análisis de mezclas de residuos sólidos orgánicos empleadas en la fabricación de ladrillos ecológicos no estructurales . *Ciencias ambientales*, 23-44.

Sánchez-Bernal, R. P.-C.-V.-V. (2019). Análisis de mezclas de residuos sólidos orgánicos empleadas en la fabricación de ladrillos ecológicos no estructurales. *Revista de Ciencias Ambientales*, 53(1), 23-44. Obtenido de https://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2215-38962019000100023

Sánchez-Monedero, M. (2017). Evaluación de la estabilidad y madurez de la composta en plantas de escala real. *Clear production*, 12.

Sánchez-Monedero. (2001). Nitrogen transformation during.

Santana, W. B. (2019). El proceso de compostaje. Obtenido de <https://ciencia.lasalle.edu.co/cgi/viewcontent.cgi?article=1071&context=libros>

Sayara, T. (2020). Reciclaje de desechos orgánicos mediante compostaje: rendimiento del proceso y aplicación de compost en agricultura. *Agronomy* 2020, 10 (11), 1838; <https://doi.org/10.3390/agronomy10111838>. Palestina: Acribia.

Scaglia, B. O. (2011). Odours and volatile organic compounds emitted from municipal solid waste at different stage of decomposition and relationship with biological stability. *Bioresource Technology*, 02(7), 4638-4645.

Schnitzer, M. (2017). EVALUATION OF COMPOST. *IVaste Management & Research*, 12.

Schott, A. B. (2019). Identification of decisive factors for greenhouse gas emissions in comparative lifecycle assessments of food waste management – An analytical review. *Journal of Cleaner Producción*, 119, 13-24.

Schwintzer, C. (2019). Nitrogenase activity in composting horse bedding and leaves. Christa R. Schwintzer, John D. Tjepkema & Bill Seekins. *Plant and Soil* 242: 277–282. Acribia.

Shangguan, H., Fu, T., Wu, J., Tang, J., Zeng, R. J., & Zhou, S. (2020). Use of an in situ thermoelectric generator for electric field-assisted aerobic composting. *Science of the Total Environment*.

Shulze, K. (1999). Continuous Thermophilic Composting. *Appl. Microbiol.*, 12.

Shulze, K. (2010). Continuous Thermophilic Composting. *Appl. Microbiol.*, 12.

Sintim, H., Bary, A., Haye, D., & Wadsworth, L. (2020). In situ degradation of biodegradable plastic mulch films in compost and agricultural soils. *Science of The Total Environment*, 1-10.

Soto, J. (2020). la incineración de residuos y por qué no debe aprobarse en México?

STOREY, S. D. (2019). Comparison of bacterial succession in green waste composts amended with inorganic fertilizer and wastewater treatment plant sludge. *Bioresource Technology*, vol. 179 . Acribia .

Suler, D. F. (1998). Effect of Temperature, Aeration, and Moisture on CO₂.

Suler, D. F. (2008). Effect of Temperature, Aeration, and Moisture on CO₂.

Sundberg, C. (2000). Low pH as an inhibiting factor in the transition from mesophilic to thermophilic phase in composting. *Biores.* 12.

TACAR, B. J. (2019). Influencia de la aireación extendida en el proceso de compostaje aerotérmico de residuos sólidos orgánicos orgánicos provenientes de mercados de la ciudad de la ciudad de Juliaca, 2017.

Tahseen Sayara, R. B.-S. (2021). El compostaje y otras aplicaciones del compost. Obtenido de <https://www.uab.cat/web/detalle->

noticia/el-compostaje-y-otras-aplicaciones-del-compost-1345680342040.html?noticiaid=1345831915522

Tanya Morocho, M. &.M. (2019). Microorganismos eficientes, propiedades funcionales y aplicaciones agrícolas. Centro Agrícola, 46(2), 93-103. Recuperado en 16 de julio de 2021. Obtenido de http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0253-57852019000200093

Tchobanogolus, G. (2008). Theisen, H., Vigil, S. 1994. Gestión integral de residuos sólidos. 12.

