

**ESTRATEGIAS PARA LA OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO Y LA CALIDAD DEL PRODUCTO
DEL COMPOSTAJE DE BIORRESIDUOS EN MUNICIPIOS MENORES DE PAÍSES EN
DESARROLLO**

Por:

EDGAR RICARDO OVIEDO OCAÑA

Tesis presentada como requisito para optar al título de Doctor en Ingeniería. Área de Énfasis Ingeniería
Sanitaria y Ambiental

Directores:

Ing. PATRICIA TORRES LOZADA, MSc, PhD.

Ing. LUIS FERNANDO MARMOLEJO REBELLON, Mas, PhD.

**UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
DOCTORADO EN INGENIERÍA
ÁREA DE ÉNFASIS INGENIERÍA SANITARIA Y AMBIENTAL
SANTIAGO DE CALI
FEBRERO DE 2015**

Nota de aceptación:

Ing. PATRICIA TORRES LOZADA, PhD. Directora de Tesis

Ing. LUIS FERNANDO MARMOLEJO REBELLON, PhD. Director de Tesis

_____ Firma del Jurado

_____ Firma del Jurado

_____ Firma del Jurado

Santiago de Cali, Febrero de 2015

A mi esposa Isabel Cristina y mi hija Sara Libertad.

A mis padres, Edgar y Mercedes.

A personas como Fredy Giraldo, Sandra Madrid, Mary Linsey Idarraga, quienes luchan día tras día, a pesar de todos los obstáculos, por posicionar desde la práctica cotidiana el aprovechamiento de residuos sólidos en el pequeño poblado. A todos ellos, mi profundo respeto y admiración.

AGRADECIMIENTOS

La escritura de los agradecimientos no es una tarea sencilla; se corre el riesgo de hacer omisiones involuntarias o de no encontrar las palabras precisas que dimensionen el sentimiento de gratitud. Sin el concurso directo o indirecto de todos los que participaron en el desarrollo de esta tesis doctoral, su culminación no hubiese sido posible. Quiero expresar mis más sinceros y profundos agradecimientos, a todos y cada uno de los que aportaron de alguna manera a este trabajo.

A la Universidad del Valle, mi alma mater a nivel de pregrado y posgrado, por contribuir con mi formación profesional y personal. El desarrollo de las distintas actividades de esta tesis doctoral fue posible gracias a la financiación de tres proyectos de investigación.

Al Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Innovación de Colombia (Colciencias) por la beca otorgada para mis estudios doctorales.

A la Universidad Industrial de Santander, por otorgarme la comisión de estudios para la finalización de la escritura del documento de tesis doctoral.

A mis directores de tesis y amigos, la Dra. Patricia Torres Lozada y el Dr. Luis Fernando Marmolejo Rebellón, por toda su orientación, dirección, apoyo, confianza y por darme la libertad para gestionar mi trabajo.

A los profesores de las Facultades de Ingeniería y de Ciencias Naturales y Exactas de la Universidad del Valle: Ing. Martha Constanza Daza, Dr. Rodrigo Abonia, Dra. Mercedes Andrade y Estad. Wilmar Alexander Torres, quienes a través de los proyectos de investigación, hicieron aportes invaluable y recomendaciones que contribuyeron a mejorar el trabajo.

Al profesor de la Escuela de Estadística de la Universidad del Valle, Wilmar Alexander Torres, por su aporte profesional en el ámbito estadístico, siempre con amable disposición.

A la Cooperativa de Servicios Públicos de Versalles, Camino Verde, por tener confianza en este trabajo y disponer de aspectos logísticos para el desarrollo de las experimentaciones. Especialmente quiero agradecer a Freddy Giraldo y Mary Linsey Idarraga, por abrir el espacio para hacer la investigación en Versalles, y a las personas que laboran en la instalación de manejo de residuos sólidos, por recibirnos con cordialidad durante estos años.

A los profesores de la Universidad Autónoma de Barcelona: Dr. Antoni Sánchez y Dra. Raquel Barrena del Grupo de Investigación de Compostaje de Residuos Orgánicos, por acogerme durante el desarrollo de mi estancia doctoral en su grupo y por sus contribuciones a este trabajo.

A los tecnólogos Jesús David Hernández y Cristian Andrés Álzate, quienes participaron con responsabilidad y alto grado de compromiso en la operación y monitoreo de los experimentos.

A los ingenieros que hicieron su proyecto de grado en el marco de esta tesis: Ángela Osorio, Carolina Grajales, Sebastián Gonzales, Laura Hoyos, Juliana Ortiz, Jonathan Soto, Paola Zambrano y Gustavo Castro. Compartir en trabajo de campo, laboratorio o discusiones en oficina ha sido una experiencia personal y profesional invaluable.

A los profesores y funcionarios del Área Académica de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, a Miriam Mosquera del Programa de Posgrado en Ingeniería Sanitaria y Ambiental y a Luz Edith Guiral del Centro de Documentación de CINARA y a Ruby Rivas del Laboratorio de Análisis Industriales, por su valioso apoyo.

A mis compañeros de la Escuela de Ingeniería Civil de la Universidad Industrial de Santander, especialmente a los profesores Guillermo Mejía, Sully Gómez, Germán García y Mario García.

A mis amigos y colegas, con quienes compartí diferentes espacios durante estos años: Ana Paola Lasso, Nancy Vásquez, Viviana Valencia, Claudia Patricia Amezcuita, Carolina Alvarez, Andrés Gómez, Paola Arias, Natalia Ospina, Orlando Salazar, Javier Ernesto Fernández, José Abdón Ordoñez, Luis Germán Delgado, Luis Alfonso Hurtado, Mario Pérez, Johnny Rojas, Juan Pablo Silva, Carlos Arturo Madera, Miguel Ricardo Peña y Mario Castaño.

A mis padres Edgar y Mercedes y a mis hermanos Ana Cristina y Diego Fernando, por su apoyo imperecedero y palabras de aliento.

A Sara Libertad, quien ha vivido mis ausencias durante estos años.

A Isabel Cristina, mi esposa, por el aprendizaje de nuestros años juntos, por su compañía, por sus aportes, por sus recomendaciones, por su amor. Gracias.

ABREVIATURAS

ALC: América Latina y el Caribe
Biorresiduos: residuos sólidos orgánicos de rápida degradación
BC: Bagazo de caña
BM: biorresiduos mezclados
BS: biorresiduos separados en fuente
CARM: calidad requerida del material
CE: conductividad eléctrica
CF: coliformes fecales
CIC: capacidad de intercambio catiónico
CM: ceniza de madera
COT: carbono orgánico oxidable total
CRA: capacidad de retención de agua
CRM: cantidad requerida del material
CRR: crecimiento de radícula relativo
CT: coliformes totales
E: estable
ECCA: Estudio y Control de la Contaminación Ambiental
HDAM: hileras dinámicas –aireación manual
IE: inestable
IG: índice de germinación
IR: índices respirométricos
IM: inmaduro
M: maduro
MP: material precompostado
NMP: número más probable
NTC: Norma Técnica Colombiana
OPS: Organización Panamericana de Salud
PE: pasto estrella
PEAP: pilas estáticas – aireación pasiva
PGR: porcentaje de germinación relativa
PMRS: planta de manejo de residuos sólidos
SV: sólidos volátiles
RSM: Residuos sólidos municipales

RESUMEN

El compostaje es una de las tecnologías con mayor potencial para el aprovechamiento de biorresiduos en municipios menores de países en desarrollo, no obstante su aplicación no ha sido efectiva, mostrando la necesidad de estudiar las causas de sus limitaciones y de proponer opciones para mejorar su desempeño. En esta tesis se evaluaron estrategias para optimizar el proceso y la calidad del producto del compostaje de biorresiduos en municipios menores a 15.000 habitantes de países en desarrollo. Se consideró este rango poblacional, teniendo en cuenta que estos municipios se clasifican como menores por instituciones como la Organización Panamericana de Salud (OPS) y presentan limitaciones para la gestión de los residuos sólidos municipales (RSM). El análisis de los sistemas de compostaje permitió identificar que: *i)* su funcionamiento está orientado por cuatro subsistemas integrados: calidad de la materia prima, desarrollo tecnológico, calidad del producto y comercialización, y gestión empresarial, y *ii)* se requieren políticas públicas para el fortalecimiento de la separación en la fuente y recolección selectiva, el reconocimiento tarifario, la revisión de estándares de calidad del producto, el estímulo al uso y comercialización de compost y el desarrollo tecnológico contextualizado. La evaluación de la calidad de la materia prima del compostaje de biorresiduos en un municipio menor a 15.000 habitantes evidenció un alta variabilidad y características típicas de biorresiduos de países en desarrollo que presentan condiciones críticas para un adecuado proceso de compostaje, entre las que se encuentran exceso de humedad, pH ácido, deficiencias en el contenido de carbono y fósforo y bajas relaciones carbono:nitrógeno. La evaluación de opciones para mejorar el proceso y la calidad del producto, incluyó estrategias como la incorporación de materiales de enmienda y soporte (seleccionados considerando las condiciones del contexto) y el incremento en la frecuencia de volteo. La incorporación de pasto estrella, bagazo de caña y material compostado, fue efectiva para acelerar el inicio del proceso, tener mayores condiciones para la higienización del material y mejorar la calidad del producto, llevándolo al cumplimiento de los estándares de calidad del producto. La adición de ceniza de madera no incidió en la duración del proceso y afectó la calidad del producto ya que aumentó su fitotoxicidad. El incremento en la frecuencia de volteo permitió mejores condiciones de proceso en las etapas mesofílica y termofílica, pero disminuyó el contenido de carbono y nutrientes en el producto. La aplicación de pruebas de estabilidad y madurez ratificó la importancia de complementar las pruebas empleadas rutinariamente en las instalaciones de compostaje con las realizadas en laboratorio, para lo cual es necesario hacer adaptaciones de monitoreo acorde con las condiciones de operación de las instalaciones de compostaje. En general, los resultados de esta investigación muestran que estrategias que mejoren la calidad de los sustratos y simultáneamente las condiciones del proceso, fueron efectivas para la optimización del proceso y la calidad del producto. Este trabajo proponen la adaptación de opciones tecnológicas y de esquemas de operación, control y monitoreo acordes con las condiciones de contexto, que pueden contribuir a mejorar el desempeño de las instalaciones de compostaje en países en desarrollo.

PUBLICACIONES

Artículos

Publicados

- Selección de sistemas agroambientales con potencial uso del compost de biorresiduos municipales. *Revista Acta Agronómica* 64 (2) 2015, 135-145p. Universidad Nacional de Colombia.
- Evaluation of wood ashes addition for the pH control of substrates in municipal biowaste composting. *Revista Ingeniería, Investigación y Tecnología* XV (3), 469 – 478p, Julio – Septiembre de 2014. Universidad Autónoma de México.
- Influencia de la frecuencia de volteo para el control de la humedad de los sustratos en el compostaje de biorresiduos de origen municipal. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental* 30 (1), 91 – 100p, Enero – Marzo de 2014. Universidad Autónoma de México.
- Influencia de la incorporación de pasto estrella (*cynodonplectostachyus*) en el compostaje de biorresiduos de origen municipal. *Revista Ingeniería y Desarrollo* 31 (2), 251 – 271p, Julio – diciembre de 2013. Universidad del Norte.
- Perspectivas de aplicación del compostaje de biorresiduos proveniente de residuos sólidos municipales. Un Enfoque desde lo global a lo local. *Revista Ingenierías* 11 (20), 67 – 75p. Universidad de Medellín.
- Intervenciones priorizadas en plantas de manejo de residuos sólidos mediante la aplicación del análisis estructural. *Revista Ingeniería y Universidad* 15 (1), 125-144p, enero-junio de 2011. Universidad Javeriana.

Artículos sometidos

- Evaluation of the variability of biowastes from small towns in developing countries. Strategies to improve their quality and composting process conditions. *Waste Management*.
- Evaluation of the stability and maturity of biowaste composts generated by small municipalities in developing countries. *Waste Management*.
- Effect of adding bulking materials over the composting process of municipal solid biowastes. *Journal chileno de agricultura*.
- Systemic Analysis of Municipal Biowaste Composting in Developing Countries. *Journal of Material Cycles and Waste Management*.
- Influencia del pH y nutrientes sobre la Biodegradabilidad aerobia de biorresiduos de origen municipal. *Revista Afinidad*.

Ponencias

Internacionales

- Improvement of municipal biowaste composting in developing countries. Case study: Versalles, Colombia. *The 29th International Conference on Solid Waste Technology and Management 2014*. The Journal of Solid Waste Technology and Management Department of Civil Engineering. Widener University. Philadelphia, Estados Unidos. Abril de 2014.

-
- Evaluating Variability in Substrate Quality in Municipal Biowaste Composting. An Approach from Developing Countries. *BioCycle. 27th anual conference Weast Coast Conference 2013*. BioCycle 2013. San Diego, Estados Unidos. Abril de 2013.
 - Selección de sistemas agroambientales con mayor potencial para la aplicación de compost proveniente de biorresiduos de plantas de manejo de residuos sólidos en el Valle del Cauca. *II Conferencia Internacional Gestión de Residuos en América latina – GRAL 2011*. IWWG, UNICEF, UAO y UNIVALLE. Universidad Autónoma de Occidente. Santiago de Cali, Colombia. Junio de 2011.

Nacionales

- Perspectivas de aplicación del compostaje en plantas de manejo de residuos sólidos en Colombia. *Exporesiduos 2011*. Asociación Colombiana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental - Acodal. Noviembre de 2011.
- Análisis de la Variabilidad de la Calidad de los Sustratos del Compostaje de Biorresiduos en la Cabecera Municipal de Versalles - Valle del Cauca, acorde con el Día de Montaje. *Encuentro Nacional de Estudiantes de Ingeniería Sanitaria y Ambiental*. Universidad del Valle. Noviembre de 2012.
- Potencialidades y desafíos de la aplicación del Compostaje de Biorresiduos. *Seminario: Manejo Integral de los Residuos Sólidos: Un reto ambiental global, de interés local*. Corporación Universitaria Autónoma del Cauca. Popayán, Noviembre de 2013.

Proyectos de grado dirigidos o codirigidos

- Evaluación del Pasto Estrella (*Cynodon Plectostachyus*) como Material de Soporte en el Compostaje de Biorresiduos de Origen Municipal en Versalles – Valle del Cauca. Ángela Osorio. Programa Académico de Ingeniería Sanitaria, Universidad del Valle, 2012.
- Análisis de la Variabilidad de la Calidad de los Sustratos del Compostaje de Biorresiduos en la Cabecera Municipal de Versalles - Valle del Cauca, acorde con el Día de Montaje. Carolina Grajales. Programa Académico de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, Universidad del Valle, 2012.
- Efecto de la incorporación de cenizas de madera en la calidad de los sustratos y en el proceso de compostaje de biorresiduos de origen municipal en Versalles, Valle del Cauca. Juliana Ortiz. Programa Académico de Ingeniería Ambiental, Universidad Autónoma de Occidente, 2013.
- Evaluación de la Estabilidad y Madurez del Compost mediante la Aplicación de Técnicas Analíticas Aplicables al Contexto Local de la Cabecera del Municipio de Versalles, Valle del Cauca. Sebastián González y Laura Vanessa Hoyos. Programa Académico de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, Universidad del Valle, 2013
- Evaluación de la biodegradabilidad aerobia de los biorresiduos de origen municipal. Johnatan Soto y Paola Zambrano. Programa Académico de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, Universidad del Valle, 2014.

CONTENIDO

0	INTRODUCCIÓN	1
1	MARCO CONCEPTUAL	4
1.1	Fundamentos del Compostaje.....	4
1.1.1	Definición	4
1.1.2	Fases del proceso de compostaje	4
1.1.3	Transformación del Nitrógeno en el proceso	5
1.1.4	Microbiología del proceso	6
1.1.5	Parámetros del proceso de compostaje	7
1.1.6	Características del Compost.....	12
1.2	Compostaje de biorresiduos provenientes de residuos sólidos municipales (RSM)	15
1.2.1	Características de los biorresiduos.....	15
1.2.2	Tecnologías de compostaje de biorresiduos aplicables al contexto de estudio	17
1.2.3	Características, uso y comercialización del compost proveniente de biorresiduos	17
2	ANÁLISIS DE LA APLICACIÓN DEL COMPOSTAJE DE BIORRESIDUOS EN PAÍSES EN DESARROLLO.....	21
2.1	Introducción	21
2.2	Materiales y Métodos	23
2.2.1	Identificación del manejo de sistemas de compostaje en el Valle del Cauca.....	23
2.2.2	Análisis de la aplicación del compostaje de biorresiduos en países en desarrollo	23
2.2.3	Estrategias para mejorar el funcionamiento del Compostaje de Biorresiduos	25
2.3	Resultados y Discusión	26
2.3.1	Manejo de compostaje de biorresiduos en municipios menores del Valle del Cauca	26
2.3.2	Elementos clave de la aplicación del compostaje de biorresiduos en países en desarrollo	29
2.3.3	Análisis sistémico de la aplicación de compostaje de biorresiduos en países en desarrollo	31
2.3.4	Estrategias para mejorar el funcionamiento del compostaje de biorresiduos.....	34
2.4	Conclusiones del capítulo	38
3	VARIABILIDAD EN LA CALIDAD DE LA MATERIA PRIMA DEL COMPOSTAJE DE BIORRESIDUOS	39
3.1	Introducción	39
3.2	Elementos Conceptuales.....	39
3.2.1	Importancia del control de las materias primas en el compostaje	39
3.2.2	Variabilidad de la materia prima en el compostaje de biorresiduos.....	40
3.3	Materiales y Métodos	42
3.3.1	Área de estudio.....	42
3.3.2	Caracterización de la materia prima	43
3.3.3	Procesamiento de información	44
3.3.4	Propuestas de mejoramiento de la materia prima a partir de la tipificación del sustrato.....	45
3.4	Resultados y Discusión	46
3.4.1	Composición física.....	46
3.4.2	Calidad Físicoquímica.....	47
3.4.3	Correlación entre los parámetros físicos y los fisicoquímicos	52
3.4.4	Propuestas para mejorar calidad de los sustratos a partir de la tipificación de la materia prima	54
3.5	Conclusiones del capítulo	56

4	EVALUACIÓN DE OPCIONES PARA MEJORAR EL PROCESO Y LA CALIDAD DEL PRODUCTO DEL COMPOSTAJE DE BIORRESIDUOS.....	57
4.1	Introducción.....	57
4.2	Elementos Conceptuales.....	57
4.2.1	Mejoramiento del compostaje a través de la incorporación de materiales de enmienda y soporte.....	57
4.2.2	Mejoramiento del compostaje a través de cambios operativos.....	60
4.3	Materiales y Métodos.....	61
4.3.1	Descripción del montaje experimental.....	61
4.3.2	Caracterización de los materiales.....	62
4.3.3	Montaje Experimental y Monitoreo del Proceso.....	63
4.3.4	Calidad del producto.....	65
4.4	Resultados y Discusión.....	66
4.4.1	Calidad de los materiales procesados (sustratos).....	66
4.4.2	Desarrollo del proceso.....	68
4.4.3	Calidad del producto.....	77
4.5	Conclusiones del capítulo.....	83
5	EVALUACIÓN DE LA ESTABILIDAD Y MADUREZ EN EL COMPOSTAJE DE BIORRESIDUOS EN MUNICIPIOS MENORES DE PAÍSES EN DESARROLLO.....	85
5.1	Introducción.....	85
5.2	Elementos Conceptuales.....	86
5.2.1	Estabilidad y madurez durante el proceso de compostaje.....	86
5.2.2	Importancia de evaluar la estabilidad y madurez en el proceso.....	86
5.2.3	Medición de la estabilidad y madurez.....	87
5.2.4	Índices respirométricos (IR) y de germinación (IG).....	88
5.3	Materiales y Métodos.....	88
5.3.1	Condiciones iniciales y montaje experimental.....	88
5.3.2	Monitoreo y procesamiento de los índices de estabilidad y madurez.....	89
5.4	Resultados y Discusión.....	91
5.4.1	Comportamiento del proceso.....	91
5.4.2	Evaluación de los índices de estabilidad y madurez en el proceso.....	92
5.4.3	Comparación entre indicadores de estabilidad y madurez del producto.....	94
5.5	Conclusiones y Recomendaciones.....	96
6	CONSIDERACIONES FINALES.....	97
6.1	Conclusiones Generales.....	97
6.2	Contribución a la teoría.....	99
6.3	Contribución a la política.....	100
6.4	Contribución a la práctica.....	100
6.5	Futuro trabajo.....	101
7	REFERENCIAS.....	102

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Descripción del rol de organismos que intervienen en el proceso de compostaje	7
Tabla 2. Tasas de degradación microbiana para un rango de materiales.....	8
Tabla 3. Relación C/N de diferentes materiales orgánicos reportada por varios autores	9
Tabla 4. Principales propiedades fisicoquímicas del compost	12
Tabla 5. Métodos comunes para determinar la estabilidad y la madurez del producto	13
Tabla 6. Porcentaje en peso de los biorresiduos en la composición física en los RSM en diferentes países	15
Tabla 7. Características fisicoquímicas de los biorresiduos, residuos de alimentos, de frutas y de vegetales.....	16
Tabla 8. Características iniciales recomendadas para las materias primas en el compostaje	16
Tabla 9. Experiencias de evaluaciones de la calidad del producto proveniente del compostaje de biorresiduos	18
Tabla 10. Límites permisibles de metales pesados para uso del compost reportadas en diferentes normas	19
Tabla 11. Reportes de usos del producto proveniente del compostaje de biorresiduos	19
Tabla 12. Experiencias de aplicación de la dinámica de sistemas en la gestión de residuos sólidos	22
Tabla 13. Métodos para la recolección de información de aspectos de funcionamiento de los sistemas	23
Tabla 14. Estudios revisados para la identificación de los elementos clave del funcionamiento del compostaje.....	24
Tabla 15. Información de los municipios con las instalaciones de compostaje en el Valle del Cauca.....	26
Tabla 16. Información de los procesos de transformación de biorresiduos en las PMRS del Valle del Cauca	27
Tabla 17. Composición física de la materia prima que se somete a transformación en las PMRS	27
Tabla 18. Análisis de calidad de la materia prima en las instalaciones de compostaje del Valle del Cauca	27
Tabla 19. Calidad de productos de procesos de transformación de los bioresiduos en el Valle del Cauca	28
Tabla 20. Metales pesados en productos de transformación de bioresiduos en el Valle del Cauca	29
Tabla 21. Composición física de la materia prima del compostaje en Versalles.....	41
Tabla 22. Materiales que integran cada categoría en la materia prima del compostaje de biorresiduos.....	43
Tabla 23. Documentos de referencias empleados para comparar la calidad de los biorresiduos	44
Tabla 24. Herramienta para selección de materiales para mejorar la calidad de los sustratos	45
Tabla 25. Composición física de los sustratos sometidos a compostaje	46
Tabla 26. Calidad fisicoquímica de la materia prima y su comparación con la reportada en otros estudios	48
Tabla 27. Correlación entre parámetros físicos y fisicoquímicos de la materia prima del compostaje	53
Tabla 28. Intervalos de confianza para la materia prima del proceso de compostaje.....	54
Tabla 29. Reportes de acondicionamiento del sustrato en el compostaje de biorresiduos.....	58
Tabla 30. Experiencias de adición de enmiendas alcalinas para el control del pH del sustrato	59
Tabla 31. Reportes de investigaciones sobre las tasas de aireación en el compostaje	60
Tabla 32. Identificación de los experimentos y composición de los tratamientos	62
Tabla 33. Descripción de los experimentos y de las unidades experimentales	64
Tabla 34. Análisis de calidad de los productos en los experimentos desarrollados.....	65
Tabla 35. Resultados de calidad de los sustratos empleados en los experimentos	67
Tabla 36. Información general del monitoreo de las unidades experimentales	68
Tabla 37. Parámetros de calidad fisicoquímica y microbiológica del producto de los seis experimentos.....	79
Tabla 38. Contenido de metales pesados en los productos de los experimentos 1, 5 y 6.....	82
Tabla 39. Criterios y pruebas para determina la estabilidad y madurez del compost.....	87
Tabla 40. Pruebas de estabilidad y madurez a nivel de laboratorio y en sitio.....	89
Tabla 41. Resultados de la evaluación de los índices de estabilidad y madurez.....	92

Tabla 42. Comparación de los resultados de la aplicación de los índices de estabilidad y madurez	95
--	----

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Estructura del documento y esquema metodológico de la investigación	2
Figura 2. Transformación del N durante el proceso de compostaje	5
Figura 3. Esquema de manejo de RSM que incluye tratamiento biológico como el compostaje	24
Figura 4. Subsistema calidad del producto y comercialización en el compostaje de biorresiduos en municipios menores de países en desarrollo	31
Figura 5. Integración del subsistema gestión empresarial al análisis del compostaje de biorresiduos en municipios menores de países en desarrollo	32
Figura 6. Integración del subsistema calidad de los biorresiduos al análisis del compostaje de biorresiduos en municipios menores de países en desarrollo	33
Figura 7. Integración del subsistema desarrollo tecnológico local al análisis del compostaje de biorresiduos en municipios menores de países en desarrollo	34
Figura 8. Estrategias para mejorar el funcionamiento del compostaje de biorresiduos en países en desarrollo	36
Figura 9. Análisis de influencia y dependencia de las estrategias propuestas.	38
Figura 10. Control del proceso de compostaje de biorresiduos analizando la variabilidad de la materia prima	42
Figura 11. Variación de los parámetros durante las jornadas de muestreo	49
Figura 12. Aplicación de la herramienta para valorar los potenciales materiales de soporte o enmienda.....	55
Figura 13. Evaluaciones desarrolladas para mejorar el proceso de compostaje y la calidad del producto	61
Figura 14. Comportamiento de la temperatura en las unidades de los seis experimentos	70
Figura 15. Comportamiento del pH en las unidades de los seis experimentos.....	74
Figura 16. Comportamiento de Sólidos Volátiles en las pilas de los experimentos 2 (a) y 6 (b).....	77
Figura 17. Índice de Germinación promedio para los productos de las unidades experimentales 2, 3, 4 y 6.	81
Figura 18. Comportamiento de la temperatura en el proceso de compostaje.....	91

LISTA DE ANEXOS

Anexo A. Matriz de influencia y dependencia de las estrategias para mejorar los sistemas de compostaje	125
Anexo B. Indicadores para los elementos del sistema de compostaje de biorresiduos	126
Anexo C. Mediciones de los parámetros fisicoquímicos y composición física de los sustratos	127
Anexo D. Información recolectada durante la caracterización y muestreo de materia prima del compostaje	129
Anexo E. Formato de inspección aplicado a establecimientos con potenciales materiales de soporte o enmienda.	130
Anexo F. Aplicación de la herramienta para la selección de materiales de enmienda y soporte	131
Anexo G. Calidad fisicoquímica de la materia prima para los dos días de monitoreo	136
Anexo H. Reportes de laboratorio de la caracterización de los materiales de enmienda y de soporte.....	137
Anexo I. Valores p de las pruebas estadísticas efectuadas a los productos de los experimentos	141

0 INTRODUCCIÓN

El compostaje se ha constituido en la tecnología de mayor aplicación para el tratamiento y aprovechamiento de los biorresiduos en municipios menores de países en desarrollo; sus principales ventajas frente a otras opciones tecnológicas son su bajo costo y sencillez en la operación (Li et al., 2013, Sundberg y Navia, 2014). Además, el producto del compostaje tiene valor nutritivo, que puede ayudar a restablecer la materia orgánica y fertilidad del suelo y al control de enfermedades de la planta (Hargreaves et al., 2008). No obstante, experiencias en países en desarrollo (OPS, 2005; Zurbrügg et al., 2005; Barreira et al., 2006; Ekelund y Nyström, 2007) y en el contexto colombiano (SSPD, 2008; Marmolejo, 2011) muestran que la aplicación del compostaje no ha sido efectiva y que los municipios menores a 15.000 habitantes (rango poblacional clasificado por la OPS et al. (2010) como municipios menores), presentan las condiciones más críticas, lo que puede generar impactos ambientales y sanitarios negativos y ocasionar el cierre de las instalaciones de compostaje, poniendo en riesgo las inversiones.

Teniendo en cuenta lo expuesto y ante los beneficios sociales y ambientales del compostaje, en esta investigación se profundizó en el conocimiento de los elementos que condicionan el funcionamiento de las instalaciones de compostaje de biorresiduos en municipios menores de países en desarrollo, identificando y evaluando estrategias que favorezcan la optimización de los sistemas. A pesar de los avances en la implementación de la tecnología, se observa que aún hay espacio para avanzar en el conocimiento de la ciencia y tecnología de compostaje (Sundberg y Navia, 2014), principalmente en la adaptación y desarrollo tecnológico para su aplicación en el contexto de estudio, que de no ser tenidos en cuenta, amenazan la sostenibilidad de la aplicación de la tecnología.

El **objetivo general** de la investigación fue evaluar estrategias para optimizar el proceso y la calidad del producto del compostaje de biorresiduos en municipios menores a 15.000 habitantes de países en desarrollo. Se plantearon los siguientes **objetivos específicos**:

- Analizar el funcionamiento del compostaje de biorresiduos en municipios menores, considerando el contexto de países en desarrollo.
- Estudiar la variabilidad de la composición física y la calidad fisicoquímica de la materia prima del compostaje de biorresiduos, planteando opciones para su mejoramiento.
- Evaluar opciones de mejoramiento del proceso y la calidad del producto del compostaje de biorresiduos, considerando las características de las materias primas y las condiciones del contexto.

El desarrollo de los objetivos de la investigación fue estructurado en seis capítulos, como se observa en la [Figura 1](#). El Capítulo 1 aborda los fundamentos del proceso de compostaje y las características del compostaje de biorresiduos. Se tratan aspectos como fases y parámetros del proceso de compostaje, aspectos microbiológicos, características de los sustratos, tecnologías para el contexto de estudio y parámetros de calidad y usos del producto.

En el capítulo 2 se realiza un análisis del funcionamiento del compostaje de biorresiduos en municipios menores de países en desarrollo, teniendo en cuenta el seguimiento al funcionamiento de cinco plantas de compostaje en el Valle del Cauca y la revisión de experiencias documentadas a nivel nacional e internacional; esto permitió la identificación de los elementos clave que condicionan la puesta en marcha y operación de las tecnologías y facilitó la aplicación de herramientas cualitativas del pensamiento sistémico para consolidar el análisis. De igual manera,

este capítulo plantea estrategias técnicas y no técnicas para mejorar el desempeño de las instalaciones de compostaje, identificando las de intervención prioritaria.

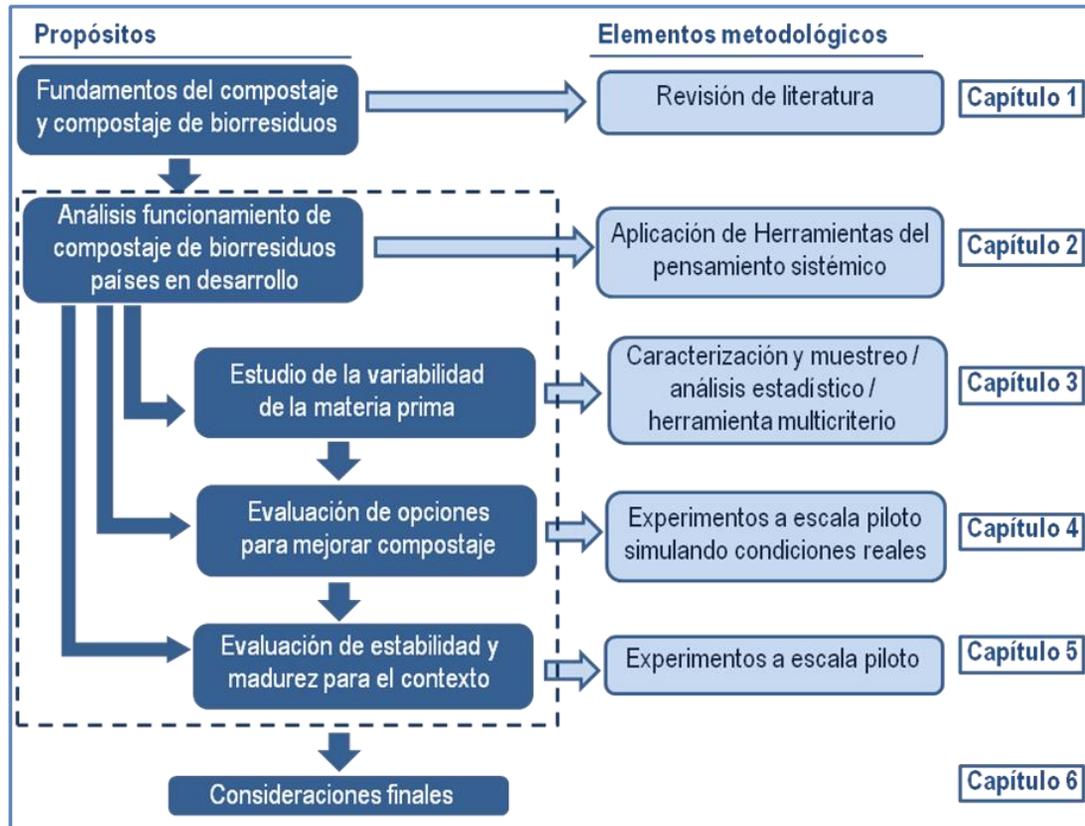


Figura 1. Estructura del documento y esquema metodológico de la investigación

El Capítulo 3 aborda el estudio de la variabilidad de la materia prima en las instalaciones de compostaje de biorresiduos. En este capítulo se analizó la variación de la composición física y las características fisicoquímicas de la materia prima y se tipificó la materia prima analizando sus condiciones predominantes, deficiencias o excesos y posibles efectos en el proceso de compostaje. Así mismo, se estudian las relaciones entre la composición física y las características fisicoquímicas, de manera que se puedan identificar esquemas de control y monitoreo in situ. Con la información generada se propusieron estrategias para mejorar la efectividad del proceso y la calidad del producto, a partir de la variabilidad de la materia prima.

En el Capítulo 4 se evalúan diferentes opciones para mejorar el compostaje de biorresiduos, considerando la variabilidad de la materia prima y las condiciones del contexto de estudio. En este capítulo fueron desarrollados seis experimentos que incluyen la incorporación de materiales de enmienda y de soporte, así como cambios en las condiciones operativas del proceso a través del incremento en la frecuencia de volteo. Se evaluó la influencia de dichas estrategias en el desarrollo del proceso y la calidad fisicoquímica del producto. Se analiza el cumplimiento de los estándares de calidad de los productos requeridos por la norma colombiana.

El Capítulo 5 se focaliza en evaluar la aplicación de pruebas de estabilidad y madurez del producto, que si bien no son requeridas por las normas de calidad del producto en el contexto de estudio, son fundamentales para el uso y comercialización del compost. En este capítulo se contrastan los resultados de pruebas de estabilidad y madurez, generalmente aplicadas en sitio para el monitoreo del proceso, con pruebas que presentan mayores requerimientos de laboratorio y que son de mayor complejidad.

Por último, en el Capítulo 6 se presentan las consideraciones finales, abordando las conclusiones generales del estudio, la contribución de la investigación a la teoría, a la política y a la práctica, y el planteamiento de futuras investigaciones y perspectivas a partir de este estudio. El documento finaliza con las referencias empleadas en la tesis y con nueve anexos que amplían aspectos específicos de la metodología y de los resultados.

La investigación fue financiada por la Universidad del Valle a través de los proyectos de investigación de convocatoria interna: “*Metodología para mejorar la calidad del compost obtenido con biorresiduos de origen municipal acorde con las condiciones agroambientales del contexto regional*” (2010 - 2012), “*Efecto de la variabilidad de la calidad de los sustratos en el compostaje de biorresiduos de origen municipal*” (2011 - 2012) y “*Optimización del proceso y la calidad del producto del compostaje de BOM en plantas de manejo de residuos sólidos*” (2012 - 2014). En el desarrollo de estos proyectos se contó con el soporte del grupo de investigación “**Estudio y Control de la Contaminación Ambiental – ECCA**” y con el acompañamiento de los grupos de investigación “**Ingeniería de los recursos Hídricos y Desarrollo de Suelos – IREHISA**” y “**Estadística Aplicada – INFERIR**” de la Universidad del Valle. El trabajo de campo también fue cofinanciado con recursos de la empresa “Cooperativa de Servicios Públicos Camino Verde APC” del municipio de Versalles, Valle del Cauca (Colombia). El estudio doctoral se desarrolló con la Beca - Crédito otorgada por el Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Innovación (COLCIENCIAS) y en la fase final de la escritura del documento con la comisión de estudios otorgada por la Universidad Industrial de Santander.

1 MARCO CONCEPTUAL

1.1 Fundamentos del Compostaje

1.1.1 Definición

El compostaje se define como la descomposición y estabilización biológica realizada por una población microbial diversa y en condiciones predominantemente aerobias de una mezcla de sustratos orgánicos, generando como principal producto un material estable, libre de patógenos y semillas, que puede ser aplicado de forma beneficiosa al suelo; adicionalmente se generan otros subproductos como CO_2 , H_2O , NO_3^- y $\text{SO}_4^{=}$ (de Bertoldi et al., 1983; Haug, 1993; Insam y de Bertoldi, 2007; Stentiford y de Bertoldi, 2010).

El proceso se desarrolla en las fases sólida, líquida y gaseosa; la sólida, representada por la partícula, interactúa con la fase acuosa que está adherida a su superficie, formando una biopelícula. En esta fase acuosa tienen lugar procesos bioquímicos como la oxidación de la fracción orgánica y el intercambio de O_2 y CO_2 con la fase gaseosa. La biopelícula contiene sustrato soluble ya presente o que es producto de la hidrólisis microbiana del sustrato insoluble y de los gases desprendidos en la fase gaseosa. El O_2 se difunde en la biopelícula hasta cierta profundidad debido a la resistencia interna de agua, por lo que se distinguen dos zonas en la fase acuosa: una fina externa aerobia y una gruesa interna anaerobia. En la anaerobia, el material insoluble se hidroliza enzimáticamente en sustrato soluble y después se transforma anaerobiamente por medio de fermentaciones en productos como ácidos grasos. Los productos resultantes de la fermentación y de la hidrólisis pueden ser oxidados en la zona aerobia. Por lo tanto, teóricamente la presencia de O_2 en concentraciones adecuadas, permitirá la completa degradación de todos los compuestos orgánicos a CO_2 y agua (Haug, 1993, Sundberg, 2003; Barrena, 2006).

1.1.2 Fases del proceso de compostaje

Según Chiumenti et al. (2005), en el proceso se distinguen dos fases, la primera denominada descomposición, comienza con la oxidación de la materia orgánica de rápida degradación y la segunda, denominada estabilización desarrolla la mineralización de moléculas de lenta degradación y la humificación de compuestos lignocelulíticos.

En la primera fase (mesofílica y termofílica), los microorganismos aerobios mesofílicos transforman compuestos de rápida degradación y ricos en energía (azúcares, proteínas, almidón y aminoácidos) a especies orgánicas e inorgánicas más sencillas, determinando el consumo de O_2 , la emisión de CO_2 y la producción de energía por el rompimiento de enlaces que es liberada en forma de calor, incrementando la temperatura de la masa (Chiumenti et al., 2005; Insam y de Bertoldi, 2007; Gajalakshmi y Abbasi, 2008; Stentiford y de Bertoldi, 2010). En esta fase se forman fitotóxicos como NH_3 y ácidos grasos volátiles de cadena corta (acético, propiónico y butírico), los cuales son metabolizados por los microorganismos (Smårs et al., 2002).

El incremento en la tasa de degradación permite alcanzar temperaturas termofílicas ($> 45^\circ\text{C}$) que facilita la reducción de patógenos (Stentiford y de Bertoldi, 2010) y el reemplazo gradual de los microorganismos mesofílicos por los termofílicos (Insam y de Bertoldi, 2007). La actividad biológica permanece alta hasta que disminuyen el suministro de nutrientes y la materia orgánica de rápida degradación. La duración de la fase depende del sustrato, la tecnología adoptada y las condiciones operacionales y ambientales (Díaz et al., 2002).

En la segunda fase (enfriamiento y maduración), el proceso es lento por la descomposición de moléculas más complejas, generando menos calor, declinación de la temperatura y pH ligeramente alcalino hasta el final del proceso (Diaz et al., 2002; Epstein, 2011). La población microbiana cambia de mesófilas a psicrófilas (bacterias y hongos) y los actinomicetos degradan lentamente almidón, celulosa, hemicelulosa y ligninas que son indispensables para la síntesis de sustancias húmicas (Stentiford y de Bertoldi, 2010). En esta fase, el producto se estabiliza biológicamente, aunque incluso después de esta fase, continúan ocurriendo procesos biológicos de efecto moderado en el producto (Chiumenti et al., 2005; Insam y de Bertoldi, 2007; Stentiford y de Bertoldi, 2010).

1.1.3 Transformación del Nitrógeno en el proceso

La transformación del N en el compostaje es uno de los factores más importantes que afecta la calidad del producto (de Guardia et al., 2010); las transformaciones más importantes son mineralización, volatilización, nitrificación, inmovilización y desnitrificación (Insam y de Bertoldi, 2007). La Figura 2 muestra el ciclo del N en el compostaje.

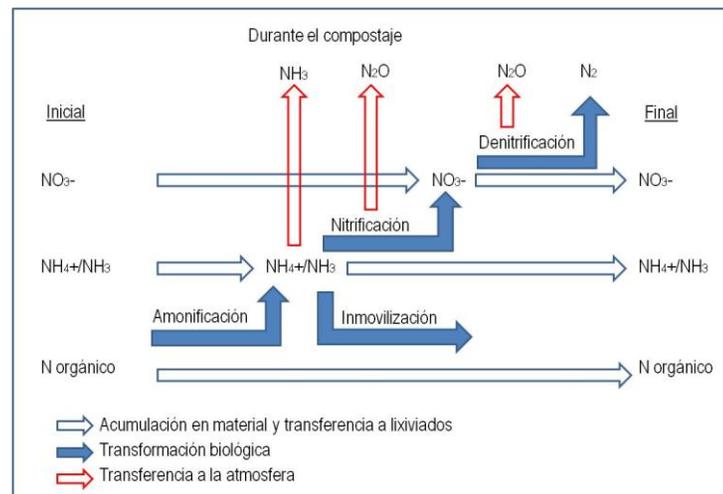


Figura 2. Transformación del N durante el proceso de compostaje

Fuente: de Guardia et al. (2010)

El $\text{N}_{\text{orgánico}}$ en los sustratos hace parte de la estructura de las proteínas y péptidos simples y puede ser usado por microorganismos (bacterias heterotróficas, hongos y actinomicetos) en su catabolismo aerobio favoreciendo la producción de CO_2 , H_2O , $\text{NH}_4^+/\text{NH}_3$, H_2S y energía (amonificación) (de Guardia et al., 2008; Stentiford y de Bertoldi, 2010). El NH_4^+ puede disociarse en NH_3 y H^+ a pH mayor de 7,5 unidades y temperaturas termófilas, situación que generalmente se presenta al inicio del proceso (Boldrin et al., 2009) o puede estar en disolución en forma de NH_4^+ , ser inmovilizado por los microorganismos que lo usan como alimento y lo transforman a $\text{N}_{\text{orgánico}}$ (Barrena, 2006).

El NH_3 puede ser oxidado por las bacterias nitrificantes a NO_2^- y NO_3^- a temperaturas menores de 40°C y condiciones de aireación favorables, o puede volatilizarse principalmente durante la aireación (Insam y de Bertoldi, 2007; Boldrin et al., 2009). En la etapa de temperatura termófila, rara vez se presenta la nitrificación, por lo que el NH_3 se acumula, volatiliza o se incorpora a la materia orgánica mediante procesos biológicos (De Bertoldi et al., 1983). Stentiford y de Bertoldi (2010) mencionan que la nitrificación puede ser inhibida por la cantidad excesiva de

NH_3 que restringe el crecimiento de bacterias nitrificantes o por la baja disponibilidad de O_2 . En efecto, la producción de NO_3^- en la primera fase del compostaje parece mayoritariamente trabajo de bacterias heterotróficas nitrificantes (Insam y de Bertoldi, 2007).

Por lo tanto, el NO_2^- y NO_3^- son relativamente menores debido a las bajas tasas de nitrificación o a la denitrificación; pueden ser asimilados por microorganismos en el proceso o perdidos por denitrificación en micro-nichos anaerobios siempre presentes, incluso en material bien oxigenado, y cuando el NH_3 ha sido oxidado a NO_3^- (Stentiford y de Bertoldi, 2010). En la denitrificación, el NO_3^- se reduce a N_2O y N_2 y es liberado; este proceso es realizado por bacterias denitrificantes termofilicas (*Bacillus* sp) y mesofilicas (*Pseudomonas*, *Paracoccus*) (Insam y de Bertoldi, 2007). Las emisiones de NH_3 y N_2O también varían con las condiciones del sustrato; cuando la C/N es alta, las emisiones son menores porque se tiende a inmovilizar y fijar el N (de Guardia et al., 2010).

En general, al principio del proceso el NH_3 puede ser alto, acorde con los materiales tratados e incluso aumentar en la fase termofilica; posteriormente, disminuye si la mezcla inicial y el desarrollo del proceso son correctos, y a su vez, se incrementa el NO_3^- en la maduración, siempre que se mantengan las condiciones aerobias (Barrena, 2006).

El N en el material usualmente decrece en el proceso por la volatilización del NH_3 , N_2O y N_2 ; sin embargo, en términos de peso seco, se incrementa debido a la mineralización de la materia orgánica (emisión de CO_2 y H_2O). Este incremento del N puede asociarse además a la actividad de bacterias que fijan el N, aunque estas últimas son inhibidas por la presencia de NH_3 y altas temperaturas (de Bertoldi et al., 1983; Insam y de Bertoldi, 2007).

1.1.4 Microbiología del proceso

Desde el punto de vista microbiológico, el compostaje se asemeja a un proceso en *batch* con cambios estables en la composición del sustrato y en las condiciones bioquímicas. La transformación del sustrato induce una alta actividad metabólica de microorganismos, generando cambios constantes en las condiciones del proceso (temperatura, pH, O_2 , humedad, disponibilidad de nutrientes) y por ende, en las etapas de crecimiento exponencial, estacionarias y sucesión de grupos de organismos (Insam y de Bertoldi, 2007).

En el proceso intervienen grupos de microorganismos con roles en la biooxidación y que tienen una sinergia debido a que algunos se alimentan de productos metabólicos de otros. Se clasifican en seis grupos: i) bacterias, ii) hongos, iii) actinomicetos, iv) protozoarios, v) lombrices y vi) larvas (Díaz et al., 2002). Los tres primeros son responsables de degradar los residuos orgánicos (Stentiford y de Bertoldi, 2010) mientras que los restantes juegan un papel activo en la transformación de estructuras orgánicas, haciéndolas disponibles a las bacterias (Chiumenti et al., 2005).

Los microorganismos operan en regímenes térmicos definidos que permiten seguir la evolución del proceso; las bacterias mesofilicas y termofilicas, y los actinomicetos y hongos, operan en la primera fase del proceso, degradando compuestos simples (monosacáridos, lípidos y péptidos) (Chiumenti et al., 2005) hasta que la alta temperatura inhibe su metabolismo y favorece la selección de bacterias termofilicas (Stentiford y de Bertoldi, 2010). Con la disminución de la temperatura, ocurre la restauración por esporulación de la actividad de microorganismos mesofilicos y psicofilicos (Chiumenti et al., 2005). En esta fase, las bacterias fermentativas, celulolíticas y proteolíticas comienzan la utilización de sustrato más complejo (lignina, celulosa, pectinas y hemicelulosas) (Chroni

et al., 2009) y se desarrollan eumicetos y actinomicetos, principales transformadores de celulosa y lignina (De Bertoldi et al., 1983). La Tabla 1 describe los microorganismos en el proceso de compostaje.

Tabla 1. Descripción del rol de organismos que intervienen en el proceso de compostaje

Organismo	Descripción
Bacterias	Están presentes en toda la biomasa y son dominantes, por entidad y tipo de actividad, prevaleciendo las heterotróficas; son susceptibles de rápido crecimiento en ambientes húmedos y presencia de compuestos de rápida degradación. Tienen la capacidad de operar en un amplio rango de valores de pH, pero se adaptan con dificultad a bajos valores. Son categorizadas con su rango de temperatura en psicrófilas (5 – 15 °C), mesófilas (25 – 45 °C) y termófilas (45 – 70 °C), pero pueden ser activas en rangos más amplios.
Hongos	Son responsables de la degradación de la materia orgánica en el suelo, principalmente en condiciones ácidas. Son similares en su metabolismo a bacterias heterotróficas y a menudo están en competencia. Estos organismos disuelven sustratos sólidos por la secreción de enzima extracelular hidrolítica. Se desarrollan en ambientes de baja humedad y en un amplio rango de pH (2 a 9 unidades). Pueden estar presentes como moho y levaduras; los mohos utilizan metabolismo aerobio, siendo importantes por la oxidación de materiales ricos en lignina. Las levaduras, fundamentalmente unicelulares, utilizan metabolismo aerobio y anaerobio y son importantes en la humificación. Son importantes en la degradación de hemicelulosa, celulosa y lignina.
Actinomicetos	Son aerobios, termófilos y similares a hongos y bacterias (enzimáticamente con mejor capacidad para degradar sustratos complejos). Son heterotróficos siendo su principal fuente de N, el N _{orgánico} y su fuente de C, la materia orgánica (lignina y celulosa). Estos microorganismos atacan la materia orgánica no degradada por los hongos y bacterias (quitina), prefieren un pH neutro y operan al final del proceso, degradando hemicelulosa, celulosa y lignina.
Algas	Son fotosintetizadores que se desarrollan a 0,1 m de la superficie de la pila; viven en sustratos húmedos y un pH neutro o ligeramente alcalino. Cuando la luz solar es insuficiente, pueden ser heterotróficos.
Cianofitas	Son microorganismos procariotas, similares a las bacterias, comúnmente llamados algas azul-verdosas, a pesar de que no son realmente un alga; fijan N atmosférico y viven en ambientes aerobios.
Protozoarios	Son organismos unicelulares móviles, principalmente depredadores de bacterias y de algunas otras especies. Requieren un ambiente húmedo y su rol en el proceso no es entendido completamente
Enzimas	Son proteínas especiales que tienen la función de catalizar las reacciones bioquímicas y se producen por la actividad de microorganismos. Se clasifican como extracelulares o intracelulares, las extracelulares hidrolizan las moléculas que no pueden penetrar la membrana celular debido a sus dimensiones, las intracelulares operan en el interior de la célula jugando un rol activo en la degradación de moléculas de pequeños tamaños.
Microfauna del compost	Estos organismos contribuyen con la degradación física de la materia orgánica y facilitan la acción de los microorganismos haciendo túneles que incrementan la porosidad del material y facilitan el mantenimiento de un ambiente aerobio. Además, producen excremento rico en compuestos orgánicos que son usados en el proceso.

Fuente: de Bertoldi et al. (1983), Chiumenti et al. (2005), Insam y de Bertoldi (2007); Stentiford y de Bertoldi (2010)

1.1.5 Parámetros del proceso de compostaje

La materia orgánica biodegradable sigue diferentes rutas metabólicas (mineralización, parcial degradación y humificación); alrededor del 50% es convertida a CO₂, H₂O, sales minerales y energía, un 20% tiene procesos metabólicos complejos con producción de sustancias húmicas y un 30% es parcialmente degradada (moléculas orgánicas menos complejas). Este proceso es condicionado por diversos parámetros como contenido de materia orgánica, relación C/N, porosidad, humedad, pH, temperatura, concentración de O₂ (Insam y de Bertoldi, 2007).

- Características del sustrato

En el compostaje se denomina sustrato al residuo orgánico a ser tratado; sus características fisicoquímicas, tales como la disponibilidad y balance de nutrientes para los microorganismos, determinan la tasa de transformación y la

factibilidad del proceso (Diaz et al., 2002). Entre las características químicas está el tamaño y estructura molecular del sustrato que definen la capacidad de asimilar nutrientes por los microorganismos (Diaz y Savage, 2007).

La mayoría de sistemas de compostaje usan una mezcla de materiales, los cuales generalmente presentan distintas tasas de biodegradación (Stentiford y de Bertoldi, 2010). Durante el proceso, compuestos de rápida degradación son transformados en compuestos más simples y en CO₂, H₂O, NH₃. Posteriormente, celulosa y hemicelulosa son utilizadas por la microflora del compost y finalmente, la lignina es sometida a degradación (hongos), aunque son resistentes a la descomposición incluso para microorganismos con sistema enzimático complejo (Gajalakshmi y Abbasi, 2008; Stentiford y de Bertoldi, 2010). La Tabla 2 presenta las tasas de degradación microbiana para un rango de materiales.

Tabla 2. Tasas de degradación microbiana para un rango de materiales

Tasa de degradación	Material orgánico
Alta	Azúcares
	Almidones, glucógeno, pectina
	Ácidos grasos y glicerol, lípidos, grasas y fosfolípidos
	Aminoácidos
	Ácidos nucleídos
	Proteínas
Lenta	Hemicelulosa y celulosa
	Quitinas
Usualmente resistente a degradación	Aromáticas y alifáticas de bajo peso moléculas
	Lignocelulosa
	Lignina

Fuente: Stentiford y de Bertoldi (2010); Epstein (2011).

- Relación Carbono – Nitrógeno (C/N)

El C y N son esenciales para los microorganismos pues son elementos estructurales y fuente de energía (Epstein, 2011); los microorganismos heterotróficos utilizan el C como fuente de energía y en la síntesis de constituyentes celulares; el N es un componente de las proteínas, ácidos nucleídos, aminoácidos, enzimas y coenzimas necesarias para el crecimiento y funcionamiento de las células (Tuomela et al., 2000; Gajalakshmi y Abbasi, 2008).

La relación C/N es un indicador del proceso asumiendo que C y N son biodegradables, sin embargo debe considerarse que el C_{orgánico} es de rápida, lenta o resistente a la degradación (Krogmann et al., 2010) mientras que el N está en forma de moléculas de proteína, rápidamente degradable (Haug, 1993; Chiumenti et al., 2005). Los microorganismos utilizan alrededor de 30 partes de C por parte de N, de las cuales se estima que 20 son oxidadas para apoyar requerimientos de energía y 10 para formación de células bacterianas (Stentiford y de Bertoldi, 2010).

El valor generalmente aceptado de C/N está entre 25 a 35 (Chiumenti et al., 2005), 20 a 25 (Adhikari et al., 2008), 25 a 30 (Stentiford y de Bertoldi, 2010) o 20 a 30 (Krogmann et al., 2010), aunque algunos autores mencionan que el proceso puede ser efectivo a C/N de menos de 20 (Chang y Chen, 2010) o incluso a C/N de 15 (Kumar et al., 2010), minimizando requerimientos de materiales complementarios para ajustar la relación inicial. Gajalakshmi y Abbasi (2008) concluyen que la C/N determina la inmovilización o mineralización en las primeras etapas del proceso.