Tellez Monzón, L. A. (2019). Estabilización de la bosta de caballo mediante un proceso aeróbico similar al compostaje. revista de la Sociedad Química del Perú, 85(1), 25-33. Recuperado en 17 de julio de 2021. Obtenido de http://www.scielo.org.pe/scielo.php?pid=S1810-634X2019000100004&script=sci_arttext&tlng=pt

Tierra, A. d. (2020). ventajas de compostaje doméstico. https://www.tierra.org/wp-content/uploads/2016/01/Informe_compost_web_con_tabla_buena-1.pdf.

Tolvamen, O. K. (2011). Occupational hygiene in biowaste composting. Waste Manage, 525-545.

Tortosa, G. (2020). Compostaje con bolsas de aire. Obtenido de <http://www.compostandociencia.com/2020/06/compostaje-con-bolsas-de-aire/>

Tortosa, G. (2020). El pH durante el compostaje. Obtenido de <http://www.compostandociencia.com/2021/06/clase-compostaje-de-residuos-agroindustriales-en-el-lvii-curso-internacional-de-edafologia-y-biologia-vegetal-granada-2021/>

Tortosa, G. (2020). Factores que influyen en el proceso de compostaje. Obtenido de <http://www.compostandociencia.com/2021/06/clase-compostaje-de-residuos-agroindustriales-en-el-lvii-curso-internacional-de-edafologia-y-biologia-vegetal-granada-2021/>

Tortosa, G. M.-M. (2020.). Evaluación de la diversidad y abundancia de la población fúngica total y activa y su correlación con la humificación durante el compostaje en dos fases de residuos de almazara ("alperujo"). *Tecnología Bioambiental*,295, 122267. DOI: 1016/j.biortech. Acribia.

Tortosa, Germán. (2018). Geosmina, ese olor característico del compost a tierra mojada. Obtenido de <http://www.compostandociencia.com/2018/10/geosmina-ese-olor-caracteristico-del-compost-a-tierra-mojada/>

Tortosa, Germán. (2019). La importancia de la relación carbono-nitrógeno en un compost. Obtenido de <http://www.compostandociencia.com/2018/04/la-importancia-de-la-relacion-carbono-nitrogeno-en-un-compost/>

Tortosa, Germán. (2021). El tamaño de partícula y homogeneización de residuos es fundamental para el compostaje. Obtenido de

<http://www.compostandociencia.com/2021/06/charla-la-ciencia-del-compostaje-a-pequena-escala-monachil-granada/>

Trejos, V. (20 de 10 de 2008). www.redalyc.org. Obtenido de <https://www.redalyc.org/pdf/496/49612069012.pdf>

Tsai, C. C. (2013). The relationship of odor concentration and the critical components emitted from food waste composting plants. *Atmospheric Environment*, 42(35), 8246-8251.

uliana González-Jiménez¹, J. V.-M. (2019). Manejo ambiental de residuos orgánicos: Estado del arte de la generación de compostaje a partir de residuos sólidos provenientes de sistemas de trampas de grasa y aceite. Obtenido de https://181.193.125.13/index.php/tec_marcha/article/view/4843/5423

Urpilainen, S. (2017). Evaluación de la estabilidad y madurez de la composta. *Network of Scientific Journals*, 9.

Valdés, A. (2019). Gestión de residuos industriales y sostenibilidad. Necesidad de un enfoque de economía ecológica. *Revista Universidad y Sociedad sCIELO*.

Valladares-Carnero, F. (2017). Universidad De Piura. Obtenido de Universidad De Piura: <https://pirhua.udep.edu.pe/>

Vallini, G. (2016). The Biology Of Composting. *Waste Management & Research*, 11.