Autores como de Bertoldi et al. (1983), Diaz y Savage (2007), Stentiford y de Bertoldi (2010), Krogmann et al. (2010) y Epstein (2011), indican que a $C/N > 30$, la tasa de descomposición es lenta por el poco N disponible para los microorganismos, mientras que a $C/N < 20$, el exceso de N es liberado en forma de NH_3 generando pérdidas de valor fertilizante del compost. Por lo tanto, es fundamental un equilibrio entre el N y el C, lo cual se puede lograr usando estrategias como la mezcla de residuos con características complementarias (Krogmann et al., 2010). La Tabla 3 presenta la relación C/N de diferentes materiales reportada por varios autores.

Tabla 3. Relación C/N de diferentes materiales orgánicos reportada por varios autores

Material / Residuo	de Bertoldi et al. (1983)	Dulac (2001)	Diaz et al. (2002)	UNEP (2005)	Chiumenti et al. (2005)	Enayetullah et al. (2006)	Epstein (2011)
Hojas	--	50	40 – 80	--	35 – 85	40 – 80	48
Aserrín	500 – 520	400	200 – 750	200 – 500	150	--	511
Poda	--	17	9 – 25	19	30	--	40 – 20
Res. Mercado	--	14-16	11 – 13	11 – 12	20	11 – 13	--
Césped	--	--	--	12 – 15	20	15	22,8
Estiércol bovino	17-19	16-25	11 – 30	18	25	--	15
Estiércol Pollo	--	--	12 – 15	--	8	2 – 4	--
Biorresiduos	25 – 45	34-80	--	--	10 – 12	34 – 80	13 – 32
Frutas	--	--	20 – 49	34,8	--	20 – 49	34,8
Alimentos	--	--	14 - 16	--	--	--	15,6

Durante el proceso, la C/N decrece por la oxidación del C y porque el N, elemento esencial de estructuras aromáticas, tiende a concentrarse en la biomasa. Una C/N muy baja en el producto, puede ser tóxica a las plantas por la posibilidad de liberarse NH_3 , mientras que una alta puede generar una competencia entre las raíces y los microorganismos del suelo por el N disponible (Chiumenti et al., 2005; Diaz y Savage, 2007).

- Porosidad del sustrato

La porosidad libre se refiere a la porción de espacio del poro que no está ocupada con agua (Epstein, 2011), que permite el intercambio gaseoso con la atmósfera, el almacenamiento del O_2 requerido por los microorganismos y la liberación de calor (Gajalakshmi y Abbasi, 2008). La porosidad depende de las características del sustrato, su humedad y el tamaño de partícula (Epstein, 2011). Teóricamente, las partículas de tamaño mínimo son susceptibles a un ataque microbial más rápido; sin embargo, dificultan mantener una porosidad adecuada (Diaz et al., 2002).

La porosidad libre puede estar entre 35 y 50% (Chiumenti et al., 2005) o entre 30 y 60% (Barrena, 2006), depende de la distribución de tamaño del material, fuerza estructural de las partículas y altura de la pila. Para mantener la porosidad libre, el tamaño de partículas debe estar entre 25 y 75 mm, que permite incrementar el área superficial para el contacto entre microorganismos y materia orgánica (Agnew y Leonard, 2003). Cuando se tienen partículas pequeñas o con humedades superiores a 60% (biosólidos o residuos de alimentos), se requiere el uso de *materiales de soporte* que suministran porosidad a la mezcla (Chiumenti et al., 2005).

- Contenido de humedad del sustrato

La humedad es esencial para mantener las actividades microbiales de transformación de moléculas orgánicas (disueltas en el medio) e intercambio de nutrientes a través de la membrana celular (Tiquia, 2005, Gajalakshmi y

Abbasi, 2008; Kumar et al, 2010). Además, tiene un significativo impacto en las otras propiedades físicas (Jiang et al., 2011). Normalmente, la humedad recomendada para el sustrato está entre 40 a 60% (Chiumenti et al., 2005) ó 55 a 65% (Stentiford, 1996); sin embargo puede variar acorde con el estado físico y tamaño de las partículas (de Bertoldi et al., 1983; Mohajer, 2008).

La humedad inferior a 40% limita la actividad biológica, haciéndola lenta y la superior a 60% impide la difusión de O₂ por saturación de los poros y generando condiciones anóxicas (Diaz y Savage, 2007; Sundberg y Jönsson, 2008). El agua formada en la transformación biológica es evaporada por la elevada temperatura, siendo necesaria la adición de agua para mantener los procesos biológicos (Chiumenti et al., 2005; Stentiford y de Bertoldi, 2010). El material con excesiva reducción de humedad aparenta un aspecto físico estable pero puede ser biológicamente inestable (Stentiford, 1996). El valor recomendado en el producto es de 30%, aunque depende de los requerimientos del uso.

- Concentración de Oxígeno

El compostaje es un proceso de oxidación biológica, en el que el O₂ es usado por los microorganismos como aceptor final de electrones para la respiración aerobia (de Bertoldi et al., 1983); en estas condiciones, la transformación de sustratos se caracteriza por el consumo de O₂ y la producción de CO₂, H₂O y calor (Ver (Ecuación 1.1). Aunque la cantidad teórica requerida de O₂ está determinada por el C a oxidar, puede ser impreciso debido a que se desconoce la fracción oxidable, refractaria y la inaccesible a microorganismos (Diaz y Savage, 2007).



Debido a la continua disminución de la concentración de O₂ en la primera fase, es necesario su suministro para mantener las actividades metabólicas, requiriéndose concentraciones de O₂ entre el 5 al 15% en la primera fase y del 1 al 5% en la segunda. Cuando la concentración de O₂ disminuye a valores inferiores, los microorganismos anaerobios comienzan a exceder a los aerobios y los procesos de respiración anaerobia predominan, generando malos olores y reducción de la temperatura (Haug, 1993; Diaz et al., 2002; Diaz y Savage, 2007). El mayor consumo de O₂ se presenta cuando los materiales de rápida degradación son metabolizados a alta tasa y refleja el nivel de actividad microbial en la masa (Stentiford y de Bertoldi, 2010). En la maduración hay un menor consumo de O₂ debido a que los materiales han sido consumidos, disminuyendo la actividad microbial (Chiumenti et al., 2005).

La oxigenación de la biomasa se alcanza por la introducción de aire en las pilas que asegura la concentración de O₂, la redistribución de masa y de energía en la pila, la disipación del exceso de calor y la liberación del vapor de agua y de gases atrapados en los espacios intersticiales que pueden inhibir las reacciones del proceso (Chiumenti et al., 2005; Gajalakshmi y Abbasi, 2008). La aireación además, está relacionada con la temperatura, debido a que: i) incrementa la actividad de los microorganismos, lo que genera un desprendimiento de energía e incremento en la temperatura; ii) favorece el enfriamiento al renovar el aire caliente por el frío; iii) puede provocar una pérdida excesiva de humedad y limitar el proceso, provocando una disminución de la temperatura (Diaz y Savage, 2007).

- Temperatura del proceso

El compostaje es un proceso exotérmico de degradación biooxidativa de moléculas orgánicas, las cuales contienen energía almacenada en sus enlaces que se libera cuando la molécula se transforma en otra más sencilla. Entre el 40 a 50% de la energía liberada es empleada por los microorganismos para la síntesis del ATP mientras que la

remanente es liberada en forma de calor. El calor es retenido en la masa al considerarse el residuo un autoaislante, provocando el incremento de la temperatura, que podrían alcanzar hasta los 90°C, inhibiendo el crecimiento microbial y causando lenta degradación de la materia orgánica (Diaz y Savage, 2007). La producción de calor en la primera fase depende estrictamente de las características del sustrato (Barrena, 2006).

El amplio rango de gradientes de temperatura también tiene un efecto en la tasa de degradación y en la población microbial que interviene en el proceso (Stentiford y de Bertoldi, 2010). La temperatura define la predominancia de los grupos de organismos (psicrofílica, mesofílica y termofílica) o la reducción de los mismos (por encima de 70°C) (Haug, 1993). De acuerdo con Stentiford y de Bertoldi (2010) a temperaturas entre 35 – 40 °C se presenta la máxima diversidad microbial, entre 45 – 55 °C la máxima tasa de degradación y mayores a 55 °C la máxima higienización.

La temperatura depende de la energía desprendida, las pérdidas (convección, radiación, conducción) y la capacidad de almacenar calor (relacionada con el calor específico y la conductividad térmica del material), que afecta sobre todo, cuando el desprendimiento de energía es bajo. La humedad y la cantidad de material mineral intervienen en el mantenimiento de la temperatura al final del proceso por su capacidad de almacenar calor (Trautmann y Krasny, 1997). De otro lado, dado que el mayor gradiente de temperatura se concentra en la parte central de las pilas, es necesario mover el material, de manera que las partes externas alcancen este gradiente (Insam y de Bertoldi, 2007).

- pH

El pH del sustrato y la producción de ácidos al inicio del proceso condicionan la presencia de determinados grupos microbianos y por ende la cinética del proceso y el tipo de reacciones (Sundberg y Jönsson, 2008; Yu y Huang, 2009); a pH entre 5,5 a 8,0 unidades se presenta la población microbiológica más variada (Diaz y Savage, 2007). Aunque no es usual modificar el pH del sustrato, Haug (1993), indica que valores ácidos requieren la incorporación de *materiales de soporte* que mejoren el ambiente para el crecimiento microbial.

En el proceso, la formación de CO₂ y de ácidos orgánicos provenientes de la degradación de materia orgánica carbonácea inciden en la disminución del pH y posteriormente, la liberación de CO₂ y la producción de NH₃ permiten su incremento a valores entre 8 y 9 unidades (Chiumenti et al., 2005; Smårs et al., 2002). La tasa de descomposición de ácidos orgánicos se incrementa cuando la concentración de O₂ es alta, incidiendo en el rápido aumento en el pH y en la generación de productos estables (Beck-Friis et al., 2003). En el proceso rara vez se presentan pH extremos por lo que no es usual incorporar amortiguadores (Diaz et al., 2002), aunque Diaz y Savage (2007) reportan que su uso en el compostaje de residuos de frutas, cuyo pH cae a 4,5 unidades, aceleró el proceso.

De acuerdo con Sundberg et al. (2004) y Lin (2008), la disminución y posterior incremento en el pH, se resumen así: i) disminución por la degradación microbial de los sustratos que produce ácidos orgánicos intermedios de cadena corta (láctico y acético); ii) disminución por la posible fermentación anóxica debido a la falta de suministro de O₂ en la primera fase; iii) posterior incremento causado por la descomposición del N, generando acumulación del NH₃ que disuelto en agua, forma NH₄⁺ alcalino; y iv) incremento por evaporación del CO₂ y de ácidos moleculares generados por descomposición de la grasa. Sundberg (2003) indica que la etapa de pH bajo puede acortarse manteniendo la temperatura baja (cerca de 35°C), incorporando compost al sustrato y adicionando sustancias alcalinas. Al final del proceso, el pH del material tiende a estar entre neutro y alcalino (Chiumenti et al., 2005).

1.1.6 Características del Compost

- Definición

El compost es el producto estabilizado e higienizado del compostaje, que es compatible para el crecimiento de plantas (Stentiford y de Bertoldi, 2010) y se caracteriza por ser un material con un proceso incompleto de humificación (Insam y de Bertoldi, 2007). Las sustancias húmicas en el material proceden de la transformación bioquímica de la materia orgánica (polimerización oxidativa de ácidos fenólicos y derivados de fenoles provenientes del catabolismo de la lignina, de taninos y de polifenoles) y de la síntesis microbiana (Chiumenti et al., 2005).

- Propiedades fisicoquímicas

El compost presenta propiedades químicas y físicas que determinan sus características y usos y afectan el crecimiento de las plantas. La Tabla 4 presenta las principales propiedades químicas y físicas del compost.

Tabla 4. Principales propiedades fisicoquímicas del compost

Parámetro	
Químicas	Carbono Orgánico Total (COT): es indicador de la concentración de materia orgánica, componente importante del suelo, que ayuda al mantenimiento de su estructura, la disponibilidad de nutrientes y la capacidad de retención de agua.
	Sólidos volátiles (SV): su contenido es aproximadamente igual al de materia orgánica del compost; no obstante, su estimación incluyen fuentes como plástico y caucho, las cuales deben considerarse en el valor reportado.
	Capacidad de intercambio catiónico (CIC): es una medida de la capacidad del compost para intercambiar cationes (K, Ca, Mg y Na) a superficies cargadas negativamente (OH ⁻ , COOH ⁻). Dado que el pH del compost aumenta, la CIC también se incrementa.
	N_{TOTAL}: puede variar significativamente debido a condiciones de materia prima, proceso, curado y almacenamiento.
	N Inorgánico: incluye NH ₄ ⁺ , NH ₃ y NO ₃ . El NH ₃ está usualmente en una muy pequeña porción del NH ₄ ⁺ y NH ₃ . Un compost inestable o inmaduro puede contener significativas cantidades de NH ₄ ⁺ que pueden volatilizarse en su manejo o almacenamiento. La forma de N inorgánico puede ser un indicador de la madurez del compost y permite identificar el N disponible para la planta.
	pH: se recomienda que el pH del compost esté entre 6,0 y 8,0; su valor final depende de las características de la materia prima, el proceso y la adición de enmiendas. Un producto con excesiva acidez o alcalinidad puede perjudicar las raíces de la planta, inhibiendo su desarrollo y crecimiento, y además influencia la disponibilidad de nutrientes para las plantas.
	Conductividad eléctrica (CE): es una medida de la salinidad, aunque no provee información del tipo de sales. Algunos aniones o cationes son nutrientes (Ca, Mg, SO ₄ o NO ₃) mientras que sales de Na, Cl o B pueden ser tóxicas para las plantas en elevadas concentraciones. Altos contenidos de sales afectan la germinación de semillas y las raíces y pueden llevar a la salinidad del suelo.
	Macronutrientes y Micronutrientes: A diferencia del K, solo una porción de P, Ca y Mg del compost puede estar disponible para las plantas. Productos con altas cantidades de bases intercambiables (como el Na intercambiable) pueden indicar posibles problemas con la infiltración del agua. En esas instancias, análisis de Ca y Mg intercambiable pueden determinar la necesidad de adicionar enmiendas al compost. Para diferentes aplicaciones de compost, puede ser necesario realizar el análisis de micronutrientes (Zn, Mn, Cu y Fe).
	Humedad: puede fluctuar por condiciones de la materia prima, el proceso y el almacenamiento. El compost con una humedad menor de 35% a menudo es difícil de manejar durante la aplicación del producto.
	Densidad aparente: varía entre 500 y 700 kg m ⁻³ y es afectada por la humedad, contenido de inorgánicos, tamaño de partícula y grado de descomposición. Usualmente, se incrementa en el proceso por el aumento en el contenido de cenizas y la reducción del tamaño de la partícula, reduciendo el drenaje y la porosidad del medio e incrementando la capacidad de retención de agua.
Física	Capacidad de retención de agua: es la cantidad de agua retenida en los poros después de la pérdida gravitacional por un tiempo específico. Es importante para la aplicación al suelo, pues contribuye con el mantenimiento del microclima y la retención de agua.
	Tamaño de partícula: es importante para el uso del producto, pues partículas pequeñas pueden limitar su aplicación en usos que requieren altos drenajes y partículas grandes (> 12 mm) limitan la incorporación de algunas propiedades al suelo.

Fuente: Sullivan y Miller (2001); Herity (2003); Dimambro et al. (2006); Tittarelli et al. (2007); Hargreaves et al. (2008).

- Indicadores de calidad del compost

La estabilidad y madurez son usados para definir el grado de descomposición de la materia orgánica y son clave para definir el uso del compost (Epstein, 2011). La *estabilidad* es una etapa en la descomposición de la materia orgánica y está relacionada con la respiración microbiana (Komilis y Tziouvaras, 2009). Un producto inestable tiene mayor potencial de generar olores, calentamiento y puede sustraer el N del suelo que normalmente está disponible para las plantas (Insam y de Bertoldi, 2007). Diferentes indicadores han sido empleados para determinar la estabilidad, sin embargo las pruebas respirométricas y los índices de humificación son de mayor precisión (Tittarelli et al., 2007); otros indicadores son: temperatura, autocalentamiento, actividad microbial, análisis de constituyentes biodegradables, CIC, contenido de nutrientes y de sustancias húmicas (Gajalakshmi y Abbasi, 2008).

La *madurez* es una condición química-orgánica del compost que describe su conveniencia para un uso particular y se relaciona con la presencia o ausencia de compuestos fitotóxicos para las plantas (NH_3 , metales pesados o ácidos orgánicos de cadena corta) (Sullivan y Miller, 2001; Epstein, 2011). La desaparición de la fitotoxicidad no siempre coincide con la consecución del grado requerido de estabilidad (Diaz et al., 2002). La medición de la madurez tiene como propósitos: i) evaluar el proceso y la calidad del producto y, ii) determinar la calidad del compost para un uso particular. Un compost inmaduro afecta el crecimiento de la planta por la inmovilización del N cuando la C/N es alta o por la toxicidad del N cuando es baja (de Bertoldi et al., 1983). De igual manera, por deficiencias de O_2 para las raíces, cuando el O_2 es utilizado por los microorganismos que metabolizan la materia orgánica (Komilis y Tziouvaras, 2009). La Tabla 5 describe algunos métodos comunes para estimar la estabilidad y la madurez.

Tabla 5. Métodos comunes para determinar la estabilidad y la madurez del producto

Tipo de Indicador	Descripción
Sensibilidad	El color y el olor son métodos para evaluar simultáneamente la estabilidad y madurez del producto; aspectos como el olor a suelo y el color marrón oscuro son empleados para determinar la estabilidad del producto.
Fitotoxicidad	El índice de germinación (IG) es una prueba de madurez que evalúa una combinación de factores fitotóxicos en el producto, determinando directamente la inhibición del crecimiento de plantas en determinadas condiciones ambientales. El IG depende de la semilla usada y no puede establecerse un umbral común para indicar la madurez de un producto.
Químicos	La C/N del producto debe estar entre 10 a 15 para ser estable para el suelo. Diversos autores plantean que la C/N no es un indicador confiable, debido a una gran variabilidad en los valores y que debe asociarse siempre a la C/N de la materia prima.
	La relación NH_4^+ y NO_3^- es indicador de madurez, debido a que el NH_4^+ a menudo declina con el incremento de la estabilidad y la producción del NO_3^- es más favorable cuando se presentan bajas tasa de respiración. No obstante, las concentraciones de NH_4^+ y NO_3^- son afectadas por el secado y re-humedecimiento en un compost inmaduro.
	Los valores alcalinos del producto son indicadores de la estabilidad del compost (por el incremento del pH al final del proceso) mientras que los ácidos, comunes fitotóxicos, son producidos en etapas intermedias e indican inmadurez e inestabilidad.
	La respiración está relacionada con la actividad metabólica de microorganismos, que respiran a altas tasas cuando hay materia orgánica biodisponible. Un amplio rango de protocolos de respirometría, han sido desarrollados basados en la producción de CO_2 , el consumo de O_2 o en la liberación de calor. No obstante, los ensayos respirométricos son afectados por parámetros como la temperatura, la humedad y las condiciones de incubación y preincubación.
	La humificación involucra transformaciones que conducen a la construcción de grupos funcionales fenólicos o a la incorporación de proteínas y carbohidratos en matrices fenólicas. En el proceso hay formación y acumulación de sustancias húmicas y, al mismo tiempo, decrecimiento en la fracción extraíble de sustancias orgánicas inestables, causadas por el consumo del material en el proceso de mineralización. El <i>método Sequi</i> , usado para determinar el índice de estabilización – humificación, está basado en la división de las sustancias orgánicas: no humificada, ácidos fúlvicos y ácidos húmicos.

Fuente: Barberis y Nappi (1996); Sullivan y Miller (2001); Chiumenti et al. (2005); Barrera et al. (2006a); Diaz y Savage (2007); Gajalakshmi y Abbasi (2008); Mohajer (2008); Komilis y Tziouvaras (2009)

- Aplicaciones del compost e influencia sobre la fertilidad

Las aplicaciones más importantes del compost son como enmienda o acondicionador del suelo, fertilizante para cultivos, medio de crecimiento en viveros, jardinería y en recuperación y remediación de suelos. En cada uso se requiere un producto de características fisicoquímicas diferentes (Sullivan y Miller, 2001), que determinan el grado de aceptación del compost. Los criterios de calidad del compost están en función de sus propiedades: i) químicas (nutrientes, elementos traza, sales y compuestos orgánicos), ii) biológicas (estabilidad, madurez y patógenos), iii) físicas (inertes y tamaño de partícula) (Krogmann et al., 2010; Epstein, 2011).

De otro lado, el uso del compost ha demostrado que afecta positivamente las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo (Epstein, 2011); no obstante, la variedad y complejidad de los componentes fisicoquímicos y biológicos en el compost y en el suelo, dificultan la comprensión de los efectos directos e indirectos de su aplicación en las propiedades del suelo (Tittarelli et al., 2007). En relación con la contribución de la aplicación del compost al tipo de fertilidad, autores como Tittarelli et al. (2007), Gajalakshmi y Abbasi (2008), Iqbal et al. (2010) y Epstein (2011) plantean los siguientes aspectos:

- Fertilidad física: contribuye con el mantenimiento de la estructura del suelo y restituye materia orgánica que puede haber sido reducida por la práctica intensiva de la agricultura. Diversos autores (Canet y Pomares, 1995; Goyal et al., 2005; Tejada y González, 2007; Farrell y Jones, 2009) han mostrado el mejoramiento en propiedades como la estructura (agregación), CIC, capacidad de retención de agua y permeabilidad debido a una mejora en la macro-porosidad. Otros efectos positivos son la reducción de la erosión del suelo en áreas con pendientes, incremento de la capacidad de retención de agua y reducción de compactación de suelos arcillosos.
- Fertilidad química: La cantidad y calidad de materia orgánica adicionada al suelo influencia la tasa en que ésta es mineralizada. La lenta liberación de nutrientes desde el compost incrementa el rendimiento de los cultivos en los años posteriores a su aplicación. El N del compost es un 85 a 90% orgánico y el resto inorgánico y disponible inmediatamente para las plantas. El P es un nutriente esencial para las plantas y su baja concentración y solubilidad en el suelo hacen de éste un nutriente crítico que limita el crecimiento de la planta. El compost contiene entre 0,2 a 2,0% de P (materia seca) y generalmente, la aplicación de tasas determinadas a satisfacer las necesidades de N de las plantas, es suficiente para la absorción del P por las plantas. La concentración de nutrientes como el N, P y el K, puede algunas veces no ser suficiente para proveer completa soporte nutricional para los cultivos. De esta manera, dada la lenta tasa de mineralización del compost y la necesidad de disponibilidad de N fertilizante a las plantas, se ha sugerido la adición de fuentes de N y P al compost.
- Fertilidad biológica: El compost mejora la capacidad de la planta para absorber el N, por la promoción del nivel de mineralización del suelo, así como el incremento en la capacidad de absorción de componentes naturales del suelo. Esto se debe principalmente a la presencia de diversas especies de bacterias en el compost, que es favorecida por las características fisicoquímicas del producto, haciéndolo un sustrato ideal para el crecimiento de diferentes grupos microbiales. Para la fertilidad biológica del suelo es importante que la comunidad microbial en el compost pertenezca a grupos fisiológicos de celulolíticos, pectinolíticos, proteínolíticos, nitrificantes y aquellos que contribuyan en su conjunto, al ciclo de nutrientes en el suelo.

1.2 Compostaje de biorresiduos provenientes de residuos sólidos municipales (RSM)

1.2.1 Características de los biorresiduos

Los biorresiduos son la fracción orgánica biodegradable de los residuos sólidos municipales (RSM) y denota los materiales que han sido separados en la fuente y recolectados selectivamente antes de introducirlos a la cadena de manejo de residuos (Veeken et al., 2007). Los biorresiduos provienen de residuos de jardín, de comida pre y posconsumo de las viviendas y de establecimientos comerciales (UNEP, 2010). Se excluyen los residuos de agricultura y forestales, estiércoles animales, biosólidos u otros biodegradables (textiles, papel y madera) (CEC, 2008). La [Tabla 6](#) presenta la proporción de biorresiduos presentes en varios lugares del mundo.

Tabla 6. Porcentaje en peso de los biorresiduos en la composición física en los RSM en diferentes países

Lugar	Biorresiduos (%)	Fuente
Estados Unidos	30	Troschinetz y Mihelcic (2009)
Países de la Unión Europea	40	Eurostat (2009)
Países en desarrollo	55	Troschinetz y Mihelcic (2009)
América Latina y el Caribe (ALC)	50 - 70	OPS (2005)
Colombia	65	MAVDT (2007)
Cabeceras municipales con PMRS (Valle del Cauca)	51 – 70	Marmolejo (2011)

Dado que los biorresiduos están compuestos por mezclas de diversos materiales, presentan proporciones distintas de proteínas, azúcares, polímeros naturales y contenidos variados de celulosa, pectina, almidón y lignina (de Bertoldi et al., 1983), que afectan la degradación biológica. Iacovidou et al. (2012a) indican que un amplio rango de factores geo-demográficos (localización, estilos de vida, hábitos de preparación de alimentos y condiciones socio-económicas), pueden afectar la cantidad y la composición de los biorresiduos; además señalan que los residuos de alimentos son la mayor fracción de los RSM, con proporciones de 50%, 46%, 41% y 29% para países de bajo, medio bajo, medio alto y alto ingreso económico respectivamente, mostrando la posible predominancia de este tipo de residuo de alimentos en las plantas de compostaje de países en desarrollo.

Los residuos de alimentos presentes en los biorresiduos incluyen residuos crudos como cáscaras y restos de frutas y de vegetales, así como alimentos semi-cocidos o cocidos. Este tipo de residuos es altamente variable por su naturaleza y sus características fisicoquímicas (Zhang et al., 2007; Iacovidou et al., 2012b). Iacovidou et al. (2012b) mencionan que los vegetales son ricos en carbohidratos y algunos como las espinacas y el brócoli también son ricos en proteínas. Las frutas están influenciadas por su variedad y madurez y son ricas en carbohidratos y en menor cantidad en proteínas y lípidos. A pesar de la diversidad en la composición de estos residuos y el efecto en su biodegradabilidad, el predominio del C lo hace altamente degradable (Iacovidou et al., 2012b).

La variabilidad temporal en las características fisicoquímicas de los biorresiduos en instalaciones de compostaje está asociada entre otros aspectos a la dinámica socioeconómica de la población y condiciones climáticas (Ward et al., 2005; Neves et al., 2009); esta variación incide en su calidad, que junto con las condiciones del proceso, modifican la tasa de transformación de la materia orgánica (Kaboré et al., 2010) y por ende, pueden incidir en el diseño y operación del proceso.

Dado que los biorresiduos que ingresan a una instalación de compostaje tienen características fisicoquímicas variables, es fundamental para el control del proceso identificar patrones de comportamiento de la variabilidad, que permitan ajustar sus características (Adhikari et al., 2008). La predominancia de residuos de alimentos requiere una cuidadosa selección de tecnología y adecuados controles en el proceso, debido a sus características húmedas, alto contenido de proteínas y rápida degradación (Krogmann et al., 2010; Iacovidou et al., 2012b) (Ver Tabla 7).

Tabla 7. Características fisicoquímicas de los biorresiduos, residuos de alimentos, de frutas y de vegetales

Material	Humedad (%)	SV (%)	C/N	N (%)	Estructura	Fuente
Biorresiduos	64 – 77	56 - 89	17 – 27	1,2 – 2,3	Pobre	Krogmann et al. (2010)
	76	89	22	1,9	Pobre	Krogmann et al. (2010)
Residuos de alimentos	69	--	14 - 16	1,9 – 2,9	--	Diaz et al. (2002)
	--	26,4	14,8	3,16	--	Zhang et al. (2007)
	80	75	15,6	3,2	--	Epstein (2011)
Residuos de frutas	62 – 88	--	20 – 49	0,9 – 2,6	--	Diaz et al. (2002)
	78,7	--	34,8	1,52	--	Tchobanoglous et al. (1994)
Residuos vegetales	--	--	11 – 13	2,5 – 4,0	---	Diaz et al. (2002)

La identificación de la variabilidad de los sustratos y de las características fisicoquímicas de los mismos, permite proponer medidas de operación, control y monitoreo del proceso, como la incorporación de materiales de soporte y/o de enmiendas para mejorar características como humedad, C/N, porosidad y pH de los sustratos. La Tabla 8 contiene las características iniciales de las materias primas recomendadas por varios autores.

Tabla 8. Características iniciales recomendadas para las materias primas en el compostaje

Parámetro	USEPA (1995)	Agnew y Leonard (2001)	Dulac (2001)	Chiumenti et al. (2005)	Enayettullah et al. (2006)	Neklyudov et al. (2008)
C/N	30	30 – 40	25 – 30	25 – 35	25 – 40	20 – 30
Humedad	50 – 60	50 – 65	40 – 60	40 – 60	40 – 60	55 – 65
pH	6,0 – 8,0	No dato	No dato	5,5 – 8,0	No dato	7,5 – 7,8

Un **material de soporte**, es el material (orgánico o inorgánico) utilizado generalmente para controlar la humedad, suministrar porosidad y soporte estructural y mejorar la aireación o movimiento del aire en la mezcla. Un **material de enmienda** es el adicionado al sustrato o al producto final para mejorar el desarrollo del proceso o la calidad del producto; por lo tanto, se utiliza para mejorar las características químicas de los materiales, tales como deficiencias en N, C o algún otro elemento (Epstein, 2011). El **co-compostaje** se denomina al proceso que involucra dos sustratos con el propósito de mejorar la eficiencia del proceso y la calidad del producto. También es usual involucrar el término **aditivo** definido como una mezcla de diferentes tipos de microorganismos, nutrientes minerales, formas de C fácilmente disponibles, enzimas y compuestos para balancear el pH; son utilizados para mejorar la actividad microbiana cuando los aditivos entran en contacto con el material a compostar (Gabhane et al., 2012). En general, distintos materiales han sido empleados para controlar la humedad, la C/N, la porosidad y amortiguar los ácidos orgánicos en el compostaje de biorresiduos, tales como virutas de madera, paja, aserrín, cascarilla de arroz, salvado de arroz y pasto picado (Haug, 1993; Kim et al., 2008; Adhikari et al., 2009; Hubbe et al., 2010; Iqbal et al., 2010) y cuyas experiencias son presentadas en la Sección 4.2.1.

De otro lado, el compostaje de biorresiduos requiere de la separación en la fuente y la recolección selectiva para reducir la presencia de contaminantes que afectan la calidad del producto y comprometen su uso (Barreira et al., 2006; Hargreaves et al., 2008; López et al., 2010). La recolección está influenciada por el tipo de recipiente empleado, las instrucciones de clasificación a los usuarios, la frecuencia de recolección (Hansen et al., 2007), las fluctuaciones en la producción de residuos y la proporción de residuos de alimentos (Ward et al., 2005).

1.2.2 Tecnologías de compostaje de biorresiduos aplicables al contexto de estudio

El compostaje se ha desarrollado utilizando diferentes métodos, cuya selección depende de los costos de inversión y de operación y mantenimiento, tiempo requerido para alcanzar la estabilidad y madurez del producto, disponibilidad de área y características de los materiales a procesar (Haug, 1993; Ruggieri et al., 2008). En general, se pueden distinguir dos tipos de sistemas de compostaje, sistemas abiertos y sistemas cerrados; los primeros se caracterizan por desarrollarse al aire libre o en construcciones parcialmente cerradas, mientras que los segundos se instalan en ambientes confinados, donde es posible el control del gas generado (Haug, 1993; Chiumenti et al., 2005; Díaz et al., 2007b). Li et al. (2013) indican que en sistemas cerrados, se requiere mayor inversión inicial y se consume más energía, sin embargo se requiere menos espacio y son sistemas más controlables; en los sistemas abiertos generalmente se presentan mayores picos de temperatura que se mantienen por más tiempo, no obstante se presentan dificultades relacionadas con la generación de lixiviados y emisiones gaseosas y olores.

El sistema a usar depende de aspectos como el sitio de localización, el tipo de sustrato, la escala de operación, el entrenamiento de los operarios y equipos disponibles (Gajalakshmi y Abbasi, 2008). En países en desarrollo, las opciones que han prevalecido son los sistemas abiertos aplicando configuraciones tipo hileras o pilas de dimensiones variables y se caracteriza por tecnologías más intensivas en mano de obra. Con respecto al método para proveer O₂, se pueden dividir en aireación pasiva de hileras estáticas (APHE), aireación forzada de hileras estáticas (AFHE) y aireación con volteo mecanizado o manual (Dulac, 2001; Lin, 2008; Shen et al., 2011). Haug (1993), Díaz et al. (2007b) y Krogmann et al. (2010) realizan una descripción detallada de las tecnologías.

El método de volteo facilita la homogenización del material y la redistribución de los microorganismos, la humedad y los nutrientes, a la vez que reduce el tamaño de las partículas y expone nuevas superficies al ataque de microorganismos (Ekelund y Nyström, 2007; Krogmann et al., 2010). De otro lado, Lin (2008) indica que con el método AFHE se reduce el tiempo del proceso debido a que se mantiene un ambiente favorable continuo en el proceso.

1.2.3 Características, uso y comercialización del compost proveniente de biorresiduos

La calidad final del producto proveniente de biorresiduos está influenciada por las características de la materia prima (procedencia, nivel de separación, grado de contaminación), el desarrollo del proceso (operación, tecnología, equipamiento, funcionamiento y organización) y el tiempo de maduración. Por lo tanto, la calidad debe controlarse tanto en el producto como en las materias primas y en el proceso (Hargreaves et al., 2008; Krogmann et al., 2010). El producto debe cumplir estándares de calidad que lo hagan competitivo con productos alternativos de fertilización (Tittarelli et al., 2007) y permitan emplearlo de manera segura en actividades como la producción de alimentos (Farrell y Jones, 2009). La Tabla 9 presenta algunas experiencias de evaluación de la calidad del producto del compostaje de biorresiduos.

Tabla 9. Experiencias de evaluaciones de la calidad del producto proveniente del compostaje de biorresiduos

Autor	Descripción de la experiencia
Soumaré et al. (2002)	Evaluaron las características químicas y el valor agronómico del compost proveniente de biorresiduos de Malí y Bélgica. Encontraron que el pH estuvo entre neutral y ligeramente alcalino y que es aceptado para el crecimiento de plantas. Así mismo, presenta un contenido limitado de nutrientes (N y P), aunque indican que puede suplir requerimientos de nutrientes de las plantas. Concluyen que la aplicación de este material al suelo, puede incrementar el pH y el contenido C _{orgánico} , Ca, K, Mg y N y mejorar propiedades físicas del suelo (densidad aparente, capacidad de retención de agua y estructura).
Herity (2003)	Analizó 59 muestras de productos de 12 instalaciones de compostaje de biorresiduos en Irlanda. Encontró que el 50% de los productos son clasificados como compost clase I y II (los de mejor calidad) y observó en general, bajos niveles de metales pesados que cumplen con los estándares de calidad de la Unión Europea. Además concluye que los productos tienen suficiente cantidad de nutrientes y tienen buena capacidad de fertilización.
Barreira et al. (2006)	Evaluaron las características fisicoquímicas de los productos generados en las instalaciones de compostaje del estado de São Paulo. Los resultados muestran alto contenido de material inerte, principalmente en las instalaciones que emplean trituradoras y molinos para el fraccionamiento de los biorresiduos. El análisis de calidad de los productos permiten catalogarlos como mejoradores de suelo, debido a la baja concentración de nutrientes y materia orgánica.
Huerta et al. (2008)	Analizaron 25 muestras de compost de 15 instalaciones de compostaje de biorresiduos ubicadas en Cataluña (España). En términos generales, se observó que la mayoría de instalaciones no cumplen con los requerimientos de pH y de CE en el producto final, con valores superiores a los establecidos en las normas españolas. De igual manera, encontraron que mayoritariamente los productos cumplieron los límites permisibles para Zn, Cu, Cr, Ni, Pb y Cd. Respecto del contenido de materia orgánica, las instalaciones cumplen el valor mínimo de reporte y se observa que el 30% no alcanza a tener los valores mínimos de N requeridos por la norma.
Farrell y Jones (2009)	Hacen una revisión sobre el compost derivado de RSM, mencionando que en general, los productos son ricos en un amplio rango de nutrientes que pueden ser benéficos para mejorar el crecimiento de las plantas. Adicionalmente, indican que el alto nivel de algunos nutrientes como el Ca ⁺² , puede suprimir la absorción de metales pesados presentes en el compost.
Adekunle et al. (2010)	Evaluaron la calidad del producto del compostaje de biorresiduos en la ciudad de Abeokuta, Nigeria. Los productos se caracterizaron por tener alto pH y CE, baja concentración de nutrientes (N, P y K) que limita su potencial agronómico. No obstante, el contenido de metales pesados permitiría cumplir con los estándares establecidos en la Unión Europea, clasificando al producto como compost clase A.
Saha et al. (2010)	Evaluaron la calidad fisicoquímica del compost de biorresiduos de 29 ciudades de India. Encontraron que en general, se presenta un pH y CE en rangos aceptables y materia orgánica, N y P bajos. Los productos de sustratos separados en la fuente presentan mejor calidad fisicoquímica y menor contenido de metales pesados.
Zurbrügg et al. (2012)	Documentan la experiencia del aprovechamiento de biorresiduos en Gianyar en Bali (Indonesia). A pesar de no tener separación en la fuente y recolección selectiva, la evaluación del producto indica que el producto presenta buena calidad (pH, C/N, materia orgánica, N, P, K, C y Coliformes Fecales), cumpliendo con los estándares de la norma de Indonesia. Resaltan que el contenido de metales pesados es significativamente inferior a lo indicado en la norma.

Uno de los aspectos críticos del compost proveniente de biorresiduos está relacionado con la presencia de contaminantes e impurezas, que han desacreditado el producto y por ende sus posibilidades de una alta comercialización (Tittarelli et al., 2007). Hargreaves et al. (2008) y López et al. (2010) indican que un compost de calidad no se logra si el proceso no se realiza correctamente o las materias primas contienen impurezas o componentes indeseables, tales como metales pesados o compuestos orgánicos persistentes. El producto generado a partir del compostaje de residuos mezclados en el origen difícilmente es considerado compost (Chiumenti et al., 2005) y pueden tener efecto negativo en su calidad y en la aceptación por los agricultores restringiendo su aplicación (Zurbrügg et al., 2004). Adicionalmente, debe considerarse que la calidad del compost es variable por la heterogeneidad de los biorresiduos y por su posible contaminación y procesamiento (Tittarelli et al., 2007).

En relación con los metales pesados, su presencia en el producto depende de su concentración en los biorresiduos, de la posible contaminación a lo largo del proceso y de la concentración relativa debida a la disminución de materia orgánica (Soliva et al., 2008). Los metales pesados encontrados con mayor frecuencia en compost de biorresiduos son el Cd, Cr, Ni, Pb y Zn los cuales provienen de la mezcla de biorresiduos con metales ferrosos, cerámicas, cuero, polvo, textiles, cartón y papel (Tittarelli et al., 2007; Farrell y Jones, 2009). En diferentes países se han planteado normas que restringen el límite permisible de metales pesados (Ver Tabla 10).

Tabla 10. Límites permisibles de metales pesados para uso del compost reportadas en diferentes normas

Parámetro	Unidades	Colombia NTC 5167	India ^a	Reino Unido ^b	Italia ^b	EPA ^c	EC (Clase I) ^{c*}	España (Clase A) ^d
Arsénico	(As ppm)	41	--	--	--	15	--	--
Mercurio	(Hg ppm)	17	--	1,0	3,0	1,0	0,5	0,5
Cadmio	(Cd ppm)	39	5	1,5	3,0	1,5	0,7	0,7
Cromo	(Cr ppm)	1200	50	100	--	100	100	70
Níquel	(Ni ppm)	420	50	50	100	50	50	25
Plomo	(Pb ppm)	300	100	200	280	150	100	45
Zinc	(Zn ppm)	---	300	400	1000	350	200	200

Fuente: ^aSaha et al. (2010), ^bFarrell y Jones (2009), ^cHerity (2003), ^dSoliva et al. (2008)

Nota: * Límites críticos para metales pesados propuestos por la European Comission – Directiva para biorresiduos (Clase I)

La separación en la fuente de los biorresiduos puede ayudar a reducir la cantidad de contaminantes en la materia prima y contribuir con un producto de mejor calidad (Krogmann et al., 2010). En India, Saha et al. (2010) encontraron en 36 plantas de compostaje, que la recolección selectiva contribuyó a reducir los metales pesados en el producto final, comparado con las plantas que procesan materia prima mezclada. Soliva et al. (2008) encontraron resultados similares, reportando que en 22 de 58 plantas de compostaje en España, se procesan materiales separados en la fuente y recolectados selectivamente, y presentan niveles inferiores de metales pesados. En la Unión Europea, diez de los 26 países, excluyen los RSM mezclados para producir compost (Hogg et al., 2009).

Respecto del uso del compost de biorresiduos, se ha identificado que mejora la fertilidad del suelo, es fuente de nutrientes para las plantas, aporta materia orgánica y contribuye con la estructura del suelo y el mantenimiento de sus propiedades (Odlare et al., 2011). Los ensayos de Canet y Pomares (1995) y Farrell y Jones (2009) muestran que puede incrementar la actividad biológica del suelo y Celik et al. (2004) indican que altas aplicaciones de este producto mejoran la porosidad total, la penetración de agua, la circulación de aire, la retención de agua y la estabilidad de agregados del suelo. No obstante, los efectos beneficiosos en las propiedades del suelo dependen de la textura del suelo, condiciones de humedad y contenido original de materia orgánica (Weber et al., 2007), siendo necesario aplicar un producto acorde con los requerimientos del suelo.

El uso agronómico representa un mercado potencial para el producto por su valor nutritivo y potencial para mejorar la calidad del suelo (Farrell y Jones, 2009). Otros usos son los cultivos no alimentarios, jardinería y recuperación de suelos erosionados y contaminados (Saha et al., 2010). La Tabla 11 presenta reportes del uso del producto del compostaje de biorresiduos.

Tabla 11. Reportes de usos del producto proveniente del compostaje de biorresiduos

Autor	Descripción de la experiencia
Hargreaves et al. (2008)	Indican que la agricultura tiene un alto potencial para el uso del compost proveniente de los RSM. No obstante, esto depende de asegurar un producto de buena calidad, lo suficientemente maduro y de bajo contenido de metales pesados y de sales, para lo cual recomiendan el mejoramiento de la calidad de los sustratos, así como mayores controles durante el proceso.
Achiba et al. (2009)	Encontraron que la aplicación de compost proveniente de RSM y estiércol bovino en suelos calcáreos de Tunes y durante 5 años, incrementó la fertilidad del suelo, pero en el caso particular del compost proveniente de RSM, incrementó el contenido de metales pesados en la capa superficial del suelo. Resaltan la necesidad de separar las fracciones de residuos que contienen metales pesados para disminuir su efecto en la calidad del suelo.
Farrell y Jones (2009)	Plantean que el compost de biorresiduos puede ser usado para incrementar el rendimiento de las plantas en sitios de alta producción y en aquellos que requieren mejorar la calidad del suelo y la estabilidad estructural, reduciendo los riesgos de erosión. De otro lado, indican que el valor nutritivo de este producto y su potencial para mejorar la calidad del suelo, lo hacen ideal en la agricultura, teniendo en cuenta las precauciones para disminuir los riesgos sanitarios y ambientales.
Hogg et al. (2009)	Reportan que la agricultura es el mayor usuario del compost proveniente de biorresiduos en Europa, representando en promedio, el 50% de la demanda total de compost (En España representa el 88%). El sector agrícola acepta una gran cantidad de productos del tratamiento de los biorresiduos, sin necesidad de mezclarlos con otros materiales, para mejorar el suelo.
Fagnano et al. (2011)	Encontraron que la aplicación del producto tuvo un efecto positivo en la fertilización del suelo, fijación del C, contenido de materia orgánica del suelo y en la cantidad y calidad de la producción de lechuga; no obstante, la dosis aplicada debe estar acorde con la necesidad de N de los cultivos, con el propósito de reducir los riesgos de lixiviación del nitrato en época lluviosa.
Tognetti et al. (2011)	Evaluaron el crecimiento de las plantas (<i>Lolium Perenne L.</i>) aplicando compost de biorresiduos con diferentes modificaciones en la materia prima (trituration, la incorporación de virutas de madera, el co-compostaje con biosólidos y el vermicompostaje). Se incluyeron en las pruebas de crecimiento de las plantas, la fertilización con un material inorgánico y un blanco. Los resultados mostraron que el co-compostaje con biosólidos en relación con el compost convencional, fue más efectivo en el crecimiento de las plantas y además, presentó mejor calidad de los productos que los otros tratamientos (mayor contenido de nutrientes y concentración de materia orgánica, potencial de mineralización de nutrientes y crecimiento de la planta).

La comercialización del producto es importante para la sostenibilidad del compostaje; de acuerdo con Diaz et al. (2002), entre los principios para el mercadeo están: i) determinación de los posibles usos del producto; ii) identificación de usuarios potenciales (análisis de mercado); iii) sensibilización del usuario sobre las características, usos y beneficios del producto; iv) persuasión al usuario potencial para procurar el uso del producto y v) establecimiento de un programa de distribución satisfactoria. El productor debe garantizar al cliente que el producto estará disponible y sus especificaciones serán constantes. La continuidad del mercado depende de: la calidad del producto (agronómica y bajos niveles de contaminación), la disponibilidad (en términos de cantidad), las especificaciones constantes (en la composición y características) y el precio (acorde con la calidad del producto y los costos en el mercado).

En general, las experiencias documentadas muestran el potencial que ha tenido el aprovechamiento de biorresiduos para la producción de compost y su uso en actividades agrícolas; esta investigación considera propuestas que permitan mejorar la calidad del producto, de manera que se incremente su posibilidad de comercialización y mercadeo y contribuya, por ende, a la sostenibilidad de las instalaciones de compostaje de municipios menores de países en desarrollo.

2 ANÁLISIS DE LA APLICACIÓN DEL COMPOSTAJE DE BIORRESIDUOS EN PAÍSES EN DESARROLLO

2.1 Introducción

En países en desarrollo, los biorresiduos son la mayor fracción de los residuos sólidos municipales (RSM) (Hoornweg y Bhada-Tata, 2012); su degradación en rellenos sanitarios genera lixiviados y gases de efecto invernadero causantes de impactos ambientales y sanitarios. El compostaje, además de desviar los biorresiduos de la disposición final, genera un producto que incorpora materia orgánica y nutrientes al suelo y a las plantas (Odlare et al., 2011; Tognetti et al., 2011) y ayuda a conservar y a mejorar las condiciones del suelo.

El compostaje ha sido una de las opciones de mayor aplicación para el aprovechamiento de biorresiduos (Haug, 1993; Slater y Frederickson, 2001; Diaz et al., 2007; Joseph, 2007; Huerta et al., 2008); no obstante, en países en desarrollo, la mayoría de las instalaciones no han sido efectivas debido a factores como la heterogeneidad y contaminación de los biorresiduos, la aplicación de tecnologías no acondicionadas a los sustratos y contextos locales o la generación de productos que no cumplen con los estándares de calidad (OPS, 2005; Zurbrügg et al., 2005; Barreira et al., 2006; Ekelund y Nyström, 2007). Las condiciones de éxito o fallas están relacionadas no solo con aspectos técnicos sino con elementos sociales, institucionales y económicos de la gestión de los RSM (Zurbrügg et al., 2012). Esta situación muestra la necesidad de analizar de una manera sistémica los elementos que condicionan el funcionamiento del compostaje y determinar las estrategias que contribuyan con su sostenibilidad.

El pensamiento sistémico es un campo transdisciplinario que se aplica a una variedad de problemas complejos (Sterman, 2000); es útil para comprender el funcionamiento de sistemas complejos y está centrado en estudiar las relaciones entre las partes del sistema. Además, facilita la comprensión de la estructura de los sistemas y la identificación de intervenciones estratégicas para mejorar su funcionamiento (Hjorth y Bagheri 2006). Una de las ramas del pensamiento sistémico es la dinámica de sistemas (Stave, 2002; Van den Belt, 2004), la cual permite enfrentar las hipótesis del sistema de manera rigurosa, monitorear los efectos de los cambios en los subsistemas y en sus relaciones, y representar gráficamente los cambios (Chaerul et al., 2008).

La dinámica de sistemas emplea herramientas cualitativas y cuantitativas; las cualitativas facilitan la conceptualización de los problemas y las cuantitativas permiten investigar y visualizar los efectos de diferentes intervenciones a través de la simulación (Richardson, 2011; Mirchi et al., 2012). Entre las herramientas cualitativas se encuentran los diagramas causales, los cuales permiten representar las estructuras de dinámica de sistemas, como ciclos causales (influencia) que sirven como esquemas preliminares de las hipótesis durante el desarrollo del modelo (Chaerul et al., 2008). La dinámica de sistemas ha sido utilizada para entender un amplio rango de procesos relacionados con el manejo de residuos sólidos. La [Tabla 12](#) presenta algunas experiencias de aplicación de la dinámica de sistemas en la gestión de residuos sólidos.

Tabla 12. Experiencias de aplicación de la dinámica de sistemas en la gestión de residuos sólidos

Autor	Descripción de la experiencia
Dyson y Chang (2005)	Propusieron un modelo de predicción de la generación de residuos sólidos que les permitió considerar diferentes escenarios de análisis de sistemas de manejo de RSM en áreas urbanas de rápido crecimiento y proponer condiciones técnicas para la gestión.
Kum et al. (2005)	Estudiaron las políticas de aprovechamiento de residuos en Phnom Penh City, Cambodia, identificando que el compostaje de pequeña escala y reciclaje informal, sin el soporte de otras políticas, no contribuye significativamente al desvío de residuos de la disposición final.
Chaerul et al. (2008)	Desarrollaron un modelo para la gestión de residuos sólidos hospitalarios que permitió establecer estrategias como la separación de residuos y el tratamiento de residuos infecciosos previo a la disposición final, para minimizar los riesgos a la salud pública.
De y Wu (2011)	Identificaron las relaciones involucradas en el ciclo urbano de reciclaje de residuos y los factores críticos del sistema en la recolección, re-manufactura y reventa. El modelo muestra que las tasas de recolección de material potencialmente reciclable se incrementan cuando la población tiene alto nivel de conciencia ambiental, siendo un factor crítico en el sistema.
Zhao et al. (2011)	Desarrollaron un modelo de dinámica de sistemas para el manejo de residuos de construcción y demolición, en el que evaluaron el tipo de centro de reciclaje bajo diferentes políticas y opciones económicas. El estudio se aplicó en una localidad como caso de estudio. Se identificaron tres factores clave que contribuyen con la factibilidad económica del reciclaje de los residuos: i) ganancias, ii) costos del reciclaje, iii) ingresos extras por la ventaja de la localización. Finalmente, establecen las condiciones para implementar el centro de reciclaje.
Yuan et al. (2012)	Propusieron un modelo que puede servir para la toma de decisiones para la reducción de residuos en proyectos de manejo de residuos de construcción y demolición. El modelo consideró aspectos sociales, económicos y administrativos relacionados con el sistema. Se desarrollan diferentes escenarios que involucran el establecimiento de políticas para la reducción de la generación de este tipo de residuos.
Marmolejo (2013)	Propuso un modelo cualitativo para analizar los sistemas de aprovechamiento de residuos sólidos en municipios con poblaciones menores de 20.000 habitantes. El análisis permitió identificar cinco grupos de elementos para la sostenibilidad de las instalaciones de aprovechamiento: recursos económicos, investigación y desarrollo conceptual contextualizados, sensibilización de usuarios, desarrollo tecnológico contextualizado, gestión empresarial y material recuperado.
Marzouk y Azab (2014)	Evaluaron dos alternativas para el manejo de los escombros (reciclaje y disposición final) utilizando un modelo dinámico, de manera que se pudieran predecir los costos e impactos ambientales. Los resultados muestran que la disposición final no es una solución viable para el manejo de estos residuos y por lo tanto, sugieren que la normatividad incentive el aprovechamiento como alternativa.

Este capítulo muestra el empleo de herramientas cualitativas del pensamiento sistémico para desarrollar el análisis sistémico del compostaje de biorresiduos aplicado en municipios menores de países en desarrollo. A partir de ese análisis, se identifican los elementos clave críticos del sistema y se proponen estrategias para mejorar su desempeño. La revisión de experiencias documentadas y el seguimiento al funcionamiento de cinco plantas de compostaje de biorresiduos del Valle del Cauca (Colombia), permitieron la construcción de diagramas causales, una de las herramientas del pensamiento sistémico, y facilitaron la identificación de estrategias para mejorar el desempeño de los sistemas.

El capítulo presenta inicialmente los métodos empleados para el desarrollo del análisis de la aplicación del compostaje de biorresiduos y la identificación de las estrategias de mejoramiento; posteriormente muestra los resultados y discusión, los cuales están estructurados en cuatro secciones: i) identificación del manejo del compostaje en el Valle del Cauca, ii) elementos clave de la aplicación del compostaje de biorresiduos en países en desarrollo, iii) análisis sistémico del funcionamiento de los sistemas y, iv) planteamiento de estrategias para mejorar la aplicación del compostaje en instalaciones de compostaje de municipios menores de países en desarrollo. Finalmente, se esbozan las conclusiones y recomendaciones de este capítulo.

2.2 Materiales y Métodos

2.2.1 Identificación del manejo de sistemas de compostaje en el Valle del Cauca

Se realizó el seguimiento y observación en campo del funcionamiento de cinco instalaciones de compostaje en el departamento Valle del Cauca entre los años 2010 y 2013 (Univalle (2009, 2012), Marmolejo et al. (2009, 2010a, 2010b, 2011), Oviedo (2010) y Marmolejo (2011)). El seguimiento estuvo orientado a identificar aspectos técnicos, de gestión empresarial y político-normativa de las instalaciones de compostaje, como se observa en la [Tabla 13](#).

Tabla 13. Métodos para la recolección de información de aspectos de funcionamiento de los sistemas

Aspecto	Componente	Descripción	Método
Técnico	Materia prima	Calidad y Cantidad	Revisión de información de calidad de sustratos.
	Proceso	Tecnologías, operación y mantenimiento, y control y monitoreo	Visitas de reconocimiento, entrevistas a operadores, revisión de información secundaria, observación <i>in situ</i> de esquemas de operación y monitoreo.
	Producto	Calidad del producto, usos	Revisión de información de calidad del producto.
Gestión empresarial	Administrativo	Tipo de empresa administrativa, operativa	Revisión de información secundaria, visitas a los sistemas, entrevistas.
	Comercial	Comercialización, mercadeo, usuarios	
	Económico	Ingresos / egresos	
Político y Normativo	Normatividad	Normas de calidad y de instalación del compostaje	Revisión de normatividad colombiana y verificación de cumplimiento

2.2.2 Análisis de la aplicación del compostaje de biorresiduos en países en desarrollo

Se realizó una revisión sobre la aplicación de compostaje de biorresiduos en países en desarrollo identificando los elementos clave del funcionamiento de los sistemas en este tipo de contexto. Para tal fin, se analizó la literatura relacionada con el diseño, operación y funcionamiento del compostaje de biorresiduos en países en desarrollo. La búsqueda de información se realizó en bases de datos del ámbito académico (Scopus, Science Direct, Academic Search Complete, Scielo y Redalyc). Las palabras clave empleadas fueron: “biowaste composting”, “composting on developing countries”, “organic municipal solid waste composting on developing countries”, “composting solid waste developing countries”. Para las experiencias identificadas, se corroboró la condición de país en desarrollo en documentos del Banco Mundial (Banco Mundial, 2014).

Para el análisis de la información, se consideró que el compostaje de biorresiduos es un componente de la gestión de RSM, por lo que lo anteceden otros componentes de la gestión (generación, separación en la fuente, almacenamiento, recolección y transporte) y además, está asociado con aspectos de sostenibilidad como los político – normativos, el marco institucional, la participación pública, la gestión financiera y empresarial y los aspectos tecnológicos (Zurbrügg et al., 2014), por lo que estos criterios fueron considerados. La Figura 3 presenta un esquema general del manejo integrado y sostenible de RSM, en el que se observan las opciones de aprovechamiento de biorresiduos a través del tratamiento biológico.

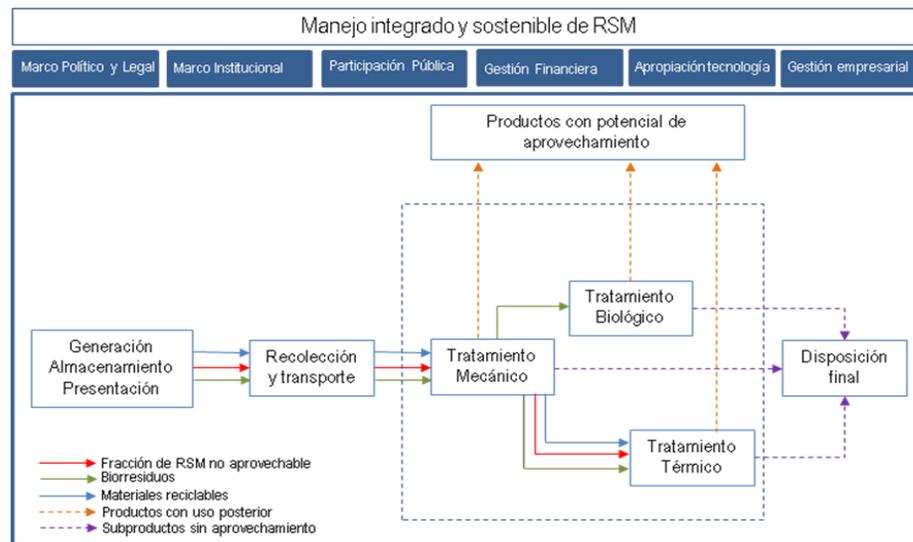


Figura 3. Esquema de manejo de RSM que incluye tratamiento biológico como el compostaje

La identificación de los elementos clave del funcionamiento del compostaje, consideró además del concepto de manejo integrado y sostenible de residuos sólidos reportado por Zurbrügg et al. (2014) y la identificación del manejo del compostaje en los sistemas del Valle del Cauca, las preguntas para determinar las características de funcionamiento de un sistema de aprovechamiento formuladas por Zurbrügg et al. (2012). La [Tabla 14](#) presenta algunos de los estudios revisados para la identificación de los elementos clave del funcionamiento del compostaje.

Tabla 14. Estudios revisados para la identificación de los elementos clave del funcionamiento del compostaje

No	Variables identificadas	Autores
1	Calidad del producto	Soumaré et al. (2002); Herity (2003); Barreira et al. (2006); Barreira et al. (2008); Huerta et al. (2008); Saha et al. (2010); Odlare et al. (2011); Tognetti et al. (2011); Hasan et al. (2012)
2	Aceptación del producto	Huerta et al. (2008); Shekdar (2009)
3	Usos del producto	Blum (1992); Huerta et al. (2008); Epstein (2011); Cabeza et al. (2013)
4	Comercialización del producto	Ali (2004); Zurbrugg et al. (2005); Huerta et al. (2008); Shekdar (2009); Turan et al. (2009)
5	Gestión empresarial	Ali (2004); Hoonweg y Bhada-Tata, 2012; Kurian (2007); Turan et al. (2009);
6	Valor comercial en el mercado	Barreira et al. (2008); Kurian (2007); Shekdar (2009); Hoonweg (1999)
7	Ingresos	Alavi Moghadam et al. (2009); Kanat (2010)
8	Rentabilidad	Alhumoud (2005); Alavi Moghadam et al. (2009); Kanat (2010)
9	Costos de funcionamiento	Kanat (2010); Alhumoud (2005); Hoonweg et al. (1999); Epstein (2011); Ekelund y Nyström (2007);
10	Funcionamiento del proceso	Ali (2004); Epstein (2011); Haug (1993); Shekdar (2009); Pereira Neto (1996)
11	Operación y mantenimiento	Diaz et al. (2006); Diaz et al. (2007a); Do Prado y Garcia (2007); Huerta et al. (2008); Shekdar (2009)
12	Control y monitoreo	Huerta et al. (2008); Do Prado y Garcia (2007); Huerta et al. (2008); OPS et al. (2010)
13	Capacitación de los operarios	Diaz et al. (2006); Diaz et al. (2007a); OPS et al. (2010)
14	Selección de tecnología	Ali (2004); Boldrín et al. (2011); Diaz et al. (2007a); Do Prado y Garcia (2007); Rogger et al. (2011)
15	Funcionamiento de la tecnología	Diaz et al. (2006); Diaz et al. (2007a); Do Prado y Garcia (2007); Huerta et al. (2008); OPS (2005)
16	Calidad de los sustratos	Epstein (2011); Huerta et al. (2008); Kaboré et al. (2010); Kurian (2007); Marmolejo et al. (2010a)
17	Prácticas de manejo	Ali (2004); Marmolejo et al. (2010b)
18	Variabilidad de los sustratos	Marmolejo (2011), Ward (2005)
19	Recolección selectiva	Diaz et al. (2007); Huerta et al. (2008); Barreira et al., 2006; Hargreaves et al., 2008; López et al., 2010
20	Separación en la fuente	Huerta et al. (2008); Barreira et al., 2006; López et al. (2010); Kurian (2007); Marmolejo et al. (2010a)

Se emplearon los diagramas causales para integrar los elementos clave facilitando la conceptualización del funcionamiento del sistema de compostaje. El diagrama causal para el alcance de este capítulo incluye los bloques (o elementos) que representan las acumulaciones importantes del sistema y los conectores (representados por flechas) son los enlaces de información que representa la causa y efecto dentro de la estructura del modelo. Cada enlace causal que une estos elementos, se representa con un signo (+ ó -) que tiene el siguiente significado: *i)* signo positivo (+) en una relación entre A y B significa que cambios en A producen cambios en B en la misma dirección; *ii)* el signo negativo (-) en la relación entre A y B significa que cambios en A producen cambios en B en la dirección opuesta (Chaerul et al., 2008). El esquema de diagrama causal fue desarrollado con cuatro colores, cada uno de los cuales representa un subsistema identificado del sistema de compostaje.

El esquema con los diagramas causales se realizó utilizando el software Vensim® en su versión libre. La interacción con funcionarios administrativos y operativos de las instalaciones de compostaje, la discusión con miembros del grupo de investigación ECCA y con expertos internacionales anónimos, permitieron construir y ajustar las relaciones causales. Se construyeron indicadores preliminares para los elementos clave identificados, teniendo en cuenta para ello, las mediciones efectuadas en otras experiencias reportadas y las posibilidades de efectuar dichas mediciones en los sistemas, tal como lo indican Baptista et al. (2011).

2.2.3 Estrategias para mejorar el funcionamiento del Compostaje de Biorresiduos

Considerando el esquema propuesto de pensamiento sistémico y las experiencias reportadas en la literatura sobre optimización del compostaje de biorresiduos, se plantearon diversas estrategias las cuales se incluyeron en el esquema de pensamiento sistémico propuesto inicialmente, incorporándolas en color verde.

Se aplicó la técnica de análisis estructural, utilizando la Matriz de Impacto Cruzado-Multiplicación Aplicada a una Clasificación (MICMAC), que permitió identificar la influencia y dependencia de las estrategias y, en consecuencia, las esenciales para la evolución de los sistemas de compostaje. Las relaciones de influencia y dependencia entre las estrategias fueron ponderadas, asignándose una puntuación para el grado de influencia y dependencia de acuerdo con lo planteado por Aponte (2005) y Restrepo (2001). El [Anexo A](#) presenta las ponderaciones entre las estrategias. Posteriormente, se graficaron en un plano cartesiano los valores de dependencia (eje X) e influencia (eje Y) para cada estrategia y se estableció el eje de coordenadas empleando la Ecuación 2.1.

$$X = Y = \frac{\left[\frac{(\text{Mayor valor de influencia} + \text{mayor valor de dependencia})}{2} \right]}{3} \quad (\text{Ecuación 2.1})$$

Los cuadrantes se interpretaron siguiendo las recomendaciones planteadas por Restrepo (2001) y Castellanos et al. (2007), utilizando las siguientes denominaciones: *cuadrante I* (zona de poder), donde se localizan variables con alta influencia y baja dependencia; *cuadrante II* (zona de trabajo), en que se localizan variables con alta influencia y dependencia; *cuadrante III* (zona de resultados), donde se localizan variables con baja influencia y alta dependencia; *cuadrante IV* (variables autónomas), en que se localizan las variables con poca influencia y dependencia. Los resultados obtenidos facilitaron el análisis de las estrategias propuestas, estableciendo las que requieren una intervención prioritaria para mejorar el funcionamiento de los sistemas de compostaje.

2.3 Resultados y Discusión

2.3.1 Manejo de compostaje de biorresiduos en municipios menores del Valle del Cauca

Las cinco instalaciones de compostaje se localizan en Alcalá, Bolívar, El Dovio, La Victoria y Versalles, municipios ubicados en el norte del Valle del Cauca (Colombia), que tienen poblaciones urbanas inferiores a 15.000 habitantes. La vocación agrícola y pecuaria de las localidades genera un mercado potencial para los productos del compostaje de los biorresiduos. La [Tabla 15](#) presenta información general de las localidades con sistema de aprovechamiento.

Tabla 15. Información de los municipios con las instalaciones de compostaje en el Valle del Cauca

Municipio	Población urbana (habitantes)	Altitud cabecera (msnm)	Temperatura Promedio (°C)	Distancia a Cali (km) ¹	Actividades económicas
Alcalá	9.106	1.485	21	211	Agricultura, ganadería y comercio
Bolívar	3.621	978	23	161	Agricultura
El Dovio	5.175	1.434	20	167	Agricultura
La Victoria	9.265	915	26	154	Ganadería, agricultura
Versalles	3.831	1.860	18	184	Agricultura, ganadería

Nota: ¹Capital del departamento del Valle del Cauca (Colombia)

Respecto de la administración y operación de los sistemas, las instalaciones de compostaje hacen parte de las plantas de manejo de residuos sólidos (PMRS), que integran la estrategia de aprovechamiento de RSM en el marco del servicio de aseo (Ver [Figura 3](#)). Oviedo (2010) y Marmolejo (2011) identificaron que el funcionamiento de las PMRS son responsabilidad de los municipios en cabeza de los alcaldes municipales; para facilitar esta actividad, se han constituido formalmente empresas de aseo (Alcalá y Versalles) o se manejan directamente a través de las Secretarías de Planeación Municipal y contratando empresas para la operación (Bolívar, El Dovio y La Victoria). Marmolejo (2011) concluye que la *“existencia de una organización formal (empresa) para la prestación del servicio de aseo y con responsabilidad sobre la PMRS, ha sido uno de los elementos clave para dinamizar su funcionamiento. La efectividad de la prestación directa por parte del municipio, ha estado supeditada a la voluntad política de los alcaldes de turno, evidenciándose situaciones de alto compromiso y también de desinterés que han incidido significativamente en el funcionamiento de la PMRS”*.

En general, el aprovechamiento de los biorresiduos se realiza a través del proceso de compostaje, a excepción de Alcalá que emplea una combinación de compostaje – lombricompostaje. En relación con el tipo de compostaje empleado, la opción más desarrollada es la aireación de pilas mediante volteo manual y en algunos casos, se ha instalado aireación pasiva de hileras estáticas (APHE). La [Tabla 16](#) presenta información básica de las instalaciones de compostaje del Valle del Cauca, debiéndose destacar que el funcionamiento del compostaje en estos sistemas no presenta los criterios empleados para la selección de tecnología, el talento humano requerido, los materiales de construcción, las condiciones de operación del proceso y el mantenimiento de los equipos. El dimensionamiento de las instalaciones no consideró las características fisicoquímicas, cantidades y composición física de los biorresiduos (así como su variabilidad).

Tabla 16. Información de los procesos de transformación de biorresiduos en las PMRS del Valle del Cauca

No	Localidad	Cantidad procesada (t mes ⁻¹)	Producto (t mes ⁻¹)	Método de compostaje	Materia prima
1	Alcalá	60,0	11,1	PEAP	BS
2	Bolívar	17,3	SD	PEAP	BM
3	El Dovio	39,1	SD	PEAP	BS
4	La Victoria	84,1	SD	PEAP	BM
5	Versalles	18,9	3	HDAM	BS

Nota: HDAM: Hileras dinámicas – Aireación manual; PEAP: Pilas estáticas - Aireación pasiva; BM: Biorresiduos Mezclados; BS: Biorresiduos Separados en fuente; SD: Sin Dato

Con respecto a las materias primas que ingresan a los sistemas de compostaje, se caracterizan por procesar principalmente biorresiduos y en algunos casos puntuales (Versalles) ocasionalmente reciben otros materiales (poda, cenizas de madera y estiércol bovino). Marmolejo (2011) presentó resultados exploratorios sobre la composición física de las materias primas en las instalaciones de compostaje de biorresiduos (Ver Tabla 17), observando que la fracción de alimentos (procesados y sin procesar) era la más significativa y presentaba variaciones entre una localidad y otra, así como al interior de la misma localidad, sin embargo esta variabilidad no ha sido estudiada en el contexto de estas poblaciones.

Tabla 17. Composición física de la materia prima que se somete a transformación en las PMRS

Componente	Porcentaje en Peso (Base húmeda) (%)				
	Alcalá	Bolívar	El Dovio	La Victoria	Versalles
Alimentos procesados	5,0	1,6	0,4 – 20,0	7,0	1,43 – 30,0
Alimentos sin procesar	85,0	55,1	75,0 – 93,5	72,6	51,8 - 87,9
Restos de Jardín y poda de césped	2,0	1,1	1,6 – 5,0	5,9	0,2 – 17,1
Impropios	8,0	42,2	0 - 4,5	14,6	1,4 – 13,6

Fuente: Marmolejo (2011)

Desde el punto de vista de la calidad fisicoquímica (Ver Tabla 18) los biorresiduos estudiados muestran similitud con lo reportado en la literatura (Chiumenti et al., 2005; Krogman et al. 2010; Epstein, 2011), destacándose su alto contenido de humedad y de N y bajo contenido de C, relaciones C/N y valores de pH ácidos.

Tabla 18. Análisis de calidad de la materia prima en las instalaciones de compostaje del Valle del Cauca

Parámetro	Unidades	n	Min	Max	Promedio ± desviación estándar
Humedad	%	6	66,6	85,4	77,0 ± 7,7
pH	Unidades	6	4,02	8,69	6,40 ± 1,7
COT	%	6	22,19	40,76	30,8 ± 6,6
N _{TOTAL}	%	6	1,24	1,89	1,6 ± 0,3
C/N	--	6	11,7	26,2	20,3 ± 5,5

Nota: sustratos de las plantas de compostaje de Alcalá, Bolívar, El Dovio, La Victoria y Versalles. S: desviación estándar
Fuente: Elaboración propia con base en Marmolejo (2011)

Las condiciones de las materias primas muestran la necesidad de incorporar materiales de soporte o de enmienda, que mejoren sus características fisicoquímicas; no obstante, en Colombia no se han documentado experiencias en el contexto de las instalaciones de compostaje de biorresiduos que analicen el efecto de la aplicación de estos

materiales para mejorar el proceso y la calidad del producto; algunas experiencias en proyectos realizados en la Universidad del Valle (Marín y Murillo, 2010; Oviedo, 2010), propusieron la incorporación de diferentes materiales para mejorar la calidad de los sustratos en PMRS del Valle del Cauca, sin embargo, estas propuestas no fueron evaluadas y además, no consideraron la variabilidad en la calidad de los biorresiduos.

Respecto a la operación, control y monitoreo del proceso de compostaje, se observa desconocimiento de los procesos de acondicionamiento y transformación de la materia prima, que se refleja en deficientes condiciones de operación y mantenimiento. En ninguna instalación se desarrollan actividades de control y monitoreo de variables (temperatura, humedad, densidad, frecuencia de volteo, rendimiento del proceso y características del producto) y tampoco se tienen equipos para realizarlas. El criterio para determinar la finalización del proceso es la obtención de un material seco, de color oscuro, con un tamaño de partículas pequeñas y con olor similar al del suelo.

En relación con la calidad del producto, tal como lo reporta Wu et al. (2000), la calidad varía de manera importante entre las instalaciones. Además, en las diferentes investigaciones que ha venido desarrollando la Universidad del Valle se observó que éstos no cumplían con los estándares de calidad de la norma técnica colombiana, no satisfacen las necesidades locales y presentan baja demanda y poca comercialización. Adicionalmente, no han sido proyectados para responder a los requerimientos de materia orgánica, nutrientes y otras características fisicoquímicas de los suelos y sistemas agroambientales predominantes. La Tabla 19 presenta información de calidad de los productos de los procesos de transformación de los biorresiduos en las instalaciones de compostaje.

Tabla 19. Calidad de productos de procesos de transformación de los biorresiduos en el Valle del Cauca

Parámetro	Unidades	Promedio \pm S ¹	Min	Max	NTC 5167
Humedad	%	19,0 \pm 8,5	5,46	26,68	\leq 35
pH	unidades	8,20 \pm 0,93	7,02	9,32	>4 y <9
COT	%	12,5 \pm 3,1	7,10	16,26	> 15
N _{TOTAL}	%	1,53 \pm 0,52	0,66	2,22	> 1 ²
C/N		8,7 \pm 2,1	5,25	10,76	--
P _{TOTAL}	%	0,54 \pm 0,15	0,31	0,67	> 1 ²
K _{TOTAL}	%	2,13 \pm 0,95	0,79	3,19	> 1 ²
CIC	meq/100 g	30,1 \pm 16,8	0,38	49,50	\geq 30
Cenizas	%	65,2 \pm 15,4	36,70	81,27	\leq 60
Densidad Aparente	g/cm ³	0,74 \pm 0,12	0,54	0,90	< 0,6

Fuente: elaboración propia con base en Marmolejo (2011)

Nota: ¹Valor promedio con base en seis datos; ²valor mínimo de reporte; S: desviación estándar

En general, estos productos se caracterizan por tener pH alto y bajo contenido de C, N_{TOTAL} y P_{TOTAL} que limitan su potencial agronómico, restringiendo su uso y mostrando la necesidad de complementar las materias primas para mejorar el contenido de estos elementos o identificar las condiciones operativas que permitan mantener nutrientes como el N_{TOTAL} durante el proceso. En ese contexto, es fundamental optimizar el proceso y mejorar la calidad del producto acorde con las necesidades de suelos y usos locales (Tognetti et al., 2011).

En relación con los metales pesados, los productos de las cinco plantas de compostaje presentan valores menores que los límites admisibles en la norma técnica colombiana (NTC 5167) y superiores a los reportados por Saha et al. (2010) para Cd, Pb, Ni y Cr. El mayor valor reportado fue el de Pb y coincide con Smith (2009), quien indica que este elemento es el que se encuentra numéricamente en mayor cantidad en el compost de biorresiduos posiblemente

asociado a algunos residuos como pilas y baterías, entre otros. De otro lado, se observó que el contenido de Cd, Hg, Cr y Ni fue inferior en las localidades que procesan biorresiduos separados en la fuente (Ver Tabla 20).

Tabla 20. Metales pesados en productos de transformación de biorresiduos en el Valle del Cauca

Parámetro	Unidades	N	Min	Max	Promedio	S
Arsénico	mg/kg	6	0,26	6,20	1,9	2,5
Cadmio	mg/kg	6	1,21	3,60	2,5	1,2
Mercurio	mg/kg	6	0,04	0,15	0,1	0,1
Cromo	mg/kg	6	30,44	126,44	59,3	34,1
Níquel	mg/kg	6	18,69	93,39	45,9	28,9
Plomo	mg/kg	6	37,78	108,80	62,1	25,7

Fuente: Elaboración propia con base en Marmolejo (2011)

2.3.2 Elementos clave de la aplicación del compostaje de biorresiduos en países en desarrollo

Los países en desarrollo se caracterizan por incremento de la población, la urbanización, la economía y el nivel de vida, elementos que inciden en la generación de RSM (Guerrero et al., 2013); en estos países, predominan los biorresiduos en la composición física de los RSM. A pesar de que el compostaje puede ser efectivo para reducir los residuos en disposición final, los proyectos implementados han sido poco exitosos (Kaboré et al., 2010). Hoornweg y Bhada-Tata (2012) compararon la aplicación del compostaje en países de bajos, medios y altos ingresos económicos y destacaron los siguientes elementos en cada grupo de países:

- Bajos ingresos: a pesar del predominio de los biorresiduos, el compostaje raramente está establecido formalmente en la gestión de los RSM. Se tiene poco mercado para el compost y poca valoración sobre la importancia de la comercialización para la sostenibilidad de los sistemas de compostaje.
- Medianos ingresos: generalmente las plantas de compostaje de carácter industrial no han sido exitosas debido a la contaminación de materias primas y productos y a los costos operativos; algunos proyectos de compostaje de pequeña escala han sido más sostenibles.
- Altos ingresos: a pesar que la proporción de biorresiduos es menor, cada vez son más populares las instalaciones a gran escala. La mayor aplicación de la separación en la fuente ha facilitado el funcionamiento del proceso de compostaje.

De otro lado, Kurian (2007) en evaluaciones de sistemas de compostaje en India, identificó algunos elementos aplicables a países en desarrollo, entre las que se encuentran: *i)* tecnologías no adaptadas a condiciones locales; *ii)* excesiva mecanización y selección de tecnologías sin análisis de características de los residuos; *iii)* poca consideración de aspectos financieros y de mercado; *iv)* ausencia de soporte institucional y de un marco político y normativo y *v)* deficiente calidad del producto por mezcla de los RSM.

Así mismo, Hoornweg et al. (1999) sintetiza un número de elementos por los cuales el compostaje en países en desarrollo no ha sido efectivo, entre las que se incluyen: *i)* inadecuada atención de los requerimientos del proceso biológico, *ii)* poca visión, planes y experiencias de comercialización del producto final, *iii)* deficiente calidad de la materia prima que genera un producto de pobre calidad, *iv)* prácticas contables que no consideran externalidades del compostaje como su contribución a la reducción de la erosión del suelo, de la contaminación del agua y del cambio climático, *v)* esfuerzos municipales centrados principalmente en aspectos de recolección y disposición final

de los RSM, vi) potenciales afectaciones tales como olores y roedores, vii) mínima integración con el sector agrícola, viii) dificultades para el sostenimiento financiero debido a que los ingresos por comercialización no son suficientes para cubrir los costos operativos, ix) falta de subsidios para mantener los programas, considerando aspectos como los costos evitados en disposición final.

En el componente tecnológico, es fundamental la selección de tecnología y la consideración de los principales parámetros en el control del proceso tales como: i) los ambientales (temperatura, humedad, pH y aireación) y ii) las características fisicoquímicas de la materia prima (relación C/N, tamaño de partículas y contenido nutricional) (Bari y Koenig, 2012; Cabezas et al., 2013). En el caso de instalaciones de compostaje en Brasil (Pereira Neto, 1996) y en países asiáticos (Shekdar, 2009), en algunas ocasiones han sido cerradas debido a elementos relacionados con el poco conocimiento local sobre el proceso, inadecuada selección de tecnología, incipiente monitoreo e incompatibilidad del diseño con las características de los residuos. Elementos como la falta de guías para la aplicación de la tecnología (OPS et al., 2010) y los limitados recursos y personal suficientemente entrenado para la operación de los sistemas (Turan et al., 2009) incide en el funcionamiento de los sistemas en países en desarrollo. El limitado avance en el desarrollo y capacidad tecnológica local está relacionada con el énfasis de investigaciones a nivel de escala de laboratorio y la incipiente realización y financiación de proyectos a escala piloto (Kanat, 2010).

La deficiencia en el funcionamiento de las tecnologías afecta adversamente la calidad del producto y compromete su uso y comercialización, tal como se ha encontrado en plantas de compostaje brasileñas debido a la deficiente operación y control del proceso (Barreira et al., 2008). Así mismo, en instalaciones de compostaje en Suráfrica (Ekelund y Nyström, 2007) y en Brasil (Do Prado Filho y Garcia Sobreira, 2007), se encontró que la calidad del producto es variable, presentando la menor calidad las que tratan residuos mezclados por la pobre calidad de las materias primas. La baja calidad del producto y los altos costos de funcionamiento han ocasionado que las instalaciones de compostaje en Turquía no se mantuvieran en operación y se reduzca la concepción sobre nuevas plantas de compostaje (Kanat, 2010).

Respecto a la comercialización y mercadeo, tal como se reporta en India, la interacción entre la calidad del producto, el precio y la demanda del cliente a veces son subestimadas, ocasionando fallas en los proyectos debido a la falta de mercado (Zurbrügg et al., 2005). En Asia (Shekdar, 2009) y en Turquía (Turan et al. (2009) se han identificado que el funcionamiento de las instalaciones de compostaje se ha realizado con mínimos estudios de mercadeo del producto y escasa atención a la gestión comercial. Esto evidencia la necesidad de hacer estudios de demanda del producto y la importancia de que se establezcan reglamentos y estándares de calidad para la producción de compost y su uso (OPS et al., 2010).

La poca comercialización del producto tiene un impacto en la rentabilidad del compostaje, tal como lo reportan Alavi Moghadam et al. (2009) en la ciudad asiática de Rasht (Irán), mostrando la mínima sostenibilidad financiera de las instalaciones las cuales, a pesar de operar efectivamente, cubren los costos operativos con subsidios del gobierno local (33%) y con ingresos por comercialización (67%). De igual manera, en las naciones del sudeste asiático, los altos costos de operación incrementan los costos del producto final, haciéndolo menos competitivo frente a los fertilizantes comerciales y disminuyendo sus posibilidades de mercadeo y comercialización (Nguyen Ngoc y Schnitzer, 2009).

Finalmente, otro elementos que limitan el funcionamiento del compostaje de biorresiduos, está relacionado con el bajo nivel de organización y administración, que inciden en la poca planeación y gestión administrativa de las

instalaciones (Hoornweg y Bhada-Tata, 2012), lo cual está asociado, entre otros elementos, a la insuficiente información sobre regulaciones y a las restricciones financieras (Turan et al., 2009).

2.3.3 Análisis sistémico de la aplicación de compostaje de biorresiduos en países en desarrollo

El análisis sistémico de la aplicación del compostaje permitió integrar los elementos clave en cuatro subsistemas: i) calidad del producto y comercialización, ii) gestión empresarial, iii) calidad de la materia prima, y iv) desarrollo tecnológico.

En relación con el primer subsistema (Ver Figura 4), hace referencia a la **calidad del producto** que está en función del valor agronómico y nivel de contaminación (impurezas, metales pesados, sales y otros compuestos); estos elementos determina sus usos potenciales (material de enmienda del suelo, fertilizante o material de cobertura en rellenos sanitarios) y pueden restringir su uso por los riesgos sanitarios y ambientales de su aplicación (Lasaridi et al., 2006). La menor variabilidad en las características fisicoquímicas y de calidad del producto (Rosen et al., 1993), su disponibilidad constante en términos de cantidad y el precio acorde con la calidad del producto y con los valores en el mercado, permiten una mayor aceptación del producto por los usuarios y a su vez, una continua comercialización, elementos que inciden en la sostenibilidad comercial del producto (Ali, 2004).

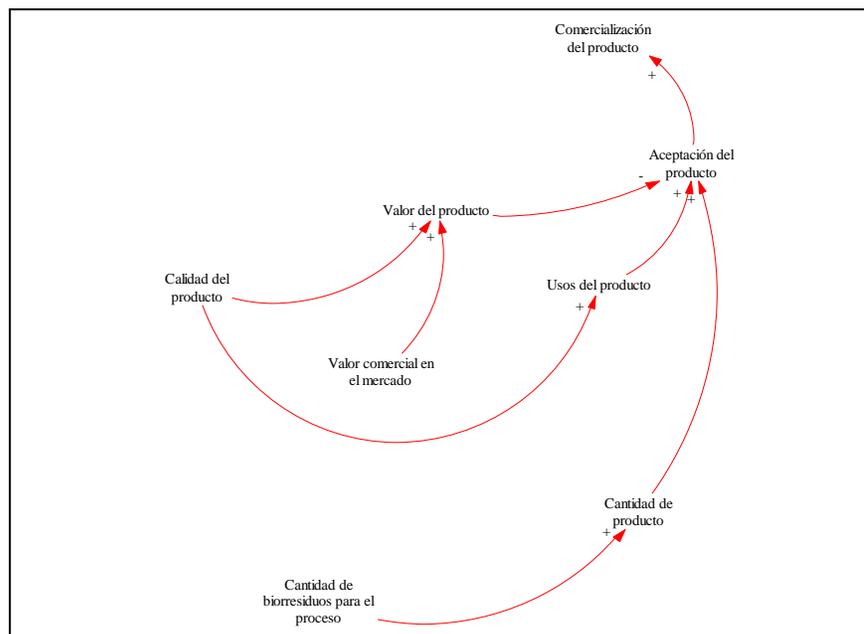


Figura 4. Subsistema calidad del producto y comercialización en el compostaje de biorresiduos en municipios menores de países en desarrollo

Respecto del segundo subsistema **gestión empresarial** (Ver Figura 5), se observa que los ingresos por comercialización del producto contribuyen con la sostenibilidad económica de los sistemas y con los recursos para la operación, mantenimiento, control, monitoreo, comercialización, mercadeo, gestión empresarial y optimización tecnológica. El compostaje debe visualizarse no solo como una opción de tratamiento de residuos sino como un sistema productivo que genera ingresos por la comercialización del producto (Ekelund y Nyström, 2007); no

obstante, la venta del compost difícilmente compensa los costos operativos (Epstein, 2011). Tal como lo señala Hoornweg et al. (1999), la historia de los fracasos de los proyectos de compostaje pueden ser atribuidas a las pobres estrategias de mercado e inadecuada atención a la financiación.

El manejo del sistema de compostaje con visión empresarial propiciaría una mejor administración de los recursos (humano, materiales y equipos) y planeación organizacional, así como el establecimiento de relaciones con agentes externos para apoyo financiero, comercial, técnico e investigativo. De igual manera, permite establecer una gestión comercial, que identifique los segmentos del mercado con posibilidades de uso del producto y los niveles de satisfacción del usuario. La informalidad en el manejo del proceso, conlleva a deficiencias en la operación, control y monitoreo del proceso e incide en la calidad del producto (Ekelund y Nyström, 2007), siendo la gestión empresarial y el acompañamiento técnico, elementos prioritarios para abordar dicha informalidad.

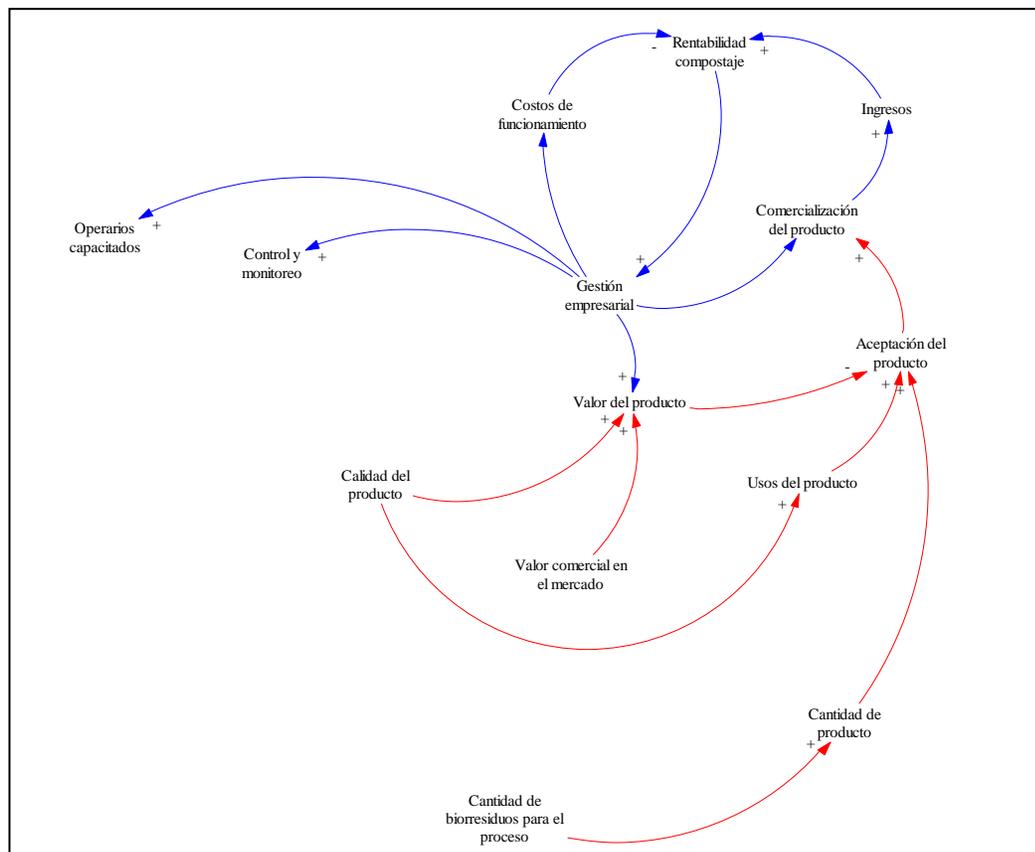


Figura 5. Integración del subsistema gestión empresarial al análisis del compostaje de biorresiduos en municipios menores de países en desarrollo

En relación con el tercer subsistema **calidad de los biorresiduos** (Ver Figura 6), se observa que la calidad del producto depende, entre otros elementos, de la calidad de las materias primas (nivel de contaminación y otras características fisicoquímicas como materia orgánica, nutrientes, humedad y pH). Con respecto al nivel de contaminación de las materias primas, en este caso los biorresiduos, las actividades de separación en la fuente y recolección selectiva han demostrado ser efectivas para reducirla (López et al. 2010; Marmolejo et al., 2010a;

Marmolejo et al., 2011). Esta situación permite minimizar la cantidad de rechazos en las instalaciones de compostaje, reducir las actividades operativas y disponer de mayor cantidad de biorresiduos con condiciones adecuadas para el proceso.

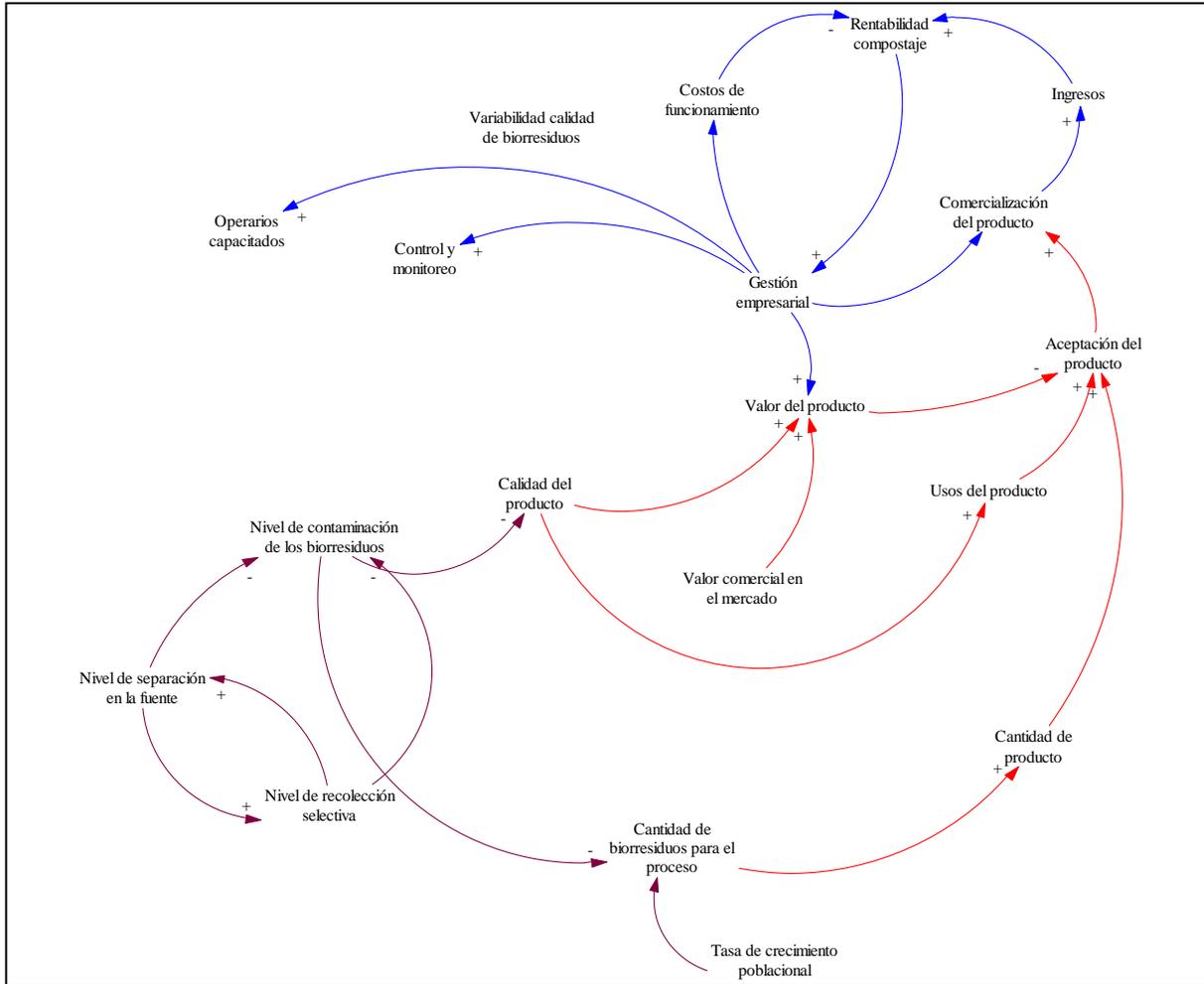


Figura 6. Integración del subsistema calidad de los biorresiduos al análisis del compostaje de biorresiduos en municipios menores de países en desarrollo

Finalmente, el subsistema de **desarrollo tecnológico** (Ver Figura 7) muestra que las características fisicoquímicas de las materias primas están influenciadas por la diversidad de materiales que la componen, los cuales son condicionados por los hábitos alimenticios, tipo de almacenamiento (tiempo, recipiente, sitio), hábitos de manejo al interior del predio, condiciones de prestación del servicio de aseo, entre otros (Marmolejo et al., 2010b). Todos estos elementos son variables, incidiendo en las características fisicoquímicas de los sustratos y que deben considerarse en el diseño de las instalaciones y en la operación y el monitoreo del proceso (control de calidad de materias primas), de manera que se acondicionen las materias primas a procesar.

La selección y diseño de la tecnología y los esquemas de control y monitoreo del proceso requieren un conocimiento detallado de las condiciones sociales, económicas y culturales de la localidad, así como de las características de las

materias primas. En países en desarrollo para la selección de tecnología es conveniente considerar, que en general se cuenta con recurso humano con bajo nivel de formación y mínimos recursos económicos para inversión, operación y mantenimiento de equipos (Roger et al., 2011). El desarrollo tecnológico adaptado a las condiciones locales facilita la operación y funcionamiento de los sistemas, lo cual puede incidir favorablemente en la cantidad de materiales recuperados impactando positivamente la sostenibilidad de los sistemas (Zurbrügg et al., 2012).

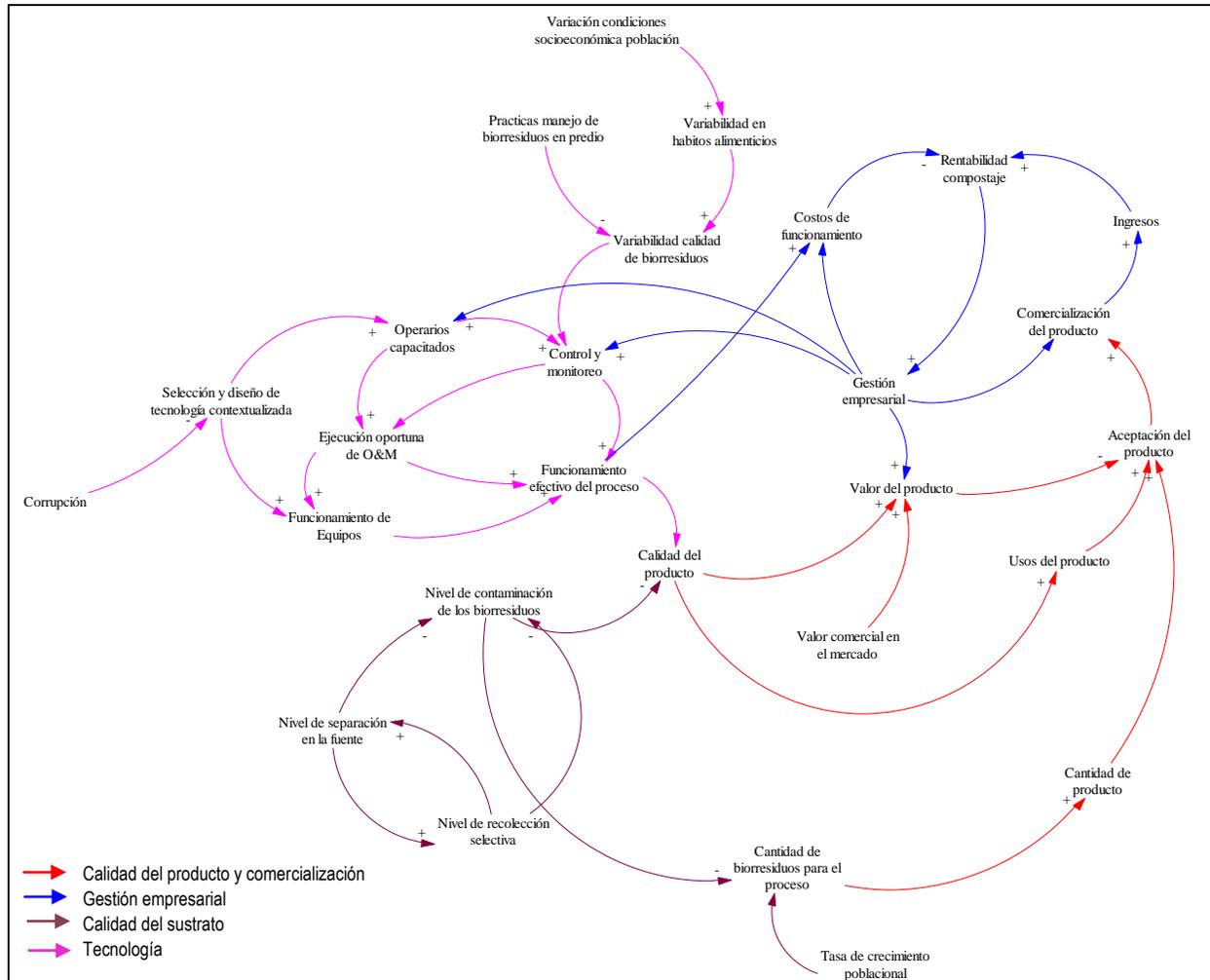


Figura 7. Integración del subsistema desarrollo tecnológico local al análisis del compostaje de biorresiduos en municipios menores de países en desarrollo

2.3.4 Estrategias para mejorar el funcionamiento del compostaje de biorresiduos

La Figura 8 presenta el esquema de análisis sistémico de la aplicación del compostaje, incorporando las estrategias de mejoramiento. En general, se requiere que el compostaje sea manejado como un proceso productivo y por ende, debe tenerse una visión de gestión empresarial para la planeación y administración del mismo; Marmolejo et al. (2011) indican que el fortalecimiento de las empresas prestadoras se traduce en el mejoramiento de las funciones gerenciales (administración, comercialización, financiación, operación y mantenimiento, planeación y dirección e

información), todo lo cual incide en la capacitación y dotación de operarios, la incorporación de normas y manuales de control y monitoreo, la operación y mantenimiento de la infraestructura y la captación de recursos para el funcionamiento del sistema.

El establecimiento de alianzas entre administraciones municipales, comunidades de base, sector privado y administradores del sistema de compostaje puede ser fundamental para: i) suministrar asistencia técnica en el proceso de compostaje, ii) desarrollo de guías para la implementación en instalaciones de bajo costo, iii) evaluación de préstamos y soporte financiero, iv) establecimiento de estándares de calidad y seguimiento a su cumplimiento, v) regulación y monitoreo de las operaciones de compostaje, vi) promoción del uso del producto a través de campañas públicas y, vii) uso del producto en obras públicas y programas de agricultura.

Para mejorar la comercialización y mercadeo del producto, se pueden establecer estándares de calidad en función de los posibles usos del producto. La calidad se puede certificar a través de entes regulatorios del sector agropecuario, lo que permite al usuario tener mayor control de calidad del producto y por ende, mayor satisfacción y una comercialización efectiva (Ali, 2004). De igual manera, las estrategias de mercado requieren la evaluación de los mercados existentes y potenciales, conociendo las características del producto, usos potenciales, limitaciones en el uso y estimación del valor del producto al usuario. También es importante adaptar las estrategias de comercialización para satisfacer las necesidades locales, considerando las características del suelo, prácticas agrícolas, costumbres sociales, costos de transporte, las variaciones estacionales (Hoornweg et al. 1999).

De otro lado, el compostaje es una opción importante en el sector de los residuos sólidos para mitigar el cambio climático debido al desvío de la fracción orgánica de los rellenos sanitarios (Eggleston et al., 2006; Rogger et al., 2011). Así mismo, la incorporación de enmiendas orgánicas como el compost en el suelo disminuye el agotamiento de la materia orgánica en los suelos y los procesos de degradación y erosión. La instauración de lineamientos de política en países en desarrollo, como la directiva de disposición final realizada en Europa para considerar estos beneficios ambientales (European Commission, 2011), puede ser también un motivador para la producción y demanda de compost de biorresiduos. De igual manera, el incentivo al consumo de productos agrícolas orgánicos también ha sido efectivo para incrementar la fertilización orgánica y el uso de materiales como el compost.

Respecto al uso del producto como mejorador del suelo, diferentes autores indican aspectos positivos que deben informarse a los usuarios del producto, tales como su contribución al mantenimiento de la estructura del suelo, el mejoramiento de las propiedades físicas, el decrecimiento de las posibilidades de erosión, el mantenimiento de la actividad microbiana y el suministro de nutrientes potenciales para las plantas (Dimambro et al., 2006; Tittarelli et al., 2007; Hargreaves et al., 2008); esto puede incrementar la posibilidad de comercialización del producto.

Dado que los ingresos por comercialización del producto no son suficientes para cubrir los costos de funcionamiento de los sistemas, en países desarrollados se han adoptado estrategias como el establecimiento de marcos tarifarios y subsidios que reconocen el valor económico y ambiental del aprovechamiento de biorresiduos y de la producción de compost. Dichos incentivos económicos pueden ayudar a cubrir los costos de funcionamiento de los sistemas en países en desarrollo. De igual manera, es imperativo desarrollar estudios que analicen los costos ambientales evitados por la no disposición de biorresiduos en sitios de disposición final (Hoornweg et al., 1999) y de esta manera disponer de mayores argumentos para promover su implantación.

El compostaje requiere biorresiduos con mínima contaminación y la mejor forma de conseguirlo es a través de la promoción de la separación en la fuente. Esto requiere estrategias como la obligatoriedad de la separación en la fuente de biorresiduos y su recolección selectiva, la cual ha sido efectiva en instalaciones de compostaje en Europa (Díaz et al., 2006). Así mismo, la participación comunitaria en estas prácticas puede lograrse a través de políticas públicas que faciliten el desarrollo de procesos de educación y sensibilización y promuevan incentivos para integrar a los diferentes sectores de la comunidad (Hoornweg et al., 1999; Ali, 2004).

Finalmente, la Investigación y desarrollo local en aspectos tecnológicos, sociales, administrativos y comerciales, soportado desde instituciones de investigación y con participación de organizaciones locales, regionales y nacionales, puede fortalecer el funcionamiento de los sistemas a través del desarrollo de proyectos demostrativos a escala piloto, que además, suministren información para reglamentaciones técnicas y desarrollo de políticas públicas alrededor de la gestión de residuos sólidos y particularmente del compostaje de biorresiduos.

Con respecto a la tecnología, Zurbrügg et al. (2014) plantea la instauración de tecnología contextualizada, definiéndola como aquella de bajos costos de inversión, simplicidad organizacional, alta adaptabilidad y uso moderado de recursos naturales. Adicionalmente, plantea que el funcionamiento técnico no solo depende de las condiciones físicas o infraestructura técnica, sino del conocimiento y habilidades para la operación de la tecnología y los factores relacionados con la organización y administración, elementos que deben incorporarse en el funcionamiento de los sistemas de compostaje. Para tal efecto, es conveniente la inclusión de profesionales de ingeniería en el diseño de las instalaciones, capacitar a los operarios del sistema y adicionalmente, desarrollar protocolos de calidad y composición de material compostable así como manuales de operación y mantenimiento (Hoornweg et al., 1999).

En síntesis, este análisis muestra que el mejoramiento del proceso de compostaje en países en desarrollo requiere estrategias como: i) mejoramiento de la calidad del producto, ii) fortalecimiento de la comercialización, iii) la incorporación de conceptos de gestión empresarial para administración del sistema, iv) el mayor seguimiento y control de los aspectos financieros, v) el desarrollo tecnológico contextualizado, vi) adaptación a las condiciones locales de esquemas de control de la calidad de los sustratos, vii) la implantación de políticas y normas que favorezcan el funcionamiento del proceso y viii) el fortalecimiento de la participación comunitaria.

La [Figura 9](#) presenta el análisis de la influencia y dependencia de estas estrategias. La aplicación del análisis estructural muestra que las estrategias denominadas clave son la 3, 7 y 8; se caracterizan por ser de extrema importancia. Los esfuerzos realizados en estas estrategias pueden ser efectivos para mejorar el desempeño de todo el sistema de compostaje. Las restantes estrategias son denominadas objetivo y se caracterizan porque sobre ellas se puede actuar directamente para que el sistema evolucione hacia los propósitos planteados. En todos los casos, las estrategias son causa y efecto de la evolución del sistema.

Finalmente, con el propósito de hacer seguimiento al funcionamiento de las instalaciones de compostaje y a la efectividad de las estrategias propuestas, se plantearon indicadores preliminares que permitirían establecer una línea base y facilitar la modelación de los sistemas de compostaje, partiendo del esquema propuesto en este estudio. Esto implica la medición y registro de información del monitoreo y de la calidad de materias primas y productos, así como información de aspectos administrativos, económicos y comerciales. En el [Anexo B](#) se presentan los indicadores propuestos para los elementos del sistema de compostaje de biorresiduos.

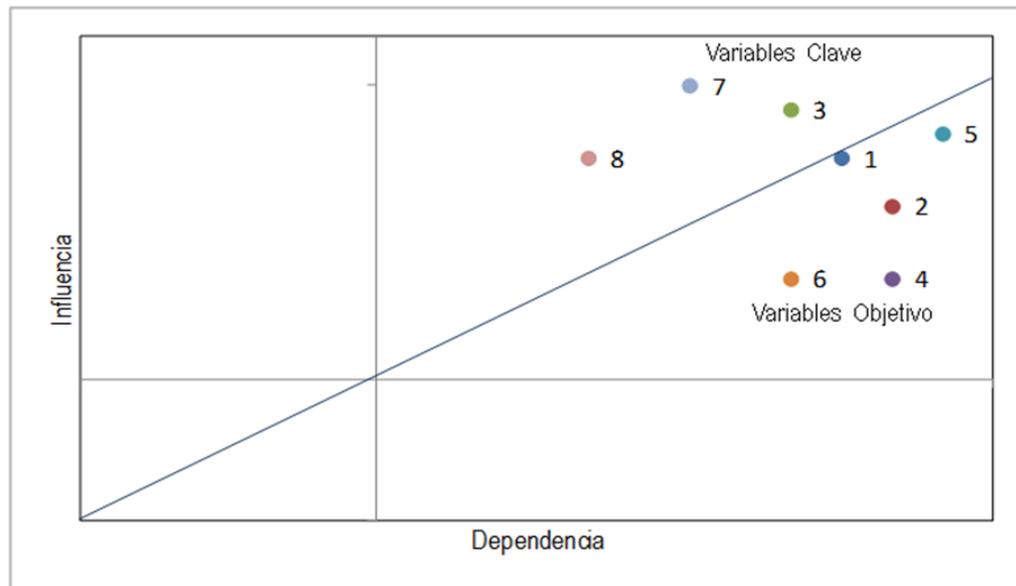


Figura 9. Análisis de influencia y dependencia de las estrategias propuestas.

Nota: 1) mejoramiento de la calidad del producto, 2) fortalecimiento de la comercialización, 3) incorporación de conceptos de gestión empresarial para administración del sistema, 4) mayor seguimiento y control de los aspectos financieros, 5) desarrollo tecnológico contextualizado, 6) adaptación a las condiciones locales de esquemas de control de la calidad de los sustratos, 7) implantación de políticas y normas que favorezcan el funcionamiento del proceso y 8) fortalecimiento de la participación comunitaria

2.4 Conclusiones del capítulo

El compostaje ha sido una de las opciones de mayor aplicación para el aprovechamiento de biorresiduos; no obstante, en países en desarrollo la generalidad de las instalaciones, no han sido efectivas. El análisis sistémico de la aplicación del compostaje de biorresiduos permitió identificar 27 elementos clave que se integraron en cuatro subsistemas interconectados que orientan su funcionamiento: i) la calidad y comercialización del producto, ii) la gestión empresarial de los sistemas, iii) la calidad de los sustratos, y iv) el desarrollo tecnológico.

El subsistema de calidad del producto depende de dos subsistemas: características fisicoquímicas de las materias primas y aspectos tecnológicos; a su vez, la calidad de los productos define los usos del producto, niveles de satisfacción del usuario y la comercialización. La gestión empresarial es un subsistema clave; orienta la planeación y administra del componente tecnológico, las estrategias de comercialización y mercadeo del producto, y el manejo de los recursos para el manejo, operación, mantenimiento y control del sistema.