Valverde, R. (2019). WASTE MANAGEMENT SYSTEMS' IMPACT ON HEALTH AND ENVIRONMENT IN DEVELOPING COUNTRIES. *Linnaeus Eco-Tech.*, 1-11. doi:DOI: <https://doi.org/10.15626/Eco-Tech.2012.019>

Vanotti M.Millner, P. S. (2016). Aerobic composting of swine manure solids mixed with cotton gin waste. *ASABE Annual*.

Varela, M. (2021). El compost, o cómo convertir tus residuos orgánicos en abono natural. Obtenido de <https://hablandoenvidrio.com/el-compost-o-como-convertir-tus-residuos-organicos-en-abono-natural/>

Varela, M. (2021). El compost, o cómo convertir tus residuos orgánicos en abono natural. Obtenido de <https://hablandoenvidrio.com/el-compost-o-como-convertir-tus-residuos-organicos-en-abono-natural/>

Vargas, C. Y., & Perez, P. L. (2018). Aprovechamiento de residuos agroindustriales en el mejoramiento de la calidad del ambiente. *Revista Facultad De Ciencias Basicas*, 59-72.

Vázquez, M. (2017). The efficiency of home composting programmes and compost quality. *Waste Management*, 12.

Vázquez, M. (2021). DISEÑO DE UNA INSTALACIÓN DE Compostaje de Residuos Organicos para Obtener Fertiizantes de uso Agrícola. Valladolid.

Velasco R, F. C. (2019). Emisión de amoniaco durante los procesos de compostaje vermicompostaje: aspectos prácticos y aplicados. Obtenido

de file:///C:/Users/USER/AppData/Local/Temp/801-Otro-1475-1-10-20180817.pdf

Vethea, Ø. (2017). Stability Indices For Different Composts. *Compost Science*, 19-26.

Vidya de Gannes, G. E. (2012). Diversity and abundance of ammonia oxidizing archaea in tropical compost systems. *Waste Management*.

Wang, L. ((2020)). El progreso del compostaje Tecnologías desde Static Heap hasta Smart Reactor: ventajas y limitaciones. *Revista Producción más limpia*, 270,122328. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122328>. Brasil: Acribia .

Wei, Y. L. (2017). Environmental challenges impeding the composting of biodegradable municipal solid waste: A critical review. . *Resources, Conservation and Recycling*, 122, 51-65.

Wilder, R. (2019). Las condiciones del suelo y el desarrollo de las plantas. La Habana: Revolucionaria.

Winsor. (1932). The Gompertz curve as a growth curve. *Proceedings of the national academy of sciences*. Recuperado el 29 de Noviembre de 2018

Xu, T.-J., & Ting, Y.-P. (2013). Fungal bioleaching of incineration fly ash: Metal extraction and modeling. *Enzyme and Microbial Technology*, 6. doi: <https://doi.org/10.1016/j.enzmictec.2009.01.006>

Yepes, S. M., & Sanchez, L. J. (2019). VALORIZACION DE RESIDUOS AGROINDUSTRIALES-FRUTAS-EN MEDELLIN Y EL SUR DEL ABURRA, COLOMBIA. SciELO.

Zang, B. S. (2016). Effects of mix ratio, moisture content and aeration rate on sulfur odor emissions during pig manure composting. *Waste Management*, 56, 498-505.

Zhang, H. L. (2016). Influence of aeration on volatile sulfur compounds (VSCs) and NH₃ emissions during aerobic composting of kitchen waste. *Waste Management*, 58, 369-375.

Zhechao, Z., Yue, Z., Tianxue, Y., Zimin, W., Yingjun, L., Yuquan, W., . . . Liqin, W. (2019). Effects of exogenous protein-like precursors on humification process during lignocellulose-like biomass composting: Amino acids as the key linker to promote humification process. *Bioresource Technology*.