Dado que la generalidad de las instalaciones de compostaje en el contexto de estudio tienen limitaciones en su funcionamiento, se identificaron estrategias para mejorar su funcionamiento que incluyen la formulación y puesta en marcha de normas y políticas públicas que i) favorezcan la separación en la fuente, la recolección selectiva y el aprovechamiento de biorresiduos, ii) reconozcan en la tarifa del servicio de aseo la recolección de biorresiduos y la operación del compostaje, iii) establezcan estándares de calidad del producto en función de los usos, iv) estimulen el uso del producto para las actividades productivas y de conservación del recurso suelo, y adicionalmente, v) promuevan el desarrollo tecnológico local que facilite la selección, diseño e implementación de tecnologías y de esquemas de operación, control y monitoreo acorde con las condiciones del contexto local.

3 VARIABILIDAD EN LA CALIDAD DE LA MATERIA PRIMA DEL COMPOSTAJE DE BIORRESIDUOS

3.1 Introducción

El compostaje es considerado como una tecnología efectiva para el aprovechamiento de los biorresiduos (Neves et al., 2009; Li et al., 2013). La efectividad del compostaje y la calidad del producto dependen de las características fisicoquímicas de los materiales a procesar y de factores clave del proceso (Ward et al., 2005; Hargreaves et al., 2008; de Guardia et al., 2010). Respecto a la materia prima del compostaje de biorresiduos, se ha identificado que aspectos como: la dinámica socioeconómica de la población, los hábitos alimenticios, las condiciones climáticas y el tipo de almacenamiento y recolección de los residuos, influyen en la variación temporal de sus características fisicoquímicas (Ward et al., 2005; Hansen et al., 2007; Neves et al., 2009).

El estudio de la variabilidad de la calidad fisicoquímica de los biorresiduos, además de suministrar información para optimizar el proceso de compostaje (Hansen et al., 2007; Chang y Hsu, 2008), facilita el establecimiento de actividades de control y operación que contribuyan a la producción de un compost de calidad deseable (Rosen et al., 1993; Adhikari et al., 2008; Farrell y Jones, 2009), tales como el acondicionamiento de los materiales o modificaciones del proceso (Tiquia, 2005). No obstante, tan solo unos pocos estudios reportan la variabilidad de las características de los biorresiduos (Ward et al., 2005) y su incidencia en el proceso de compostaje (Chang y Hsu, 2008).

En países en desarrollo como Colombia, aunque se reconoce que la calidad de la materia prima es variable, los sistemas de aprovechamiento de biorresiduos parecen estandarizados y la variabilidad de su calidad no ha sido estudiada ni incorporada como variable a controlar en el proceso, siendo ésta una de las posibles causas de la poca efectividad de los sistemas de aprovechamiento.

En este capítulo se estudia la variación en la calidad de la materia prima (composición física y características fisicoquímicas) en una instalación de compostaje de biorresiduos que opera de manera continua. Posteriormente, se tipifica la calidad de la materia, analizando las condiciones predominantes y el efecto que pueden tener en el proceso de compostaje. A partir de las características de la materia prima, se propone una herramienta para la selección de materiales con potencial para mejorar el proceso de compostaje y la calidad del producto.

3.2 Elementos Conceptuales

3.2.1 Importancia del control de las materias primas en el compostaje

El compostaje es un proceso productivo, en el que se utilizan equipos y herramientas, se realizan operaciones y se obtienen productos a partir de las materias y componentes básicos. Los procesos productivos como éste, están sujetos a variaciones, algunas son tan importantes que es necesario aplicar esquemas de control. Las variaciones significativas son una separación esporádica de estándares establecidos y deben identificarse para tomar medidas que restablezcan la situación, abordando las causas de los cambios o tomando acciones correctivas para disminuir las variaciones (Juran et al., 1983). En el proceso de compostaje, el concepto de control de la calidad abarca

evaluaciones en la calidad de las materias primas, en las condiciones del proceso y en la calidad de los productos, verificando el cumplimiento de los objetivos de calidad propuestos en cada etapa de la producción.

La aplicación del control de la calidad, implica el conocimiento de los aspectos básicos del compostaje que permitan alcanzar una efectiva descomposición de la materia orgánica con los menores impactos ambientales (Epstein, 1997). Respecto del conocimiento de las características de las materias primas, es importante indicar que la materia orgánica es heterogénea y está definida como i) compuestos de alto peso molecular (polisacáridos y las proteínas), ii) sustancias simples (azúcares, aminoácidos y otras pequeñas moléculas), y iii) sustancias húmicas. En esencia, la constituyen siete elementos: carbohidratos y azúcares, proteínas, grasas (descomposición rápida), hemicelulosa, celulosa, lignina (difícil degradación) y materia mineral (no biodegradable) (Epstein, 1997; Bernal et al., 2009).

La composición de la materia orgánica varía significativamente y determina las tasas de descomposición durante el proceso de compostaje (de Bertoldi et al., 1983; Epstein, 1997; Zhang et al., 2007; Iacovidou et al., 2012a). Por lo tanto, el conocimiento de esta composición es importante para aspectos de diseño, operación y control del proceso. Dado que la calidad de las características fisicoquímicas de los materiales a compostar debe estar en condiciones adecuadas para el proceso (Ver Sección 1.1.5), se ha definido el concepto de *co-compostaje* con la adición de *co-sustratos* que compensen las deficiencias en las propiedades originales del material (Ruggieri et al., 2008).

Respecto de la combinación de materiales en el proceso de compostaje, se ha identificado que la mezcla de ricos en proteínas con ricos en material celulítico reduce el potencial de generación de olores y de pérdidas de N_{TOTAL} durante el proceso y genera una C/N más favorable para la población microbiana (Epstein, 1997; López et al., 2010). De otro lado, materiales con altos contenidos de celulosa y lignina toman mayor tiempo para descomponerse; la combinación de este tipo de materiales con residuos de alimentos puede ayudar a reducir el tiempo de compostaje, dado que los carbohidratos y azúcares de los residuos de alimentos comienzan a descomponerse rápidamente e incrementan el nivel de actividad microbiana (Epstein, 1997; Ruggieri et al., 2008).

En relación con las grasas, lípidos y aceites (que integran los residuos de alimentos), químicamente son triglicéridos que consisten en ácidos grasos de cadena lineal, con ésteres y glicerol, o también de ácidos grasos libres y glicerol cuando ha tenido lugar la hidrólisis (Lemus y Lau, 2002). Estos materiales se caracterizan por su alto contenido de energía y por lo tanto, pueden ser usados como co-sustratos cuando los materiales de compostaje no llegan a temperaturas para la inactivación de patógenos (Gea et al., 2006), favoreciendo las tasas de degradación y una mayor reducción de compuestos recalcitrantes como la lignina (Ruggieri et al., 2008).

3.2.2 Variabilidad de la materia prima en el compostaje de biorresiduos

Generalmente, los estudios sobre la variabilidad temporal en la producción y composición de los residuos se han orientado a la identificación de la variación de los RSM (Roberts et al., 2010; Doležalová et al., 2013). Scheinberg et al. (2010) indican que a pesar de que se presentan patrones comunes, la información disponible da cuenta de la variación de la composición de los RSM en un mismo país y entre países, así como en las diferentes estaciones del año; además, es influenciada por factores como localización geográfica, estándares de vida de la población, fuente de energía, clima, hábitos alimenticios, urbanización y tradiciones culturales (Adhikari, 2005).

Diferentes experiencias que analizan las variaciones temporales en la producción de RSM asociadas a las condiciones climatológicas no son coincidentes en los periodos de mayor producción de residuos, identificándose mayor producción en invierno en Jimma Ethiopia (Getahun et al., 2012a), en verano en el estado de Kuwait (Al-Jarallah y Aleisa, 2014) o la no ocurrencia de diferencias significativas en la producción entre invierno y verano, en Pakistan (Iqbal et al., 2010). Estas experiencias muestran que no se pueden hacer generalizaciones sobre las condiciones de variación de la materia prima y que es fundamental analizar las situaciones particulares de cada contexto.

Respecto al estudio de la variabilidad de los biorresiduos, se identifican pocos reportes y adicionalmente, éstos no evalúan el efecto de dicha variabilidad en el proceso de compostaje. Hanc et al. (2011) atribuyen los pocos estudios de la composición y características de los biorresiduos de las viviendas al requerimiento de labor intensiva y al tiempo que demandan los procedimientos. A pesar de los pocos reportes, autores como Zhang et al. (2007) y Barrena et al. (2011) han corroborado la variación de los biorresiduos y de elementos que lo integran como los residuos de alimentos, atribuyendo la variación a las características sociales y modelos de consumo de alimentos de los habitantes de la población.

De otro lado, Boldrin y Christensen (2010) analizaron la variabilidad de los residuos de jardines y parques (corte de césped y restos de poda, hoja y madera) encontrando que debido a su origen y características, estos materiales tienen tasas de generación y composición variables, asociadas a factores climatológicos, localización y estrategias de manejo de residuos.

En el Valle del Cauca (Colombia) se identificó una variabilidad en la composición física de la materia prima de los procesos de transformación de los biorresiduos en cinco instalaciones de compostaje, que es atribuible a las prácticas de manejo de residuos a nivel domiciliario, la continuidad en las actividades de sensibilización y el esquema de recolección de cada localidad (Marmolejo, 2011). A pesar de las variaciones, se observó un predominio en una dieta rica en carbohidratos (arroz, papa, plátano y yuca), con pequeñas proporciones de proteína animal y de frutas y verduras. Este mismo autor verificó en una de las localidades una alta variación en la composición física que puede incidir en el proceso de transformación de la materia orgánica (Ver [Tabla 21](#)).

Tabla 21. Composición física de la materia prima del compostaje en Versalles

Categoría	Rango (%)	Promedio (%) + Desviación Estándar (%)
Alimentos crudos	51,79 – 87,87	67,88 ± 13,41
Alimentos preparados	1,43 – 30,00	15,41 ± 11,71
Poda y jardín	0,23 – 17,14	7,87 ± 5,20
Impropios	1,43 – 13,55	8,85 ± 3,16

Fuente: Marmolejo (2011)

La variación temporal en la composición de los biorresiduos puede tener un impacto en las instalaciones de procesamiento de los residuos, pues tecnologías como digestión aerobia o anaerobia dependen de la composición de los residuos y en particular del contenido de C y nutrientes. Por lo tanto, debe ser tomada en cuenta para realizar los ajustes en la composición de los materiales procesados (Hanc et al., 2011).

En relación con el efecto de la variación de la composición de la materia prima en el compostaje, algunos reportes enunciados por Epstein (1997) indican el efecto de las diferentes proporciones de los componentes de la materia

orgánica en el proceso de compostaje, analizando aspectos como el efecto de la variación en la proporción de carbohidratos, celulosa y ligninas en la tasa de degradación. De igual manera, otros estudios (Chang y Hsu, 2008) reportan que alimentos crudos ricos en proteínas (derivados de soya, pescado y carne) tuvieron mayores temperaturas y menores tiempos para alcanzar la madurez en comparación con alimentos crudos con predominio de carbohidratos o grasas.

Dada la reconocida variabilidad de la calidad fisicoquímica de los biorresiduos y la influencia que tiene en el desarrollo del proceso y la calidad del producto del compostaje, es necesario identificar el comportamiento de dicha variabilidad para proponer mecanismos de operación y control (acondicionamiento de materiales o cambios operativos) que conduzcan a un proceso efectivo y a la obtención de un producto de calidad que cumpla con los estándares de calidad establecidos (Ver Figura 10).

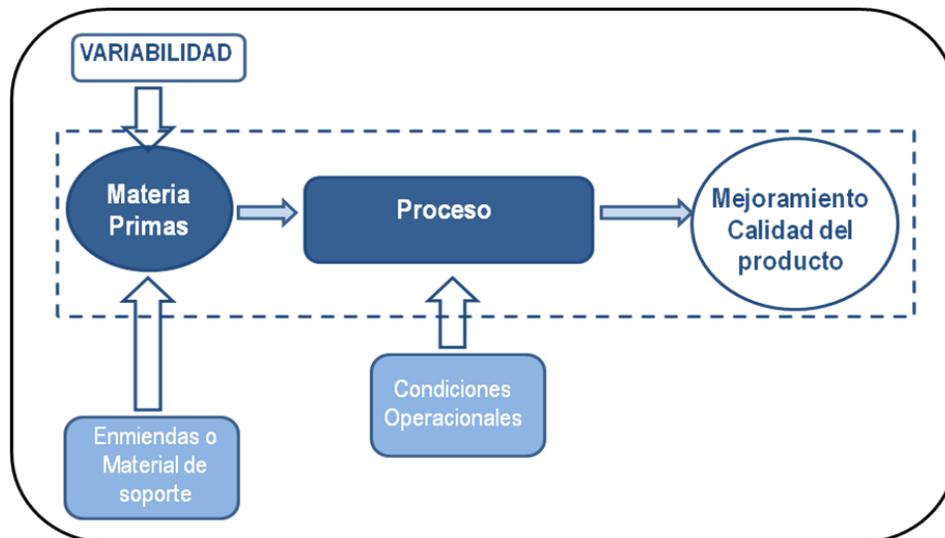


Figura 10. Control del proceso de compostaje de biorresiduos analizando la variabilidad de la materia prima

3.3 Materiales y Métodos

3.3.1 Área de estudio

El estudio se desarrolló en el municipio de Versalles - Valle del Cauca (Colombia), ubicado a 1.860 msnm con temperatura promedio de 18°C y precipitación promedio de 1.500 mm/año; aproximadamente el 80% de la población urbana (3.276 habitantes) separa los residuos sólidos en la fuente y el servicio de aseo incluye recolección selectiva con una frecuencia de dos veces por semana (lunes y jueves). Los residuos son trasladados a una instalación de compostaje en la cual, los operarios separan los materiales no biodegradables antes de conformar las pilas de compostaje, lo que finaliza entre 24 y 36 horas después del ingreso de los biorresiduos a la planta. De las 10,2 t sem⁻¹ de RSM generadas en promedio, 66% tienen potencial para ser compostados. Durante la conformación de las pilas, la materia prima se homogeniza manualmente y los materiales con tamaños superiores a 10 cm son triturados manualmente.

3.3.2 Caracterización de la materia prima

Para la caracterización fisicoquímica de la materia prima, se conformaron muestras a partir de sub-muestras tomadas directamente de las pilas de compostaje en el día cero del proceso. Previo a la obtención de la muestra, las pilas de compostaje fueron mezcladas manualmente, buscando la mayor homogenización posible. De cada pila se obtuvieron 50 kg aproximadamente que fueron mezclados y cuarteados para obtener las muestras de cada pila; 2 kg fueron destinados para la caracterización fisicoquímica. Tanto la conformación de las muestras como los procedimientos de trituración y preservación, fueron realizados de acuerdo con Sullivan y Miller (2001). Se tuvieron un total de 39 muestras (durante un período de 18 meses), de las cuales 20 procedían de pilas conformadas con materia prima recolectada el día lunes y 19 el día jueves (días empleados en la recolección).

Se determinó la composición física, clasificando y pesando el material en nueve categorías (Ver [Tabla 22](#)); las primeras cinco corresponden a alimentos no procesados. Las categorías 1 a 6 se propusieron acorde con Parfitt et al. (2010) y Gustavsson et al. (2011) y teniendo en cuenta los alimentos identificados en la materia prima. Así mismo, se consideró lo indicado por Liwarska-Bizukoja y Ledakowicz (2003) y Lebersorger y Schneider (2011) quienes mencionan que debido a la dificultad de determinar individualmente todos los componentes, los análisis son desarrollados con agrupamientos de manera que permitan comprender las características fisicoquímicas de los materiales.

Tabla 22. Materiales que integran cada categoría en la materia prima del compostaje de biorresiduos

No	Categorías	Descripción de materiales
1	Frutas cítricas/semi-cítricas ¹	Cáscaras y restos de: Limón, naranja, piña, maracuyá, lulo, guanábana, mango y mandarina
2	Frutas no cítricas ¹	Cáscaras y restos de: guayaba, banano, papaya, granadilla, manzana, melón, sandía, coco, pera, chontaduro, sapote.
3	Vegetales, legumbres y leguminosas ¹	Cáscaras y restos de: zapallo, cidra, tomate, zanahoria, repollo, pepino, remolacha, pimentón, cebolla larga, cebolla cabezona, cilantro, arveja, aguacate, habichuela, apio, ajo, col, frijoles, lechuga, perejil
4	Plátanos y tubérculos ¹	Restos y cáscaras de: yuca, plátano, papa, papa amarilla y arracacha.
5	Mezcla de alimentos no procesados ¹	Mezcla de restos y cáscaras de alimentos sin procesar que es definida por la dificultad de separación de materiales inferiores a 2 cm
6	Alimentos procesados	Restos de alimentos que han tenido procesamiento y/o cocción y que generalmente son restos postconsumo entre los que se encuentran: arroz, frijoles, arepa, plátano, papa, yuca, pan, galletas, buñuelos, arepas de maíz, carne de pollo, pastas y maíz cocido.
7	Poda y jardín	Corte de pasto, poda de árboles, hojas, ramas.
8	Papel y cartón	Servilletas y papel bond y papel periódico húmedos
9	Otros no biodegradables	Películas de plástico (empaques de alimentos y de restos de alimentos procesados), piedras, metales,

Nota: ¹integra los alimentos no procesados

La caracterización fisicoquímica realizada a las muestras de biorresiduos comprendió las variables: potasio (K_2O), carbono orgánico oxidable total (COT), fósforo total (P_2O_5), cenizas y humedad (Norma NTC 5167 - Icontec, 2003); pH (Soil Survey Laboratory Methods Manual Reporte N°42, Versión 2.0, 1992 - SSLMM 42-2-92); nitrógeno total (N_{TOTAL}) (Norma NTC 370 - Icontec, 1997); extracto etéreo y fibra cruda (Norma NTC 668 – Icontec, 1973), proteína (norma NTC 4657 – Icontec, 1999) y los carbohidratos (Análisis Proximal).

El [Anexo B](#) presenta la información sobre las mediciones fisicoquímicas de la materia prima y de la composición física de los sustratos. Finalmente, durante el período de estudio, se recolectó información de campo que pudiera

explicar la posible variación de los biorresiduos: i) día de montaje, ii) ocurrencia de eventos municipales, iii) días festivos, y iv) irregularidades en la recolección de residuos (Ver Anexo D).

3.3.3 Procesamiento de información

Inicialmente se evaluó si se presentaban diferencias significativas en la composición física y características fisicoquímicas de la materia prima proveniente de los dos días de recolección. Para tal efecto, se realizó la prueba paramétrica t-student para los casos en los que el comportamiento de ambos conjuntos de datos se adecuaba a una distribución normal. En los casos en los que el supuesto de normalidad no se cumplió, se empleó la prueba no paramétrica de Mann-Whitney. El cumplimiento del supuesto de normalidad se validó a través de la prueba de Shapiro-Wilks, la cual es recomendable para contrastar el ajuste de un conjunto pequeño de datos a una distribución normal. En el caso de cumplimiento de normalidad, se empleó la prueba F para determinar si la variabilidad de la materia prima entre los días de montaje se puede considerar estadísticamente igual. Bajo el incumplimiento del supuesto de normalidad se empleó la prueba de Levene (Kuehl, 2001) para determinar si la variabilidad de la materia prima entre los días de recolección se puede considerar estadísticamente igual.

Una vez se determinó si se presentaban o no diferencias significativas entre la calidad fisicoquímica de la materia prima proveniente de los dos días de montaje, se realizó la descripción de la materia prima a través de: i) estadísticos descriptivos y ii) coeficientes de correlación. Los estadísticos descriptivos incluyeron medidas de tendencia central y de dispersión para analizar la composición física y de las características fisicoquímicas.

Adicionalmente, se construyeron los intervalos de confianza con un nivel de confianza del 90%; para tal efecto, se desarrolló la prueba de Shapiro- Wilks, rechazando la hipótesis de normalidad para valores-p de la prueba inferiores a 10%; para valores inferiores al 10% se construyeron los intervalos de confianza vía Bootstrap y para valores superiores por distribución t-student. Finalmente, se evaluó la intensidad con que se asocian los parámetros fisicoquímicas y los de la composición física a través del coeficiente de correlación por rangos de Spearman, el cual mide la asociación entre pares de variables cuando al menos una de ellas no tienen una distribución Normal. El procesamiento estadístico se realizó en el programa para el análisis de datos de libre distribución R versión 2.15.2.

Las características fisicoquímicas de los biorresiduos fueron comparadas con reportes de la literatura que incluyeron los términos: biorresiduos (biowaste), fracción orgánica de RSM (Organic fraction from municipal solid waste), residuos de alimentos (food waste), residuos de cocina (kitchen waste), residuos de frutas y vegetales (fruit and vegetable waste). La [Tabla 23](#) presenta los estudios considerados para este análisis comparativo.

Tabla 23. Documentos de referencias empleados para comparar la calidad de los biorresiduos

Categorías	Referencias
Biorresiduos/fracción orgánica de los RSM	Forster-Carneiro et al (2008); Hanc et al. (2011); Francou et al. (2008); Tosun et al. (2008); Lopez et al. (2010); Huerta-Pujol et al. (2011)
Residuos de alimentos	Adhikari et al. (2009); Tsai et al. (2007); Schwalb et al. (2011); Kim et al. (2008); Lin (2008); Chang y Chen (2010); Zhang et al. (2007)
Residuos de cocina	Chang et al. (2006); Kumar et al. (2010); Farrell y Jones (2010); Chan y Hsu (2008); Li et al. (2009); Yang et al. (2013)
Residuos de frutas y vegetales	Jolanun et al. (2008); Jolanun et al. (2005)

3.3.4 Propuestas de mejoramiento de la materia prima a partir de la tipificación del sustrato

Con el propósito de identificar estrategias de mejoramiento de la calidad de las materias primas del compostaje de biorresiduos, una vez fueron tipificadas, se identificaron las deficiencias y excesos en los parámetros de calidad fisicoquímica analizados. Con base en este diagnóstico, se realizó un inventario de materiales de soporte y enmienda en la zona de estudio, visitando establecimientos o predios con potencial de suministrar dichos materiales. Se aplicó un formato de visita que se observa en el [Anexo E](#).

Se identificaron como potenciales materiales: i) residuos de cosecha de frutas (mora), ii) bagazo de caña, iii) residuos de poda (pasto estrella), iv) material en proceso, v) cenizas de madera, vi) estiércol bovino, vii) estiércol porcino y viii) pollinaza. Con el propósito de seleccionar los de mayor potencial, se construyó una herramienta que incorpora variables de orden técnico y socioeconómico. Las variables fueron propuestas a partir de la consulta a actores con conocimiento en el tema y teniendo en cuenta la calidad fisicoquímica de los materiales y aspectos relacionados con las condiciones para la entrega por parte de los generadores del material.

Las ponderaciones propuestas en la herramienta fueron discutidas con miembros del grupo de investigación ECCA. Se realizó la evaluación con tres escenarios de ponderación, con el propósito de observar las tendencias en los resultados finales. La [Tabla 24](#) presenta la herramienta propuesta para la selección de los materiales y el [Anexo F](#) presenta la explicación de cada indicador y los resultados de la aplicación de la misma.

Tabla 24. Herramienta para selección de materiales para mejorar la calidad de los sustratos

% ¹	Indicadores	%	Medición	Valores Posibles	Valor Deseado	Calificación
%	Calidad requerida del material (CARM)	28 24 24 12 12	Cumple criterio de C/N Cumple criterio de humedad Cumple criterio de pH Cumple criterio de otros nutrientes Suministra porosidad	Si/No Si/No Si/No Si/No Si/No	Si	Si: 5 puntos No: 1 punto
%	Cantidad requerida de material (CRM)	100	CRM para complementar sustrato en términos de masa	-99% < CRM < 99	Cantidad entre 0 y 15%	menor de 0%: 0 puntos Mayor de 30%: 1 punto Entre 15 y 30%: 3 puntos Menor de 15%: 5 puntos
%	Menor costo de adquisición (Ind _{costo})	100	Costo material / mayor costo de todos los materiales	Ind _{costo} ≥ 0	Ind _{costo} ≤ 0,5	Ind _{costo} < 0,5: 5 puntos Ind _{costo} ≥ 0,5: 1 punto
%	Acceso para consecución del material	100	Tipo de vía acceso	Pavimentada Afirmado Carreteable Trocha No existe	Pavimentada	Pavimentada: 5 puntos Afirmado: 4 puntos Carreteable: 3 puntos Trocha: 2 puntos No existe: 0 puntos
%	Distancia al SA	100	Distancia al SA (D)	D ≥ 0	D = 0	D = 0 km: 5 puntos 1 < D < 3 km : 4 puntos 3 ≤ D < 5 : 3 puntos D ≥ 5 : 1 punto
%	Disposición para entrega de material	100	Presenta restricciones para suministro continuo	Si No	No	Si: 1 punto No: 5 puntos
%	Facilidades de manejo del material	100	Requerimientos operativos	Clasificación y trituration Trituration No requiere	No requiere	Clasif. y trit.: 1 punto Trituration: 3 puntos No requiere: 5 puntos

Nota: ¹Fueron variados para realizar la evaluación bajo tres alternativas de ponderación diferentes

3.4 Resultados y Discusión

3.4.1 Composición física

La Tabla 25 presenta los promedios y la desviación estándar de la composición física de la materia prima, así como los valores-p asociados a las pruebas estadísticas empleadas para determinar la igualdad entre días de montaje.

Tabla 25. Composición física de los sustratos sometidos a compostaje en el caso de estudio

Categorías	Unidad	Promedio \pm desviación estándar	Coefficiente de Variación (%)	Igualdad entre días de montaje (p>0,10)
Plátanos y tubérculos ¹	% (b.h.)	32,57 \pm 7,35	22,58	0,771
Frutas cítricas ¹	% (b.h.)	15,45 \pm 4,43	28,71	0,646
Frutas no cítricas ¹	% (b.h.)	3,42 \pm 2,01	58,99	0,286
Verduras, legumbres y hortalizas ^{1,2}	% (b.h.)	7,12 \pm 3,45	48,43	0,023
Mezcla alimentos no procesados ¹	% (b.h.)	35,66 \pm 9,16	25,69	0,923
Sumatoria comida sin procesar	% (b.h.)	92,90 \pm 3,98	4,28	1,000
Comida procesada	% (b.h.)	2,02 \pm 1,78	88,27	0,757
Papel y cartón	% (b.h.)	1,96 \pm 1,46	74,60	0,944
Poda y jardín	% (b.h.)	1,74 \pm 1,26	72,39	0,684
Otros No biodegradables	% (b.h.)	1,39 \pm 0,96	69,05	0,332

Nota: b.h.: base húmeda; ¹hacen parte de la categoría de comida sin procesar; ²Existe diferencias significativas entre los días de montaje a un nivel del 10%.

Tan solo se encontró diferencias significativas entre los días de montaje, en la categoría verduras, legumbres y hortalizas, situación que puede atribuirse a cambios en la dieta durante los días de la semana y entre el periodo de estudio, tal como se ha encontrado en otros contextos (Getahun et al., 2012a; Al-Jarallah y Aleisa, 2014).

Los coeficientes de variación en todas las categorías presentan alta variabilidad (23 a 88%). Las fluctuaciones en la separación en la fuente, condiciones de la recolección selectiva, otros hábitos de manejo de los residuos al interior del predio y condiciones operativas en la instalación de compostaje en la zona de estudio, pueden explicar la variabilidad en los resultados, tal como lo encontró Ward et al. (2005). Respecto de los residuos de alimentos, su composición no homogénea con fluctuaciones diarias puede explicar su variabilidad (Neves et al., 2009).

Los alimentos sin procesar, categoría predominante (92,90%) en la materia prima, se caracterizan por tener sustancias orgánicas de fácil degradación (azúcares, lípidos, almidones y proteínas), alta relación COT/cenizas, alta concentración de N_{TOTAL}, baja relación C/N y poca estructura física (Tsai et al., 2007; Kumar et al., 2010; Abdullah y Chin, 2010; Li et al., 2013; Yang et al., 2013). Entre los alimentos sin procesar, una de las categorías predominante es plátanos y tubérculos (papas, yuca, plátano, arracacha), en los cuales se ha reportado alto contenido de potasio (Kalemelawa et al., 2012) así como de bacterias fijadoras de N y celulolíticas (Nasreen y Qazi, 2012), que podría influenciar positivamente el contenido de nutrientes en el producto y facilitar la degradación de materia orgánica de lenta degradación.

La suma de las categorías de frutas (cítricas y no cítricas) y vegetales (Verduras, legumbres y hortalizas) (25,99%) representa una fracción importante del proceso de compostaje; se caracterizan por alta humedad, alta composición de materia orgánica (integrada por almidón, celulosa, azúcar soluble y ácidos orgánicos), de fácil degradación

(Kroyer, 1995; Stabnikova et al., 2005; Jolanun et al., 2005); esta alta proporción es similar a la reportada en otros estudios de caracterización de biorresiduos tanto en países desarrollados (Parfitt et al., 2010) como en países en desarrollo (Gustavsson et al., 2011). De otro lado, la presencia de frutas cítricas o semicítricas (15,45%) puede afectar el valor inicial del pH de los biorresiduos, tal como encontraron Nasreen y Qazi (2012), incidiendo en la actividad biológica y en el arranque del proceso.

La baja proporción de residuos de alimentos procesados se asocia con prácticas como la alimentación de animales (cerdos) con estos residuos (Marmolejo et al., 2010a), situación que influencia positivamente el proceso, debido a que este tipo de alimentos presenta importantes contenidos de aceites, lípidos y grasas que, a pesar de tener alto contenido de energía, algunos de sus componentes podrían tener un efecto inhibitorio en el proceso biológico, dificultando la degradación de la materia orgánica durante el compostaje (Neves et al., 2009; Tsai et al., 2007).

La implementación de prácticas de separación en la fuente y la eficiencia de los operarios en las actividades de acondicionamiento de la materia prima en la planta de compostaje, contribuyen con la menor proporción de impurezas y material no biodegradable, lo que también es favorable para el proceso de compostaje, pues se mejora la calidad de los sustratos (Hansen et al., 2007; Hargreaves et al., 2008; López et al., 2010). La presencia de impurezas genera una disminución en la concentración de materia orgánica de la materia prima a procesar y menores tasas de respiración que de biorresiduos separados en la fuente, situación que tiene incidencia en el diseño de instalaciones y en el tiempo de maduración del producto (Barrena et al., 2011).

3.4.2 Calidad Físicoquímica

La [Tabla 26](#) presenta los estadísticos descriptivos de las variables de calidad físicoquímica de la materia prima del proceso de compostaje, los valores-p asociados a las pruebas estadísticas empleadas para determinar la igualdad entre días de montaje y los resultados obtenidos en otros estudios con el propósito de realizar comparaciones con los obtenidos en este estudio. Los valores de otros estudios, hacen referencia a información de la literatura con las denominaciones: biorresiduos, fracción orgánica de los RSM, residuos de alimentos, residuos de cocina y residuos de fruta y vegetales, tal como se presenta en la [Tabla 23](#). Es conveniente mencionar que debido a que no se encontraron diferencias significativas entre la calidad físicoquímica de la materia prima de los dos días de montaje, la información se analizó considerando un solo tipo de materia prima. En el [Anexo G](#) se presentan los promedios de la calidad físicoquímica de la materia prima para cada día de montaje.

La [Figura 11](#) presenta el comportamiento en el tiempo de cada uno de los parámetros analizados en el estudio. En el eje de las abscisas se observa el número de muestras realizadas (muestreo) y se observan dos líneas horizontales, la roja representa el valor promedio de los datos mientras que la azul, representa los valores de referencia de las características físicoquímicas de la materia prima para el inicio del proceso de compostaje (Ver [Tabla 8](#)).

Tabla 26. Calidad fisicoquímica de la materia prima y su comparación con la reportada en otros estudios

Variable	pH (Unidades)	Humedad (%)	COT (%)	N _{TOTAL} (%)	C/N	K _{TOTAL} (%)	P _{TOTAL} (%)	Ceniza (%)	Extracto Etéreo (%)	Fibra Cruda (%)	Proteína (%)	Carbohidratos (%)
Promedio ± desviación estándar	5,5 ± 0,5	76,7 ± 3,2	33,0 ± 4,8	1,6 ± 0,5	21,7 ± 5,3	1,6 ± 0,5	0,3 ± 0,1	25,1 ± 5,6	4,3 ± 1,2	12,1 ± 5,2	10,1 ± 3,1	48,4 ± 6,7
CV (%)	9,09	4,17	14,55	31,25	24,42	31,25	33,33	22,52	27,01	42,98	30,32	13,75
Igualdad entre días de montaje (p>0,10)	0,720	0,946	0,985	0,613	0,436	0,716	0,989	0,572	0,325	0,672	0,653	0,757
Rango otro estudios	3,8 – 7,3	63,7 – 91,5	30,5 -52,0	1,0 – 5,4	13 - 36	0,9 – 2,4	0,1 – 0,6	3,0 – 21,5	15 - 40	12,6 – 17,1	10 - 30	40 - 65
Jolanun et al. (2005)	4,63	90,3	40,4	2,1	22,6			7,74				
Chang et al. (2006)		65 - 80	50 – 5	3 – 4	13 - 18			3,5 - 5,5	15 - 35		12 - 20	52 - 65
Franco et al. (2006)	5,4	90	41,6	2,1	20,1					13,2		
	4,67	76,53	41,9	3,0	13,9			12,59		15,31		
Tsai et al. (2007)	4,08	73,55	43,6	3,9	12,0			11,66		17,08		
	4,7	81,12	39,3	2,4	15,3			12,95		12,62		
Zhang et al. (2007)			46,8	3,2	14,8	0,9	0,52					
Chan y Hsu (2008)		65 - 80	45 – 65	1 – 3	15 - 40			3 - 5	15 - 40		10 - 30	40 - 60
Forster-Carneiro et al (2008)	7,3		30,5	3,4	8,9		0,10					
Jolanun et al. (2008)	6,22	91,52	42,9	2,3	18,3			21,51				
Kim et al. (2008)	4,4	80	53,0	2,2	24,1							
Lin (2008)	4,57	85	39,6	1,1	36,0	1,2	0,60					
Tosun et al. (2008)	5,4	80,3	37,8	1,9	20,0							
Adhikari et al. (2009)	4,1	87,8	47,4	2,0	23,7							
Li et al. (2009)	5,1								23,9		15	55,2
Chang y Chen (2010)		65 - 80	50 - 52	3 – 4	13 - 18			3 - 5	15 - 35		12 - 20	52 - 65
Farrell y Jones (2010)	4,58	63,7	49,6	1,9	26,1							
Kumar et al. (2010)	3,8 - 6,5	70 - 80	47,4	5,4	8,9							
Lopez et al. (2010)	5,26	70,84	42,6	2,5	17,0	1,1 ¹	0,58 ¹					
Hanc et al. (2011)	5,62	71,5	37,1	1,6	23,6	1,5	0,16					
Marmolejo et al. (2011)	6,40	77,0	30,8	1,6	20,3	2,5	0,38					
	5		47,8	1,9	25,2							
Schwab et al. (2011)	5,1		47,4	1,6	29,6	1,8	0,11					
	4,8		44,8	2,4	18,7	3,7	0,20					
	4,4		43,9	1,7	26,4	2,3	0,29					
Yang et al. (2013)	5,75	66,9	40,0	1,1	35,1							

Nota: Datos en base seca; CV: coeficiente de variación; ¹reportados por Huerta-Pujol et al. (2011); ²datos de los municipios del Valle del Cauca; espacios en blanco significa que no reportaba dato

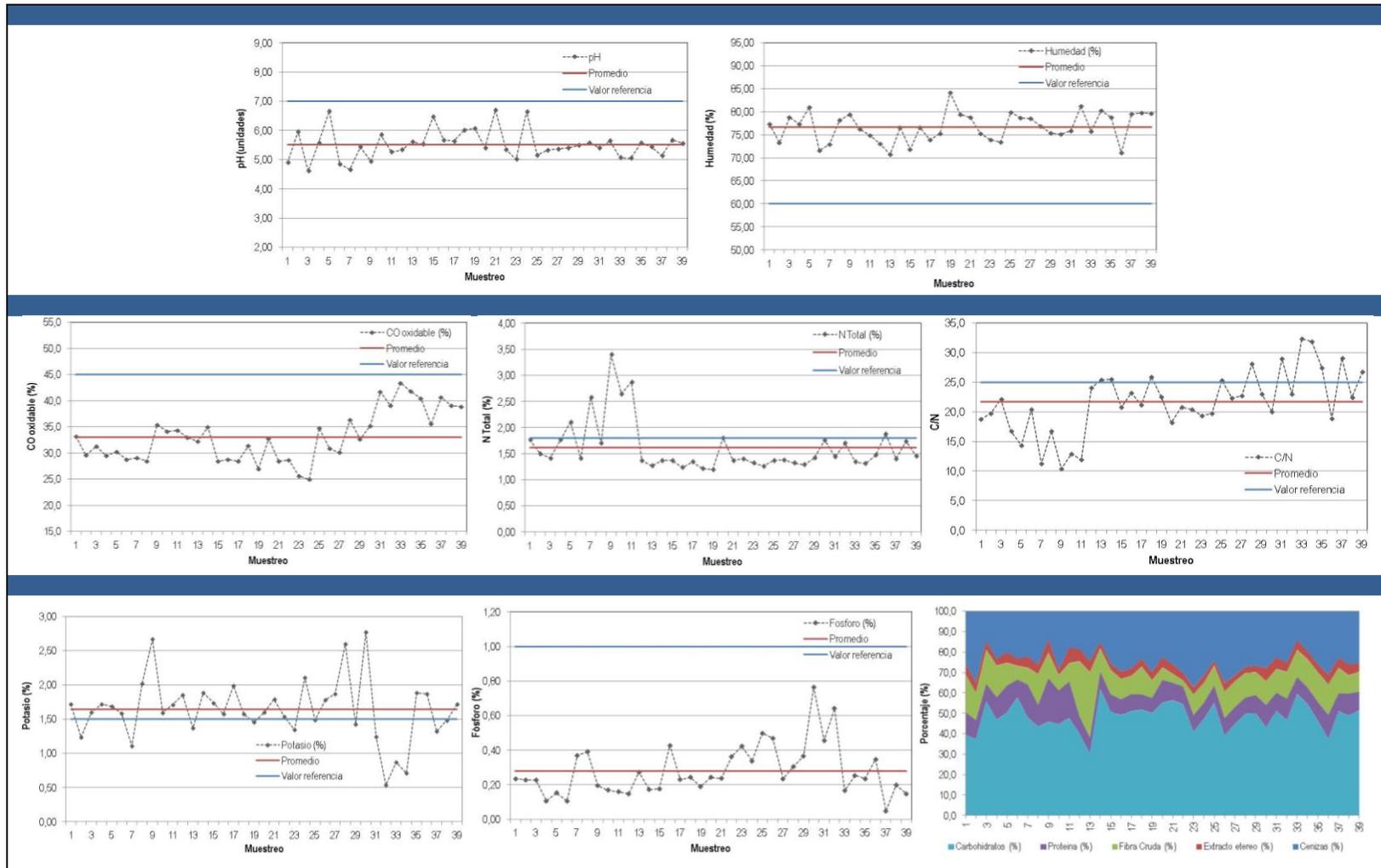


Figura 11. Variación de los parámetros durante las jornadas de muestreo

En general, a excepción del pH, humedad, COT y carbohidratos, los restantes parámetros presentan coeficientes de variación entre 22,52 y 42,98%, catalogados como altos y que puede estar asociada a la variación y heterogeneidad en la composición física de la materia prima.

El pH ácido se debe a que los residuos de alimentos contienen material rápidamente fermentable que favorece la producción temprana de ácidos orgánicos de bajo peso molecular, desde el almacenamiento de los residuos en las viviendas (Bergersen et al., 2009; Krogmann et al., 2010). Los bajos valores en el pH también pueden asociarse al contenido de humedad (superior a 70%) que puede propiciar condiciones anaerobias durante el almacenamiento de residuos que facilita la generación de ácidos orgánicos volátiles (López et al., 2010).

La característica ácida de la materia prima ha sido reportada por otros autores (ver [Tabla 26](#)), los cuales mayoritariamente presentan valores menores al promedio encontrado en este estudio. De acuerdo con Smår et al. (2002), Sundberg et al. (2004) y Wong et al. (2009), los pH ácidos afectan el proceso durante la fase inicial de incremento de la temperatura y pueden generar ineficiencia en la descomposición (Neves et al., 2009; Sundberg et al., 2011). Esto sucede porque a bajos pH, los ácidos orgánicos de cadena corta (láctico y acético) están presentes predominantemente en forma disociada, la cual resulta tóxica para los microorganismos y por lo tanto, inhibe la actividad microbial (Bergersen et al., 2009).

El alto contenido de humedad es típico de este tipo de sustratos (ver [Tabla 26](#)) y se debe a la alta proporción de residuos de alimentos sin procesar (vegetales y frutas) (Kim et al., 2008; Jolanun et al., 2008), que presentan humedades entre 66 y 80% (Chiumenti et al., 2005; Zhang et al., 2007; Epstein, 2011). La humedad excesiva (>70%) reduce los espacios en la matriz a compostar, causa limitaciones de oxígeno y puede generar baja eficiencia de degradación (Li et al., 2013), situación crítica en este estudio en el que la humedad osciló entre 70 y 85% durante el periodo de análisis (Ver [Figura 11](#)).

El COT fue similar al reportado en el área de estudio (Marmolejo et al., 2010a; Marmolejo, 2011) e inferior al encontrado en estudios de otros contextos (ver [Tabla 26](#)) que presentan valores entre 40 y 50%. El bajo contenido de COT puede asociarse a la baja proporción de material celuloso, que se ratifica con la baja concentración de fibra cruda en comparación con lo encontrado en otros reportes. Así mismo, puede estar asociado al inicio de la oxidación de la materia orgánica durante el almacenamiento, recolección y recepción de los biorresiduos en la instalación de compostaje. En N_{TOTAL} presenta valores típicos para biorresiduos acorde con lo indicado por Hanc et al. (2011) y Tchobanoglous et al. (1994) y menores a los reportados para residuos de alimento (ver [Tabla 26](#)) por Adhikari et al. (2009); Tsai et al. (2007); Schwalb et al. (2011); Kim et al. (2008); Chang y Chen (2010); Zhang et al. (2007).

La relación C/N es inferior a la recomendada por diversas fuentes (25 a 30) (Chiumenti et al., 2005; Agnew y Leonard, 2003), incrementando la posibilidad de afectar el inicio efectivo del proceso (Haug, 1993; Beck-Friis et al., 2003) y de propiciar pérdidas de N_{TOTAL} . La C/N fue semejante a la encontrada por Adhikari (2005) para residuos de alimentos (entre 17,9 y 23,1), quien identificó la necesidad de ajustarla en los periodos estacionales en los que fue más baja.

El K_{TOTAL} y el P_{TOTAL} son esenciales para el proceso de compostaje debido a que son elementos estructurales y fuente de energía para microorganismos. El K_{TOTAL} se asocia a la presencia de cáscaras de plátano (predominante en la materia prima), mientras que el P_{TOTAL} con la de vegetales y leguminosas. Los valores de ambos parámetros

son característicos de la zona de estudio (Marmolejo, 2011). El bajo contenido de P_{TOTAL} es característico de residuos de alimentos (Kroyer, 1995) mientras que en el caso del K_{TOTAL} se observa una concentración relativamente alta, que puede incrementar el valor nutritivo del producto (ver Tabla 26).

Respecto del P_{TOTAL} , Huerta-Pujol et al. (2011) indican que el bajo contenido puede ser ocasionado por la formación de formas solubles del fósforo desde formas insolubles bajo condiciones ácidas, como las encontradas en este estudio, y dicha fracción solubilizada puede perderse en la lixiviación del material, previo al montaje de las pilas de compostaje y durante los primeros días del proceso. Es importante indicar que el contenido de P_{TOTAL} en la materia prima es fundamental, pues la concentración de este nutriente en el producto depende más de su contenido inicial que de la transformación durante el proceso (Ward et al., 2005) generando deficiencias de éste en el producto.

Las cenizas reflejan el contenido mineral del material y su incremento durante el proceso de transformación muestra el grado de mineralización de la materia orgánica (Nasreen y Qazi, 2012). Este parámetro presentó valores bajos en comparación con reportes previos en la localidad (Marmolejo, 2011), que puede relacionarse con una baja cantidad de impurezas. Adicionalmente, puede relacionarse con el contenido mineral presente en algunas frutas y verduras, que puede variar entre 2 y 9% en las frutas y entre 0,7 y 16% en los vegetales (Asquer et al., 2013).

Con respecto a la materia orgánica, en este estudio se encontró un predominio de los carbohidratos, seguidos en su orden por fibra cruda, proteínas y extracto etéreo, tendencia también reportada por Chang y Chen (2010), Li et al. (2009) y Chang et al. (2006) quienes reportan resultados similares de esta composición para residuos de alimentos.

El contenido de carbohidratos está asociado a la presencia de elementos como plátano, yuca, arracacha, papa y maíz, el de proteínas a la de leguminosas (frijol y arveja) mientras que las fibras y mezcla de minerales a la de verduras, frutas, hierbas y poda y hojas. Los carbohidratos y proteínas son esenciales en el compostaje pues los microorganismos inician la descomposición de compuestos fácilmente degradables (azúcares, ácidos orgánicos y aminoácidos) provenientes de éstos (Chiumenti et al., 2005); no obstante es necesario un mayor control pues este tipo de sustratos son rápidamente acidificables (Li et al., 2009).

En relación con el contenido de proteínas, son las que aportan la mayor parte del N_{TOTAL} , siendo la mayoría de éste biodegradable (Sánchez, 2007). Chang y Hsu (2008) han demostrado de forma concluyente, que sustratos ricos en proteínas se caracterizan por un rápido crecimiento de las bacterias, un rápido consumo de ácidos que implica un menor requerimiento de tiempo para la maduración, produce más CO_2 , se alcanzan mayores temperaturas y valores de pH más altos al final del proceso. Esta puede ser una de las causas por las que estudios previos desarrollados en el área de estudio, han mostrado valores de pH altos al final del proceso (Marmolejo et al., 2010a; Marmolejo, 2011).

En este estudio se encontró un bajo contenido de extracto etéreo en comparación con el reportado en otros estudios (ver Tabla 26) que está relacionado con la poca presencia de residuos de alimentos preparados. De acuerdo con Nakasaki et al. (2004), los resultados de su estudio indican que la materia orgánica que contiene grasas se descompone bien si dicho contenido es pequeño, situación también encontrada en este estudio. No obstante, también debe tenerse en cuenta que a pesar de su alto contenido de energía, puede presentar una inhibición en la temperatura del compostaje, lo cual puede atribuirse a la poca solubilidad y la limitada porosidad de algunas grasas que dificultan su procesamiento y además, porque cubre la superficie de otros materiales orgánicos (Neves et al., 2009; Maliki y Lai, 2011).

3.4.3 Correlación entre los parámetros físicos y los fisicoquímicos

La Tabla 27 presenta la correlación entre los parámetros físicos y los fisicoquímicos de la materia prima del compostaje de biorresiduos. En general, se observa que entre 5 pares de parámetros se presenta una relación directa estadísticamente significativa y entre 13 pares de parámetros una inversa estadísticamente significativa.

Entre los parámetros físicos y los fisicoquímicos se encontraron tan solo tres relaciones estadísticamente significativas, las tres inversas, cuyos resultados no son concluyentes. Esto puede estar asociado a la propuesta de composición física planteada, a la incertidumbre en categorías como “mezcla de materiales” (integrado por pequeñas fracciones de alimentos sin procesar), a los diferentes niveles de avance en la transformación de la materia orgánica y a la alta variabilidad encontrada en el conjunto de parámetros fisicoquímicos.

Los bajos coeficientes de correlación entre los parámetros físicos y los fisicoquímicos así como los resultados inesperados entre estas relaciones, pueden estar relacionados posiblemente a la heterogeneidad en el contenido nutricional y fisicoquímico de cada uno de los elementos que integran las categorías de composición física propuestas que dificultan el análisis desarrollado. Entre los resultados se esperaba encontrar una influencia entre: i) pH por la presencia de frutas cítricas y las verduras, leguminosas y hortalizas, ii) humedad por presencia de frutas y de plátanos y tubérculos y las verduras por su alto porcentaje de agua de constitución, iii) cenizas por la presencia de residuos con contenidos de minerales como las frutas y las hortalizas, iv) fibra cruda con la presencia de frutas y verduras con contenidos de celulosa, hemicelulosa y lignina en su pared celular y, v) extracto etéreo con la presencia de frutas cítricas y verduras por su alto contenido de pigmentos como la clorofila y la cera y cutícula presentes en las cáscaras.

Tabla 27. Correlación entre parámetros físicos y fisicoquímicos de la materia prima del compostaje

	Variables fisicoquímicas											Variables físicas										
	COT	N _{Total}	C/N	K _{Total}	P _{Total}	Cen	ExtE	Fib	Prot	Carb	pH	Hum	CSP	CP	PyC	PyJ	Otros	PyT	FC	FNC	VLH	MM
COT	1,00	,267	,486	-,164	-,067	-,461	,301	,284	,271	,089	-,263	,318	,063	-,182	-,028	-,132	,317	-,014	-,225	,082	,114	,169
N _{Total}		1,00	-,635	,097	-,144	-,245	,450	-,060	,999	-,245	-,166	,076	,014	,150	-,144	-,139	,144	-,093	-,421	-,037	,087	,234
C/N			1,00	-,267	,061	-,131	-,197	,249	-,632	,363*	-,003	,204	,003	-,240	,163	,013	,153	-,003	,230	,174	,070	-,090
K _{Total}				1,00	-,086	,166	-,073	,072	,093	-,204	,162	-,093	,281	-,207	-,182	-,256	-,092	-,129	,012	,026	-,336	,253
P _{Total}					1,00	,420	-,050	,003	-,150	-,227	-,009	-,057	,048	-,008	-,213	,150	-,251	,048	-,034	,270	,199	,047
Cen						1,00	-,405	-,165	-,256	-,463	,379	-,188	,313	-,080	-,373*	-,107	-,425	,038	,168	,232	,183	-,137
ExtE							1,00	,181	,449	-,245	-,157	-,025	-,061	-,090	,126	,092	,060	,164	-,307	-,253	-,218	,210
Fib								1,00	-,044	-,440	-,163	-,055	,045	-,128	,148	-,026	,162	-,288	-,111	-,043	-,199	,382
Prot									1,00	-,253	-,181	,072	-,001	,166	-,137	-,133	,148	-,107	-,422	-,020	,095	,238
Carb										1,00	-,075	,283	-,212	,062	,310	,069	,222	,046	,123	-,007	,037	-,252
pH											1,00	,037	-,015	-,038	,057	-,023	-,168	,045	,065	,033	-,206	,025
Hum												1,00	,060	-,105	-,056	-,054	,267	,145	-,033	,105	,245	-,260
CSP													1,00	-,647	-,647	-,655	-,421	,307	,040	,107	,038	-,036
CP														1,00	,254	,028	,087	-,200	-,101	,162	,048	-,053
PyC															1,00	,389	,189	-,323*	-,134	-,233	-,277	,118
PyJ																1,00	,264	-,138	,201	-,253	,057	-,090
Otros																	1,00	-,306	-,233	-,128	,070	,152
PyT																		1,00	,139	-,156	-,092	-,600
FC																			1,00	,029	,180	-,490
FNC																				1,00	,307	-,175
VLH																					1,00	-,417
MM																						1,000

Nota: Hum: humedad, Cen: cenizas, EE: extracto etéreo, Fib: fibra cruda, Prot: proteína, Carb: carbohidratos, CP: comida procesada, PyC: papel y cartón, PyJ: poda y jardín, PyT: plátano y tubérculo, FC: frutas cítricas, FNC: frutas no cítricas, VLH: verduras, leguminosas y hortalizas, MM: mezcla de materiales

3.4.4 Propuestas para mejorar calidad de los sustratos a partir de la tipificación de la materia prima

La [Tabla 28](#) presenta el intervalo de confianza para el promedio de las variables de mayor interés en el control del proceso de compostaje.

Tabla 28. Intervalos de confianza para la materia prima del proceso de compostaje

Variable	Unidad	Valor-p Prueba de Shapiro	Promedio	Intervalo de Confianza (90% de confianza)
pH	Unidades	0,026	5,5	[5,39 - 5,65]
Humedad	%	0,585	76,7	[75,84 - 77,54]
COT	% (b.s.)	0,082	33,0	[31,77 - 34,28]
N _{TOTAL}	% (b.s.)	2,0E-07	1,6	[1,50 - 1,75]
C/N	--	0,626	21,7	[20,23 - 23,08]
K _{TOTAL}	% (b.s.)	0,052	1,6	[1,53 - 1,76]
P _{TOTAL}	% (b.s.)	0,002	0,3	[0,24 - 0,32]
Cenizas	% (b.s.)	0,521	25,1	[23,53 - 26,57]
Extracto etéreo	% (b.s.)	0,393	4,3	[4,02 - 4,66]
Fibra cruda	% (b.s.)	7,1E-05	12,1	[10,82 - 13,84]
Proteína	% (b.s.)	2,03E-07	10,1	[9,33 - 11,11]
Carbohidratos	% (b.s.)	0,771	48,4	[46,61 - 50,20]

Nota: b.s.: base seca

De acuerdo con lo analizado en este capítulo, la materia prima del proceso de compostaje de biorresiduos no presenta condiciones favorables debido a aspectos como pH en el rango ácido, humedades que exceden el 70%, contenido limitado de COT, relación C/N menor a la recomendada en la literatura y baja concentración del P_{TOTAL}. Adicionalmente, se observa un bajo contenido de fibra cruda, elemento que de suplirse, podría contribuir al incremento del C (celulosa, hemicelulosa y ligninas) estimulando una mayor formación de sustancias húmicas al final del proceso de compostaje.

En la literatura se mencionan diversas estrategias para mejorar el proceso de compostaje tales como la adición de materiales de soporte o de enmienda (Beck-Friis et al., 2003; Sundberg y Jönsson, 2005; Tsai et al., 2007; Wong et al., 2009; Farrell y Jones, 2010; Epstein, 2011). Los materiales de soporte pueden favorecer el proceso ayudando a regular el exceso de humedad y a mejorar la aireación del material, incidiendo también en la acidez del medio; los materiales de enmienda pueden ayudar a incrementar deficiencias del C y P_{TOTAL}, o favorecer un mejor pH para el inicio del proceso.

Para las condiciones de la zona de estudio y buscando valorizar otros residuos o materiales disponibles, se realizó un inventario de materiales potenciales para incorporar como soporte o enmienda, encontrando: i) residuos de cosecha de frutas (mora), ii) bagazo de caña, iii) residuos de poda (pasto estrella), iv) material en proceso, v) cenizas de madera, vi) estiércol bovino, vii) estiércol porcino y viii) pollinaza. La evaluación de los materiales con mayor potencial incluyó la aplicación de la herramienta de selección (Ver Sección 0). La descripción de la aplicación de la herramienta se observa en el [Anexo F](#) y la [Figura 12](#) presenta los resultados de la evaluación.

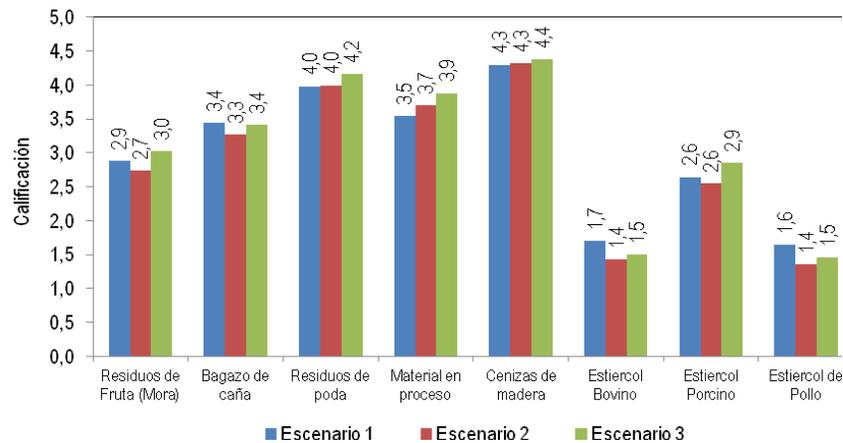


Figura 12. Aplicación de la herramienta para valorar los potenciales materiales de soporte o enmienda

Los resultados de los tres escenarios de análisis muestran que los materiales con mayor potencial para incorporarse en el proceso de compostaje de biorresiduos en la zona de estudio son en orden descendente la ceniza de madera, los residuos de poda, material en proceso y el bagazo de caña. Los elementos determinantes en la selección fueron la contribución de los materiales para mejorar la calidad fisicoquímica de los sustratos (Ver Anexo F).

Respecto de la ceniza alcalina, es un material amortiguador de la caída del pH en el proceso que ha sido sugerido en otros estudios (Koivula et al., 2004; Kuba et al., 2008; Kurola et al., 2011; An et al., 2012), debido a que incrementan la tasa de mineralización del material, la formación de ácidos húmicos, la disponibilidad de O₂ y minimiza compuestos ácidos como el H₂S y los olores (Koivula et al., 2004), acortando el tiempo del proceso (Li et al., 2013).

En relación con los residuos de poda, aunque no se encontraron estudios específicos del uso del pasto estrella como material de soporte en el compostaje de biorresiduos, diversos estudios han empleado el material de poda en el compostaje de biorresiduos, biosólidos y residuos de alimentos (Haug, 1993, Epstein, 1997; Francou et al., 2008; Kumar et al., 2010) alcanzando resultados favorables; la incorporación de este tipo de material, puede contribuir a la identificación de materiales de soporte que no han sido empleados o documentados previamente en localidades con contextos similares al de la población objeto de estudio.

El bagazo de caña es un material lignocelulósico cuya incorporación podría tener el doble propósito de servir como material de soporte y aportar contenido de COT, de manera que además de modificar las propiedades físicas de los biorresiduos, propiciaría mejores condiciones para la actividad biológica y cinética de biodegradación (Haug, 1993; Adhikari et al., 2009; Yang et al., 2013; Li et al., 2013); adicionalmente, aporta fibra cruda, elemento identificado con contenido limitado en la materia prima.

El material en proceso (maduro o inmaduro), en condiciones de acceso limitado a otro tipo de materiales de enmienda y/o soporte, puede ser incorporado para el control de la caída del pH al inicio del proceso, regular el exceso de humedad en el proceso e inocular microorganismos específicos al proceso. Ha sido empleado en el compostaje de una variedad de residuos (Kato y Miura, 2009; Lu y Guo, 2009; Ke et al., 2010; Li et al., 2013; Nakasaki et al., 2013) y estas experiencias son descritas en la Sección 4.2.

3.5 Conclusiones del capítulo

El conocimiento de la calidad de la materia prima en el compostaje es fundamental para el desarrollo del proceso de compostaje y la calidad del producto. En este estudio se encontró que en términos de la calidad fisicoquímica, las materias primas que se procesan el día lunes y las del jueves son estadísticamente iguales.

El estudio de la calidad de la materia prima permitió encontrar una variabilidad significativa la calidad fisicoquímica de la materia prima del compostaje en ocho de los doce parámetros (N_{TOTAL} , C/N, P_{TOTAL} , K_{TOTAL} , cenizas, fibra cruda, proteínas y carbohidratos), que se demuestra con los coeficientes de variación que estuvieron entre 22,52% y 42,98%, mostrando la necesidad de identificar esquemas de operación, control y monitoreo que se articulen con la variabilidad identificada.

La materia prima de la instalación de compostaje se caracterizó por presentar una alta proporción de residuos de alimentos sin procesar cuyos elementos más representativos son en su orden: i) mezcla de alimentos no procesados, ii) plátanos y tubérculos, y iii) frutas cítricas. La calidad fisicoquímica de la materia prima es característica de los residuos de alimentos, con un predominio de pH ácido, alto contenido de humedad, una relación C/N menor a los valores recomendados para el desarrollo del proceso y una materia orgánica caracterizada por el predominio de elementos de fácil degradación (carbohidratos, proteínas). Se destaca el aporte de potasio por la presencia de cáscaras de plátano, y una deficiencia en el fósforo que puede limitar el valor nutricional del producto. El contenido de cenizas evidencia la presencia de material mineral proveniente de frutas y vegetales así como por la presencia de impurezas que ameritan continuar con el arraigo de los hábitos de separación en la fuente.

Se encontraron bajos coeficientes de correlación entre los parámetros de la composición física y los de las características fisicoquímicas; esto está relacionado posiblemente a la heterogeneidad en el contenido nutricional y fisicoquímico de cada uno de los elementos que integran las categorías de composición física propuestas que dificultan el análisis desarrollado, así como a la alta incertidumbre generada en la categoría mezcla de materiales que está integrado por todas las fracciones de alimentos sin procesar.

Para las condiciones de la materia prima se identificó la necesidad de identificar estrategias para mejorar el proceso de compostaje que incluyeron los materiales de soporte para regular el exceso de humedad y suministrar porosidad mejorando la aireación y la condición de acidez del medio, así como los materiales de enmienda que ayudan a incrementar el contenido de C y P_{TOTAL} , o favorecer un mejor pH para el inicio del proceso. La herramienta desarrollada facilitó la selección la ceniza de madera, residuos de poda, material en proceso y bagazo de caña, los cuales fueron escogidos por su aporte para mejorar las deficiencias o excesos de la calidad de los biorresiduos y por las facilidades para la adquisición, disponibilidad, transporte y manejo en la instalación de compostaje.

4 EVALUACIÓN DE OPCIONES PARA MEJORAR EL PROCESO Y LA CALIDAD DEL PRODUCTO DEL COMPOSTAJE DE BIORRESIDUOS

4.1 Introducción

El proceso, la calidad del producto y los impactos ambientales del compostaje son afectados por condiciones ambientales, características del sustrato, control del proceso y tiempo de maduración del producto (Chiumenti et al., 2005; Hargreaves et al., 2008; De Guardia et al., 2010). En este trabajo se identificaron condiciones de la materia prima poco favorables para el proceso de compostaje de biorresiduos, tales como una relación C/N inferior a 20 y una alta humedad que afecta adversamente la porosidad del material y la difusión de O₂ (Jolanun et al., 2008; El Kader et al., 2007; Krogmann et al., 2010) y que pueden favorecer procesos anaerobios, caídas en el pH, disminución en la tasa de degradación y baja calidad del producto (Guo et al., 2012; Sundberg y Jonsson, 2008; Diaz y Savage, 2007).

En instalaciones de compostaje que tratan sustratos con una alta humedad y que son de rápida degradación como los residuos de alimentos, se requiere una cuidadosa selección de tecnología y mayores controles operacionales (Krogmann et al., 2010). Diversas estrategias se han analizado para el control de la humedad, la caída en el pH y para incrementar el contenido de COT, tales como i) la incorporación de materiales de soporte y enmienda, y ii) el incremento en la tasa de aireación; estas estrategias han demostrado su influencia en el proceso, acelerando la fase de maduración (Haug, 1993; Tiquia, 2005; Epstein, 2011; Beck-Friis et al., 2003; Sundberg y Jönsson, 2005; Wong et al., 2009; Epstein, 2011). Respecto de los materiales de soporte y de enmienda, en el Capítulo 3 se encontró que los materiales que tienen potencial para incorporarse en el proceso son: i) pasto estrella, ii) cenizas de combustión de madera, iii) bagazo de caña y, iv) material pre-compostado.

Dadas las condiciones predominantes de calidad de la materia prima del compostaje de biorresiduos, la necesidad de identificar medidas de operación y control para mejorar el proceso y la calidad del producto, y la importancia de contribuir a incrementar la competitividad de esta opción para la gestión de los RSM en el contexto de localidades menores de países en desarrollo, en este capítulo se presentan la evaluación del efecto sobre las condiciones del proceso de compostaje y la calidad fisicoquímica y microbiológica de los productos, de la incorporación de los potenciales materiales de enmienda y soporte y del incremento en la frecuencia de volteo.

4.2 Elementos Conceptuales

4.2.1 Mejoramiento del compostaje a través de la incorporación de materiales de enmienda y soporte

La incorporación de materiales de soporte ha sido aplicada para modificar propiedades físicas del material a procesar, suministrando porosidad y soporte estructural para mejorar la aireación (Haug, 1993; Diaz y Savage, 2007; Epstein, 2011) y propiciar mejores condiciones para la actividad biológica (Haug, 1993; Adhikari et al., 2009; Yang et al., 2013; Li et al., 2013). Usualmente, la definición de las mezclas de materiales están basadas en el ajuste de la humedad y la C/N a valores favorables para el crecimiento y actividad de las poblaciones microbiales (Silva et al., 2014). Sin embargo, la disponibilidad de los materiales puede ser limitada o incrementar los costos operativos, por lo que deben ser cuidadosamente seleccionados (Adhikari et al., 2009).

La aplicación de diferentes materiales de soporte para la optimización del proceso de compostaje de biorresiduos ha sido reportada por varios autores: Adhikari et al. (2008) con paja de trigo y pasto picado, Francou et al. (2008) con residuos verdes y papel y cartón, Chang y Chen (2010) con cáscara de arroz y aserrín y Kumar et al. (2010) con residuos de poda de jardín y hojas. Li et al. (2013) documentan en el compostaje de residuos de alimentos, el mayor uso del aserrín seguido por el bagazo de caña de azúcar, cáscara de arroz y residuos de madera. La Tabla 29 presenta otras experiencias de incorporación de materiales en el compostaje de biorresiduos.

Tabla 29. Reportes de acondicionamiento del sustrato en el compostaje de biorresiduos

Autor	Descripción de la experiencia
Manios (2004)	Recopilaron experiencias de compostaje con diferentes materiales (residuos de cosecha, biosólidos y biorresiduos) en la Isla de Creta, concluyendo que a pesar que el proceso se desarrolla efectivamente con los diferentes materiales individualmente, su mezcla por los diferentes contenidos de nutrientes y materia orgánica, podría mejorar el proceso y la calidad del producto.
Adhikari et al. (2008)	Emplearon diferentes materiales de soporte en el compostaje de residuos de alimentos, encontrando que la paja de trigo y el pasto picado ofrecieron las mejores propiedades, por su capacidad de absorción de agua, pH neutral y C/N > 50.
Francou et al. (2008)	Evaluaron la influencia de diferentes mezclas de residuos de poda, biorresiduos y papel en la transformación de la materia orgánica en el compostaje. La mezcla con predominio de residuos de poda presentó baja biodegradabilidad por la alta proporción de lignina. La mezcla con proporción de papel entre 21 y 38%, incrementó la fracción celulosa que fue favorable para la rápida estabilización de la materia orgánica; sin embargo, su exceso puede afectar dicha estabilización cuando alcanza una C/N inicial entre 57 y 65.
Chang y Chen (2010)	Estudiaron el efecto de tres materiales de soporte (cáscara de arroz, aserrín y salvado de arroz) en el compostaje de residuos de alimentos, encontrando los mejores resultados con la incorporación de aserrín que incrementó la capacidad de absorción de agua y la tasa de transformación de la materia orgánica, disminuyendo el tiempo del proceso y de acidificación y generando valores de pH más bajos al final del proceso.
Kumar et al. (2010)	Estudiaron el co-compostaje de residuos de poda de jardín y hojas y de residuos de alimentos, encontrando una disminución en la humedad y un aumento del N en la mezcla. El co-compostaje de estos materiales fue efectivo a humedades de 60% y C/N de 19,6, reduciendo en un 33% los sólidos volátiles totales en 12 días.
Sundberg et al. (2011)	Estudiaron las características fisicoquímicas y microbiológicas de los biorresiduos en Finlandia, Noruega y Suecia, con el propósito de identificar sus condiciones para el compostaje y mejorar la operación de las instalaciones. Se encontró que los biorresiduos tienen un bajo pH por la alta presencia de ácidos orgánicos y de bacterias ácido - lácticas, que pueden incidir en el proceso. Recomendaron incorporar materiales de soporte y compost, que permitan alcanzar valores de pH alrededor de 6 unidades, favoreciendo la capacidad amortiguadora del sustrato e incrementando la diversidad de bacterias para el proceso.

Los sustratos orgánicos empleados como materiales de soporte o de enmienda son procedentes, en su mayoría, de material vegetal (Tuomela et al., 2000); en relación con el uso de poda se ha identificado que es fuente de N, ayuda a regular la humedad y mejora la estructura y aireación (López et al., 2010), ha sido empleado efectivamente en el compostaje de residuos de alimentos (Francou et al., 2008; Kumar et al., 2010). El bagazo de caña de azúcar es un material lignocelulósico constituido por celulosa (50%), hemicelulosa (25%) y lignina (25%) (Balakrishnan y Batra, 2011) que también ha sido empleado en el compostaje de estiércol bovino (Monson et al., 2010) o mezclado con residuos del proceso de la industria azucarera (Meunchang et al., 2005). Se caracteriza por mejorar el contenido de COT en sustratos con deficiencia de este elemento (Iqbal et al., 2010).

El compost o material en proceso de maduración también han sido usados en el compostaje de estiércoles o residuos de alimentos; su incorporación contribuye a reducir la inhibición del proceso debido a generación de ácidos y suministra especies microbiales diversas que aceleran el inicio del proceso (Kato y Miura, 2009; Li et al., 2013). Kato y Miura (2009) emplearon compost maduro en el compostaje de estiércol bovino, encontrando que aceleró la

sucesión de la comunidad microbiana, mantuvo la diversidad de los microorganismos y redujo el tiempo de proceso en relación con la unidad control. Lu y Guo (2009), también evaluaron el efecto de la incorporación de compost en el compostaje de biorresiduos, encontrando que mejoró la estructura del sustrato, favoreció un rápido inicio del proceso (mayores tasas de consumo de O₂), propiciando una disminución del tiempo total de proceso; así mismo, reportan un incremento de hongos y actinomicetos desde el inicio del proceso que favorecieron la transformación.

Ke et al. (2010) y Nakasaki et al. (2013) reportan el empleo de compost para inocular organismos específicos en el proceso de compostaje; dichos organismos fueron incorporados para degradar los ácidos orgánicos al inicio del proceso (*Pichia kudriavzevii* RB1) o favorecer los procesos de maduración del producto (*Thermoactinomyces vulgaris* A31), encontrando en ambos casos, resultados efectivos.

De otro lado, en las instalaciones de compostaje de biorresiduos caracterizadas por presentar un sustrato con pH ácido (Adhikari et al., 2008; Yu y Huang, 2009) se deben realizar controles operacionales para minimizar el efecto de la acidez en el proceso. La producción de ácidos grasos favorece el aumento de microorganismos mesófilos (bacterias ácido-lácticas y levaduras) que provocan la caída del pH, inhiben la degradación de los biorresiduos, dificultan la consecución de temperaturas termófilas y afectan la calidad del producto (Sundberg y Jonsson, 2008).

Wong et al. (2009) sugiere para controlar la caída del pH, el incremento en la aireación, la inoculación de cultivos bacteriales o de levaduras y la adición de material alcalino. En relación con el material alcalino, diversos estudios lo han empleado efectivamente (Koivula et al., 2004; Kuba et al., 2008; Wong et al., 2009; Kurola et al., 2011; An et al., 2012) (Ver [Tabla 30](#)), aunque su incorporación también ha sido cuestionada (UNEP y Calrecovery, 2005).

Tabla 30. Experiencias de adición de enmiendas alcalinas para el control del pH del sustrato

Autor	Descripción de la experiencia
Koivula et al. (2004)	Demostraron que la adición de cenizas provenientes de la combustión de madera (CM) en el compostaje de residuos de cocina, incrementó la tasa de mineralización del compost y la formación de ácidos húmicos, mejorando, la disponibilidad de O ₂ , el control en la formación de compuestos ácidos y minimizando la formación de malos olores.
Kuba et al. (2008)	Incorporaron CM en el compostaje de biorresiduos, encontrando que una proporción de 16% de CM no tuvo efectos negativos en la actividad microbiana ni incrementó el contenido de metales pesados y mejoró el balance de nutrientes en el producto.
Yu y Huang (2009)	Evaluaron el efecto de la adición de acetato de sodio (NaAc) sobre la actividad microbiana, producción de amoníaco y de ácidos orgánicos en el compostaje de residuos de alimentos. La adición de NaAc incrementó el pH a valores entre 5,2 y 5,5 unidades, afectando positivamente la degradación de materiales orgánicos comparado con las pilas control. Aunque se presentaron mayores pérdidas de amoníaco en las pilas con adición de NaAc, éstas no fueron significativas comparadas con la cantidad de N en el sustrato. La adición de NaAc inhibió la producción de ácido propiónico y butírico, causantes del descenso en el pH.
Wong et al. (2009)	Evaluaron la incorporación de diferentes mezclas de cenizas de carbón (5%, 10% y 15%) y cal (1,5% a 3%) en el compostaje de residuos de alimentos (alcanzando equivalentes entre 0,94 a 1,88% de CaCO ₃), con el propósito de amortiguar el descenso del pH. La mezcla alcalina equivalente a 1,88% de CaCO ₃ fue efectiva para mejorar la descomposición del material. Cuando se utilizó conjuntamente cenizas de carbón y cal, se acortó el proceso de 42 a 28 días. Se recomienda emplear en la mezcla entre 5 y 10% de cenizas de carbón, pues una mayor cantidad causa reducción en la eficiencia de degradación.
Kurola et al. (2011)	Analizaron el efecto de la CM sobre el control del pH en el compostaje de biorresiduos, encontrando que con 4 a 8% de CM, se incrementó el pH y mejoró la actividad microbiana en el proceso. Recomiendan el uso de CM y una apropiada aireación para minimizar los olores, además de un estricto control de las CM, para minimizar el riesgo de metales pesados en el producto.
An et al. (2012)	Investigaron la influencia de la adición de cenizas de carbón en el compostaje de residuos de alimentos, encontrando mayores temperaturas durante los primeros ocho días, un mayor consumo de O ₂ en las primeras dos etapas del proceso debido a una mayor tasa de degradación y un menor decaimiento en el pH en comparación con las unidades experimentales control.

4.2.2 Mejoramiento del compostaje a través de cambios operativos

Dado que los materiales de soporte o enmienda pueden ser limitados, la implementación de medidas operativas pueden ser efectivas para controlar el proceso (Epstein, 2011). Respecto del control de la humedad, se requiere una efectiva aireación para la actividad microbiana (Iqbal et al., 2010; Jiang et al., 2011; Guo et al., 2012), que influya en la tasa de degradación de los sustratos (Puyuelo et al., 2010; Li et al., 2013). La selección del método de aireación depende, entre otros factores, de la naturaleza del sustrato, siendo los métodos más comunes para el contexto de estudio, el volteo de pilas o la aireación forzada (Cayuela et al., 2006); entre éstos, los volteos han resultado más efectivos para el control de la humedad (Epstein, 2011). En sistemas de compostaje de pequeña escala en países en desarrollo, los métodos de mayor potencial son la aireación con volteos o la aireación forzada (OPS et al., 2010).

Tiquia (2005) y Kalamdhad y Kazmi (2009) indican que el volteo expone material fresco a la colonización microbiana, liberando NH_3 y calor, y al aumentar las frecuencias de volteo al inicio del proceso, se acorta el período de estabilización activa. Adicionalmente, la mejor distribución de la temperatura en el material puede ayudar a una mayor reducción de microorganismos patógenos (Kuok et al., 2012) y evita la compactación del material (Ruggieri et al., 2008). No obstante, una mayor frecuencia de volteo requiere un trabajo intensivo (Getahun et al., 2012b) y puede generar enfriamiento de las pilas (Rasapoor et al., 2009), siendo necesario establecer un régimen apropiado de volteo. La Tabla 31 presenta estudios sobre el efecto de las tasas de aireación en el compostaje.

Tabla 31. Reportes de investigaciones sobre las tasas de aireación en el compostaje

Autor	Descripción de la experiencia
Beck-Friis et al. (2003)	Evaluaron el efecto de diferentes concentraciones de O_2 (16%, 2,5% y 1%) sobre las emisiones gaseosas en el compostaje de biorresiduos. Encontraron que la mayor concentración de O_2 tuvo un efecto en la disminución de la fase mesofílica, en el tiempo para la consecución del mayor pico de producción de CO_2 y en el decaimiento de ácidos grasos durante la fase mesofílica. También observaron mayor volatilización de NH_3 lo cual afecta la calidad agronómica del producto.
Parkinson et al. (2004)	Estudiaron el efecto de la frecuencia de volteo en las pérdidas de N y P durante el compostaje de estiércol bovino. Encontraron que una mayor frecuencia de volteo, incrementa la pérdida de nutrientes (volatilización del NH_3 y lixiviación del P), sugiriendo realizar los volteos espaciados para minimizar dichas pérdidas.
Smith y Hughes (2004)	Evaluaron el efecto del incremento en la frecuencia de volteo sobre la madurez del producto del compostaje de residuos de jardín mezclados con residuos de frutas y vegetales. Se planteó el volteo (6 veces por semana) y no volteo de las pilas de compostaje. Los resultados muestran que tanto la incorporación de residuos del mercado como la frecuencia de volteo intensificaron la degradación en el proceso, que se reflejó en una mayor CIC (mayor madurez).
Tiquia (2005)	Determinó cambios microbiológicos en el compostaje de estiércol de cerdo, utilizando diferentes regímenes de volteo. Encontró una disminución de tiempo para la estabilización, en las pilas con mayor frecuencia de volteo (tres veces por semana) (60 días) en comparación con las que emplearon dos veces por semana (67 y 126 días).
Brito et al. (2008)	Evaluaron el efecto de diferentes tipos de aireación (estática y por volteos) en el compostaje de la fracción sólida de purines bovinos, encontrando una mayor tasa de mineralización de la materia orgánica en las pilas con volteo en comparación con las estáticas, sin embargo al final de la semana 4 se encontró similar mineralización de la materia orgánica en ambos tratamientos. Concluyen que con la aireación estática también se alcanzó la maduración del compost y se tuvo menor volatilización de NH_3 .
Tiquia (2010)	Evaluó el efecto de diferentes estrategias de operación (frecuencia de volteo y humedad), en el compostaje de estiércol de perro. En el caso de las pilas con mayor frecuencia de volteo (cada dos días), encontró que alcanzaron la temperatura ambiente en menor tiempo, pero presentaron menor IG.
Kuok et al. (2012)	Analizaron el efecto del volteo en el compostaje de estiércol porcino; encontraron una aceleración de la degradación de la materia orgánica en las pilas que tuvieron volteos (en comparación con las que no lo efectuaron) con mayor mantenimiento de temperaturas entre 50 y 70 °C, lo cual atribuyen a la redistribución de la materia orgánica durante los volteos de las pilas.

4.3 Materiales y Métodos

4.3.1 Descripción del montaje experimental

El estudio se desarrolló en el Municipio de Versalles - Valle del Cauca (Colombia), zona de estudio cuyas características fueron descritas en la Sección 3.3.1. La Figura 13 muestra los ensayos experimentales propuestos para evaluar la influencia de las estrategias de operación en el proceso y en la calidad del producto del compostaje de biorresiduos.

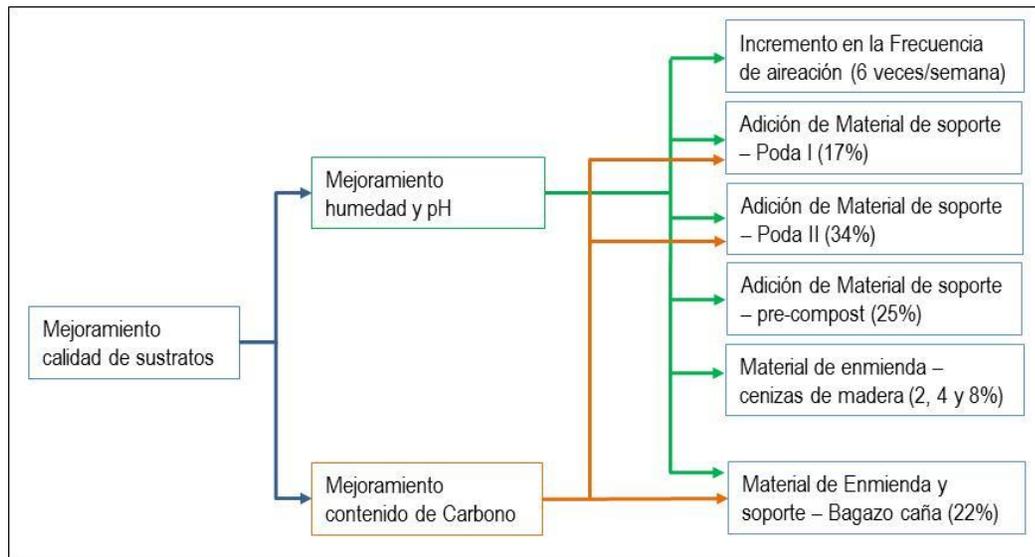


Figura 13. Evaluaciones desarrolladas para mejorar el proceso de compostaje y la calidad del producto

Con respecto al control de la humedad y del pH se propusieron dos tipos de ensayos: a) Incorporación de materiales (soporte o enmienda) y b) incremento frecuencia de volteo. Respecto del a incorporación de materiales, se realizaron cuatro experimentos que están fundamentados en la incorporación de materiales disponibles localmente y que fueron seleccionados en la Sección 3.4.4. Los materiales seleccionados son Pasto Estrella, cenizas de madera y material pre-compostado. Respecto a las actividades operativas, se evaluó el efecto del incremento en la frecuencia de volteo en el proceso y en la calidad del producto.

De otro lado, el mejoramiento del contenido de COT se realizó a través de la adición del bagazo de caña, material también seleccionado para la localidad, y que tiene doble propósito de mejorar el contenido de COT y de incrementar la porosidad del medio (Ver Sección 3.4.4). La Tabla 32 presenta la descripción de los experimentos y la denominación de las unidades experimentales. Los tratamientos a los que no se les aplicó las estrategias operativas son denominados controles y se les asignó la letra B y a los otros tratamientos se les denominó con la letra A; en ambos casos, fue antecedida por el número del experimento.

Tabla 32. Identificación de los experimentos y composición de los tratamientos

Experimento	Descripción Experimento	Tipo de sustrato	Descripción unidad experimentales ¹	Definición de proporciones
1	Influencia de PE (Proporción I)	1B	-Biorresiduos	Experiencias previas reportadas en la literatura
		1A	-17% PE y 83% biorresiduos	
2	Influencia de PE (Proporción II)	2B	-Biorresiduos	Balance de masas (C, N y humedad)
		2A	-34% PE y 66% biorresiduos	
3	Influencia de la incorporación de CM	3B ₁	-Biorresiduos	Experiencias previas reportadas en la literatura y caracterización inicial de las cenizas de madera
		3A ₁	-98% Biorresiduos y 2% CM	
		3B ₂	-Biorresiduos	
		3A ₂	-96% Biorresiduos y 4% CM	
		3B ₃	-Biorresiduos	
3A ₃	-92% Biorresiduos y 8% CM			
4	Influencia de la frecuencia de aireación	4B	-Frecuencia de aireación acorde con proceso	No aplica
		4A	-Incremento en frecuencia de aireación	
5	Influencia de MP	5B	-Biorresiduos	Balance de humedad
		5A	-75% Biorresiduos y 25% MP	
6	Influencia del BC	6B	-Biorresiduos	Balance de masas alrededor de C, N y humedad
		6A	-78% Biorresiduos y 22% BC	

Nota: ¹ Proporciones definidas para material en peso base húmeda; PE: Pasto Estrella; CM: Cenizas de Madera; BC: Bagazo de Caña; MP: Material pre-compostado

4.3.2 Caracterización de los materiales

Los montajes experimentales se realizaron a escala piloto usando como sustratos los biorresiduos de la cabecera municipal y los materiales de enmienda y/o soportes definidos. Con respecto a los biorresiduos, se generaron por la totalidad de habitantes de la cabecera municipal de Versalles (Valle), tuvieron cuatro días de almacenamiento en los predios, fueron separados en la fuente y recolectados selectivamente. Previo al inicio de los experimentos, se descargaban los biorresiduos en un área acondicionada en la instalación de compostaje y se extraían manualmente los materiales no biodegradables. Posteriormente, se seguían los procedimientos establecidos por Sakurai (2001) de mezcla y cuarteos sucesivos hasta alcanzar una muestra representativa de 50 kg. Consecutivamente, se tomó una sub-muestra representativa de 2 kg para los análisis fisicoquímicos de laboratorio. Con el material restante, se realizó la composición física, clasificándolo en cinco categorías: i) alimentos procesados, ii) alimentos sin procesar, iii) papel y cartón, iv) residuos de poda y jardín y v) otros (no biodegradables). En relación con los materiales de enmienda y/o de soporte, las condiciones fueron las siguientes:

- El Pasto Estrella (*CynodonPlectostachyus*) fue seleccionado por su disponibilidad local en áreas de propiedad del municipio. Provino del corte de poda efectuado en la instalación de compostaje. Tuvo un día de almacenamiento previo al experimento. Se realizaron análisis fisicoquímicos de laboratorio previos al experimento con el propósito de estimar la cantidad a adicionar con los biorresiduos (Ver Anexo H).
- El bagazo de caña provino del procesamiento de la caña de azúcar de una microempresa panelera. Se realizaron análisis fisicoquímicos previos sobre materiales con diferentes tiempos de almacenamiento (un día, una semana, un mes) seleccionándose el de una semana por sus características fisicoquímicas. Con el reporte de Laboratorio (Ver Anexo H) se realizaron balances de masa para estimar la cantidad a adicionar.

- La ceniza de madera provino de un proceso de combustión en una microempresa láctea de la localidad. La ceniza fue obtenida un día después del proceso de combustión y estuvo almacenada tres días previo al proceso. Se caracterizó el contenido de COT, N_{TOTAL} , pH y alcalinidad, tal como se reporta en el [Anexo H](#).
- El producto pre-compostado fue obtenido del proceso de compostaje desarrollado en la instalación, cuyo tiempo de proceso era de 3 meses. Se estimó el contenido de humedad y densidad volumétrica con el propósito de efectuar balances de humedad y estimar las proporciones a adicionar. El material fue empleado sin proceso de tamizaje y fue tomado directamente de una pila de compostaje y almacenado durante un día previo al experimento. La información de sus características fisicoquímicas se observa en el [Anexo H](#).

En todos los sustratos se realizó trituración manual alcanzando tamaños de partícula máximos de 7 cm, los cuales son recomendados para el proceso de compostaje (Agnew y Leonard, 2003; Haug, 1993). Tanto la conformación de las muestras como los procedimientos de trituración y preservación, fueron realizados de acuerdo con Sullivan y Miller (2001). Los análisis fisicoquímicos fueron realizados en el Laboratorio de Análisis Industriales de la Facultad de Ciencias Naturales y Exactas de la Universidad del Valle.

La caracterización fisicoquímica realizada a los sustratos de los seis experimentos comprendió las variables: potasio (K_2O), carbono orgánico oxidable total (COT), fósforo total (P_2O_5), cenizas y humedad (Norma NTC 5167 - Icontec, 2003); pH (Soil Survey Laboratory Methods Manual Reporte N°42, Versión 2.0, 1992 - SSLMM 42-2-92) y nitrógeno total (N_{TOTAL}) (Norma NTC 370 - Icontec, 1997). Adicionalmente, para el experimento 6, se realizó complementariamente extracto etéreo y fibra cruda (Norma NTC 668 – Icontec, 1973), proteína (norma NTC 4657 – Icontec, 1999) y los carbohidratos (Análisis Proximal). Cada medición tuvo dos lecturas y en caso de que el coeficiente de variación presentara un valor mayor que 15%, se repetía la medición.

4.3.3 Montaje Experimental y Monitoreo del Proceso

Para cada uno de los experimentos, se realizaron pruebas a escala piloto de compostaje aerobio con volteo manual. Los experimentos 1, 2 y 6 tuvieron tres réplicas por tratamiento; el experimento 5 presentó dos réplicas y los experimentos 3 y 4 tuvieron una réplica. Todas las unidades experimentales se conformaron de forma cónica y alturas que oscilaron entre 0,6 y 1,0 m. En cada experimento, las unidades experimentales se ubicaron en iguales condiciones ambientales, en espacio con techo impermeable, sobre superficie nivelada y distancia mínima de 2 m. La cantidad de sustrato empleado para cada unidad experimental varió en cada experimento, conforme la disponibilidad de los biorresiduos, tal como se muestra en la [Tabla 33](#).

Las variables de control y monitoreo en todos los experimentos fueron la temperatura, el pH y la humedad. Adicionalmente, para los experimentos 2 y 6, se realizó monitoreo de los sólidos volátiles (SV). A los experimentos 2, 3, 4 y 6 se les determinó conductividad y el IG como parámetros complementarios del monitoreo del proceso.

Tabla 33. Descripción de los experimentos y de las unidades experimentales

Experimento	Descripción Experimento	Número de Tratamientos	Denominación de tratamiento	Réplica por tratamiento	Peso de unidad experimental (kg)
1	Influencia de pasto estrella (Proporción I)	2	1B y 1A	3	220
2	Influencia de pasto estrella (Proporción II)	2	2B y 2A	3	250
3	Influencia de la incorporación de cenizas de madera	6	3B ₁ , 3A ₁ , 3B ₂ , 3A ₂ , 3B ₃ y 2A ₃	1	550
4	Influencia de la frecuencia de aireación	2	4A y 4B	1	550
5	Influencia de material en proceso	3	5B y 5A	2	200
6	Influencia del bagazo de caña	2	6B y 6A	3	350

La temperatura fue medida diariamente en el centroide de cada pila, utilizando un termómetro de carátula de 30 cm (experimentos 1, 2 y 5) ó 60 cm (experimentos 3, 4 y 6). Para la determinación del pH y la humedad, en cada pila se tomó una muestra de 200 g, proveniente de cuatro puntos opuestos que luego eran integrados (Sullivan y Miller, 2001). El pH se estableció utilizando el método potenciométrico, con un pHmetro WTW Modelo 315i, empleando agua destilada y material a analizar en una relación 5:1 (v/v); para la humedad se empleó un analizador de humedad Ohaus MB-35 (OhausCorporation, PineBrook, NJ). Durante las primeras cuatro semanas, estas variables (pH y humedad) fueron medidas diariamente y posteriormente una vez por semana. Los SV se determinaron por calcinación a 550 °C, siguiendo el protocolo establecido en APHA (2005). La Conductividad Eléctrica (CE) se determinó sobre el mismo extracto empleado para la medición de pH y fue realizada por método potenciométrico con un conductivímetro WTW modelo 325. Los ensayos de germinación se efectuaron determinando la sensibilidad del rabanito (*Raphanus sativus*) a los productos y siguiendo los procedimientos establecidos en la INN (2004), Varnero et al. (2007) y Tiquia (2010).

Para el IG se incubó un extracto de cada producto con las semillas de rabanito a una temperatura de 22 °C por 5 días. Al día 5, se determinaron el número de semillas germinadas y la longitud de crecimiento de las raíces. El porcentaje de semillas germinadas y de la longitud de las raíces se determinó en relación con las obtenidas en el control, el cual desarrollado con la inoculación de las semillas en agua destilada. La germinación relativa (GR), el crecimiento relativo (CR) y el IG fueron calculados de acuerdo con las ecuaciones 4.1 a 4.3.

$$GR(\%) = \frac{\text{Semillas germinadas en extracto} - \text{producto}}{\text{Semillas germinadas en control}} \times 100 \quad (\text{Ecuación 4.1})$$

$$CR(\%) = \frac{\text{Longitud media de las raíces en extracto} - \text{producto}}{\text{Longitud media de las raíces en el control}} \times 100 \quad (\text{Ecuación 4.2})$$

$$IG = \frac{GR \times CR}{100} \quad (\text{Ecuación 4.3})$$

El contenido de humedad se mantuvo por encima del 40% tal como lo recomienda Agnew y Leonard (2003), mediante la humectación con agua del acueducto municipal. La cantidad de agua por aplicar se determinó utilizando los valores de humedad, densidad y peso de la pila; para garantizar la distribución uniforme del agua, se extendió el material de la pila asperjándola con una regadera y culminada la humectación, se conformó nuevamente la pila y se

registró el valor de humedad. El volteo de las pilas también se realizó cuando se registraban temperaturas mayores o iguales a 65°C, así como para evitar la compactación de los sustratos.

El seguimiento del proceso se desarrolló hasta que la temperatura de las pilas fue cercana a la temperatura ambiente (dentro de un rango de $\pm 5^\circ\text{C}$) y el producto tenía olor a suelo, criterios que indican la finalización de la etapa de curado y siguiendo las recomendaciones de Ruggieri et al. (2008) y de Marešová y Kollárová (2010) quienes plantean que el seguimiento de la temperatura es uno de los parámetros a considerar para determinar la finalización del producto. Se efectuaron pruebas de autocalentamiento en sitio para verificar que no se presentaran incrementos en la temperatura (Herity, 2003). Con la información recopilada, se llevó a cabo un análisis descriptivo del comportamiento de la temperatura y el pH, relacionándolos con la calidad de los sustratos.

4.3.4 Calidad del producto

Una vez concluido el período de monitoreo, se tomaron muestras representativas de cada una de las unidades experimentales, siguiendo los procedimientos de muestreo expuestos en Sullivan y Miller (2001). La Tabla 34 muestra los análisis de calidad de los productos en los experimentos desarrollados.

Tabla 34. Análisis de calidad de los productos en los experimentos desarrollados

Parámetro	unidades	Método	Experimentos
pH	Unidades	NTC 5167	1, 2, 3, 4, 5, 6
Humedad	% (m/m)	NTC 5167	1, 2, 3, 4, 5, 6
COT	% (m/m)	NTC 5167	1, 2, 3, 4, 5, 6
N _{total}	% (m/m)	NTC 370	1, 2, 3, 4, 5, 6
P _{total}	% (m/m)	NTC 243	1, 2, 3, 4, 5, 6
K _{total}	% (m/m)	Electroforesis Capilar (Métodos Estándar - SM 3112A)	1, 2, 3, 4, 5, 6
Ca	% (m/m)	Electroforesis Capilar (Métodos Estándar - SM 3112A)	1, 2, 5, 6
Mg	% (m/m)	Electroforesis Capilar (Métodos Estándar - SM 3112A)	1, 2, 5, 6
Na	% (m/m)	Electroforesis Capilar (Métodos Estándar - SM 3112A)	1, 2, 5, 6
Cenizas	% (m/m)	NTC 370	1, 2, 3, 4, 5, 6
Conductividad	dS/m	Técnica potenciométrica	1, 2, 3, 4, 5, 6
CIC	meq/100g	NTC 5157	1, 2, 5, 6
CRA	%	NTC 5157	1, 2, 5, 6
Densidad	g/cm ³	NTC 5157	1, 2, 5, 6
As	ppm	Métodos Estándar - SM 3114C	1, 5, 6
Cd	ppm	Absorción Atómica (Métodos Estándar - SM 3111B)	1, 5, 6
Cr	ppm	Absorción Atómica (Métodos Estándar - SM 3111B)	1, 5, 6
Hg	ppm	Absorción Atómica Vapor Frio (Métodos Estándar - SM 3112A)	1, 5, 6
Ni	ppm	Absorción Atómica (Métodos Estándar - SM 3111B)	1, 5, 6
Pb	ppm	Absorción Atómica (Métodos Estándar - SM 3111B)	1, 5, 6
Zn	ppm	Electroforesis Capilar (Métodos Estándar - SM 3112A)	1, 5, 6
Coliformes totales	NMP/100g	NTC 5167	1, 2, 5, 6
Coliformes fecales	NMP/100g	NTC 5167	1, 2, 5, 6

Para evaluar la ocurrencia de diferencias significativas en los resultados de los parámetros de calidad de los productos entre los tratamientos, se aplicó el concepto de pruebas de aleatorización que es una alternativa no paramétrica a la prueba t-student cuando se requiere comparar si los promedios de dos poblaciones independientes son estadísticamente iguales o diferentes y los supuestos en que se basa no se pueden validar debido al

incumplimiento de ellos o a la poca cantidad de réplicas (Edgington, 1995). Este análisis estadístico fue aplicado para los experimentos 1, 2, 5 y 6.

Para el análisis se consideró: i) si $p > 0,05$ no existen diferencias entre los tratamientos; ii) $p < 0,05$ se presentan diferencias significativas. El procesamiento estadístico se realizó en el software de programación para análisis de datos y gráficos de libre distribución R versión 2.12.1. Los resultados de la calidad de los productos fueron comparados con los límites propuestos por la norma colombiana de calidad de compost (Icontec, 2003) y contrastados con otros estudios y normas relacionados. Adicionalmente, se analizaron los resultados obtenidos por Rosero (2013) para evaluar el efecto de la aplicación de compost mejorado sobre el crecimiento del cultivo de maíz, utilizando el producto 1A y su respectivo control (1B). Los procedimientos metodológicos desarrollados para la mencionada evaluación, pueden observarse en Rosero (2013) y Univalle (2012).

4.4 Resultados y Discusión

4.4.1 Calidad de los materiales procesados (sustratos)

La [Tabla 35](#) presenta los resultados de calidad de los sustratos en los experimentos. El sustrato B se caracterizó por presentar un pH ácido, tal como se encontró en la Sección 3.4.2. La adición del pasto estrella y cenizas de madera incrementaron el pH, ratificando lo expuesto por Haug (1993) y Smårs et al. (2002) quienes recomiendan incorporar materiales para mejorar las condiciones iniciales del pH y controlar la acidez generada en las primeras etapas del proceso. La incorporación de las cenizas de madera en un 4% y 8% incrementó el pH a valores alcalinos, mayores a los recomendados por Krogmann *et al.* (2010) para el inicio del proceso; esto podría generar volatilización del NH_3 en la etapa termofílica, por combinación de altas temperaturas y pH alcalino (de Bertoldi *et al.*, 1983).

Respecto de la humedad, los sustratos B presentaron humedades mayores a las recomendadas para el inicio del proceso (55% a 65%), debido a la presencia de residuos de alimentos (Adhikari et al., 2008; Li et al., 2013) como frutas y vegetales (Epstein 2011). La adición de bagazo de caña y de material pre-compostado, por sus bajas humedades, disminuyeron la humedad en los sustrato 5A y 6A y suministraron porosidad al medio facilitando una mejor aireación. En el caso de las cenizas de madera, se observa una influencia positiva en la reducción de la humedad con la adición de mayores proporciones del material, no obstante en todos los casos son mayores a 70%.

El pasto estrella presentó una humedad similar a la de los biorresiduos, sin embargo, sus características fibrosas (Dormond et al., 1998) permiten incrementar la porosidad del medio y promover la aireación. Iqbal et al. (2010) mencionan que materiales de soporte comúnmente fibrosos, con material carbonáceo (como el pasto estrella y el bagazo de caña), suministran espacios vacíos (o espacio libre) adecuados para el proceso y adicionalmente, en el caso del bagazo encontraron una alta capacidad para absorber agua producida durante la descomposición.

Con respecto al COT, el sustrato B presenta valores inferiores a los reportados en otros contextos (Sundberg et al., 2011; Hansen et al., 2007; Forster - Carneiro et al., 2008; Adhikari et al., 2008), especialmente en los experimentos 2 y 3, siendo necesario complementarlos, como sugieren Saha et al. (2010) y Marmolejo (2011). La incorporación de bagazo de caña, debido a su alto C, tuvo efecto positivo en las condiciones de COT para el arranque del proceso (Abhilash y Singh, 2008; Iqbal et al., 2010). La adición de cenizas de madera, por su mínimo contenido de C (Kuba et al., 2008), generó un efecto de reducción del COT afectando los valores iniciales en los sustratos 3A.

Tabla 35. Resultados de calidad de los sustratos empleados en los experimentos

Experimento	Tipo de sustrato	pH Unidad	Humedad % (m/m)	COT % (m/m)	N _{Total} % (m/m)	C/N --	K % (m/m)	P % (m/m)	Cenizas % (m/m)
1	1B	3,99	78,07±1,64	34,97±0,77	2,28±0,04	15,34	3,47±0,26	1,14±0,05	18,70±0,54
	1A	7,13	79,40±1,67	33,54±0,07	2,52±0,21	13,29	1,46±0,00	1,21±0,01	26,21±0,10
	PE	8,04	78,00±1,87	36,91±0,45	2,45±0,10	15,04	1,18±0,03	1,27±0,01	10,91±0,16
2	2B	5,39	78,99 ± 0,82	25,94 ± 0,02	1,08 ± 0,02	24,02	1,75 ± 0,03	0,21 ± 0,01	31,00 ± 0,90
	2A	6,12	72,46 ± 1,63	25,85 ± 0,93	1,48 ± 0,02	17,47	2,05 ± 0,10	0,59 ± 0,01	35,54 ± 0,14
	PE	8,30	74,19 ± 0,32	40,72 ± 1,17	1,53 ± 0,04	26,61	1,60 ± 0,05	0,18 ± 0,00	13,26 ± 0,20
3	3B ₁	5,85	75,24±1,31	28,63±1,75	1,41±0,09	20,25	1,54±0,18	0,36±0,01	--
	3A ₁	7,16	73,3±2,24	27,49±2,54	1,16±0,02	23,68	1,27±0,05	0,19±0,00	--
	3B ₂	5,30	79,77±1,45	32,18±0,71	1,24±0,00	26,04	2,42±0,02	0,15±0,01	--
	3A ₂	8,02	70,73±0,41	17,80±0,30	1,13±0,01	15,79	2,84±0,15	0,17±0,01	--
	3B ₃	4,99	81,11±0,13	23,98±0,19	1,22±0,04	19,70	3,18±0,00	0,21±0,00	--
	3A ₃	9,03	71,74±2,83	21,73±0,48	1,13±0,02	19,19	3,26±0,06	0,39±0,01	--
4	4B - 4A	4,57	72,14	30,3 ± 2,9	1,70 ± 0,6	19,3	1,70±0,30	0,24±0,10	--
5	5B	4,12	72,57 ± 0,58	31,21 ± 0,59	1,30 ± 0,05	24,00	2,73 ± 0,05	0,15 ± 0,00	21,51 ± 0,09
	5A	4,53	63,70 ± 1,02	36,91 ± 0,45	1,40 ± 0,03	24,54	3,77 ± 0,04	0,41 ± 0,01	33,94 ± 2,57
	MP	9,34	23,17 ± 0,70	12,89 ± 0,73	1,30 ± 0,07	9,91	2,77 ± 0,07	0,46 ± 0,02	59,35 ± 1,78
6	6B	5,67	70,8 ± 5,88	27,26 ± 1,50	1,27 ± 0,00	21,5	1,06 ± 0,01	0,64 ± 0,05	34,38 ± 1,03
	6A	5,57	65,7 ± 1,90	37,32 ± 2,00	1,17 ± 0,02	32,0	1,33 ± 0,02	1,06 ± 0,09	21,87 ± 0,09
	BC	5,12	41,0 ± 0,66	43,56 ± 0,83	0,47 ± 0,00	91,8	0,11 ± 0,01	0,64 ± 0,05	7,07 ± 0,24

Nota: PE: Pasto Estrella; MP: material pre-compostado; BC: Bagazo de Caña

En relación con el N_{TOTAL} del sustrato B, a excepción del experimento 1, estuvo en el rango entre 1,08% y 1,70%; su variación es atribuible a su dinámica de transformación. En general, tuvo valores cercanos a los reportados en otros estudios para biorresiduos (Hanc et al., 2011; Dulac, 2001; Krogmann et al., 2010; Epstein, 2011) y residuos de alimentos (Chang y Hsu, 2008; Kumar et al., 2010; Li et al., 2013). El pasto estrella, a pesar de la variabilidad en el contenido de N_{TOTAL} y que también ha sido identificado en otro tipo de pastos (Bary et al., 2005; Zmora-Nahum et al., 2007), incrementó el contenido de N_{TOTAL} en 1A y 2A. El bajo contenido de N_{TOTAL} en las cenizas de madera (Kuba et al., 2008), bagazo de caña (Meunchang et al., 2005; Saticha y Devarajan, 2007) y material precompostado, generó una disminución en el contenido de N_{TOTAL} en los sustratos 3A, 5A y 6A.

La C/N del sustrato B, a excepción de 3B₂, no cumple lo estipulado para el inicio del proceso (25 a 30) (Chiumenti et al., 2005; Diaz y Savage, 2007), que puede estar asociada a la presencia de alimentos vegetales en los residuos de alimentos (Chang y Hsu, 2008; Kumar et al., 2010; Li et al., 2013) y que según Adhikari et al. (2008) y Abdullah y Chin (2010) pueden tener C/N hasta de 12. El bagazo de caña resultó efectivo para incrementar el C/N de la mezcla, aportando celulosas, hemicelulosas y ligninas que son precursoras de sustancias húmicas (Tuomela et al., 2000). La adición de pasto estrella y las cenizas de madera generó una disminución de la C/N en la mezcla, lo cual está asociado tanto al mínimo aporte de COT de ambos materiales, como al considerable aporte de N_{TOTAL} en el pasto estrella. La adición de material precompostado, a pesar de la baja C/N en éste, no incidió en la C/N de la mezcla.

Se observó un alto contenido de K_{TOTAL} en el sustrato B que puede estar asociado al contenido de cáscaras de plátano identificado en los biorresiduos y también reportado en otros estudios (Kalemelawa et al. 2012). A excepción del bagazo de caña, los otros materiales adicionados presentaron contenidos de K_{TOTAL} cercanos a la del sustrato B, en especial la ceniza de madera, también reportado por Kuba et al. (2008), y el material precompostado (Marmolejo, 2011). El sustrato B se caracterizó por tener deficiencias en P_{TOTAL}, situación característica de residuos de alimentos

(Kroyer, 1995) y también reportada en biorresiduos de otros contextos (Hanc et al., 2011). La adición de bagazo de caña, material precompostado y 8% de ceniza de madera (Kuba et al., 2008) incrementaron el contenido de P_{TOTAL} .

Las cenizas en el sustrato B presentan valores relativamente cercanos a los reportados por Marmolejo (2011). La baja presencia puede estar asociada a una menor proporción de impropios debido a condiciones favorables de separación en la fuente. El contenido de cenizas en los residuos de poda y bagazo de caña fue bajo, debido a su alto contenido de materia orgánica. El material precompostado presentó los mayores valores (60%), que puede relacionarse con material empleado sin tamizar y con presencia de impurezas.

4.4.2 Desarrollo del proceso

La **Tabla 36** presenta información del monitoreo en los seis experimentos. Se reporta la temperatura máxima, el tiempo para la temperatura máxima, el tiempo para la etapa termofílica, la duración de la etapa termofílica, el tiempo para temperaturas cercanas a la ambiente, el pH inicial y la cantidad de agua para la humectación de las pilas.

Tabla 36. Información general del monitoreo de las unidades experimentales

Experimento	Pila	T_{MAX} (°C)	Tiempo para T_{MAX} (días)	Tiempo para $T_{Termofílica}$ (días)	Duración fase termofílica (días)	Tiempo para $T_{AMB} \pm 3$ °C (días)	Agua adicionada (L)	pH inicial
1	1B ₁	55	10	5	16	51	31	5,01
	1B ₂	59	10	3	17	51	26	5,01
	1B ₃	55	10	5	15	51	24	5,01
	1A ₁	63	11	1	20	51	29	5,71
	1A ₂	65	11	1	20	51	34	5,71
	1A ₃	63	11	1	20	53	37	5,71
2	2B ₁	65	15	1	21	67	15	6,62
	2B ₂	70	11	2	18	66	18	5,99
	2B ₃	70	11	2	19	69	39	5,85
	2A ₁	72	2	1	16	92	45	5,89
	2A ₂	72	2	1	14	99	43	8,64
	2A ₃	72	4	1	19	98	38	8,80
3	3B ₁	72	10	3	19	98	94	5,85
	3A ₁	73	10	3	20	137	69	7,16
	3B ₂	68	10	2	16	147	26	5,3
	3A ₂	70	10	2	16	166	67	8,02
	3B ₃	68	12	1	27	146	45	4,99
	3A ₃	68	10	2	29	153	54	9,03
4	4B	64	10	2	26	129	26	4,57
	4A	74	11	2	24	128	80	4,57
5	5B ₁	57	4	2	20	78	91	4,12
	5B ₂	57	4	2	12	58	162	4,12
	5A ₁	63	3	2	14	98	128	4,53
	5A ₂	61	4	2	15	85	100	4,53
6	6B ₁	71	13	2	25	80	23	5,26
	6B ₂	70	12	2	21	78	37	4,88
	6B ₃	60	18	2	23	76	16	4,88
	6A ₁	62	3	1	9	133	182	4,82
	6A ₂	62	3	1	13	133	183	4,82
	6A ₃	63	3	1	12	133	147	4,82

Nota: Color Verde: tratamiento control; Color Azul: tratamiento con estrategia

- Comportamiento de la Temperatura

La [Figura 14](#) presenta el comportamiento de la temperatura en los experimentos. En la parte inferior de cada curva de temperatura, se observan los momentos en que fue efectuado el volteo y la humectación de cada pila. Los volteos y las humectaciones solo tienen una representación del momento en que fueron realizadas en la escala de tiempo. En los experimentos 1, 2, 5 y 6 se observan dos gráficos paralelos, que representa cada tratamiento del experimento, con sus respectivas réplicas. En los experimentos 3 y 4, en cada gráfico se observa la comparación entre tratamientos, debido a que no se presentaron réplicas.