Zhi, X., Bing, Z., Yuyun, W., Jinliang, X., & Xuan, W. (2019). Composting process and odor emission varied in windrow and trough composting system under different air humidity conditions. *Journal Pre-proofs*.

Zhu, D. H. (2021). La calidad de los aditivos influye en la reserva de genes de resistencia a los antibióticos durante el compostaje de estiércol de pollo. *Elsevier Ecotoxicología y seguridad ambiental* .

Zhu, N. D. (2009). Performance characteristics of three aeration systems. 13.



Fundamentos teóricos de la fermentación aerobia en el proceso de obtención de bioinsumos, se publicó en el mes de diciembre de 2025.

ISBN: 978-9907-0-0519-6

**Editorial InvestiGo
Riobamba – Ecuador
Cel: +593 97 911 9620
publicaciones@grupobl.com**

BIOGRAFÍA DE LOS AUTORES

Juan Alberto Gaibor Chávez:

Profesor Investigador de la Universidad Estatal de Bolívar. Nació en Guaranda – Ecuador. Formación en Ingeniería Agroindustrial, con énfasis en estudios del ambiente, tratamiento de residuos sólidos con fines energéticos y como bioinsumos.

Franz Patricio Verdezoto Mendoza:

Franz Verdezoto Mendoza nació en Ecuador el 18 de diciembre de 1981. Ingeniero Químico con maestría en Cambio Climático. Inició su carrera en el área ambiental pública y privada, ocupando cargos relevantes de Subsecretario de Calidad Ambiental, director de Ambiente y actual docente titular en la Universidad Estatal de Bolívar.

Isidro Favian Bayas Morejón:

Isidro Favián Bayas-Morejón, PhD, se desempeña como Director de Investigación y Vinculación y docente-investigador en el CIMABiF de la Universidad Estatal de Bolívar, cuenta con más de 70 publicaciones científicas y un libro. Sus investigaciones se centran en alimentos funcionales, microbiología aplicada, fitoquímica y biotecnología, con énfasis en compuestos bioactivos, seguridad alimentaria e innovación sostenible. Ha participado en congresos internacionales en Europa y Latinoamérica, promoviendo la vinculación ciencia-sociedad y el fortalecimiento de redes de investigación.

Edgar Fabián Rivera Guzmán:

Fabián Rivera, Ingeniero Industrial y Magíster en Electrónica, doctorando en Ciencias Computacionales, docente desde 2016, actualmente en la Universidad Estatal de Bolívar. Investiga y colabora en tecnologías emergentes de la Industria 4.0 como IA, visión artificial, minería de datos, realidad aumentada e IoT, publicando en congresos y revistas internacionales.

FUNDAMENTOS TEÓRICOS DE LA FERMENTACIÓN AEROBIA EN EL PROCESO DE OBTENCIÓN DE BIOINSUMOS

El libro es un manifiesto científico y una guía práctica que promueve el compostaje definido como una biotecnología de precisión como la solución esencial y accesible para transformar la crisis global de residuos en una oportunidad de regeneración ambiental. La obra está basada en una síntesis rigurosa de estudios científicos y busca elevar la práctica del compostaje, que es vital en países como Ecuador, de un método empírico a un proceso controlado.

El objetivo principal es la restauración del suelo, combatiendo la degradación, mejorando la seguridad alimentaria y potenciando la resiliencia al cambio climático. Está dirigido a una audiencia amplia, desde estudiantes hasta técnicos y agricultores, ofreciendo herramientas teóricas (como modelos cinéticos avanzados) y prácticas.

El texto aborda además los desafíos de gestión, como las emisiones y los olores, mediante la modelación y la mitigación tecnológica, concluyendo que el compostaje es una inversión crucial para un futuro más sostenible y justo.



Editorial InvestiGo
Riobamba – Ecuador
Cel: +593 97 911 9620
publicaciones@grupobl.com

ISBN: 978-9907-0-0519-6



9 789907 005196