A excepción de las pilas 6A en las restantes pilas se observa un comportamiento típico de temperatura del proceso de compostaje, con etapas secuenciales mesofílica ($< 45^{\circ}\text{C}$), termofílica ($> 45^{\circ}\text{C}$), enfriamiento ($< 45^{\circ}\text{C}$) y maduración (temperatura ambiente) (Insam y de Bertoldi, 2007; Chiumenti et al., 2005). En las pilas 6A, se presentaron continuas oscilaciones en la temperatura, pasando de temperaturas mesofílicas a termofílicas en cinco ocasiones durante el proceso. En todas las pilas, después de su conformación se presentó un rápido incremento de la temperatura, indicando marcada actividad microbiana, atribuible al alto número de microorganismo en los residuos y de contenido de materia orgánica de rápida degradación disponible (Fourti, 2013).

En todas las pilas se alcanzaron temperaturas termofílicas poco después de conformarse, no obstante, en el caso de las pilas con incorporación de pasto estrella y bagazo de caña (1A, 2A y 6A) fue en menor tiempo, lo que muestra el efecto favorable de la incorporación de materiales en este tipo de sustrato, como lo reportan Francou et al. (2008), Adhikari et al. (2009) y Kumar et al. (2010). Una situación similar se presentó incrementando la frecuencia de volteo (pila 4A) alcanzando mayores temperaturas desde el inicio del proceso como indican Tiquia et al. (2002). La adición de cenizas de madera y de material precompostado no aceleró el inicio de temperaturas termofílicas, situación reportada por Koivula et al. (2004) para cenizas de madera y contraria a la de Lu y Guo (2012) empleando compost.

En general, las pilas con $\text{C/N} \leq 20$ (1A, 1B, 2A, 3A₂, 3B₃, 3A₃, 4B y 4A), no presentaron retrasos para el inicio de la oxidación de la materia orgánica, situación también reportada por Silva et al. (2014). El rápido incremento de la temperatura a valores termofílicos en todas las pilas, puede relacionarse con la transformación de fracciones fácilmente biodegradables en los sustratos (Tumuhairwe et al., 2009; Krogmann et al., 2010; Chun-Jiang An et al., 2012) incrementando las tasas de crecimiento microbiano y de reacción (Chang et al., 2006).

El incremento de la temperatura a rangos termofílicos entre 12 y 48 horas después del inicio del experimento, coincide con el tiempo típico reportado por Chiumenti et al. (2005). El menor tiempo requerido en las pilas 1A, 2A y 6A, puede estar asociado con mejores condiciones de la mezcla, como pH neutro (pasto estrella) y mayor porosidad, que mejoran el ambiente para el metabolismo microbiano (Gajalakshmi y Abbasi, 2008).

En la pila 4A, el aumento en la frecuencia de los volteos propició mejores condiciones para el suministro de oxígeno y para el control de la humedad, intensificando la actividad biológica como lo reportan Haug (1993), Smith y Hughes (2004) Tiquia (2005) y Luo et al. (2008). Así mismo, puede deberse a una mejor homogenización del sustrato, que permite a los microorganismos transformar material no degradado previamente (Getahun et al. 2012b).

Respecto de la etapa termofílica en los experimentos 1 y 2, las pilas control alcanzaron la máxima temperatura entre los días 11 y 18, y duración de la etapa termofílica entre 18 y 25 días, mientras que en las pilas 1A y 2A se tuvieron mayores temperaturas que sus controles (65°C en 1A y 72°C en 2A) y duración termofílica entre 14 y 20 días.

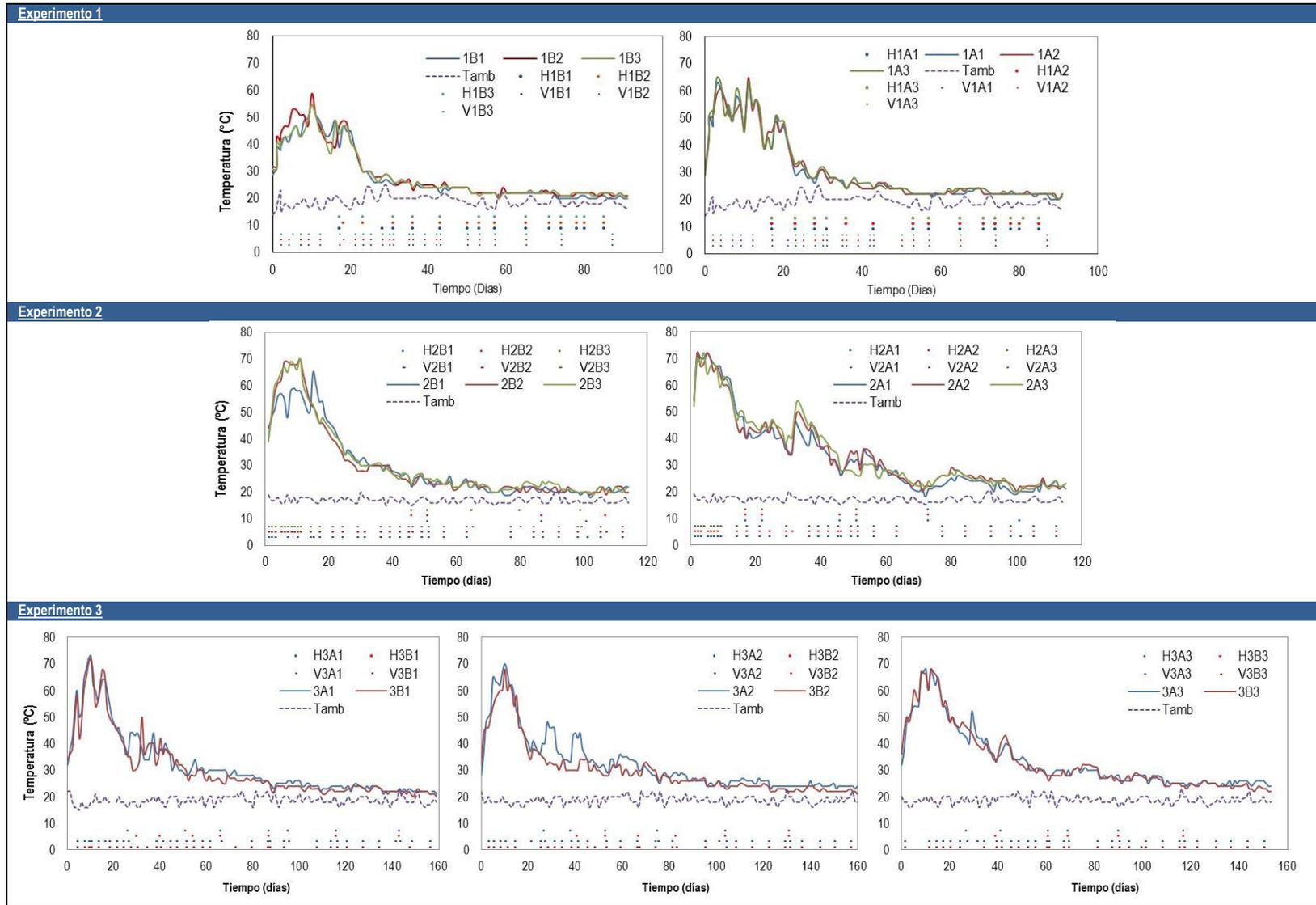
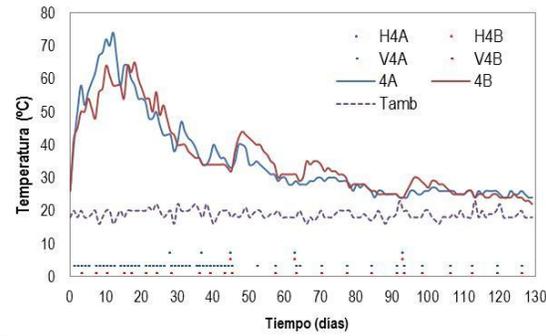
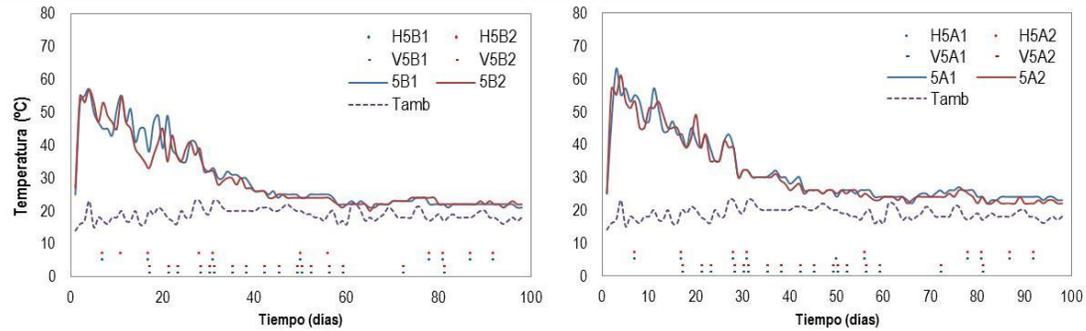


Figura 14. Comportamiento de la temperatura en las unidades de los seis experimentos

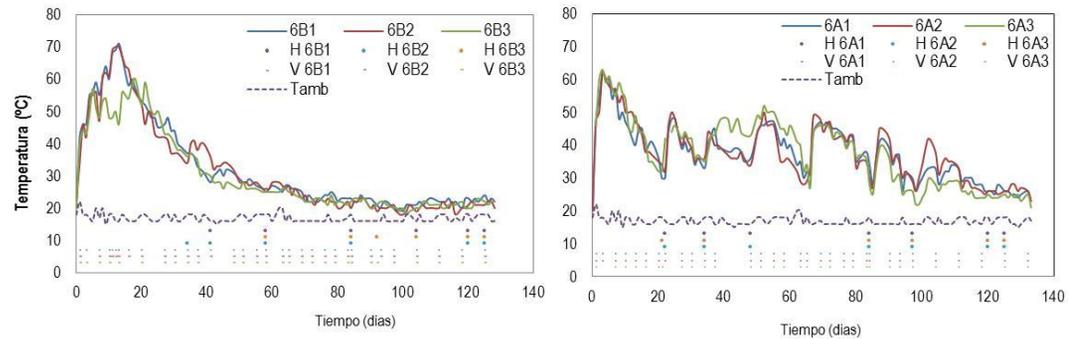
Experimento 4



Experimento 5



Experimento 6



Continuación Figura 14. Comportamiento de la temperatura en las unidades de los seis experimentos

En el experimento 3, a pesar de que la adición de cenizas de madera no aceleró el incremento de la temperatura a valores termofílicos, se obtuvieron mayores valores de temperatura que los controles (73°C, 70°C y 68°C para 3A₁, 3A₂ y 3A₃ respectivamente). Así mismo, en las pilas 3A₂ y 3A₃ se presentó una reducción de la duración de las temperaturas del rango termofílico respecto de sus controles (1 y 2 días), situación no lograda en la pila 3A₁.

En el experimento 4, la pila 4A alcanzó en menor tiempo la temperatura del rango termofílico (2 días) así como el mayor valor (12 días), en comparación con la pila 4B que presentó 3 y 16 días respectivamente. La duración total de las etapas mesofílica y termofílica fue dos días menor en la Pila 4A que en la 4B, resultado similar al reportado en el compostaje de diferentes sustratos por Jiang et al. (2011) (residuos de estiércol porcino y tallos de maíz) y por de Guardia et al. (2008) (mezcla de virutas de madera y lodos), quienes mencionan que la temperatura incrementa y decrece más rápido a mayores tasas de aireación. Guo et al. (2012) indica que esta situación se presenta porque la mayor tasa de aireación conduce a mayor tasa de degradación y pérdidas de humedad y calor.

Las mayores temperaturas se presentaron en la pila 4A (74 °C) respecto de la pila 4B que alcanzó una temperatura de 64 °C; esto muestra la necesidad de un monitoreo cuidadoso para el control de la temperatura en las pilas con mayor aireación. Similares resultados encontraron El Kader et al. (2007), quienes concluyen que el volteo, que incrementa la aireación natural, permitió alcanzar las mayores temperaturas del proceso. El incremento en la frecuencia de volteo, no incidió en el enfriamiento de la pila, situación que como señalan Marešová y Kollárová (2010) puede volver lento el proceso.

En el experimento 5, en ambos tipos de tratamiento, la fase termofílica duró hasta el día 22 del proceso, sin embargo se alcanzaron mayores temperaturas en la pila 5A, lo cual puede asociarse a un mejoramiento en las condiciones del proceso, tales como porosidad, control de la humedad y ventilación natural de las pilas. En ambos casos, la temperatura máxima se alcanzó a los 4 días del proceso, situación contraria a la reportada por Kato y Miura (2008) y Lu y Guo (2009) quienes encontraron que la adición de compost aceleró la sucesión de la comunidad microbial, generando una disminución en el tiempo del proceso.

En el experimento 6, a excepción de la pila 6B₃, la temperatura presentó un comportamiento típico, con un incremento a valores termofílicos desde el día 4 y alcanzando los máximos valores hacia el día 13 (70 °C). Las pilas 6A, a pesar del rápido incremento de la temperatura a valores termofílicos (día 1) y de alcanzar la temperatura máxima a los tres días (63°C), tuvieron menores temperaturas a las presentadas en el control y una duración inferior de la etapa termofílica. De igual manera, las cinco oscilaciones de la temperatura (entre mesofílicas y termofílicas), se presentaron desde el primer descenso de la temperatura hasta el día 88 del proceso. Esto puede estar relacionado con la presencia de elementos de difícil degradación como la lignina que son resistentes a la degradación microbial (Tuomela et al., 2000) y que durante las humectaciones y el volteo de las pilas pueden quedar expuestas al ataque de los microorganismos (Getahun et al., 2012b).

Las pilas de los seis experimentos cumplieron las condiciones para la higienización indicada por Haug (1993), con duración de temperaturas termofílicas por períodos mayores o iguales a 4 días. Para el caso de la incorporación de pasto estrella, cenizas de madera y material precompostado y del incremento en la frecuencia de aireación, se observaron temperaturas mayores a 55 °C por más de tres días y por mayor tiempo que sus respectivos controles, lo que le permite alcanzar mejores condiciones para la higienización (Ruggieri et al., 2008; Puyuelo et al., 2010).

Posterior a la fase termofílica, en todas las pilas, a excepción de 6A, se observa un descenso pronunciado de la temperatura y posteriormente uno más extendido, alcanzando temperaturas al final entre 22 y 24°C. Este comportamiento sucede porque en la fase de enfriamiento se transforman compuestos de difícil degradación y la temperatura tiene un descenso extendido (Chiumenti et al., 2005; Gajalakshmi y Abbasi, 2008; Guo et al, 2012). Posterior a este descenso, la temperatura permaneció entre 2 y 5°C por encima de la temperatura ambiente, con valores relativamente superiores en las pilas A. Estos valores superiores, en el caso de las pilas 1A y 2A, pueden estar asociado a la presencia de compuestos de difícil degradación en el pasto estrella (celulosa, hemicelulosa y lignina) (Laredo y Cuesta, 1988; Doublet et al., 2011), y que promueve una descomposición más lenta. En el caso de las cenizas de madera, las mayores temperaturas en las pilas 3A puede estar asociado a que la incorporación de este material incrementa la capacidad térmica de la masa, ayudando a mantener mayor calor en las pilas (Koivula et al., 2004).

En el experimento 4, a pesar que la fase de enfriamiento se alcanzó en menor tiempo en la pila 4A (26 días) en comparación con la pila 4B (28 días), su fase de maduración fue más extendida (duración de 66 días para alcanzar la temperatura de 24 °C mientras que la pila 4B alcanzó la temperatura de 22 °C en 51 días), lo cual ha atribuido Brito et al. (2008) a que el volteo incrementa la tasa de mineralización de la materia orgánica, pero después de las cuatro primeras semanas, se presenta una estabilización similar de la materia orgánica en comparación con otras técnicas de aireación, mostrando que esta práctica puede efectuarse hasta el inicio de la fase de enfriamiento.

Al finalizar el ensayo, las pilas control (B) tuvieron temperaturas más cercanas a la ambiente, mientras que las pilas con incorporación de materiales tuvieron temperaturas entre 2 y 3 °C por encima. En el caso del bagazo de caña, la consecución de las temperaturas ambiente fue más prolongada, lo que es atribuible, como plantea Nolan et al. (2011), a la baja degradabilidad de la lignina (extremadamente resistente a la degradación química y enzimática) que puede prolongar los tiempos de proceso cuando son empleados como material de soporte en el proceso.

- Comportamiento del pH

La [Figura 15](#) presenta el comportamiento del pH en los seis experimentos. Los materiales incorporados, a excepción del bagazo de caña, incrementaron el valor inicial del pH; no obstante, salvo las pilas 2A y 3A, todas iniciaron con pH ácido. Los bajos valores de pH podrían inhibir a los microorganismos y condicionar la reacción de diferentes compuestos (Li et al., 2013).

El mayor pH en las pilas 1A y 2A se asocia a la incorporación del pasto estrella que por sus características básicas, contribuyó a atenuar la formación de ácidos orgánicos subproductos de la descomposición microbiana de la materia orgánica. Este mismo propósito se cumplió con la incorporación de cenizas de madera, que por sus características alcalinas pudieron servir como material amortiguador de la acidez generada en el proceso (An et al., 2012). Esta estrategia puede ser efectiva para reducir la posible inhibición de la degradación biológica de la materia orgánica, que se presenta a un pH menor de 6,0 combinado con temperaturas superiores a 40 °C (Smårs et al., 2002; Sundberg et al., 2004). De otro lado, se observa que a pesar de la acidez presentada en las otras pilas, esta característica no fue una limitante para el desarrollo del proceso, posiblemente debido a que la transformación de la materia orgánica de fácil degradación se realizó bajo condiciones controladas de aireación.

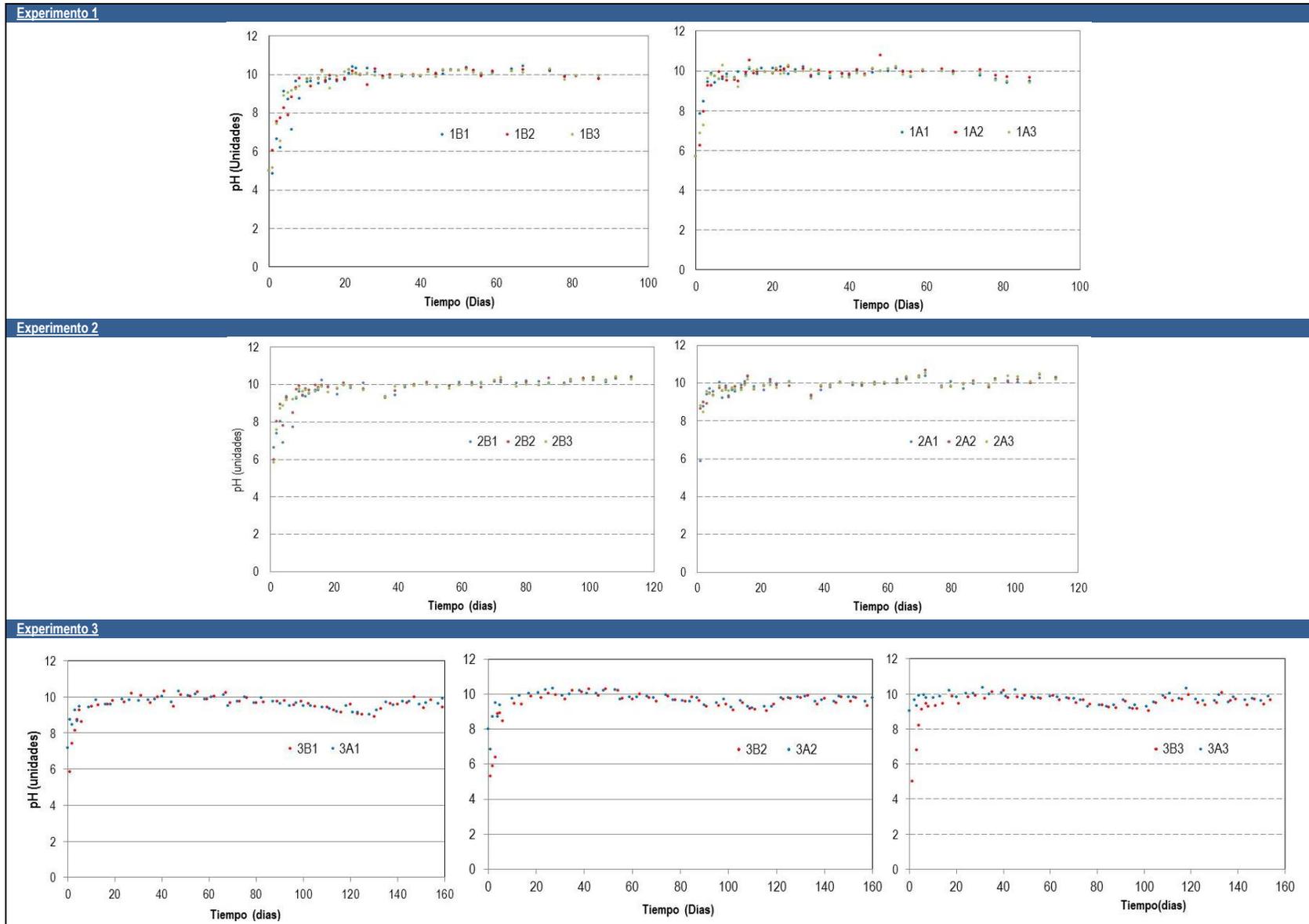
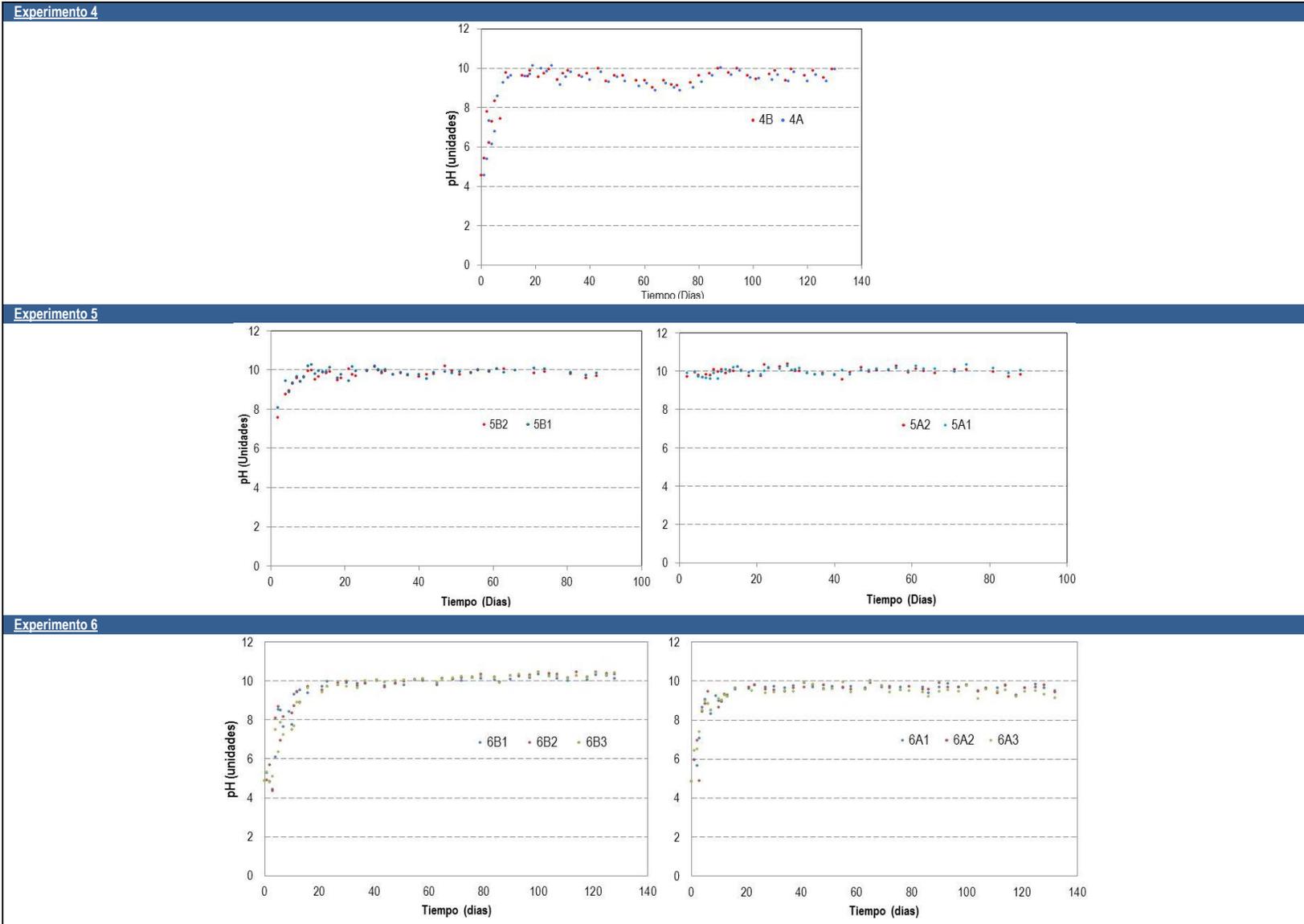


Figura 15. Comportamiento del pH en las unidades de los seis experimentos.



Continuación Figura 15. Comportamiento del pH en las unidades de los seis experimentos.

Posterior al día 2 en las pilas con incorporación de materiales y entre los días 3 y 4 en las pilas control y en la 4A, el pH estuvo entre neutro y alcalino; esto se debe a que los ácidos orgánicos son fácilmente biodegradables y consumidos por los microorganismos (Sundberg y Jönsson, 2005). El rápido incremento en el pH es causado por la transformación de $N_{\text{orgánico}}$ en amoniacal durante el proceso de amonificación (Bech-friis et al., 2001). También se asocia a la liberación de CO_2 durante la aireación de la biomasa reduciendo la posibilidad de formación de ácidos bicarbonato (Haug, 1993). El incremento en el pH debe controlarse debido a que en la fase termofílica (presentada entre 10 y 29 días) puede generar un desplazamiento del equilibrio de iones de amoníaco – amonio, promoviendo la volatilización de NH_3 (Beck-friis et al., 2001; Wong et al., 2009; Boldrin et al., 2010).

Una vez se alcanzaron los valores de pH en el rango alcalino, se mantuvieron hasta el final del proceso en todas las pilas, con una tendencia a presentar menores valores de pH en las pilas 6A (entre 7,0 y 7,5 unidades), lo cual se asocia al pH del bagazo de caña. En las restantes pilas, los valores de pH entre 8 y 10 unidades en las pilas pueden asociarse al alto contenido de K^+ en los sustratos, el cual en su forma soluble en agua y combinado con ácidos bicarbonatos (HCO_3^-) producidos durante la mineralización de la materia orgánica, pueden formar una base fuerte como el hidróxido de potasio (KOH) (Kalemelawa et al., 2012). Así mismo, es atribuible a la descomposición del alto contenido de proteínas identificado en los sustratos (Chun et al., 2012). La pequeña reducción del pH al final de los experimentos, puede deberse a la formación de nitratos como resultados de la liberación de H^+ durante la nitrificación microbiana (Eklind y Kirchmann, 2000) o debido a la sucesión microbiana de hongos acidofílicos - mesofílicos a bacterias alcalinofílicas – termofílicas (Tumuhairwe et al., 2009).

A excepción del bagazo de caña, ninguna de las estrategias planteadas tuvo un efecto en los valores de pH de las pilas en las fases de enfriamiento y maduración, tal como lo reportan Koivula et al. (2004) con la adición de cenizas de madera o Arslan et al. (2011) con el incremento de las tasas de aireación. Estos valores básicos en el producto final se han reportado en estudios previos desarrollados en la zona de estudio por Marmolejo (2011) y Marmolejo et al. (2010). Brito et al. (2008) recomiendan que los productos con valores de pH básicos sean mezclados con otros materiales de pH bajos, de manera que puedan ser aplicados en diferentes usos. La aplicación de productos con características de pH alcalino en suelos ácidos ha sido reportada como una de las mayores ventajas de la aplicación de compost proveniente de RSM (Tumuhairwe et al., 2009).

- Comportamiento de los sólidos volátiles (SV) experimentos 2 y 6

La Figura 16 (a, b) presenta el comportamiento de los SV en las pilas del experimento 2 (a) y del experimento 6 (b). Las pilas con incorporación de materiales (pasto estrella y bagazo de caña) presentan mayor contenido de SV, lo cual está asociado a su mayor aporte de COT (Ver [Tabla 35](#)). El descenso pronunciado de los SV durante las etapas mesofílicas y termofílicas en todas las pilas (2A, 2B, 6A y 6B) se debe a que los materiales orgánicos de fácil degradación son transformados por los microorganismos durante estas etapas del proceso, generándose CO_2 producto de la respiración microbiana (Haug, 1993).

La menor pendiente de decrecimiento durante las primeras etapas del proceso en las pilas con bagazo de caña (6A) está asociada a la presencia de materiales de difícil degradación como la lignina, que protegen las células fibrosas (celulosa y hemicelulosa) del ataque microbiano (Haug, 1993). Luego de la etapa termofílica se observó un descenso de los SV menos pronunciado asociado a la descomposición del material de media y difícil degradación en los sustratos, comportamiento similar al reportado en otros estudios (Zhu, 2007).

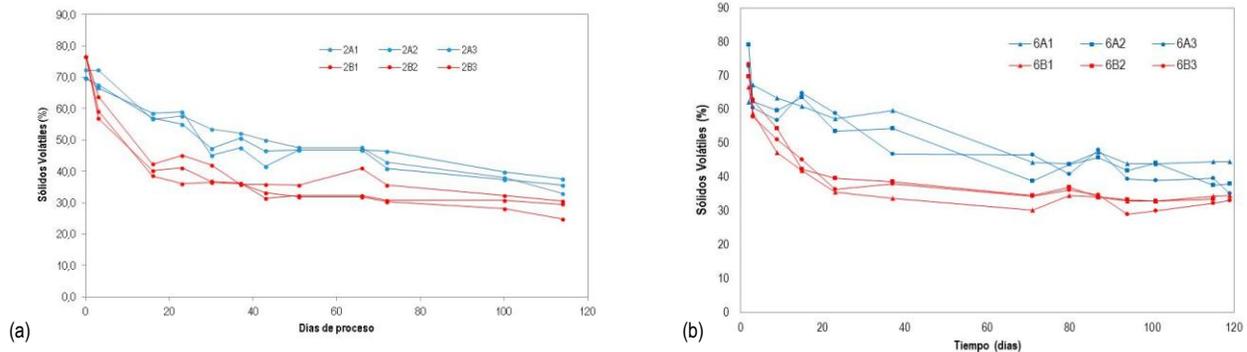


Figura 16. Comportamiento de Sólidos Volátiles en las pilas de los experimentos 2 (a) y 6 (b)

Con respecto a la reducción de los SV en las pilas, se encontró que las pilas 2A, 2B, 6A y 6B, presentaron respectivamente $49,81\% \pm 4,26\%$, $63,04\% \pm 4,07\%$, $47,18\% \pm 10,88\%$ y $56,68\% \pm 1,81\%$, lo que evidencia el alto avance en la transformación de la materia orgánica. De igual manera, se observa que las pilas con incorporación de materiales de soporte presentaron menores porcentajes de reducción de SV, lo cual está asociado a la mayor presencia de materiales de resistente degradación.

4.4.3 Calidad del producto

- Calidad fisicoquímica y microbiológica

En la Tabla 37 se presenta los resultados de calidad fisicoquímica y microbiológica de los productos de los seis experimentos. Se observa en color verdes los parámetros de la calidad del producto que tuvieron diferencias significativas para los experimentos en los que se efectuaron las pruebas estadísticas (Experimentos 1, 2, 5 y 6). En el Anexo I se presentan los valores de p de las pruebas estadísticas.

El pH de los productos en ambos tipos de pilas de los seis experimentos, estuvo en el rango de valores alcalinos. En las pilas controles se identifica la tendencia observada en estudios previos en la zona de estudio, en los que se presentaron valores de pH entre 8,5 y 9,5 (Marmolejo, 2011). Se observa que la adición de pasto estrella y del bagazo de caña influenciaron la disminución del pH del producto en comparación con sus respectivos controles (1B, 2B y 6B). Con respecto a los experimentos con adición de cenizas de madera e incremento en la frecuencia de volteo, salvo las pilas 3A₃ y 3B₃, no se presentan diferencias en el valor final del pH de los productos. Resultados similares reportan Kurolo et al. (2011) con la aplicación de cenizas de madera y Tirado y Michel (2010) en el compostaje de estiércol bovino con el incremento en la frecuencia de volteo. Los tratamientos que no cumplen con los valores estipulados en la norma NTC 5167 son 1B, 2A y 2B, 3A₃, 4A y 4B, y 5A y 5B.

La aplicación de este tipo de productos con valores alcalinos incrementa el pH del suelo, facilitando una mayor mineralización del carbono, la generación de iones OH⁻ y la introducción de cationes básicos como el K⁺ (Mkhabela y Warman, 2005). De otro lado, se podrían presentar restricciones para la aplicación continua de estos productos en suelos básicos (salinos, sólidos y salino-sódicos) que podría afectar la disponibilidad de micronutrientes al disminuir la movilidad por su precipitación y la formación de quelatos con las sustancias húmicas del suelo (Pigozzo et al., 2006). Su aplicación resultaría favorable en suelos ácidos, en los cuales generalmente la disponibilidad de bases

intercambiables como Ca, Mg y K es baja, por lo que estos productos contribuirían a subir el pH del suelo y a suministrar nutrientes que pueden complementar la fertilización convencional (Zapata, 2004).

Respecto a la humedad, salvo los productos del experimento 6, las restantes unidades cumplen con el rango establecido en la norma técnica colombiana y adicionalmente, presentan valores similares entre los tratamientos del mismo experimento (Ver [Tabla 37](#)). De otro lado, se observó una tendencia a requerirse mayor humectación en las pilas A respecto de los controles (Ver [Tabla 36](#)), necesitándose una cantidad adicional de agua para mantener la actividad biológica en el proceso, en un 1,23 y 1,75 veces para los experimentos 1 y 2, 3 veces para el experimento 4 y 6,7 veces para el experimento 6. Una situación similar se presentó en el experimento 3, particularmente con las pilas que incorporaron cenizas en un 4% y 8%, requiriéndose respectivamente 2,6 y 1,2 veces más agua. La pila 5^a presentó requerimientos de agua similar a los presentados en su pila control. Estos elementos muestran que a pesar de presentarse condiciones favorables en el desarrollo de las estrategias propuestas, se requiere un control y monitoreo de esta variable, para mantener las condiciones biológicas durante el proceso.

La incorporación de pasto estrella, material precompostado y bagazo de caña, fue favorable para la obtención de un mayor contenido de COT en los productos en comparación con sus respectivos controles y en el caso de los productos de las pilas 2A y 6A, cumplen con el valor mínimo de reporte de la norma colombiana. Para los productos de las pilas control, el límite de la norma es difícilmente alcanzable y varios autores recomiendan la revisión y ajuste de las normas en lo que respecta a este parámetro (Saha et al., 2010; Marmolejo, 2011); por lo tanto, la adición de estos materiales contribuyó a mejorar la calidad del producto, situación identificada como crítica en las instalaciones de compostaje de la zona. De otro lado, las condiciones presentadas en todos estos productos (1A, 2A, 5A y 6A), tales como mayor COT asociado con una relativa mayor CIC, una disminución de la densidad aparente y un aumento en la CRA (Ver [Tabla 37](#)), puede traer beneficios al suelo en su aplicación, como una mayor retención de nutrientes y agua, el mejoramiento de las condiciones físicas del suelo y el incremento de la actividad microbiana (Aggelides y Londra, 2000).

Respecto del N_{TOTAL} , aunque el objetivo de los materiales de soporte es suministrar soporte estructural a la mezcla, la incorporación del pasto estrella también aportó N_{TOTAL} , que permitió el cumplimiento del valor mínimo de reporte de la norma colombiana. Esto está asociado tanto a un mayor contenido de N en los sustratos 1A y 2A como a un mejor control del pH y la temperatura en el proceso, que minimiza las pérdidas por volatilización (Bernal et al., 2009). En las pilas 6A por el contrario, se presentó un valor inferior de N respecto de su control disminuyendo el valor agronómico (Saticha y Devarajan, 2007). Aunque la relación C/N apropiada al inicio del proceso es una de las estrategias para mantener el N_{TOTAL} en el producto, Bernal et al. (2009) indican que la fuente de C debe ser fácilmente degradable para que sea efectiva, situación no presentada con el bagazo de caña caracterizado por materia orgánica resistente (Goyal et al., 2005).

Las pilas 3A₁, 3A₂ y 3A₃ presentaron una disminución en el contenido de COT y en el de N_{TOTAL} en comparación con sus respectivos controles; tal como lo manifiestan Kuba et al. (2008), esto puede ser atribuido a un efecto de dilución por la mezcla con cenizas de madera y además, por un mejoramiento en la mineralización. En el experimento 3, todas las pilas presentaron valores de COT inferiores al valor mínimo de reporte de la norma colombiana (>15%). El contenido de N_{TOTAL} fue típico para este tipo de sustratos (0,7-1,7%) (Kuba et al., 2008) con las mayores diferencias en las pilas 3B₃ y 3A₃; esta última, presentó los valores de N_{TOTAL} más bajos en el experimento y adicionalmente, fue la única que no cumplió con el valor mínimo de reporte indicado en la norma colombiana (> 1%).

Tabla 37. Parámetros de calidad fisicoquímica y microbiológica del producto de los seis experimentos

Parámetro	Unidad	Experimento 1		Experimento 2		Experimento 3						Experimento 4		Experimento 5		Experimento 6		NTC 5167
		1 B	1 A	2 B	2 A	3 B ₁	3 A ₁	3 B ₂	3 A ₂	3 B ₃	3 A ₃	4 B	4 A	5 B	5 A	6 B	6 A	
pH	Unidad	9,86 ± 0,1	8,85 ± 0,1	10,10±0,28	9,90 ± 0,17	8,94	8,82	8,69	8,87	7,85	9,07	9,81	9,80	9,55±0,13	9,97±0,00	8,01±0,13	7,38 ± 0,07	>4 y <9
Humedad	% (m/m)	24,37 ± 5,9	27,50 ± 3,6	32,77±5,6	34,50±3,3	35,2±0,2	35,4±0,0	29,8±1,0	28,7±0,2	25,3±0,3	23,9±0,3	21±0,57	22±1,23	25,65 ± 0,0	29,35±0,5	39,00±0,9	49,47±11,1	<35
COT	% (m/m)	10,13 ± 1,3	13,53 ± 0,8	13,73±0,4	18,87±2,7	11,53±0,4	11,49±0,9	11,34±0,6	9,94±0,3	12,3±0,1	8,88±0,7	9,59±0,65	8,62±0,05	7,65±0,78	9,00±0,00	12,77±1,97	17,77±1,46	>15
N _{Total}	% (m/m)	1,05 ± 0,2	1,18 ± 0,2	0,90±0,12	2,02±0,50	1,44±0,01	1,52±0,01	1,35±0,02	1,3±0,01	1,45±0,04	0,88±0,03	1,38±0,10	1,27±0,02	0,72±0,07	0,96±0,11	1,54±0,51	0,90±0,69	>1
C/N	--	10,10 ± 3,6	11,83 ± 3,3	14,77±1,9	9,67±3,1	8,03	7,57	8,38	7,62	8,51	10,09	6,95±	6,79±	10,70±0,1	9,45±1,2	9,43±5,4	28,23±18,7	-
Cenizas	% (m/m)	78,94 ± 0,9	74,86 ± 1,3	65,67±2,3	61,03±1,3	--	--	--	--	--	--	--	--	83,00±0,6	79,65±0,1	62,63±1,9	57,23±1,0	<60
K _{Total}	% (m/m)	1,76 ± 1,3	1,66 ± 0,5	3,23 ± 0,38	3,92 ± 0,13	1,05±0,09	0,79±0,04	1,62±0,14	1,28±0,11	1,43±0,00	1,48±0,10	2,62±0,16	1,94±0,18	1,99±0,71	2,56±0,21	3,78±0,37	3,11±0,40	>1
P _{Total}	% (m/m)	0,91 ± 0,1	0,42 ± 0,0	1,32 ± 0,06	1,26 ± 0,10	0,66±0,01	0,56±0,02	0,64±0,03	0,63±0,01	0,6±0,01	0,8±0,07	0,27±0,02	0,21±0,01	0,50±0,13	0,49±0,03	1,45±0,17	1,04±0,08	>1
Densidad	g/cm ³	0,60 ± 0,0	0,48 ± 0,0	0,55 ± 0,1	0,34 ± 0,0	--	--	--	--	--	--	--	--	0,72±0,06	0,73±0,07	0,61±0,03	0,44±0,07	<0,6
CRA	%	93,37±12,2	119,13±14,2	120,4± 6,9	165,6±18,6	--	--	--	--	--	--	--	--	81,50±11,3	92,85±12,2	124,4±7,1	168,83±9,9	>100
CE	dS/m	0,23 ± 0,0	0,30 ± 0,0	0,49 ± 0,07	0,49 ± 0,07	0,730	0,84	0,50	0,63	0,53	1,09	0,48	0,42	0,23±0,01	0,34±0,06	0,74±0,23	0,43±0,07	-
CIC	meq/100g	29,3 ± 4,7	32,00 ± 1,0	49,7 ± 1,6	50,0 ± 2,7	--	--	--	--	--	--	--	--	35,5±2,1	38,0±4,2	52,3 ± 0,9	56,2±1,9	>30
CT	NMP/g	84,0	67,3	10,0	7,7	--	--	--	--	--	--	--	--	350,0	29,5	809,3	751,0	--
CF	NMP/g	47,0	53,0	0,0	0,0	--	--	--	--	--	--	--	--	54,5	16,5	17,0	23,0	--
IG	Unidad	--	--	26,7± 5,7	36,9± 5,8	49,2	18,7	115,7	17,6	20,0	1,1	28,8±1,4	39,5±12,1	--	--	40,4±18,6	80,6±24,4	--

Nota: CT: Coliformes totales; CF: Coliformes fecales; IG: Índice de Germinación

Con respecto al contenido de COT y N_{TOTAL} del experimento 4, se observan menores valores en la pila 4A; los menores valores de COT pueden asociarse a una mayor mineralización debido a la disponibilidad de oxígeno en el medio que permitió mayor actividad biológica así como una mayor volatilización del CO_2 durante los volteos de las pilas. En este experimento, este parámetro no cumple con los valores mínimos de reporte de la norma técnica, lo que está asociado al bajo contenido del COT en los sustratos procesados. Tiquia et al. (2002) y Parkinson et al. (2004) también encontraron en el compostaje de estiércol bovino menores valores de COT (además de N_{TOTAL} , P_{TOTAL} y K_{TOTAL}) en los tratamientos que incluían mayores frecuencias de volteo de las pilas.

En relación con el menor contenido de N_{TOTAL} en la pila 4A, otros autores (Tiquia et al. 2002, Bernal et al., 2009; Getahun et al. 2012b, Guo et al. 2012) también reportan menores valores cuando se aumenta la frecuencia de los volteos de las pilas de compostaje, debido a la liberación del NH_3 . Esto sucede debido a que la mayor aireación aumenta la transformación de NH_3 acuoso a NH_3 gaseoso el cual, debido a la alta temperatura y pH, puede ser volatilizado durante los volteos. A pesar de una mayor pérdida de N en la pila B, ambos productos cumplen con los valores mínimos de reporte para este parámetro estipulados en la norma colombiana. Además, es importante resaltar que el impacto de la pérdida de N en pilas con mayor frecuencia de volteo no fue significativo en este experimento, debido al contenido inicial del N en los sustratos; no obstante cuando este contenido es bajo, puede incidir negativamente en la calidad del producto. El Kader et al. (2007) recomiendan considerar la relación C/N de los sustratos para la programación de la aireación, de manera que se minimicen las pérdidas cuando la relación no es la recomendada para el inicio del proceso.

En general, todas las pilas presentaron una disminución de la C/N respecto de la de los sustratos; la disminución de la C/N al final del proceso es el resultado de la degradación del C y la concentración del N_{TOTAL} (Nolan et al., 2011). Aunque la C/N del producto depende de las características de los materiales tratados, se recomienda que debe estar entre 10 a 15 (Barberis y Nappi 1996; Sullivan y Miller, 2001), situación que se presentó en los productos de las pilas 1B, 1A, 2B, 3A₃ y 5B; en el caso del pasto estrella (1A y 2A), cenizas de madera (3A) y en la pila con incremento en la aireación (4A), los bajos valores en la C/N están asociados al limitado contenido de COT en los sustratos y en el caso de las pilas 2A debido a la contribución de N_{TOTAL} por parte del pasto estrella. En los productos de las pilas 6A, los altos valores encontrados en la relación C/N están asociados al bajo contenido de N_{TOTAL} y al aporte de COT del bagazo de caña. Aggelides y Londra (2000) indican que el uso de materiales con alta C/N (como del producto 6A) resultan ser idóneos para la recuperación y la formación de suelos, además de constituirse en una alternativa como material de cobertura para control de erosión. Esto se debe a que en este tipo de productos predominan las reacciones de inmovilización en los suelos, por la presencia de sustancias altamente recalcitrantes como la lignina que se ha reconocido como uno de los compuestos precursores de la formación de humus en el suelo (Amalfitano et al., 2006).

Los productos de las pilas B, a excepción del contenido de P_{TOTAL} en 4B, tienen valores típicos de P_{TOTAL} y K_{TOTAL} (entre 0,4 a 1,1% y 0,6 a 1,7% respectivamente) (Herity, 2003). En las pilas 1A, 2A y 6A se presentaron valores superiores a los indicados por Herity (2003) y cumplen con el mínimo de reporte de la norma colombiana. En la pila 4A la mayor disponibilidad de oxígeno pudo favorecer una mayor mineralización del P_{TOTAL} y adicionalmente, la baja concentración en los sustratos (Ver [Tabla 35](#)) condiciona la concentración de P_{TOTAL} en el producto final. En general, las mayores concentraciones de K_{TOTAL} y P_{TOTAL} en el producto en comparación con el sustrato, pueden estar asociadas a la pérdida de masa en el proceso (Mkhabela y Warman, 2005).

Se observa que el P_{TOTAL} en los productos de los experimentos 1, 3, 4 y 5 (en ambos tipos de tratamiento), no alcanzó el valor mínimo de reporte de la norma colombiana, lo que amerita identificar alternativas para complementar el sustrato. Desde el punto de vista agronómico, el contenido de P_{TOTAL} es bajo para la producción de cultivos; así mismo, en suelos derivados de cenizas volcánicas, como los que predominan en la zona de estudio, es mayor la limitación, pues se tiende a fijar el P y no dejarlo disponible para las plantas, ratificando la necesidad de complementar la fertilización en cultivos donde se esperan altos rendimientos. Estrategias como la incorporación de roca fosfórica al producto o incorporar enmiendas ricas en P, podrían ser efectivas para incrementar la calidad agronómica del producto.

La CE es una medida indirecta del contenido de sales asociada a la presencia de sodio, cloruro, potasio, nitrato, sulfato y sales de amonio, que en elevadas concentraciones son tóxicas para las plantas e inhiben su crecimiento (Hargreaves et al. 2008, Sullivan y Miller 2001). Se observa que en todos los casos, las pilas presentaron valores bajos de CE, que cumplen con los rangos recomendados por Koivula et al. (2004) (< 4 dS/m), Dinambro et al. (2006) (< 2 dS/m) o Getahun et al. (2012b) (< 3 dS/m) para su uso en la agricultura. Los contenidos aceptables de CE también pueden estar asociados a la baja presencia de sales en los sustratos, por la poca cantidad de residuos de alimentos procesados.

De otro lado, se observa la influencia de la incorporación de cenizas de madera en el incremento de la CE lo cual está asociado con la alta salinidad que caracteriza a las cenizas de madera (Kuba et al., 2008). La pila 4A presentó un menor valor respecto de su control, lo cual puede estar asociado a una mayor liberación de sales minerales y de iones de amonio (volatilización del amoniaco) a través de la descomposición de la materia orgánica; tal como indica Tiquia (2010) la salinidad puede estar asociada al relativo alto contenido de N_{TOTAL} en el producto final y su posterior mineralización. Rasapoor et al. (2009) y Gao et al. (2010) reseñan que la volatilización del NH_3 y la precipitación de sales minerales contribuyen a la disminución de la CE, tendencia observada en las pilas del experimento 3 y 4.

La Figura 17 presenta el IG promedio de las tres réplicas para los experimentos 2, 3, 4 y 6. Las estrategias resultaron favorables para alcanzar mayores IG en los productos respecto de sus controles, salvo en las pilas 3A. En general, los análisis desarrollados mostraron que aunque se tuvieron altos porcentajes de germinación en los productos de las pilas (Porcentajes de Germinación Relativa – PGR), se presentó un bajo crecimiento de la raíz (Crecimiento de Radícula Relativo – CRR) que afecta el valor del IG.

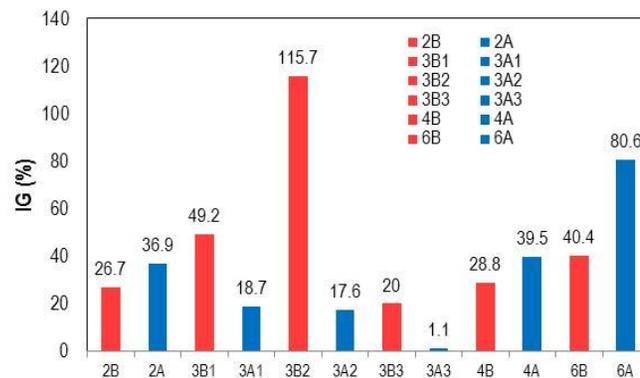


Figura 17. Índice de Germinación promedio para los productos de las unidades experimentales 2, 3, 4 y 6.

Las pilas 3A presentaron menores valores de IG que sus controles así como de todos los experimentos; el incremento en la proporción de cenizas de madera generó menores IG. Esto puede relacionarse con la presencia de compuestos fitotóxicos en las cenizas de madera, el incremento de sales en el producto y por ende, mayor efecto fitotóxico sobre el crecimiento de las plantas (Ali et al., 2013). La alta salinidad del compost puede ser una razón para los bajos valores en el IG, la cual fue corroborada con los valores encontrados de CE en los productos (Smith y Hughes, 2004).

De otro lado, a excepción de las pilas 3B₂ y 6A, los productos no alcanzaron el valor de IG propuesto por Varnero et al. (2007) que indica madurez del producto. En el caso de las pilas con incorporación de pasto estrella y bagazo de caña, los menores valores de pH en el producto pueden incidir para la obtención de mayores IG, mientras que en el caso de la pila con mayor frecuencia de volteo, puede asociarse con mejores condiciones del proceso y mayor volatilización del N en sus formas de NH₃.

- Metales pesados

La [Tabla 38](#) presenta los resultados del contenido de los metales pesados en los productos de los experimentos 1, 5 y 6. A pesar de percibirse diferencias significativas para parámetros como el Cr, Hg, Ni y Zn, se observa que el contenido de los metales cumple con los límites propuestos por las normas colombiana, estadounidense y de la Comunidad Económica Europea (compost tipo I y II). Estos resultados muestran que el uso agronómico del producto no es restringido por la contaminación por metales pesados y que su baja presencia está relacionada con la calidad de los sustratos, los cuales provienen de materiales separados en la fuente. Esto coincide con lo reportado por Smith (2009) que indica que un producto que proviene de biorresiduos separados en la fuente y recolectados selectivamente, normalmente presentan metales pesados inferior a los límites de los estándares de calidad.

Tabla 38. Contenido de metales pesados en los productos de los experimentos 1, 5 y 6

Parámetro	Unid.	UE ¹	EEUU	NTC 5167	Experimento 1			Experimento 5			Experimento 6		
					1A	1B	P<0,05	5A	5B	P<0,05	6 ^a	6B	P<0,05
As	ppm	10	NA	54	16,4	5,1	0,303	4,19	5,50	0,1448	0,80	0,34	0,113
Cd	ppm	0,7– 1,5	20	18	<0,003	<0,003	--	<0,003	<0,003	--	<0,003	<0,003	--
Cr	ppm	100–150	1500	1200	<0,02	<0,02	--	1,58	<0,02	--	23,92	29,04	0
Hg	ppm	0,5 - 1	NA	5	0,14	0,16	0,492	0,11	0,15	0,0089	0,14	0,03	0
Ni	ppm	50 - 75	210	180	24,46	26,19	--	14,7	13,27	0,0281	13,66	13,47	0,893
Pb	ppm	100- 300	150	300	<0,01	<0,01	--	35,61	122,48	0,7929	20,64	55,65	--
Zn	ppm	150-300	600	NA	47,60	11,00	0	0,02	0,09	0,8671	ND	ND	--

Nota: ¹Rango mínimo y máximo de metales pesados para compost clase I y II, respectivamente; N.D.: No dato

- Análisis microbiológicos

Respecto de los coliformes totales y fecales (Ver [Tabla 37](#)), se observa que los dos tipos productos de cada experimento no presentaron diferencias significativas para estos parámetros. De otro lado, a pesar que la norma colombiana no estipula límites para los coliformes fecales, los resultados muestran un bajo contenido de los mismos, que cumple con los mínimos indicados en normas como la de Estados Unidos (US-EPA, 1994) y la Norma Chilena

(INN, 2004) (exige un valor menor a 1000 NMP/g). La baja presencia de coliformes fecales indica efectividad en los procesos de higienización del material. La no eliminación total puede atribuirse a procesos de contaminación inherentes a la experimentación en condiciones reales (Hargreaves et al., 2008) o la re-contaminación del material durante los volteos de las pilas (Hassen et al., 2001). De otro lado, se observa una tendencia a presentar menores valores en las pilas que incorporaron materiales (pasto estrella, material precompostado y bagazo de caña).

- Evaluación del crecimiento en cultivo indicador

Rosero (2013) evaluó el crecimiento de maíz en un suelo andisol, con la aplicación de los productos de las pilas 1A y 1B con y sin fertilizante (Fertilizante 10-30-10), comparándolos además con un testigo (sin producto) y con la aplicación únicamente del Fertilizante 10-30-10. La dosis se estimó con base en el contenido de N en los productos; para los cuatro tratamientos con los productos obtenidos se aplicó una dosis de 47,12 g/planta mientras que para el fertilizante 10 -30 -10 se empleó una dosis de 0,2 g/planta. El testigo no presentó dosis.

Se encontró un efecto positivo con la adición de producto mejorado (1A) en propiedades del suelo, como el pH, CE, $C_{\text{orgánico}}$ del suelo, actividad microbiana del suelo y N del suelo. De otro lado, encontró que la incorporación del producto mejorado en combinación con Fertilizante 10-30-10 y la aplicación del Fertilizante (10-30-10) presentaron las mayores alturas de crecimiento del maíz a los 50 días de la evaluación, lo cual se atribuyen al aporte de $C_{\text{orgánico}}$ al suelo, a la vez que permitió que el N estuviese disponible para la planta hasta alcanzar su madurez fisiológica. De igual manera, este mismo producto permitió obtener al final del experimento, el tallo con mayor diámetro, situación que puede estar asociado con el contenido de K y P en el material evaluado.

4.5 Conclusiones del capítulo

En este capítulo se evaluó el efecto en el proceso y en la calidad del producto del compostaje de biorresiduos, de la incorporación de: i) pasto estrella (en dos proporciones), ii) cenizas de madera, iii) bagazo de caña y iv) material precompostado; para el caso de condiciones con limitado acceso a materiales de soporte o enmienda, también se evaluó el incremento en la frecuencia de volteo.

La incorporación de pasto estrella y del bagazo de caña resultó efectiva en la optimización del proceso y en la calidad del producto. La adición de ambos materiales permitió alcanzar la temperatura del rango termofílico en menor tiempo, observándose mayores tasas de degradación que incidieron en una menor duración de las etapas mesofílica y termofílica. No obstante, compuestos de difícil degradación en ambos tipos de materiales tales como hemicelulosas y ligninas, incrementaron la duración de las etapas de enfriamiento y maduración.

La calidad del producto de las pilas con la incorporación de pasto estrella y bagazo de caña, presentó niveles de COT, CIC, densidad aparente y CRA que podrían mejorar propiedades del suelo, como mayor retención de agua y nutrientes e incremento en la actividad microbiana. A excepción del bajo contenido de N_{Total} en los productos de las pilas con incorporación con bagazo de caña, ambos tipos de productos tuvieron un contenido de P_{Total} y K_{Total} que pueden complementar la fertilización agrícola y debido a su mayor valor de C/N, tienen potencial para ser usado en la recuperación estructural de los suelos o en coberturas para la recuperación de suelos erosionados.

La adición de ceniza resultó favorable para incrementar el pH inicial y mejorar el contenido nutricional de los biorresiduos; sin embargo, dicho incremento fue excesivo con la adición de 4 y 8 % de ceniza de madera, que asociado con temperaturas termofílicas pudieron propiciar la volatilización de N_{TOTAL} y una disminución de éste en el producto. Respecto del proceso, la incorporación de las cenizas no aceleró el inicio de la etapa termofílica, observándose similares tasas de degradación de la materia orgánica respecto del control, que puede ser atribuido a la presencia de materia orgánica de fácil degradación. El producto de las pilas con adición de cenizas mostró mayor presencia de elementos fitotóxicos para las plantas que pueden comprometer el uso del producto.

El incremento en la frecuencia de volteo permitió mayores tasas de degradación de la materia orgánica, una disminución en la duración de las etapas mesofílica, termofílica y de enfriamiento (en un 80%) y mayor mantenimiento de las temperaturas de higienización. Sin embargo, impactó la calidad del producto, disminuyendo el contenido de COT y nutrientes debido a una mayor mineralización del COT y del N y P orgánicos, así como una mayor volatilización del NH_3 . El incremento de la aireación tuvo un efecto favorable en la disminución de sustancias fitotóxicas que se reflejó en un mejor IG y en menores valores de CE. En general, fue efectivo para el control de la humedad y se recomienda efectuarlo en las etapas mesofílica y termofílica.

5 EVALUACIÓN DE LA ESTABILIDAD Y MADUREZ EN EL COMPOSTAJE DE BIORRESIDUOS EN MUNICIPIOS MENORES DE PAÍSES EN DESARROLLO

5.1 Introducción

El compostaje es una de las opciones de mayor aplicación y efectividad para el tratamiento de la fracción orgánica de los residuos sólidos municipales (Biorresiduos) (Levis et al., 2010). Para garantizar la inocuidad del compost para su uso en actividades agrícolas o de conservación de suelos, se deben cumplir criterios de calidad en términos de contenido de patógenos, metales pesados, materia orgánica, nutrientes (macro y micronutrientes) y estabilidad y madurez, entre otros (Soumaré et al., 2003; Tognetti et al., 2007; Barral et al., 2007).

La estabilidad se refiere a la resistencia del producto a una mayor degradación de la materia orgánica o a la actividad microbiológica y la madurez describe la aptitud del producto para un uso particular y se relaciona con el crecimiento de la planta y la fitotoxicidad. En general, ambos criterios están relacionados, debido a que los compuestos fitotóxicos son producidos por los microorganismos en materiales inestables (Sullivan y Miller 2001; Bernal et al., 2009). Un producto inestable o inmaduro perjudica el crecimiento de plantas y afecta la calidad del suelo (Riffaldi et al., 1986; Wu et al., 2000; Tang et al., 2003).

Se han propuesto un amplio número de pruebas físicas, químicas y biológicas para evaluar la estabilidad y madurez del compost (Bernal et al., 1998; Barrena et al., 2006; Bernal et al., 2009); sin embargo, aún no hay una prueba universalmente aceptada (Komilis et al., 2011). Entre las pruebas usadas se encuentran las comúnmente empleadas para el monitoreo en sitio y otras determinadas en laboratorio, que se caracterizan por ser de mayor complejidad y que demandan altos costos y aspectos logísticos (Khalil et al., 2008).

En países en desarrollo, el compostaje de biorresiduos no ha sido efectivo, siendo una de las causas la generación de productos que no cumplen con los estándares de calidad (Hoornweg et al., 1999; OPS, 2005; Barreira et al., 2006; Kurian, 2007). En las instalaciones de compostaje de municipios menores, definidas en este artículo como las ubicadas en poblaciones menores a 15.000 habitantes, se caracterizan por limitados recursos y porque su control y operación es realizada por operarios capacitados para hacer actividades de baja complejidad (Turan et al., 2009; Shekdar, 2009; Marmolejo, 2011).

En estas instalaciones generalmente son aplicadas únicamente pruebas en sitio para el control del producto (olor, color, temperatura, humedad, pH y CE) que pueden ser inconsistentes con pruebas de estabilidad y madurez desarrolladas a nivel de laboratorio; el criterio empleado para determinar la finalización del proceso es la obtención de un material seco, de color oscuro, con un tamaño de partícula pequeña y un olor similar al del suelo; no obstante los análisis fisicoquímicos de calidad a nivel de laboratorio han indicado que el producto no presenta condiciones de estabilidad o madurez (Marmolejo, 2011).

Una de las causas de la aplicación únicamente de dichas pruebas en sitio, además del desconocimiento de los procesos de transformación y las deficientes condiciones de operación y control en las instalaciones de compostaje, es la falta de investigación a escala real o piloto, de manera que se aumenten las adaptaciones y capacidad tecnológica a las condiciones de funcionamiento de las instalaciones (Hoornweg, 1999; Kurian, 2007; Shekdar, 2009).

Teniendo en cuenta las condiciones de funcionamiento de las instalaciones de compostaje de municipios menores, el mejoramiento del producto y el cumplimiento de los estándares de calidad de la norma colombiana con las estrategias evaluadas en esta investigación y la necesidad de suministrar información que mejore con recursos locales, los esquemas de control y monitoreo del proceso y de la calidad del producto, en este capítulo se contrastan los resultados de la aplicación de pruebas de laboratorio de estabilidad (SV, relación C/N, índice de respirometría – IR y autocalentamiento) y madurez (IG) con las pruebas comúnmente empleadas en sitio (temperatura, color, olor y humedad, pH y CE).

5.2 Elementos Conceptuales

5.2.1 Estabilidad y madurez durante el proceso de compostaje

El proceso de compostaje se desarrolla en dos fases, la biooxidativa y la maduración (Chiumenti et al., 2005); durante la fase de maduración se presenta la estabilización y humificación de la materia orgánica, generándose un producto maduro, que puede actuar como un fertilizante de lenta liberación en la agricultura (Bernal et al., 2009). En esta fase, la materia orgánica original ha sido mineralizada y la residual desarrolla procesos de humificación que pueden ocurrir de forma natural en el suelo (Campitelli et al., 2006).

La estabilidad se refiere a una etapa específica de la descomposición de la materia orgánica durante el compostaje, que está relacionada con el tipo de compuestos orgánicos remanentes y con la actividad biológica en el material (Bernal et al., 2009). En otras palabras, se refiere al grado de descomposición de la materia orgánica expresado como una función de la actividad microbial y evaluado por mediciones respirométricas o transformaciones químicas de la materia orgánica del producto (Wu et al., 2000; Barrena et al., 2006b; Said-Pullicino et al., 2007).

La madurez se refiere al grado de descomposición de sustancias orgánicas fitotóxicas producidas durante la etapa activa del compostaje (Wu et al., 2000). La emisión de NH_3 y la presencia de otras sustancias fitotóxicas como compuestos fenólicos, óxidos de etileno y ácidos orgánicos de bajo peso molecular son características de un producto inmaduro (Grigatti et al., 2011). Un compost maduro se caracteriza por contener concentraciones insignificantes o aceptables de compuestos fitotóxicos, aunque algunos elementos tóxicos provienen de la calidad de la materia prima (sales solubles, metales pesados y herbicidas persistentes) (Brewer y Sullivan, 2003).

La madurez del compost depende, por lo tanto, de las características iniciales de los residuos (relación C/N, pH, contenido de materia orgánica, humedad y porosidad) y de las condiciones de proceso (tiempo y proceso) (Khalil et al., 2008). El efecto en la toxicidad generalmente disminuye a medida que aumenta el tiempo del compostaje, posiblemente a causa de las menores concentraciones de ácidos orgánicos (Wolkowski, 2003), aunque es posible que al final del proceso, se presenten compuestos fitotóxicos debido a las características de la materia prima.

5.2.2 Importancia de evaluar la estabilidad y madurez en el proceso

El uso del compost en la agricultura requiere del conocimiento de su nivel de madurez y estabilización; la aplicación de materia orgánica inestable al suelo promueve la competición de O_2 entre la biomasa microbial y las raíces de la planta, privando de O_2 a la planta y conduciendo a la producción de H_2S y NO_2 . Adicionalmente, limita el N a las plantas, dado el requerimiento de este nutriente por los microorganismos para degradar la materia orgánica en el

suelo (Grigatti et al., 2011). El uso del producto inmaduro puede involucrar: i) mayor evolución de la transformación de la materia orgánica en el suelo, que genera la formación de moléculas fitotóxicas, ii) inmovilización de nitratos, iii) consumo de O₂ en la atmosfera del suelo y iv) posible producción de NH₃ (Khalil et al., 2008). Estas situaciones generan la inhibición de la germinación de las semillas o la reducción en el crecimiento vía la toxicidad (Sullivan y Miller, 2001).

5.2.3 Medición de la estabilidad y madurez

Diversas pruebas han sido propuestas para determinar la estabilidad y madurez del producto, las cuales expresan esas características como función del tiempo de compostaje (Said-Pullicino et al., 2007). Bernal et al. (2009) y Wu et al. (2000), mencionan que los niveles de estabilidad y madurez de la materia orgánica no pueden ser establecidos por una sola prueba y recomiendan la aplicación de varias simultáneamente. La [Tabla 39](#) presenta las pruebas establecidas para determinar la estabilidad y madurez del producto del compostaje. La descripción de algunas pruebas se presenta en la Sección 1.1.6 y la descripción detallada se observa en Lasaridi y Stentiford (1998), Wu et al. (2000), ADAS Consulting Limited (2005), Barrera et al. (2006b), Bernal et al. (2009) y Komilis et al. (2011).

Tabla 39. Criterios y pruebas para determina la estabilidad y madurez del compost

Criterios	Pruebas
Físicos	Olor, color, temperatura, tamaño de la partícula y materiales inertes.
Químicos	C/N (en medio sólido y en agua), CO (en medio sólido y en agua), CIC, CIC/COT, pH, CE, COT, NH ₄ -N/N _{TOTAL} , metales pesados, composición orgánica (lignina, carbohidratos, lípidos, azúcares), índices de humificación.
Biológicos	Actividad microbial (producción de CO ₂ , consumo de O ₂ , autocalentamiento), actividad enzimática (fosfatasa, deshidrogenasa, Proteasa), contenido de ATP, biomasa microbial, pruebas de germinación y crecimiento de plantas y pruebas de ecotoxicidad

La selección de pruebas en una instalación de compostaje incluyen aspectos como la confiabilidad en los resultados, facilidad de medición, costos de la prueba y rapidez en los resultados (ADAS Consulting Limited, 2005). Adicionalmente, se espera que las pruebas cumplan con: i) una tendencia consistente durante el proceso; ii) proporcionen valores de referencia, críticos o umbrales; iii) procedimientos relativamente rápidos y económicos; iv) fácil interpretación (Gómez-Brandón et al., 2008).

Respecto de la estabilización del compost, las pruebas pueden ser divididas en dos categorías: i) las medidas en sitio que son fáciles de realizar y ii) las de laboratorio, que suministran mayor información sobre la evolución de la materia orgánica, pero son más complejos de llevar a cabo. La primera categoría incluye una lista limitada de pruebas: temperatura, color, olor, potencial redox, conductividad, pH, humedad y concentración de O₂. La lista de pruebas de laboratorio incluye, entre otros: reducción de SV, relación C/N, relación NH₄⁺/NO₃⁻, relación ácidos húmicos y ácidos fúlvicos y contenido de materia orgánica total. Las determinaciones analíticas a menudo son difíciles y complejas de realizar en las instalaciones de compostaje (Khalil et al., 2008).

La madurez es determinada a través de pruebas como CIC, relación C/N y concentración de N inorgánico; específicamente la fitotoxicidad es medida a través del crecimiento de raíces en un extracto acuoso del material o en un medio de cultivo (Sullivan y Miller, 2001). Bernal et al. (2009) mencionan que aunque las características físicas como color, olor y temperatura dan una idea general de la etapa de descomposición alcanzada, suministran poca información relacionada con el grado de madurez; por lo tanto, sugieren parámetros adicionales que incluyen la

medición de la C/N en la fase acuosa, CO soluble en agua, relación COT/CO soluble en agua, ácidos orgánicos volátiles, nitrificación, ácidos fenólicos y ácidos grasos volátiles.

5.2.4 Índices respirométricos (IR) y de germinación (IG)

De acuerdo con ADAS Consulting Limited (2005) las pruebas más ampliamente empleadas para medir la estabilidad y la madurez son respectivamente los IR y los IG. Respecto de los IR entre las ventajas se tienen: determinan directamente la actividad biológica, relativa simplicidad de los equipos empleados, bajos costos de medición. Entre las ventajas de los IG se tienen: refleja el intento de uso y los resultados son sencillos de interpretar.

El principio de los IR es la evaluación de la actividad biológica; en condiciones aerobias, un átomo de C derivado del catabolismo es atacado por dos átomos de O₂ para formar CO₂, liberando energía (en forma de calor) en el proceso. Por lo tanto, la respiración puede ser medida de distintas maneras: evolución del CO₂, consumo de O₂ y autocalentamiento, que son indicativos de la cantidad de materia orgánica degradable todavía presente (ADAS Consulting Limited. 2005; Barrena et al., 2006b; Bernal et al., 2009; Komilis et al., 2011).

El autocalentamiento determina los incrementos de la temperatura debido a la actividad bioquímica exotérmica, por lo que no es estrictamente una medida de la respiración. De otro lado, un compost insuficiente estable tiene una alta demanda de O₂ y alta tasa de producción de CO₂, debido al intenso desarrollo de los microorganismos como consecuencia de la abundancia de compuestos fácilmente biodegradables en el material (Bernal et al., 2009).

Respecto de las pruebas de germinación y longitud de las raíces, se evalúa el efecto que las sustancias fitotóxicas (ácidos fenólicos y ácidos grasos volátiles) pueden tener en el desarrollo de la semilla y de la planta (Bernal et al., 1998). El IG es calculado como un porcentaje de un control, usando varios tipos de semillas (Komilis et al., 2011).

5.3 Materiales y Métodos

5.3.1 Condiciones iniciales y montaje experimental

El estudio se desarrolló a escala real, en una instalación de compostaje de biorresiduos que opera con separación en la fuente y recolección selectiva de los biorresiduos. Se tienen dos días de recolección a la semana, obteniéndose cada día, entre 1,3 a 1,5 t de biorresiduos (Ver más detalles de la Localidad en la Sección 4.3.1).

Actividades de monitoreo de la calidad de los biorresiduos desarrolladas durante un año, muestran que presentan un pH de $5,5 \pm 0,5$ unidades, humedad de $76,7 \pm 3,2\%$, COT de $33,0 \pm 4,8\%$, N_{TOTAL} de $1,6\% \pm 0,5\%$, relación C/N de $21,7 \pm 5,3$ y contenido de cenizas de $25,1 \pm 5,6\%$ (en base seca) (Ver Sección 3.4.2).

El estudio incluyó el monitoreo y seguimiento a dos pilas de compostaje, constituidas a partir de los biorresiduos generados en la localidad en un periodo de cuatro días (pila A1) y tres días (pila A2). Las pilas fueron montadas aproximadamente 24 horas después del ingreso de los biorresiduos a la planta de compostaje y previo a la conformación de las pilas fueron separados materiales no biodegradables. Durante la conformación de las pilas, el material se homogenizó manualmente y los elementos con tamaños superiores a 10 cm fueron triturados.

Las pilas tuvieron un peso de 1400 kg y se conformaron de forma cónica, con altura aproximada de 1,1 m y en un espacio con techo impermeable y conservando una distancia mínima de tres metros entre ellas. La técnica empleada fue el compostaje con volteo manual.

Con el propósito de hacer seguimiento de las distintas fases del proceso de compostaje, se midió diariamente la temperatura en el centroide de cada pila, utilizando un termómetro de carátula de 70 cm. La humedad se mantuvo por encima del 40% hasta el inicio de la fase de maduración, mediante humectación con agua (Agnew y Leonard, 2003) y se determinó en sitio empleando un analizador de humedad Ohaus MB-35. El volteo de las pilas se realizó para evitar la compactación del material y cuando se registraban temperaturas mayores o iguales a 65°C. El proceso de compostaje se desarrolló hasta que la temperatura de las pilas fue cercana a la temperatura ambiente (en un rango de $\pm 5^\circ\text{C}$).

5.3.2 Monitoreo y procesamiento de los índices de estabilidad y madurez

En el estudio se monitorearon once pruebas para determinar la estabilidad y madurez, seleccionadas por su mayor potencial de aplicación en la localidad de estudio. Con el propósito de hacer seguimiento a la evolución de los resultados de las pruebas, las mediciones se realizaron desde el inicio de la etapa de enfriamiento del proceso hasta la finalización del monitoreo de las pilas, con una diferencia de dos semanas entre cada medición. La Tabla 40 presenta las pruebas de estabilidad y madurez a nivel de laboratorio y las de sitio, así como los días de medición.

Tabla 40. Pruebas de estabilidad y madurez a nivel de laboratorio y en sitio

Sitio	Estabilidad	Madurez	Días de medición en el proceso
En sitio*	Temperatura, color, olor y humedad	pH y CE	70, 86, 100, 113, 128, 141, 155, 162 y 190
En Laboratorio	SV, relación C/N, IR y autocalentamiento	IG	

Nota: * De acuerdo con lo identificado en las instalaciones de compostaje, se emplean estas pruebas para inferir estabilidad y madurez en sitio. Debido a limitaciones experimentales las pruebas de autocalentamiento e IG no fueron medidas el día 70; IR no fue medida el día 70, 113 y 155; C/N no fue medida los días 70, 86, 100, 113 y 128

En cada medición se siguieron los protocolos de toma de muestras para pilas de compostaje propuestos por Sullivan y Miller (2001). La humedad fue determinada mediante método gravimétrico, el COT por el método de Walkley Black, el pH y la CE por método potenciométrico sobre un extracto acuoso obtenido mediante agitación del agua destilada y del material a analizar en una relación 5:1 (peso/peso), utilizando un pHmetro WTW Modelo 315i y un conductivímetro WTW modelo 325. Los SV se determinaron a través de técnicas de calcinación determinando los pesos de la muestra tanto a 105°C por 24 horas como a 550°C por 4 horas. Todos estos parámetros se determinaron siguiendo los protocolos establecidos en la Norma Técnica Colombiana (NTC) 5167 (Icontec, 2003). El N_{Total} se analizó con el método Kjeldahl de acuerdo con la NTC 370 (Icontec, 1997). Los ensayos de germinación se efectuaron determinando la sensibilidad del rabanito (*Raphanus Sativus*) a los productos, siguiendo lo establecido en INN (2004) y Varnero et al. (2007).

El potencial de autocalentamiento se desarrolló siguiendo lo establecido por Brinton et al. (1995), mediante el acondicionamiento de la humedad de la muestra a 35% y el depósito en un recipiente térmicamente aislante (Vaso Dewar). El registro de la temperatura se hizo con dos termómetros de carátula (bimetálico 2" dial x 1.5" bulbo) durante 8 días (muestra incubada en un lugar cubierto y a temperatura ambiente de $25 \pm 2^\circ\text{C}$) y registrando el valor de la temperatura cada 8 horas.

El IR se realizó a través de la determinación de CO₂ de las muestras; para tal efecto se adaptó la técnica de actividad microbiana en suelos conforme el método descrito por Álvarez-Solís y Anzueto-Martínez (2004) y Tognetti (2007). La muestra (50 g) se incubó durante seis días a temperatura ambiente en un sistema cerrado y adicionando una muestra de 10 mL de hidróxido de sodio (NaOH) 1N (capta el CO₂). Transcurrido el tiempo de incubación, se adicionaron 2 mL de cloruro de bario (BaCl₂) al 10%, cuya reacción precipita el CO₂ producto de la respiración, en forma de carbonato de bario (BaCO₃). Luego se agregaron dos gotas de fenolftaleína al 1% (solución indicadora) y posteriormente se titularon todas las muestras con ácido clorhídrico (HCl) 0,5N determinando los volúmenes consumidos hasta el cambio de color de la solución. La determinación se desarrolló también con una muestra testigo (blanco). La Ecuación 5.1 presenta los cálculos para la estimación del IR (medido como actividad microbológica – AMS) en términos de mgCO₂-C / g CO * día.

$$AMS = \frac{(B - T) * NHCl * 0,006 * 1000}{P * \left(\frac{\%CO}{100}\right) * d} \quad (\text{Ecuación 5.1})$$

Donde:

B= volumen empleado en la Titulación del Blanco (mL)

T= volumen empleado en la Titulación Muestra (mL)

N HCL = normalidad HCL (0,5 N)

0,006= Factor de Dilución

1000 = Factor conversión µgCO₂a mg CO₂

P= peso seco de la muestra

% CO= Porcentaje de Carbono Orgánico de la muestra (%)

d = días de incubación (6 día)

Para la determinación de olor se almacenó la muestra en recipientes herméticos durante cinco días; transcurrido el tiempo, se abrió el recipiente y se comparó con el olor producido por la muestra con otro que contenía suelo, contrastando los olores típicos predominantes. Se consideró lo planteado por Iglesia–Jiménez et al. (2008) quienes indican que un producto con alto grado de madurez carece de olores generados por el contenido de ácidos orgánicos, presentando un olor característico similar al del suelo húmedo. Respecto del color, se comparó visualmente la muestra con compost certificados como estables y maduros, identificando las tonalidades: café claro, café oscuro y casi negro indicando respectivamente inestable, relativamente estable y estable.

Las mediciones de SV, CE, pH, COT, N_{TOTAL} e IG fueron realizadas por duplicado y ante la ocurrencia de coeficientes de variación mayores de 10% se repetía el ensayo. Los valores obtenidos en cada medición de los parámetros fueron comparados con los estándares establecidos en la literatura técnica para determinar su grado de estabilidad y madurez. Se compararon los resultados de estabilidad y madurez de todas las pruebas, estableciendo la consistencia entre los resultados.

Con el propósito de identificar si se presentaban diferencias significativas en los resultados de las pruebas de estabilidad y madurez entre las pilas, se aplicaron modelos de regresión para las pruebas cuantitativas determinadas ocho o nueve veces (temperatura, humedad, SV, autocalentamiento, pH, CE e IG). El modelo de regresión estimado se presenta en la Ecuación 5.2. Los análisis se realizaron con un nivel de significancia del 5% y se validaron satisfactoriamente los supuestos de cada modelo planteado.

$$Y_t = \beta_0 + \beta_1 \cdot t + \beta_2 \cdot Pila_t + \varepsilon_t$$

(Ecuación 5.2)

donde,

Y_t : Parámetro bajo análisis

t : Tiempo en el cual se midió el parámetro

$Pila_t$: Variable dicotómica que toma el valor de 0 si la medición del parámetro se realiza en la pila A y 1 si la medición se realiza en la pila B

ε_t : Error aleatorio

β_0 : Valor de intercepto del modelo, es decir, valor que asume Y en la eventualidad que las variables t y Pila sean cero

β_1 : Pendiente asociada al tiempo, es decir, cambio en Y por cada unidad de t

β_2 : Pendiente asociada a la pila, es decir, cambio en Y debido a que la medición se realizó en la pila B

5.4 Resultados y Discusión

5.4.1 Comportamiento del proceso

La Figura 18 presenta el comportamiento de la temperatura ambiente y de las pilas A1 y A2 durante el proceso de compostaje y se resaltan los periodos en los que fueron realizados los volteos de las pilas. Las líneas puntuadas verticales representan los tiempos en que se tomaron las muestras para realizar las pruebas de estabilidad y madurez.

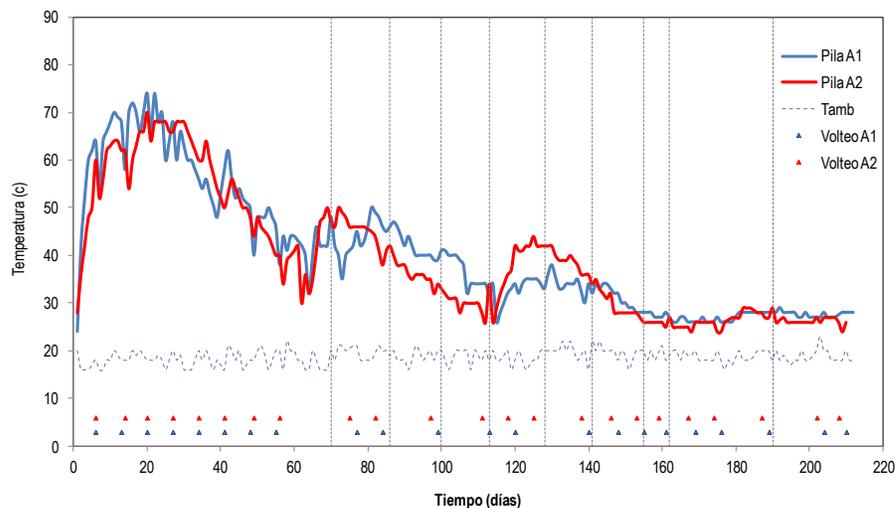


Figura 18. Comportamiento de la temperatura en el proceso de compostaje

En general, la temperatura tuvo un comportamiento típico del proceso de compostaje de acuerdo con lo propuesto por Chiumenti et al. (2005), en el que se observa la ocurrencia de la fase biooxidativa – mesofílica, termofílica y enfriamiento – y el avance de la fase de maduración. El rápido incremento en la temperatura está asociado a la presencia de compuestos de fácil biodegradación y coincide con experimentos previos de compostaje realizados con los biorresiduos de la localidad (Ver Sección 4.4.2).

La elevada duración de la etapa termofílica (por encima de 5 a 6 semanas) podría asociarse a una anomalía extendida de la descomposición y una transición retardada hacia la maduración que es atribuible a una reducción en la actividad biológica por el mantenimiento prolongado de altas temperaturas ($> 55\text{ }^{\circ}\text{C}$), tal como lo proponen Tognetti et al. (2007). Con relación a los incrementos de temperatura posteriores a la etapa termofílica, éstos pueden estar relacionados con la reactivación de la actividad biológica por las operaciones de volteo y humectación de las pilas, lo cual indica que aún había material que no estaba estabilizado dentro de la pila.

5.4.2 Evaluación de los índices de estabilidad y madurez en el proceso

La Tabla 41 presenta los resultados de las pruebas de estabilidad y madurez en ambas pilas. Los modelos de regresión muestran que no se presentaron diferencias significativas ($p>0,05$) entre las pilas para temperatura ($p=0,70$), humedad ($p=0,41$), autocalentamiento ($p=0,27$), pH ($p=0,70$) e IG ($p=0,83$), mientras que sí se presentaron ($p<0,05$) en términos de SV ($p=0,03$) y CE ($p=0,0$).

Tabla 41. Resultados de la evaluación de las pruebas de estabilidad y madurez

Pila	Tiempo (días)	Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)	Humedad (%)	SV (%)	Parámetros de Estabilidad				Parámetros de madurez			
					IR (mg $\text{CO}_2/\text{g CO/día}$)	Auto - calentamiento ($\Delta T - ^{\circ}\text{C}$)	Color	Olor	C/N ¹	pH (unid.)	IG (%)	CE (dS/m)
A1	70	40	51,0	35	-	-	Negro	Putrefacto	-	9,2	-	4,1
	86	46	48,0	44	1,8	1	Negro	Húmedo	-	9,5	39,7	5,4
	100	40	46,0	37	2,8	5	Café oscuro	Térreo	-	9,4	34,7	4,6
	113	26	36,0	39	-	5	Café oscuro	Térreo	-	9,6	64,0	5,7
	128	38	44,0	38	2,2	3	Negro	Térreo	-	9,4	33,0	5,2
	141	33	35,0	34	1,9	2	Negro	Térreo	10,0	9,4	71,8	5,8
	155	28	34,0	34	-	5	Negro	Térreo	13,2	9,5	56,8	5,8
	162	26	32,0	33	2,3	3	Negro	Térreo	10,6	9,5	40,9	5,7
	190	29	32,2	34	1,3	1	Negro	Térreo	9,2	9,7	66,4	5,2
A2	70	47	48,0	55	-	-	Negro	Putrefacto	-	9,3	-	3,7
	86	42	42,0	51	2,2	0	Café oscuro	Térreo	-	9,8	27,3	3,8
	100	33	36,0	44	2,3	3	Café oscuro	Térreo	-	9,3	43,6	4,5
	113	34	30,0	42	1,4	2	Café oscuro	Húmedo	-	9,5	34,7	3,8
	128	42	46,0	47	2,2	3	Negro	Térreo	-	9,1	26,5	2,8
	141	34	37,0	36	2,1	1	Negro	Térreo	8,2	9,6	93,3	3,8
	155	26	34,0	30	-	3	Negro	Térreo	8,7	9,3	57,4	4,4
	162	27	31,0	36	0,9	3	Negro	Térreo	8,3	9,4	59,4	4,1
	190	29	36,5	33	1,4	3	Negro	Térreo	7,7	9,6	49,7	3,6

Nota: ¹la relación C/N sirve simultáneamente para evaluar la estabilidad y la madurez

Se observa que durante las primeras seis mediciones (hasta el día 141), la temperatura se encontró en el rango típico de la etapa de enfriamiento, mientras que las últimas tres correspondieron a material que se encontraba en proceso de maduración. Según Dulac (2001) y Raj y Antil (2011), el criterio para considerar finalizado el proceso de compostaje, es que la temperatura de la pila esté en un rango de $\pm 5^{\circ}\text{C}$ la temperatura ambiente; en este caso, aunque se observó un progresivo descenso de la temperatura, el valor final fue superior al rango indicado por estos autores. No obstante, según Tognetti et al., (2007) algunos residuos pueden actuar como auto-aislantes, preservando el calor liberado durante el proceso, situación que pudo presentarse en este estudio.

La humedad descendió durante el período de análisis debido a que el incremento de la temperatura durante el proceso de compostaje implica la evaporación del agua. En general, al final del proceso se mantuvo una humedad en el rango recomendado por Icontec (2003) y Saha et al. (2010) (inferior a 35%); sin embargo, valores inferiores pueden limitar la actividad biológica generando pobre estabilización de la materia orgánica. El incremento de la humedad hacia el día 128, coincidió con la humectación de las pilas, la ocurrencia de un pico de temperatura y un aumento en la producción de CO₂ y en el ΔT, lo que evidencia la reactivación biológica asociada a los volteos y la humectación del material y que puede indicar la presencia de material aún inestable.

Respecto de los SV, al inicio del proceso de compostaje los sustratos tenían un contenido de 74,9% y en la primera medición (día 70 del proceso), los niveles eran 35 y 55% para las pilas A1 y A2 respectivamente, ratificando la significativa transformación de la materia orgánica durante las primeras etapas del proceso. Según Raj y Antil, (2011) el material se considera estable a partir de una reducción de los SV de un 42%, situación que en este estudio se alcanzó antes del día 70 en la pila A1 (reducción del 53,3%) y alrededor del día 113 en la pila A2 (reducción del 44,0%). La diferencia entre ambos tipos de pilas puede asociarse a diferencias en el avance del proceso de transformación de la materia orgánica.

El avance en la degradación de la materia orgánica implica una reducción en la respiración de los microorganismos y por ende, una reducción en la generación de CO₂ (Said-Pullicino et al., 2007; Defrieri et al., 2005). Contrastando los resultados obtenidos en este estudio con los rangos de clasificación de estabilidad (2 mg (CO₂-C)/g MO/día: muy estables, entre 2 y 4 mg (CO₂-C)/g MO/día: estables y mayores a 4 mg (CO₂-C)/g MO/día: inestables) reportados por Bernal et al. (2009), se presentaron condiciones entre estables y muy estables, obteniéndose las menores producciones de CO₂ en la última medición efectuada.

La prueba de autocalentamiento desde el inicio de las mediciones, presentó valores de ΔT iguales o inferiores a 5 °C. Según Brinton et al. (1995), ΔT entre 0 y 10 °C, clasifican al compost como *grado de estabilidad V*, describiéndolo como un producto *muy estable* y que se determina como compost finalizado. Las fluctuaciones en ΔT en ambas pilas, pueden estar relacionadas con momentos de reactivación de la actividad biológica y condiciones de la operación del proceso (volteo y humectación).

El color del material, tal como lo señala Mohedo (2004), oscurece a medida que el compost va madurando hasta llegar a un color café oscuro o *casí* negro que sucede por la formación de grupos cromóforos y por la síntesis de melanoidinas. La inspección visual comparándola con compost maduros y estables, permitió identificar diferentes tonalidades y concluir la apariencia de producto estable y maduro a partir del día 128 del proceso.

Durante el proceso de compostaje, el olor se debe mayoritariamente a la presencia de ácidos orgánicos de bajo peso molecular cuya concentración disminuye a valores inapreciables al final del proceso. El olor característico similar a suelo húmedo, se presentó de manera continua a partir del día 100 en la pila A1 y 128 en la pila A2.

La relación C/N ha sido ampliamente reportada como un indicador de estabilidad en el proceso de compostaje (Tognetti et al. 2007; Said-Pullicino et al., 2007), reportándose diferentes valores para determinar la madurez y estabilidad del compost, tales como: < 17 (Moldes et al., 2007); < 12 (Bernal et al., 1998); entre 15 y 16 (Barral et al., 2007); entre 15 a 20 (Rosen et al., 1993). Otros autores indican que no se puede establecer un valor único y que este depende de las características de los materiales tratados (Defrieri et al., 2005). Los resultados obtenidos a partir del día 141 del proceso, permiten concluir que en esta etapa los materiales cumplen mayoritariamente los

criterios de estabilidad y madurez, observándose valores mayores en la pila A1. A pesar de considerarse un material maduro, la inconsistencia del resultado con las otras tres pruebas de madurez, coincide con lo planteado por Brewer y Sullivan (2003) que concluyen que la relación C/N no es un buen indicador de la madurez del compost, pero es apropiado para ilustrar el desarrollo del proceso de compostaje.

El pH estuvo en el rango alcalino durante el monitoreo, con valores entre 9,2 y 9,7 unidades en la pila A1 y 9,1 y 9,8 en la A2. El incremento del pH a rangos alcalinos es atribuible al consumo de protones durante la descomposición de ácidos grasos volátiles, la liberación de CO₂ y la mineralización del N_{orgánico} (Beck-Friis et al., 2001; Smars et al., 2002; Chiumenti et al., 2005). Tognetti et al. (2007) atribuyen el alto pH al final del proceso de compostaje de biorresiduos no triturados, a la más larga e intensiva fase termofílica, que puede favorecer la amonificación del N_{orgánico}. De acuerdo con este parámetro, el producto puede ser catalogado como inmaduro, pues están fuera del rango de 7 a 8 unidades y de ser aplicado en actividades agrícolas, podría limitar el desarrollo de las plantas y diversos cultivos, de acuerdo con las recomendaciones de USDA (1999).

El contenido de sales solubles en el producto puede ser estimado a través de la CE de una muestra saturada. Los elementos que más contribuyen con la salinidad son el Na, K, Cl⁻, NH₃, NO₃ y SO₄⁻. Bajos valores (CE < 3,5 dS/m) revelan poca cantidad de sales disponibles. La Norma Chilena -NCh 2880, establece que en un compost de alta calidad sin restricciones en su uso, la CE debe ser inferior a 3 dS/m (INN 2004). Los valores de ambas pilas son superiores a los propuestos por Moldes et al. (2007) e INN (2004), siendo al final del proceso de 5,2 dS/m en la pila A1 y 3,6 dS/m en la A2. Said-Pullicino et al. (2007) también encontraron, en el compostaje de biorresiduos, poda y follaje, altos valores (5,0 a 7,8 dS/m) durante el proceso aunque no fueron fitotóxicos en las pruebas de germinación. A pesar de esperarse una tendencia al decrecimiento a medida que avanza el tiempo del proceso (Khalil et al., 2008), los resultados de este estudio muestran que la CE fue variable.

Al inicio del proceso de compostaje se encuentran bajos valores de IG debido a la descomposición de compuestos orgánicos fitotóxicos; estos compuestos, que están presentes en los residuos crudos como productos intermedios del metabolismo microbiano, son degradados durante el proceso, facilitando la obtención de un producto maduro que no afecta el crecimiento de las plantas (Zucconi et al., 1981; Bernal et al., 1998). Bernal et al. (2009) señalan que a IG < 80 el material es inmaduro, entre 80 y 90 es maduro y > 90 es altamente maduro. En este estudio, a pesar de presentarse oscilaciones en el IG en ambas pilas, se observa una tendencia a su incremento. Teniendo en cuenta la propuesta de Bernal et al. (2009) se presenta inmadurez del material desde el inicio de las mediciones hasta el final del monitoreo del proceso.

5.4.3 Comparación entre indicadores de estabilidad y madurez del producto

La [Tabla 42](#) presenta la comparación de los resultados de la aplicación de los índices de estabilidad y madurez en el proceso de compostaje de biorresiduos. Como se observa, a partir del día 162 en la pila A1 y del día 155 en la pila A2, las pruebas empleadas coinciden con la condición de estabilidad. La aplicación de las tres pruebas de madurez presentó valores que atribuyen inmadurez durante el estudio.

Tabla 42. Comparación de los resultados de la aplicación de los índices de estabilidad y madurez

Pila	Tiempo (días)	Parámetros de Estabilidad								Parámetros de madurez		
		Temperatura	Humedad	SV	IR	Auto - calentamiento	Color	Olor	C/N	pH	IG	CE
A1	70	IE	IE	E	-	-	IE	IE	-	IM	-	IM
	86	IE	IE	E	E	E	IE	E	-	IM	IM	IM
	100	IE	IE	E	E	E	IE	E	-	IM	IM	IM
	113	IE	IE	E	-	E	IE	E	-	IM	IM	IM
	128	IE	IE	E	E	E	E	E	-	IM	IM	IM
	141	IE	E	E	E	E	E	E	E/M	IM	IM	IM
	155	E	E	E	-	E	E	E	IE/IM	IM	IM	IM
	162	E	E	E	E	E	E	E	E/M	IM	IM	IM
	190	E	E	E	E	E	E	E	E/M	IM	IM	IM
A2	70	IE	IE	IE	-	-	IE	IE	-	IM	-	IM
	86	IE	IE	IE	E	E	IE	E	-	IM	IM	IM
	100	IE	IE	E	E	E	IE	E	-	IM	IM	IM
	113	IE	E	E	E	E	IE	E	-	IM	IM	IM
	128	IE	E	E	E	E	E	E	-	IM	IM	M
	141	IE	E	E	E	E	E	E	E/M	IM	IM	IM
	155	E	E	E	-	E	E	E	E/M	IM	IM	IM
	162	E	E	E	E	E	E	E	E/M	IM	IM	IM
	190	E	E	E	E	E	E	E	E/M	IM	IM	IM

Nota: E: Estable; IE: Inestable; M: Maduro; IM: Inmaduro. El color azul representa las condiciones de estabilidad y madurez

Al comparar los resultados de las pruebas de estabilidad y madurez en las pilas, se observa que fueron coherentes, a pesar de conformarse con sustratos diferentes. De otro lado, se tienen coincidencias en los resultados de estabilidad entre dos grupos de pruebas, el primero conformado por autocalentamiento, IR, SV y olor y el segundo conformado por las pruebas desarrolladas en sitio (temperatura, humedad y color). Esto ratifica el planteamiento inicial de este artículo, sobre las inconsistencias en los resultados de pruebas en sitio respecto a pruebas de laboratorio.

A pesar que al final del monitoreo las pruebas de laboratorio y en sitio indicaron estabilidad, esta condición fue reportada más rápidamente (día 86) en pruebas de laboratorio como IR y autocalentamiento. Esto muestra que las decisiones basadas en una sola prueba pueden ser erróneas y es necesario hacerlo empleando mayores elementos de decisión (Tontti et al., 2011)

Respecto de la temperatura, a pesar que esta prueba muestra la evolución del proceso, no presentó coincidencia con otras pruebas (IR, SV, autocalentamiento y C/N) que concluían la estabilidad del material. Por lo tanto, puede ser fundamental para emplearse en el monitoreo del proceso pero se sugiere combinarla con otras pruebas para la determinación de la estabilidad del material. Una situación similar se presenta con otra prueba en sitio como el color, cuya determinación, a pesar de ser simple, puede ser subjetiva e imprecisa. Para este tipo de pruebas también se recomienda contrastar con otras pruebas fisicoquímicas y/o biológicas, tal como lo señalan Raj y Antil (2011).

Los resultados de las pruebas de madurez, a excepción de la C/N, son consistentes entre ellas; aunque las pilas alcanzaron la estabilidad al final del monitoreo, el material era fitotóxico (bajos IG) y tenía altos contenidos de sales (CE) y de valores de pH hasta el final del monitoreo. Esto también ratifica la pertinencia de evaluar simultáneamente estabilidad y madurez.

5.5 Conclusiones y Recomendaciones

Los resultados de la aplicación de las pruebas de estabilidad en el compostaje de biorresiduos, permitió identificar que las pruebas tradicionalmente empleadas para el monitoreo del proceso en sitio como la temperatura y humedad, no son consistentes con las pruebas de laboratorio para determinar la estabilidad del producto. En el caso de la madurez, las pruebas en sitio (pH y CE) confirmaron los hallazgos realizados mediante la prueba de laboratorio. Se recomienda la aplicación de las pruebas empleadas para el monitoreo del proceso en conjunto con pruebas de estabilidad de laboratorio, que faciliten la toma de decisiones operativas y de proceso. Para tal efecto, se pueden adaptar técnicas como pruebas de autocalentamiento e índice respirométrico para efectuarlas en sitio, bajo condiciones locales.

6 CONSIDERACIONES FINALES

6.1 Conclusiones Generales

El funcionamiento del compostaje de biorresiduos en municipios menores de países en desarrollo y particularmente en los de Colombia, muestra que su implementación no ha conducido a soluciones efectivas. Este trabajo identificó las causas de sus limitantes, profundizó en el estudio de las condiciones de las materias primas del proceso y evaluó estrategias para mejorar el desempeño de los sistemas, alcanzando mejoras sustanciales en el comportamiento de la degradación de la materia orgánica y en parámetros fisicoquímicos de la calidad del producto; de igual manera, aportó herramientas que facilitan la toma de decisiones para la implementación del proceso, con visión sostenible.

La investigación permitió identificar 27 elementos clave (técnicos y no técnicos) para la sostenibilidad del compostaje de biorresiduos en países en desarrollo, los cuales se integraron en cuatro subsistemas que orientan el funcionamiento de las instalaciones: i) la calidad de los sustratos, ii) el desarrollo tecnológico, iii) la calidad y comercialización del producto y iv) la gestión empresarial de los sistemas. Desde la perspectiva tecnológica se identificó la necesidad de promover el desarrollo tecnológico local que facilite la selección, diseño e implementación de tecnologías y de esquemas de operación, control y monitoreo acorde con las condiciones del contexto local.

Para contribuir con este último propósito, entre los elementos abordados en este trabajo se incluyó el estudio de la variabilidad de la calidad de la materia prima en las instalaciones de compostaje de biorresiduos, elemento que fue identificado como crítico en el análisis de funcionamiento de los sistemas, buscando su tipificación. Al evaluar la variabilidad en un contexto en el que la recolección se lleva a cabo con una frecuencia de dos veces por semana (con periodos de almacenamiento en el punto de generación de tres y cuatro días) no se encontraron diferencias estadísticamente representativas en la calidad del sustrato, lo cual permite inferir que el sustrato recibido en los dos días es el mismo y por ende no era necesario establecer patrones de operación y mantenimiento específicos por cada jornada de recolección.

La tipificación de la materia prima permitió evidenciar condiciones críticas para el procesamiento de los biorresiduos, tales como exceso de humedad, pH en el rango ácido, deficiencias en los contenidos de carbono y de fósforo y una relación C/N inferior a la establecida para el inicio del proceso de compostaje; estas características difieren de las reportadas para biorresiduos en regiones de países desarrollados, alrededor de las cuales giran la mayoría de las publicaciones científicas encontradas y muestran afinidad con lo encontrado en otras regiones de Colombia. De igual manera, al contrastar las características típicas con las requeridas para el compostaje, se encuentra que el biorresiduo presenta limitaciones para un compostaje efectivo, por esta razón fue necesario evaluar opciones de acondicionamiento del sustrato; teniendo en cuenta que la selección de las opciones de acondicionamiento están sujetas al contexto de aplicación, se elaboró una herramienta de selección.

La herramienta propuesta para la selección de materiales de enmienda y de soporte, desarrollada considerando las características predominantes de la materia prima del compostaje de biorresiduos, fue fundamental para la formulación de opciones de mejoramiento del proceso y de la calidad del producto; buscando contribuir a la aplicabilidad de la solución, se seleccionaron materiales disponibles localmente como el pasto estrella, el bagazo de caña, la ceniza de madera y el material en proceso. Concretamente, estos materiales tuvieron el siguiente efecto:

- El pasto estrella y bagazo de caña aceleraron el arranque del proceso, redujeron la duración de la etapa termofílica y propiciaron condiciones adecuadas para la higienización del material, no obstante, compuestos de difícil degradación como hemicelulosas y ligninas en estos materiales, pueden ser la causa de una mayor duración en las fases de enfriamiento y maduración.
- De igual manera, estos materiales contribuyeron a mejorar significativamente la calidad de los productos en relación con el compostaje de solo biorresiduos, obteniéndose niveles de COT, CIC, densidad aparente y CRA que en su uso, pueden mejorar las propiedades del suelo, tales como una mayor retención de nutrientes y agua e incremento en la actividad microbiana.
- La calidad del producto del compostaje de biorresiduos con pasto estrella (en su proporción de 34%), salvo para el criterio de pH, cumplió con los estándares establecidos por la norma técnica colombiana para este tipo de productos.
- El material en proceso contribuyó a mejorar la humedad inicial y el contenido de COT de los sustratos, facilitando la obtención de mayores temperaturas en el rango termofílico respecto al compostaje de biorresiduos; no obstante, se presentaron similares tiempos de duración de las etapas termofílica y de enfriamiento y la obtención de un producto con características fisicoquímicas similares (solo tuvieron diferencias significativas la C/N y las cenizas).
- La adición de ceniza de madera resultó favorable para incrementar el pH inicial, mejorar el contenido nutricional de los sustratos, y para amortiguar los ácidos generados en la primera fase del proceso; sin embargo, no tuvo efecto en acelerar el arranque del proceso y se observó un excesivo incremento del pH con la adición de 4 y 8% de ceniza de madera, que asociado con temperaturas termofílicas pudieron propiciar mayores pérdidas de N_{TOTAL} . Las pruebas de germinación del producto mostraron presencia de fitotóxicos que pueden comprometer el uso del producto.

Otra de las opciones evaluadas que incidió positivamente en el proceso, fue el incremento en la frecuencia de los volteos en el proceso de compostaje. La disminución del tiempo del proceso en un 20% en las fases mesofílica, termofílica y de enfriamiento demuestra que esquemas de control y monitoreo acordes con las condiciones locales, pueden ser efectivos para mejorar el desempeño del proceso de compostaje. La reducción en el contenido de N_{TOTAL} en el producto final y los aspectos positivos en la mejora del proceso, plantean nuevos retos y trabajos como la evaluación conjunta del efecto del incremento de la frecuencia del volteo (en las fases mesofílica y termofílica) y la adición de materiales de soporte en el compostaje de biorresiduos, así como el análisis de costos y análisis de los posibles efectos en la salud de los operarios con las modificaciones en las actividades operativas.

Este trabajo también demostró que esquemas de control y monitoreo del proceso comúnmente empleados en las instalaciones de compostaje, no son suficientes para determinar la estabilidad del material. Dados los complejos procesos en la degradación de la materia orgánica durante el proceso de compostaje, se evidenció la necesidad de utilizar pruebas combinadas, de laboratorio y en sitio, para determinar con mayor precisión la estabilidad del producto. En el caso de la madurez, a pesar de la consistencia en los resultados de las pruebas en sitio y de laboratorio empleadas, se requieren profundizar en su estudio debido a que en el presente trabajo, no fue alcanzada la condición de madurez por ninguna de las pruebas empleadas.

6.2 Contribución a la teoría

Esta tesis empleó herramientas del pensamiento sistémico para el análisis del funcionamiento de las instalaciones de compostaje. Aunque este tipo de herramientas ha sido empleada por diversos autores (Dyson y Chang, 2005; Kum et al., 2005; Chaerul et al., 2008; De y Wu, 2011; Zhao et al., 2011; Yuan et al., 2012; Marmolejo, 2013; Marzouk y Azab, 2014) para estudiar la gestión de residuos sólidos y establecer estrategias para optimizar su funcionamiento, no se encontraron evidencias sobre el empleo de este enfoque para el análisis del compostaje de biorresiduos en municipios menores de países en desarrollo. Por lo tanto, la integración de estas dos áreas de conocimiento, resulta ser una novedad para el estudio y establecimiento de estrategias para mejorar el compostaje de biorresiduos en el contexto de estudio.

De otro lado, los fundamentos del proceso del compostaje han sido ampliamente estudiados por reconocidos investigadores y durante muchas décadas. Estos autores (de Bertoldi et al., 1983; Haug, 1993; Stentiford, 1996; Epstein, 1997; Diaz et al., 2002; Agnew y Leonard, 2003; Chiumenti et al., 2005; Krogmann et al., 2010; Stentiford y de Bertoldi 2010), entre muchos otros, han constatado la importancia de las características fisicoquímicas de los sustratos en el proceso y en la calidad del producto. Sin embargo, un número limitado de publicaciones científicas aborda aspectos como la variabilidad en la calidad fisicoquímica en las instalaciones de compostaje y las publicaciones existentes abordan investigaciones en países desarrollados, con residuos cuyas características difieren de las encontradas en el contexto de estudio. Esta tesis aportó un enfoque de trabajo para estudiar las variaciones y las causas de la variabilidad de la composición física y las características fisicoquímicas de la materia prima del compostaje de biorresiduos.

Una gran cantidad de reportes muestran la evaluación del efecto de materiales de enmienda y de soporte para el mejoramiento del proceso y calidad del producto de compostaje (Manios, 2004; Koivula et al., 2004; Adhikari et al., 2008; Francou et al., 2008; Kuba et al., 2008; Wong et al., 2009; Yu y Huang, 2009; Chang y Chen, 2010; Kumar et al., 2010; Sundberg et al., 2011; Kurola et al., 2011; An et al., 2012); sin embargo, en esos estudios no se enfatiza en los procedimientos para la selección de los materiales de enmienda o soporte. Este trabajo propuso y evaluó una herramienta para la selección de materiales de enmienda o de soporte, que tiene en cuenta las condiciones locales y las características fisicoquímicas de la materia prima. Los resultados de la aplicación de la herramienta y las mejoras obtenidas en el proceso y la calidad del producto del compostaje al emplear los materiales seleccionados, muestra el potencial de la herramienta y la necesidad de profundizar en sus indicadores y validarla en otros casos de estudio.

La poda y corte de césped han sido empleados como materiales de soporte en el compostaje de biorresiduos o de residuos de alimentos en varios estudios (Adhikari et al., 2008; Francou et al., 2008; Kumar et al., 2010; López et al., 2010). En general, la literatura técnica y científica no presenta reportes específicos del uso del pasto estrella como material de soporte en el compostaje de biorresiduos. Este trabajo contribuyó con la evaluación de materiales de soporte poco reportados en la literatura, observándose resultados satisfactorios en el mejoramiento del proceso y la calidad del producto

6.3 Contribución a la política

El análisis sistémico del compostaje de biorresiduos de municipios menores en países en desarrollo permitió identificar la necesidad de formular normas y políticas públicas para impulsar el funcionamiento de los sistemas. Estos lineamientos podrían ser considerados por instituciones gubernamentales, nacionales y departamentales para la puesta en marcha y seguimiento de las instalaciones. Las normas y políticas identificadas deben: i) favorecer la separación en la fuente, la recolección selectiva y el aprovechamiento de biorresiduos, ii) reconocer en la tarifa del servicio de aseo la recolección de biorresiduos y la operación del compostaje, iii) establecer estándares de calidad del producto en función de los usos, iv) estimular el uso del producto para las actividades productivas y de conservación del recurso suelo, y v) promover el desarrollo tecnológico local que facilite la selección, diseño e implementación de tecnologías y de esquemas de operación, control y monitoreo acorde con las condiciones del contexto local.

La formulación de indicadores para los elementos clave del funcionamiento de los sistemas de compostaje de biorresiduos, puede facilitar el seguimiento, por parte de las autoridades gubernamentales, a las instalaciones de aprovechamiento de biorresiduos ubicadas en municipios menores. Esto también permitiría la focalización y priorización de recursos para intervenir en el funcionamiento de estas instalaciones.

De otro lado, en este trabajo se constató lo identificado por Saha et al. (2010) y Marmolejo (2011), quienes mostraron que los productos del compostaje provenientes únicamente de biorresiduos, debido a las características específicas de los sustratos, difícilmente alcanzan el límite establecido por la norma para el cumplimiento del contenido de carbono orgánico oxidable total. Este trabajo es un insumo adicional para que las autoridades gubernamentales relacionadas con el uso de productos como el compost, realicen la revisión y ajuste de las normas en lo que respecta a este parámetro. Adicionalmente, este trabajo también muestra la necesidad de que en las normas de calidad y uso de compost (particularmente en la norma colombiana), se incluyan la estabilidad y madurez del producto, analizando el desarrollo de pruebas asequibles al contexto colombiano.

6.4 Contribución a la práctica

Este trabajo contribuyó a la formación de talento humano para la operación, control y monitoreo del proceso de compostaje en la instalación ubicada en Versalles, Valle del Cauca (Colombia). Específicamente en aspectos como: toma de muestras representativas, mediciones de pH, conductividad eléctrica, temperatura y humedad. Se desarrollaron capacitaciones teórico-prácticas con los operarios de la instalación de compostaje, sobre los fundamentos del proceso y la interpretación de resultados. Adicionalmente, se adaptó colectivamente un formato para el registro diario del monitoreo de las pilas de compostaje a escala real y se sistematizaron los registros para facilitar el análisis y la toma de decisiones en sitio.

De otro lado, el estudio de los índices de estabilidad concluyó que los parámetros comúnmente empleados para el seguimiento del proceso, son insuficientes para determinar la finalización del proceso; este trabajo propuso la adaptación en la instalación de compostaje, de pruebas como el autocalentamiento y el índice respirométrico, que complementen pruebas como la temperatura, humedad, pH y conductividad eléctrica, parámetros actualmente monitoreados en sitio.

6.5 Futuro trabajo

Son diversos los aspectos en los que ameritan continuar profundizando desde la academia, que incluyen aspectos tecnológicos, económicos, ambientales y sociales; algunos de los elementos técnicos son:

Aplicar el modelo de la dinámica de sistemas, con los indicadores cuantitativos propuestos, en al menos dos instalaciones de compostaje de biorresiduos, que permitan afinar la herramienta.

Analizar propuestas complementarias de desagregación de la composición física de la materia prima del compostaje de biorresiduos, que contribuya a suministrar mayor información para la correlación entre las características fisicoquímicas y composición física de este tipo de sustratos.

Adaptar pruebas de laboratorio para desarrollar en las condiciones y características de las instalaciones de compostaje objeto de estudio.

Estudiar las causas de los altos valores del pH en el producto del compostaje de biorresiduos y evaluar opciones que permitan su reducción.

Evaluar conjuntamente la estrategia del incremento en la frecuencia de volteos durante las fases mesofílica y termofílica, incorporando materiales de enmienda o de soporte que mejoren la calidad final del producto.

Evaluar el efecto sobre el proceso de diferentes opciones de aireación en el compostaje de biorresiduos, acorde con las condiciones de los sistemas de aprovechamiento.

Analizar opciones para valorizar desde la perspectiva agrícola, el contenido de potasio de los productos obtenidos en el compostaje desarrollado en el contexto de estudio.

7 REFERENCIAS

- Abdullah, N.; Chin, N. L. (2010). Simplex-centroid mixture formulation for optimised composting of kitchen waste. *Bioresource technology*, 101 (21), 8205-8210.
- Abhilash, P. C.; Singh, N. (2008). Influence of the application of sugarcane bagasse on lindane (γ -HCH) mobility through soil column: Implication for biotreatment. *Bioresource technology*, 99(18), 8961-8966.
- Abril, A.; Noe, L.; Filippini, M. F.; Cony, M.; Martinez, L. (2011). Microbial dynamics and fertility characteristics in compost from different waste and maturation processes. *The Open Agriculture Journal* 5, 19-29.
- Achiba, W. B.; Gabteni, N.; Lakhdar, A.; Laing, G. D.; Verloo, M.; Jedidi, N.; Gallali, T. (2009). Effects of 5-year application of municipal solid waste compost on the distribution and mobility of heavy metals in a Tunisian calcareous soil. *Agriculture, ecosystems & environment* 130 (3), 156-163.
- Adekunle, I. M., Adekunle, A. A., Akintokun, A. K., Akintokun, P. O., Arowolo, T. A. (2010). Recycling of organic wastes through composting for land applications: a Nigerian experience. *Waste Management & Research* 29(6), 582-593.
- Adhikari, B. K. (2005). Urban food waste composting (Doctoral dissertation, McGill University).
- Adhikari, B.; Barrington, S.; Martinez, J.; King, S. (2008). Characterization of food waste and bulking agents for composting. *Waste Management* 28 (5), 795-804.
- Adhikari, B.; Barrington, S.; Martinez, J.; King, S. (2009). Effectiveness of three bulking agents for food waste composting. *Waste Management* 29 (1), 197-203.
- ADAS, W. Consulting Limited. 2005. Assessment of options and requirements for stability and maturity testing of compost. 80p.
- Aggelides, M.; Londra, P. 2000. Effects of compost produced from town wastes and sewage sludge on the physical properties of a loamy and a clay soil. *Bioresource technology* 71(3), 253-259.
- Agnew, J.M.; Leonard, J.J. (2003). The physical properties of compost. *Compost Science y Utilization* 11 (3), 238-264.
- Al-Jarallah, R.; Aleisa, E. (2014). A baseline study characterizing the municipal solid waste in the State of Kuwait. *Waste Management* 34 (5), 952-960.
- Alavi Moghadam, M.R.; Mokhtarani, N.; Mokhtarani, B. (2009). Municipal solid waste management in Rasht City, Iran. *Waste Management* 29 (1), 485-489.
- Ali, M. (2004). Sustainable composting: case studies and guidelines for developing countries. Water, Engineering and Development Centre (WEDC).

-
- Ali, U.; Khalid, A.; Mahmood, T.; Aziz, I. (2013). Accelerated Biodegradation of Solid Organic Waste through Biostimulation. *Proceedings of the Pakistan Academy of Sciences* 50 (1), 37-46.
- Alhumoud, J. M. (2005). Municipal solid waste recycling in the Gulf Co-operation Council states. *Resources, Conservation and Recycling* 45 (2), 142-158
- Álvarez-Solís, J. D.; Anzueto-Martínez, D. J. (2004). Actividad microbiana del suelo bajo diferentes sistemas de producción de maíz en los altos de Chiapas, México. *Agrociencia* 38(1), 13-22.
- An, C. J.; Huang, G. H.; Yao, Y.; Sun, W.; An, K. (2012). Performance of in-vessel composting of food waste in the presence of coal ash and uric acid. *Journal of hazardous materials* 203-204, 38-45.
- Amalfitano, C.; Pignalosa, V.; Auriemma, L.; Ramunni, A. (2006). The contribution of lignin to the composition of humic acids from a wheat-straw amended soil during 3 years of incubation in pots. *European Journal of soil science* 43 (3), 495-504.
- APHA, AWWA; WEF (2005). *Standard Methods for the Examination of Water & Wastewater*. 21 ed. Washington DC: American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation.
- Aponte, A. (2010). Modelo conceptual para la toma de decisiones en el sector de abastecimiento de agua, saneamiento básico e higiene. Tesis presentada como requisito parcial para el título de Máster en Ingeniería, énfasis en Ingeniería Sanitaria y Ambiental, Facultad de Ingeniería, Universidad del Valle, Cali.
- Arslan E. I.; Unlu A.; Topal M. (2011). Determination of the effect of aeration rate on composting of vegetable–fruit wastes. *Clean-Soil Air Water* 39 (11), 1014-1021.
- Asquer, C.; Pistis, A.; Scano, E. A. (2013). Characterization of fruit and vegetable wastes as a single substrate for the anaerobic digestion. Extended abstract. *Environmental Engineering and Management Journal* 12, 89-92.
- Balakrishnan, M.; Batra, V.S. (2011). Valorization of solid waste in sugar factories with possible applications in India: A review. *Journal of Environmental Management* 92 (11), 2886-2891.
- Banco Mundial (2014). How we classify countries. <<http://data.worldbank.org/about/country-and-lending-groups>> [consulta: 16-09-2014].
- Baptista, M.; Antunes, F.; Silveira, A. (2011). Diagnosis and optimization of the composting process in full-scale mechanical-biological treatment plants. *Waste Management & Research* 29 (6), 565–573.
- Barberis, R.; Nappi, P. (1996). Evaluation of compost stability. En: European Commission (1996). *International symposium*. Editado por: de Bertoldi et al. Blackie Academic and Professional. 175-184.
- Bari, Q. H.; Koenig, A. (2012). Application of a simplified mathematical model to estimate the effect of forced aeration on composting in a closed system. *Waste management* 32 (11), 2037-2045.
- Barral, M. T.; Moldes, A.; Cendón, Y.; Diaz-Fierros, F. (2007). Assessment of municipal solid waste compost quality using standardized methods before preparation of plant growth media. *Waste management & research*, 25(2), 99-108.
-

-
- Barral, M. T.; Paradelo, R. (2011). Trace elements in compost regulation: The case of Spain. *Waste Management*, 31(3), 407-410.
- Barreira, L.; Philippi, A.; Rodrigues, M. (2006). Usinas de compostagem do estado de Sao Paulo qualidade dos compostos e processos de producao. *Eng. Sanit. Ambient.* 11 (4). 385-393.
- Barreira, L.; Philippi Junior, A.; Rodrigues, M.S.; Tenório, J.A.S. (2008). Physical analyses of compost from composting plants in Brazil. *Waste Management* 28 (8), 1417-1422.
- Barrena, R. (2006). Compostaje de residuos sólidos orgánicos. Aplicación de técnicas respirométricas en el seguimiento del proceso. *Disertación Doctoral. Escuela Técnica Superior de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Barcelona. España.*
- Barrena, R.; Ruggieri, L.; Ponsá, S.; Gea, T.; Artola, A.; Font, X.; Sánchez, A.; Pagans, E.; Vázquez, F. (2006a). El uso de índices respirométricos en el proceso de compostaje: revisión del estado actual de la metodología. *Residuos* 16 (93), 46-58.
- Barrena, R.; Vazquez, F.; Sanchez, A. (2006b). The use of respiration indices in the composting process: a review. *Waste Management & Research* 24 (1), 37-47.
- Barrena, R.; d'Imporzano, G.; Ponsá, S.; Gea, T.; Artola, A.; Vázquez, F.; Sánchez, A.; Adani, F. (2009). In search of a reliable technique for the determination of the biological stability of the organic matter in the mechanical-biological treated waste. *Journal of Hazardous Materials* 162 (2), 1065-1072.
- Barrena, R.; Gea, T.; Ponsá, S.; Ruggieri, L.; Artola, A.; Font, X.; Sánchez, A. (2011). Categorizing raw organic material biodegradability via respiration activity measurement: a review. *Compost science & utilization* 19 (2), 105-113.
- Barrena, R.; Font, X.; Gabarrell, X.; Sánchez, A. (2014). Home composting versus industrial composting: Influence of composting system on compost quality with focus on compost stability. *Waste Management* 34 (7), 1109-1116.
- Bary, A. I.; Cogger, C. G.; Sullivan, D. M.; Myhre, E. A. (2005). Characterization of fresh yard trimmings for agricultural use. *Bioresource technology* 96 (13), 1499-1504.
- Beck-Friis, B.; Smars, S.; Jönsson, H.; Kirchmann, H. (2001). Gaseous Emissions of Carbon Dioxide, Ammonia and Nitrous Oxide from Organic Household Waste in a Compost Reactor under Different Temperature Regimes. *Journal of agricultural engineering research* 78 (4), 423-430.
- Beck-Friis, B.; Smårs, S.; Jönsson, H.; Eklind, Y.; Kirchmann, H. (2003). Composting of source-separated household organics at different oxygen levels: Gaining an understanding of the emission dynamics. *Compost Science and Utilization* 11 (1), 41-50.
- Bergersen, O.; Bøen, A. S.; Sørheim, R. (2009). Strategies to reduce short-chain organic acids and synchronously establish high-rate composting in acidic household waste. *Bioresource technology* 100 (2), 521-526.
-

-
- Bernal, M. P.; Paredes, C.; Sanchez-Monedero, M. A.; Cegarra, J. (1998). Maturity and stability parameters of composts prepared with a wide range of organic wastes. *Bioresource Technology* 63 (1), 91-99.
- Bernal, M. P.; Albuquerque, J. A.; Moral, R. (2009). Composting of animal manures and chemical criteria for compost maturity assessment. A review. *Bioresource technology* 100 (22), 5444-5453.
- Blum, B. (1992). Composting and the Roots of the Sustainable Agriculture. *Agricultural History* 66 (2), 171-188
- Boldrin, A.; Andersen, J.K.; Moller, J.; Favoino, E.; Christensen, T.H. (2009). Composting and compost utilization: accounting of greenhouse gases and global warming potentials. *Waste Management & Research* 27 (8), 800-812.
- Boldrin, A.; Christensen, T. H. (2010). Seasonal generation and composition of garden waste in Aarhus (Denmark). *Waste management* 30 (4), 551-557.
- Boldrin, A.; Neidel, T.; Damgaard, A.; Bhandar, G.; Møller, J.; Christensen, T. (2011). Modelling of environmental impacts from biological treatment of organic municipal waste in EASEWASTE. *Waste Management* 31 (4) 619-630.
- Brewer, L. J.; Sullivan, D. M. (2003). Maturity and stability evaluation of composted yard trimmings. *Compost Science & Utilization* 11 (2), 96-112.
- Brinton, W. F.; Evans, E.; Droffner, M. L.; Brinton, R. B. (1995). A standardized Dewar test for evaluation of compost self-heating. *Biocycle*, 36, 1-16.
- Brito L.M.; Coutinho J.; Smith S.R. (2008). Methods to improve the composting process of the solid fraction of dairy cattle slurry. *Bioresource technology* 99 (18), 8955-8960.
- Brown, K. H.; Bouwkamp, J. C.; Gouin, F. R. (1998). The influence of C:P ratio on the biological degradation of municipal solid waste. *Compost Science & Utilization* 6 (1), 53-58.
- Burnley, S. J. (2007). The use of chemical composition data in waste management planning—A case study. *Waste management* 27 (3), 327-336.
- Bustamante, M. A.; Restrepo, A. P.; Albuquerque, J. A.; Pérez-Murcia, M. D.; Paredes, C.; Moral, R.; Bernal, M. P. (2013). Recycling of anaerobic digestates by composting: effect of the bulking agent used. *Journal of Cleaner Production* 47, 61-69.
- Cabeza, I. O.; López, R.; Ruiz-Montoya, M.; Díaz, M. J. (2013). Maximising municipal solid waste—Legume trimming residue mixture degradation in composting by control parameters optimization. *Journal of environmental management* 128, 266-273.
- Campitelli, P. A.; Velasco, M. I.; Ceppi, S. B. (2006). Chemical and physicochemical characteristics of humic acids extracted from compost, soil and amended soil. *Talanta* 69 (5), 1234-1239.
- Canet, R.; Pomares, F. (1995). Changes in physical, chemical and physico-chemical parameters during the composting of municipal solid wastes in two plants in Valencia. *Bioresource Technology* 51 (2 – 3), 259-264p
-

-
- Castellanos, M.; Montauban, J.; Aristide, R. (2007). Prospectiva: importante herramienta para la planificación estratégica. Un ejemplo de aplicación en Economía y Medio Ambiente. En: Aplicaciones sobre prospectiva y valoración económico ambiental [libro en línea]. La Habana: Editorial La Habana, 2007. <<http://www.bibliociencias.cu/gsdll/collect/libros/index/assoc/HASHed7b.dir/doc.pdf>> [consulta: 06-06-2010].
- Cayuela M. L.; Sánchez-Monedero M. A.; Roig, A. (2006). Evaluation of two different aeration systems for composting two-phase olive mill wastes. *Process Biochemistry* 41 (3), 616-623.
- Celik, I.; Ortas, I.; Kilic, S. (2004). Effects of compost, mycorrhiza, manure and fertilizer on some physical properties of a Chromoxerert soil. *Soil and Tillage Research* 78 (1), 59-67.
- CEC (2008). Communication of the Commission COM (2008) 811 final. Green Paper on the management of biowaste in the European Union, 3/12/2008. Revisado en: <http://www.efaep.org/downloads/download_manager_members/fPhANXa0SimyYa1E.pdf> [consulta: 09-07-2011].
- Chaerul, M.; Tanaka, M.; Shekdar, A. (2008). A system dynamics approach for hospital waste management. *Waste Management* 28 (2), 442-449.
- Chang, J. I.; Tsai, J. J.; Wu, K. H. (2006). Thermophilic composting of food waste. *Bioresource technology* 97 (1), 116-122.
- Chang, J.; Chen., Y.J. (2010). Effects of bulking agents on food waste composting. *Bioresource Technology* 101 (15), 5917-5924.
- Chang, J.; Hsu, T. (2008). Effects of compositions on food waste composting. *Bioresource Technology* 99 (17), 8068-8074.
- Cheung, H.N.B.; Huang, G.H.; Yua, H. (2010). Microbial-growth inhibition during composting of food waste: Effects of organic acids. *Bioresource Technology* 101 (15), 5925-5934.
- Chiumenti, A.; Chiumenti, R.; Diaz, L.; Savage, G.; Eggerth, L.; Goldstein, N. (2005). Modern Composting Technologies. *BioCycle. Journal of Composting y Organics Recycling*. Singapore.
- Chroni, C.; Kyriacou, A.; Georgaki, I.; Manios, T.; Kotsou, M.; Lasaridi, K. (2009). Microbial characterization during composting of biowaste. *Waste Management* 29 (5), 1520-1525.
- Dahlén, L.; Lagerkvist, A. (2008). Methods for household waste composition studies. *Waste Management* 28 (7), 1100-1112.
- De Bertoldi, M.; Vallini, G.; Pera, A. (1983). The biology of composting: A review. *Waste Management & Research* 1 (2), 157-176.
- De Guardia, A.; Mallard, P.; Teglia, C.; Marin, A.; Le Pape, C.; Launay, M.; Benoist, J.C.; Petiot, C. (2010). Comparison of five organic wastes regarding their behaviour during composting: Part 2, nitrogen dynamic. *Waste Management* 30 (3), 415-425.

-
- De, X.; Wu, F. (2011). Towards More Sustainability: A Dynamic Recycling Framework of Discarded Products Based on SD Theory. *International Journal of Intelligent Systems and Applications (IJISA)* 3 (1), 43-50.
- Defrieri, R. L.; Jimenez, M. D. L. P.; Effron, D.; Palma, M. (2005). Utilización de parámetros químicos y microbiológicos como criterios de madurez durante el proceso de compostaje. *Agriscientia* 22 (1), 25 - 31.
- Diaz, L.F.; Savage, G.M.; Golueke, C. (2002). Chapter 12. Composting Municipal Solid Waste. In: Handbook of solid waste management. Editado por Tchobanoglous, G.; Kreith, F. Segunda Edición. Mc Graw Hill Handbooks.
- Diaz, L.F.; Savage, G.M. (2007). Chapter 4. Factors that affect the process. *Compost Science and Technology*. Editado por: L.F. Diaz, M. de Bertoldi, W. Bidlingmaier and E. Stentiford. Waste Management Series 8, 1-364.
- Diaz L.F.; Savage, G.M.; Eggerth, L.L. (2007a). The management of solid waste in economically developing countries – mayor needs. Eleventh International Waste Management and Landfill Symposium. Proceedings Sardinia
- Diaz, L.F.; Savage, G.M.; Eggerth; Chiumenti, A. (2007b). Chapter 5. Systems Used in Composting. *Compost Science and Technology*. Editado por: L.F. Diaz, M. de Bertoldi, W. Bidlingmaier and E. Stentiford. Waste Management Series 8, 1-364.
- Diaz, L. F.; Chiumenti, A.; Savage G. M.; Eggerth, L. L. (2006) Managing the organic fraction of municipal solid waste. *BioCycle* 47 (10), 50.
- Dimambro, M.E.; Lillywhite, R.D.; Rahn, C.R. (2006). Biodegradable municipal waste composts: analysis and application to agriculture. Warwick HRI, University of Warwick
<www2.warwick.ac.uk/fac/sci/whri/research/nitrogenandenvironment/summary/dimambro2006.pdf> [consulta: 09-07-2011].
- Do Prado, J.; Garcia, F. (2007). Desempenho operacional e ambiental de unidades de reciclagem e disposicao de residuos sólidos domésticos financiadas pelo ICMS ecológico de Minas Gerais. *Eng. Sanit. Ambient.* 12 (1), 52-61.
- Doležalová, M.; Benešová, L.; Závodská, A. (2013). The changing character of household waste in the Czech Republic between 1999 and 2009 as a function of home heating methods. *Waste management* 33 (9), 1950-1957.
- Dormond, H.; Boschini, C.; Rojas Bourrillón, A.; Zúñiga, A. (1998). Efecto de cuatro niveles de cáscara de banano maduro sobre la degradabilidad ruminal de la materia seca de los pastos Kikuyo (*Pennisetum clandestinum*) estrella africana (*Cynodon nlemfluensis*) en vacas Jersey. *Agronomía Costarricense* 22 (2), 163-172.
- Doublet, J.; Francou, C.; Poitrenaud, M.; Houot, S. (2011). Influence of bulking agents on organic matter evolution during sewage sludge composting: consequences on compost organic matter stability and N availability. *Bioresource Technology* 102 (2), 1298–1307.

-
- Dulac, N. (2001). The Organic Waste flow in Integrated Sustainable Waste Management – The Concept. Waste. Tools for Decision-makers: Experiences from the Urban Waste Expertise Programme (1995-2001). Netherlands, 49.
- Dyson, B.; Chang, N. (2005). Forecasting municipal solid waste generation in a fast-growing urban region with system dynamics modeling. *Waste Management* 25 (7), 669–679.
- Edgington, E.S. (1995). *Randomization Tests*. New York, USA: Marcel Dekker Inc, 1995
- Ekelund, L., Nyström, K. (2007). Composting of Municipal Waste in South Africa. *Uppsala Universitet*.
- Eggleston, S.; Buendia, L.; Miwa, K.; Ngara, T.; Tanabe, K. (2006). IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories. Institute for Global Environmental Strategies, Hayama, Japan.
- El Kader, N. A.; Robin, P.; Paillat, J. M.; Leterme, P. (2007). Turning, compacting and the addition of water as factors affecting gaseous emissions in farm manure composting. *Bioresource Technology* 98 (14), 2619-2628.
- Enayetullah, F.; Rothenberger, S.; Maqsood Sinha, A.H. Md.; Zurbrügg, C. (2006). *Decentralised Composting for Cities of Low- and Middle- Income Countries. A Users' Manual*. Waste Concern. 107p.
<http://www.eawag.ch/organisation/abteilungen/sandec/publikationen/publications_swm/downloads_swm/decomp_Handbook_hiRes.pdf> [consulta: 09-07-2012].
- Epstein, E. (1997). *The Science of Composting*. CRC Press LLC, Florida, USA.
- Epstein, E. (2011). *Industrial Composting: Environmental Engineering and Facilities Management*. CRC. Taylor & Francis Group. Press. Boca Raton, 314p.
- European Commission DG ENV (2011). *Assessment Of Feasibility Of Setting Bio-Waste Recycling Targets In EU, Including Subsidiarity aspects*.
<http://ec.europa.eu/environment/waste/compost/pdf/Biowaste_recycling_targets_final_final.pdf> [consulta: 09-07-2012].
- Eurostat - the Statistical Office of the European Communities (2009). *Municipal waste Half a ton of municipal waste generated per person in the EU27 in 2007*. <http://www.eds-destatis.de/en/press/download/09_03/031-2009-03-09.pdf> [consulta: 15-07-2013].
- Fagnano, M.; Adamo, P.; Zampella, M.; Fiorentino, N. (2011). Environmental and agronomic impact of fertilization with composted organic fraction from municipal solid waste: A case study in the region of Naples, Italy. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 141 (1-2), 100–107.
- Farrell, M.; Jones, D.L. (2009). Critical evaluation of municipal solid waste composting and potential compost markets. *Bioresource Technology* 100 (19), 4301–4310.
- Farrell, M.; Jones, D. L. (2010). Food waste composting: Its use as a peat replacement. *Waste management* 30 (8), 1495-1501.
-

-
- Forster-Carneiro, T.; Pérez, M.; Romero, L. I. (2008). Thermophilic anaerobic digestion of source-sorted organic fraction of municipal solid waste. *Bioresource Technology* 99 (15), 6763-6770.
- Fourti, O. (2013). The maturity tests during the composting of municipal solid wastes. *Resources, Conservation & Recycling* 72, 43-49.
- Francou, C.; Linéres, M.; Derenne, S.; Villio-Poitrenaud, M.; Houot, S. (2008). Influence of green waste, biowaste and paper-cardboard initial ratios on organic matter transformations during composting. *Bioresource Technology* 99 (18). 8926-8934.
- Gabhane, J.; William, S. P. M.; Bidyadhar, R.; Bhilawe, P.; Anand, D.; Vaidya, A. N.; Wate, S. R. (2012). Additives aided composting of green waste: Effects on organic matter degradation, compost maturity, and quality of the finished compost. *Bioresource Technology* 114, 382-388.
- Gajalakshmi, S.; Abbasi, S. A. (2008). Solid waste management by composting: state of the art. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology* 38 (5), 311-400.
- Gao, M.; Li, B.; Yu, A.; Liang, F.; Yang, L.; Sun, Y. (2010). The effect of aeration rate on forced-aeration composting of chicken manure and sawdust. *Bioresource technology* 101 (6), 1899-1903.
- Gea, T.; Ferrer, P.; Álvaro, G.; Valero, F.; Artola, A.; Sánchez, A. (2006). Co-composting of sewage sludge: fats mixtures and characteristics of the lipases involved. *Biochemical engineering journal* 33 (3), 275-283.
- Getahun, T.; Mengistie, E.; Haddis, A.; Wasie, F.; Alemayehu, E.; Dadi, D.; Van der Bruggen, B. (2012a). Municipal solid waste generation in growing urban areas in Africa: current practices and relation to socioeconomic factors in Jimma, Ethiopia. *Environmental monitoring and assessment* 184 (10), 6337-6345.
- Getahun, T.; Nigusie, A.; Entele, T.; Gerven, T. V.; Van der Bruggen, B. (2012b). Effect of turning frequencies on composting biodegradable municipal solid waste quality. *Resources, Conservation and Recycling* 65, 79-84.
- Guo, R.; Li, G.; Jiang, T.; Schuchardt, F.; Chen, T.; Zhao, Y.; Yujun, Y. (2012). Effect of aeration rate, C/N ratio and moisture content on the stability and maturity of compost. *Bioresource technology* 112, 171-178.
- Golueke, C.G; Diaz, L.F. (1996). Historical review of composting and its Role in municipal waste management. En: European Commission (1996). *International symposium*. Editado por: de Bertoldi et al. Blackie Academic and Professional. 3-14.
- Gómez-Brandón, M.; Lazcano, C.; Domínguez, J. (2008). The evaluation of stability and maturity during the composting of cattle manure. *Chemosphere* 70 (3), 436-444.
- Goyal, S.; Dhull, S.K.; Kapoor, K.K. (2005). Chemical and biological changes during composting of different organic wastes and assessment of compost maturity. *Bioresource Technology* 96 (14), 1584-1591.
- Grigatti, M.; Cavani, L.; Ciavatta, C. (2011). The evaluation of stability during the composting of different starting materials: Comparison of chemical and biological parameters. *Chemosphere* 83 (1), 41-48.

-
- Guerrero, L.; Maas, G.; Hogland, W. (2013). Review: Solid waste management challenges for cities in developing countries. *Waste Management* 33 (1), 220–232.
- Gustavsson, J.; Cederberg, C.; Sonesson, U.; Van Otterdijk, R.; Meybeck, A. (2011). *Global food losses and food waste*. Rome, Italy: Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Hanc, A.; Novak, P.; Dvorak, M.; Habart, J.; Svehla, P. (2011). Composition and parameters of household bio-waste in four seasons. *Waste Management* 31 (7), 1450–1460.
- Hänninen, K. (1996). Composting in Finland: Experiences and Perspectives. En: European Commission (1996). *International symposium*. Editado por: de Bertoldi et al. Blackie Academic and Professional, 673 – 683.
- Hansen, T. L.; Jansen, J.; Spliid, H.; Davidsson, A.; Christensen, T. (2007). Composition of source-sorted municipal organic waste collected in Danish cities. *Waste Management* 27 (4), 510–518.
- Hargreaves, J.; Adl, M.; Warman, P. (2008). A review of the use of composted municipal solid waste in agriculture. *Agriculture Ecosystems and Environment* 123 (1-3), 1 – 14.
- Hasan, K.M.M.; Sarkar, G.; Alamgir, M.; Bari, Q.H.; Haedrich, G. (2012). Study on the quality and stability of compost through a Demo Compost Plant. *Waste Management* 32 (11), 2046–2055.
- Hassen A.; Belguith, K.; Jedidi N.; Cherif A.; Cherif, M.; Boudabous, A. (2001). Microbial Characterization during composting of municipal solid waste. *Bioresource Technology* 80 (3), 217 – 225.
- Haug, R.T. (1993). *The Practical Handbook of Compost Engineering*. , Lewis Publishers, Boca Raton.
- Herity, L. (2003). *A Study of the Quality of Waste derived Compost in Ireland*. Thesis submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science in Environmental Engineering to the Faculty of Engineering, Queens University of Belfast.
- Hjorth, P.; Bagheri, A. (2006). Navigating towards sustainable development: A system dynamics approach. *Futures* 38 (1), 74-92.
- Hogg, D.; Lister, D.; Barth, J.; Favoino, E.; Amlinger, F. (2009). *Frameworks for Use of Compost in Agriculture in Europe*. Documento producido por Waste and Resources Action Programme (WRAP). Eunomia Research & Consulting Ltd.
<http://www2.wrap.org.uk/downloads/Eunomia_compost_in_agriculture_final_report.29fc498a.6993.pdf>
[consulta: 15-07-2013].
- Hoornweg, D.; Bhada-Tata, P. (2012). *What a Waste: Waste Management around the World*. Washington, DC: World Bank.
- Hoornweg, D., Thomas, L., Otten, L. (1999). *Composting and Its Application in Developing Countries*. Published for Urban Development Division, The World Bank, Washington DC.
- Hubbe, M.A.; Nazhad, M.; Sanchez, C. (2010). Composting as a way to convert cellulosic biomass and organic waste into high – value soils amendments: A review. *BioResources* 5 (4), 2808 – 2854.
-

-
- Huerta, O.; López, M.; Soliva M.; Zaloña, M. (2008). Compostaje de residuos municipales. Control del proceso, rendimiento y calidad del producto. Escuela Superior de Agricultura de Barcelona y Agencia de Residuos de Cataluña y el Ministerio de Medio Ambiente. España. <www.resol.com.br/cartilhas/compostaje.pdf > [consulta: 15-037-2011].
- Huerta-Pujol, O.; Gallart, M.; Soliva, M.; Martínez-Farré, F. X.; López, M. (2011). Effect of collection system on mineral content of biowaste. *Resources, Conservation and Recycling* 55 (11), 1095-1099.
- Iacovidou, E.; Ohandja, D. G.; Voulvoulis, N. (2012a). Food waste co-digestion with sewage sludge—realising its potential in the UK. *Journal of environmental management* 112, 267-274.
- Iacovidou, E.; Ohandja, D.; Gronow, J.; Voulvoulis, N. (2012b). The Household use of food waste disposal units as a waste management option: A review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology* 42 (14), 1485–1508.
- ICONTEC (1973). Norma Técnica Colombiana NTC 668. Alimentos y Materias Primas. Determinación de los contenidos de grasa y fibra cruda. Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. Bogotá, 5.
- ICONTEC (1997). Norma Técnica Colombiana NTC 370. Abonos o Fertilizantes. Determinación de Nitrógeno Total. Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. Bogotá.
- ICONTEC (1999). Norma Técnica Colombiana NTC 4657. Alimento para animales. Determinación del contenido de nitrógeno y cálculo del contenido de proteína cruda. Método Kjeldahl. Instituto Colombiano de Normas Técnicas (ICONTEC). Bogotá, 6.
- ICONTEC (2003). Norma Técnica Colombiana. Productos para la industria agrícola. Productos orgánicos usados como abonos o fertilizantes y enmiendas de suelo. Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. Bogotá.
- Iglesias-Jiménez, E.; Pérez García, V. (1992). Determination of maturity indices for city refuse composts. *Agriculture, ecosystems & environment* 38 (4), 331-343.
- Iglesias-Jiménez, E.; Barral-Silva, M.T.; Marhuenda-Egea, F.C. (2008). Indicadores de la estabilidad y madurez del compost. En *compostaje*, Editado por: Moreno Casco, J.; Moral Herrero, R. Madrid: Ed. Mundi-Prensa.
- INN – Instituto Nacional de Normalización (2004). Norma chilena de compost 2880- 2004 (NCh 2880-2004), *Compost - Clasificación y requisitos*, 23. Santiago de Chile, 27.
- Insam, H.; de Bertoldi, M. (2007). Chapter 3. Microbiology of the composting process. *Compost Science and Technology*. Editado or: Diaz, L.F.; de Bertoldi, M.; Bidlingmaier, W.; Stentiford, E. Waste Management Series 8. 25 -45.
- Iqbal, M.K.; Shafiq, T.; Ahmed, K. (2010). Characterization of bulking agents and its effects on physical properties of compost . *Bioresource Technology* 101 (15), 1913–1919.

-
- Jiang T.; Schuchardt F.; Li G.; Guo R.; Zhao Y. (2011). Effect of C/N ratio, aeration rate and moisture content on ammonia and greenhouse gas emission during the composting. *Journal of Environmental Sciences* 23 (10), 1754-1760.
- Jolanun, B.; Tripetchku, S.; Chiemchaisri, C.; Chaiprasert, P.; Towprayoonr, S. (2005). The application of a fed batch reactor for composting of vegetable and fruit wastes. *Thammasat Int. J. Sc. Tech* 10 (2), 60-69.
- Jolanun, B.; Towprayoon, S.; Chiemchaisri, C. (2008). Aeration improvement in fed batch composting of vegetable and fruit wastes. *Environmental Progress* 27 (2), 250-256.
- Juran, J. M.; Gryna, F.; Bingham, R. S. (1983). *Manual de Control de la Calidad*. Reverté.
- Kaboré, T.W.; Houot, S.; Hien, E.; Zombré, P.; Hien, V.; Masse, D. (2010). Effect of the raw materials and mixing ratio of composted wastes on the dynamic of organic matter stabilization and nitrogen availability in composts of Sub-Saharan Africa. *Bioresource technology* 101 (3), 1002–1013.
- Kalamdhad, A. S.; Kazmi, A. A. (2009). Effects of turning frequency on compost stability and some chemical characteristics in a rotary drum composter. *Chemosphere* 74 (10), 1327-1334.
- Kalemelawa, F.; Nishihara, E.; Endo, T.; Ahmad, Z.; Yeasmin, R.; Tenywa, M. M.; Yamamoto, S. (2012). An evaluation of aerobic and anaerobic composting of banana peels treated with different inoculums for soil nutrient replenishment. *Bioresource technology* 126, 375-382.
- Kanat, G. (2010). Municipal solid-waste management in Istanbul. *Waste management* 30 (8), 1737-1745.
- Kato, K.; Miura, N. (2008). Effect of matured compost as a bulking and inoculating agent on the microbial community and maturity of cattle manure compost. *Bioresource technology* 99 (9), 3372-3380.
- Ke, G. R.; Lai, C. M.; Liu, Y. Y.; Yang, S. S. (2010). Inoculation of food waste with the thermo-tolerant lipolytic actinomycete *Thermoactinomyces vulgaris* A31 and maturity evaluation of the compost. *Bioresource technology* 101 (19), 7424-7431.
- Khalil, A.; Domeizel, M.; Prudent, P. (2008). Monitoring of green waste composting process based on redox potential. *Bioresource technology*, 99(14), 6037-6045.
- Kim, J.; Park, J.; In, B.; Kim, D.; Namkoong, W. (2008). Evaluation of pilot-scale in-vessel composting for food waste treatment. *Journal of Hazardous Materials* 154 (1-3), 272-277.
- Koivula, N.; Räikkönen, T.; Urpilainen, S.; Ranta, J.; Hänninen, K. (2004). Ash in composting of source-separated catering waste. *Bioresource technology* 93 (3), 291-299.
- Komilis, D.; Tziouvaras, I. (2009). A statistical analysis to assess the maturity and stability of six composts. *Waste Management* 29 (5), 1504–1513.
- Komilis, D.; Kontou, I.; Ntougias, S. (2011). A modified static respiration assay and its relationship with an enzymatic test to assess compost stability and maturity. *Bioresource technology* 102 (10), 5863-5872.
-

-
- Krogmann, U.; Körner, I.; Diaz, L. F. (2010). Composting: Technology. In *Solid Waste Technology Management*. John Wiley Sons, Ltd, 533-568.
- Kroyer, G. T. (1995). Impact of food processing on the environment—an overview. *LWT-Food Science and Technology* 28 (6), 547-552.
- Kuba T.; Tschöll A.; Partl C.; Meyer K.; Insam H. (2008). Wood ash admixture to organic wastes improves compost and its Performance. *Agriculture Ecosystems and Environment* 127 (1-2), 43–49.
- Kuehl, R. O. (2001). *Diseño de Experimentos. Principios estadísticos para el diseño y análisis de investigaciones*. 2da Edición. Thomson Learning.
- Kum, V.; Sharp, A.; Harnpornchai, N. (2005). A System Dynamics Study of Solid Waste Recovery Policies in Phnom Penh City. In *Proceeding of the 23rd International Conference of the System Dynamics Society*, Boston, MA (CD-ROM version).
- Kumar, M.; Ou, Y.; Lin, J. (2010). Co-composting of green and food waste at low C/N ratio. *Waste Management* 30 (4), 602-609.
- Kuok, F.; Mimoto, H.; Nakasaki, K. (2012). Effects of turning on the microbial consortia and the *in situ* temperature preferences of microorganisms in a laboratory-scale swine manure composting. *Bioresource technology* 116, 421-427.
- Kurian, J. (2007). Experiencias de tratamiento de residuos sólidos urbanos en India. *Residuos: La Revista Técnica del Medio Ambiente* 97 (Mayo – Junio), 24 – 30.
- Kurola J.; Mona A.; Kontro M.; Talves M.; Romantschuk, M. (2011). Wood ash for application in municipal biowaste composting. *BioresourceTechnology* 102 (8), 5214–5220.
- Kroyer, G. T. (1995). Impact of food processing on the environment—an overview. *LWT-Food Science and Technology* 28 (6), 547-552.
- Laredo, M.A.; Cuesta, A. (1988). *Tabla de contenido nutricional en pastos y forrajes de Colombia*, 2da ed.; Bogotá: ICA.
- Lakhdar, A.; Rabhi, M.; Ghnaya, T.; Montemurro, F.; Jedidi, N.; Abdelly, C. (2009). Effectiveness of compost use in salt-affected soil. *Journal of hazardous materials* 171 (1), 29-37.
- Lasaridi, K. E.; Stentiford, E. I. (1998). A simple respirometric technique for assessing compost stability. *Water Research* 32 (12), 3717-3723.
- Lasaridi, K.; Protopapa, I.; Kotsou, M.; Pilidis, G.; Manios, T.; Kyriacou, A. (2006). Quality assessment of composts in the Greek market: the need for standards and quality assurance. *Journal of environmental management* 80 (1), 58-65
- Lebersorger, S.; Schneider, F. (2011). Discussion on the methodology for determining food waste in household waste composition studies. *Waste management* 31 (9), 1924-1933.
-

-
- Lemus, G. R.; Lau, A. K. (2002). Biodegradation of lipidic compounds in synthetic food wastes during composting. *Canadian biosystems engineering* 44 (6), 6-33.
- Levis, J.; Barlaz, M.; Themelis, N.; Ulloa, P. (2010). Assessment of the state of food waste treatment in the United States and Canada. *Waste Management* 30 (8-9), p.1486–1494.
- Li, R.; Chen, S.; Li, X.; Saifullah Lar, J.; He, Y.; Zhu, B. (2009). Anaerobic codigestion of kitchen waste with cattle manure for biogas production. *Energy Fuels* 23 (4), 2225-2228.
- Li, Z.; Lu, H.; Ren, L.; He, L (2013). Experimental and modeling approaches for food waste composting: A review. *Chemosphere* 93 (7), 1247–1257p.
- Lin, C. (2008). A negative-pressure aeration system for composting food wastes. *Bioresource technology* 99 (16), 7651-7656.
- Liwerska-Bizukojc, E.; Ledakowicz, S. (2003). Stoichiometry of the aerobic biodegradation of the organic fraction of municipal solid waste (MSW). *Biodegradation* 14 (1), 51-56.
- López, M.; Soliva, M.; Martínez-Farré, F.X.; Fernández, M.; Huerta-Pujol, O. (2010). Evaluation of MSW organic fraction for composting: Separate collection or mechanical sorting. *Resources, Conservation and Recycling* 54 (4), 222–228.
- Lu, Y.; Guo, J. (2009). Effect of Matured Compost As a Bulking Agent and Inoculating Agent on Composting of Municipal Solid Waste. In: *Bioinformatics and Biomedical Engineering, 2009. ICBBE 2009. 3rd International Conference on. IEEE*, 1-4.
- Luo, W.; Chen, T. B.; Zheng, G. D.; Gao, D.; Zhang, Y. A.; Gao, W. (2008). Effect of moisture adjustments on vertical temperature distribution during forced-aeration static-pile composting of sewage sludge. *Resources, Conservation and Recycling* 52 (4), 635-642.
- Maliki, A. D.; Lai, K. M. (2011). Design and application of a pre-composting test step to determine the effect of high fat food wastes on an industrial scale in-vessel composting system. *International Biodeterioration Biodegradation* 65 (6), 906-911.
- Manios, T. (2004). The composting potential of different organic solid wastes: experience from the island of Crete. *Environment International* 29 (8), 1079–1089.
- Marešová, K.; Kollárová, M. (2010). Influence of compost covers on the efficiency of biowaste composting process. *Waste management* 30 (12), 2469-2474.
- Marin, J.; Murillo, S. (2010). Mejoramiento al proceso de manejo de residuos sólidos orgánicos de rápida degradación en la cabecera del municipio de La Victoria, Valle del Cauca. Trabajo de grado de Pregrado, Facultad de Ingeniería. Universidad del Valle
- Marzouk, M.; Azab, S. (2014). Environmental and economic impact assessment of construction and demolition waste disposal using system dynamics. *Resources, Conservation and Recycling* 82, 41– 49.
-

-
- Marmolejo (2011). Marco conceptual para la sostenibilidad de los sistemas de aprovechamiento de residuos sólidos en cabeceras municipales menores a 20.000 habitantes del Valle del Cauca. Tesis Doctoral. Doctorado en Ingeniería, énfasis Ingeniería Sanitaria y Ambiental. Facultad de Ingeniería. Universidad del Valle.
- Marmolejo, L. F.; Torres, P.; Oviedo, E. R.; Bedoya, D. F.; Amezquita, C.; Klinger, R.; Alban, F.; Diaz, L. F. (2009). Flujo de residuos. Elemento base para la sostenibilidad del aprovechamiento de residuos sólidos municipales. *Ingeniería y Competitividad* 11 (2), 79-93.
- Marmolejo, L.; Oviedo, R.; Jaimes, J.; Torres, P. (2010a). Influencia de la separación en la fuente sobre el compostaje de residuos sólidos municipales. *Revista Agronómica de la Universidad Nacional* 28, 319-328.
- Marmolejo, L. F.; Díaz, L. F.; Torres, P.; García, M.; Burbano, M. H.; Blanco, C.; Erazo, K.; Pereira, J. F. (2010b). Influence of handling practices on material recovery from residential solid waste. *Sustainability* 2 (7), 2070-2083.
- Marmolejo, L.F.; Torres, P.; Oviedo, E.R.; Garcia, M.; Diaz, L.F. (2011). Análisis del funcionamiento de plantas de manejo de residuos sólidos en el norte del Valle del Cauca, Colombia. *Revista Escuela de Ingeniería de Antioquia (EIA)*, 16 (2), 163-174.
- Marmolejo, L.F. (2013). Systemic analysis of municipal solid waste management facility sustainability in municipalities with populations below 20,000 inhabitants. *Ingeniería y Competitividad* 15 (2), 253-263.
- Meunchang, S.; Panichsakpatana, S.; Weaver, R.W. (2005). Co-composting of filter cake and bagasse; by-products from a sugar mill. *Bioresource Technology* 96 (4), 437-442.
- Mkhabela, M.; Warman, P.R. (2005). The influence of municipal solid waste compost on yield, soil phosphorus availability and uptake by two vegetable crops, grown in a Pugwash sandy loam soil in Nova Scotia. *Agric. Ecosyst. Environ* 106, 57-67.
- Mohedo, J. J. (2004). Estudio de la estabilidad durante el compostaje de residuos municipales. Tesis Doctoral. Doctorado en Ingeniería Química. Universidad de Córdoba, Córdoba (Argentina). Facultad de Ciencias.
- Moldes, A.; Cendon, Y.; Barral, M. T. (2007). Evaluation of municipal solid waste compost as a plant growing media component, by applying mixture design. *Bioresource technology* 98 (16), 3069-3075.
- Monson, C.; Murugappan, A. (2010). Developing optimal combination of bulking agents in an In-Vessel composting of vegetable waste. *E-journal of chemistry* 7 (1), 93-100.
- Nolan, T.; Troy, S. M.; Healy, M. G.; Kwapinski, W.; Leahy, J. J.; Lawlor, P. G. (2011). Characterization of compost produced from separated pig manure and a variety of bulking agents at low initial C/N ratios. *Bioresource technology* 102 (14), 7131-7138.
- MAVDT – Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (2007). Evaluación de las cadenas de reciclaje. Dirección de Desarrollo Sectorial Sostenible. República de Colombia.

-
- Mirchi, A.; Madani, K.; Watkins Jr, D.; Ahmad, S. (2012). Synthesis of System Dynamics Tools for Holistic Conceptualization of Water Resources Problems. *Water Resources Management* 26 (9), 2421-2442.
- Mohajer, A. (2008). The influence of compost physical parameters on microbial oxygen uptake. A thesis submitted to McGill University in partial fulfilment of the requirements for the degree of Master of Science. Department of Bioresource Engineering. McGill University, Montreal.
- Nakasaki, K.; Nagasaki, K.; Ariga, O. (2004). Degradation of fats during thermophilic composting of organic waste. *Waste Management Research* 22 (4), 276-282.
- Nakasaki, K.; Araya, S.; Mimoto, H. (2013). Inoculation of *Pichia kudriavzevii* RB1 degrades the organic acids present in raw compost material and accelerates composting. *Bioresource Technology* 144, 521–528.
- Nguyen Ngoc, U.; Schnitzer, H. (2009). Sustainable solutions for solid waste management in Southeast Asian countries. *Waste Management* 29(6), 1982-1995.
- Nasreen, Z.; Qazi, J. I. (2012). Lab Scale Composting of Fruits and Vegetable Waste at Elevated Temperature and Forced Aeration. *Pakistan J. Zool* 44 (5), 1285-1290.
- Neves, L.; Ferreira, V.; Oliveira, R. (2009). Co-composting cow manure with food waste: The influence of lipids content. *World Academy of Science, Engineering and Technology* 58, 986 – 991
- Neklyudov, A.D.; Fedotov, G.N.; Ivankin, A.N. (2008). Intensification of composting processes by aerobic microorganisms: A review. *Applied biochemistry and microbiology* 44 (1), 6–18.
- Odlare, M.; Arthurson, V.; Pell, M.; Svensson, K.; Nehrenheim, E.; Abubaker, J. (2011). Land application of organic waste – Effects on the soil ecosystem. *Applied Energy* 88 (6), 2210-2218.
- OPS - Organización Panamericana de la Salud (2005). Informe de la Evaluación Regional de los Servicios de Manejo de Residuos Sólidos en América Latina y el Caribe. Washington. D.C
- OPS, BID AIDIS (2010). Informe Regional del Proyecto Evaluación Regional del Manejo de Residuos Sólidos Urbanos en América Latina y el Caribe 2010. Organización Panamericana de la Salud (OPS), Banco Interamericano de Desarrollo (BID) y Asociación interamericana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental (AIDIS). 156p
- Oviedo, E.R. (2010). Funcionamiento de los sistemas de aprovechamiento de residuos sólidos en localidades menores a 20.000 habitantes del Valle del Cauca. Trabajo de Investigación de Maestría. Facultad de Ingeniería. Universidad del Valle
- Pagans, E.; Barrera, R.; Font, X.; Sánchez, A. (2006). Ammonia emissions from the composting of different organic wastes. Dependency on process temperature. *Chemosphere* 62 (9), 1534-1542.
- Parfitt, J.; Barthel, M.; Macnaughton, S. (2010). Food waste within food supply chains: quantification and potential for change to 2050. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* 365 (1554), 3065-3081.
-

-
- Parkinson, R.; Gibbs, P.; Burchett, S.; Misselbrook, T. (2004). Effect of turning regime and seasonal weather conditions on nitrogen and phosphorus losses during aerobic composting of cattle manure. *Bioresource Technology* 91 (2), 171–178
- Pereira Neto, J. T. (1996). Composting: Experiences and perspectives in Brazil. En: European Commission (1996). International symposium. Editado por: de Bertoldi, M.; Sequi, P.; Lemmes, B.; Papi, T. Blackie Academic Professional, 729 – 735,
- Pigozzo, A.T.G.; Lenzi, E.; Junior, J.L.; Scapin, C.; Da Costa, A.C.S. (2006). Transition metal rates in latosol twice treated with sewage sludge. Brazil. *Arch. Biol. Technol* 49 (3), 515–526.
- Pognani, M.; Barrena, R.; Font, X.; Adani, F.; Scaglia, B.; Sánchez, A. (2011). Evolution of organic matter in a full-scale composting plant for the treatment of sewage sludge and biowaste by respiration techniques and pyrolysis-GC/MS. *Bioresource Technology* 102 (6), 4536-4543.
- Ponsá, S.; Puyuelo, B.; Gea, T.; Sánchez, A. (2011). Modelling the aerobic degradation of organic wastes based on slowly and rapidly degradable fractions. *Waste management* 31 (7), 1472-1479.
- Puyuelo, B.; Gea, T.; Sánchez, A. (2010). A new control strategy for the composting process based on the oxygen uptake rate. *Chemical Engineering Journal* 165 (1), 161-169.
- Qazi, A., M.; Akram, M.; Ahmad, N.; Artiola, J. F.; Tuller, M. (2009). Economical and environmental implications of solid waste compost applications to agricultural fields in Punjab, Pakistan. *Waste management*, 29(9), 2437-2445.
- Raj, D.; Antil, R. S. (2011). Evaluation of maturity and stability parameters of composts prepared from agro-industrial wastes. *Bioresource technology* 102 (3), 2868-2873.
- Rasapoor, M.; Nasrabadi, T.; Kamali, M.; Hoveidi, H. (2009). The effects of aeration rate on generated compost quality, using aerated static pile method. *Waste Management* 29 (2), 570-573.
- Restrepo, I. (2001). Team learning Project as a strategy to contribute to the sustainability of water supply and sanitation services. Doctoral Thesis. Leeds: University of Leeds, School of Civil Engineering.
- Richardson, G.P. (2011). Reflections on the foundations of system dynamics. *System Dynamics Review* 27 (3), 219-243.
- Riffaldi, R.; Levi-Minzi, R.; Pera, A.; De Bertoldi, M. (1986). Evaluation of compost maturity by means of chemical and microbial analyses. *Waste management & research* 4 (4), 387-396.
- Roberts, C. L.; Watkin, G. D.; Ezeah, C.; Phillips, P. S.; Odunfa, A. (2010). Seasonal variation and municipal Solid Waste Composition—Issues for development of new waste management strategies in Abuja, Nigeria. *The Journal of Solid Waste Technology and Management* 36 (4), 210-219.
- Rogger, C.; Beaurain, F.; Schmidt, T. S. (2011). Composting projects under the Clean Development Mechanism: Sustainable contribution to mitigate climate change. *Waste Management* 31 (1), 138–146.
-

-
- Rosen, C. J.; Halbach, T. R.; Swanson, B. T. (1993). Horticultural uses of municipal solid waste composts. *HortTechnology* 3 (2), 167-173.
- Rosero (2013). Evaluación de la aplicación de compost proveniente de biorresiduos del municipio de Versalles y residuos de poda de jardín en las propiedades químicas y biológicas de un suelo andisol y en la producción de maíz (*zea mays*). Trabajo de grado de Pregrado, Facultad de Ingeniería. Universidad del Valle
- Ruggieri, L.; Gea, T.; Artola, A.; Sánchez, A. (2008). Influence of different co-substrates biochemical composition on raw sludge co-composting. *Biodegradation* 19 (3), 403-415.
- Saha, J.K.; Panwar, N.; Singh, M.V. (2010). An assessment of municipal solid waste compost quality produced in different cities of India in the perspective of developing quality control indices. *Waste Management* 30 (2), 192–201.
- Said-Pullicino, D.; Erriquens, F. G.; Gigliotti, G. (2007). Changes in the chemical characteristics of water-extractable organic matter during composting and their influence on compost stability and maturity. *Bioresource Technology* 98 (9), 1822-1831.
- Sakurai K. (2001). Método sencillo del análisis de residuos sólidos, HDT 17. CEPIS. 2010. <<http://www.cepis.ops-oms.org/eswww/proyecto/repidisc/publica/hdt/hdt017.html>> [Consulta: 23-10-2012].
- Sánchez, A. (2007). A kinetic analysis of solid waste composting at optimal conditions. *Waste management* 27 (6), 854-855.
- Satisha, G.C.; Devarajan, L. (2007). Effect of amendments on windrow composting of sugar industry pressmud. *Waste Management* 27 (9), 1083–1091.
- Schwalb, M.; Rosevear, C.; Chin, R.; Barrington, S. (2011). Food waste treatment in a community center. *Waste management* 31 (7), 1570-1575.
- Scheinberg, A.; Wilson, D. C.; Rodic, L. (2010). Solid waste management in the world's cities. UN-Habitat's State of Water and Sanitation in the World's Cities Series, Earthscan for UN-Habitat, London and Washington DC.
- Shekdar, A. V. (2009). Sustainable solid waste management: An integrated approach for Asian countries. *Waste Management* 29 (4), 1438–1448.
- Shi, W.; Norton, J. M.; Miller, B. E.; Pace, M. G. (1999). Effects of aeration and moisture during windrow composting on the nitrogen fertilizer values of dairy waste composts. *Applied Soil Ecology* 11 (1), 17-28.
- Silva, M. E. F.; de Lemos, L. T.; Nunes, O. C.; Cunha-Queda, A. C. (2014). Influence of the composition of the initial mixtures on the chemical composition, physicochemical properties and humic-like substances content of composts. *Waste Management* 34 (1), 21-27.
- Shen, Y.; Ren, L.; Li, G.; Chen, T.; Guo, R. (2011). Influence of aeration on CH₄, N₂O and NH₃ emissions during aerobic composting of a chicken manure and high C/N waste mixture. *Waste Management* 31 (1), 33–38.
-

-
- Slater, R.A.; Frederickson, J. (2001). Composting municipal waste in the UK: some lessons from Europe. *Resources, Conservation and Recycling* 32 (3-4), 359–374.
- Smårs, S.; Gustafsson, L.; Beck-Friis, B.; Jönsson, H. (2002). Improvement of the composting time for household waste during an initial low pH phase by mesophilic temperature control. *Bioresource Technology* 84 (3), 237-241.
- Smith, D. C.; Hughes, J. C. (2004). Changes in maturity indicators during the degradation of organic wastes subjected to simple composting procedures. *Biology and fertility of soils* 39 (4), 280-286.
- Smith, R.S. (2009). A critical review of the bioavailability and impacts of heavy metals in municipal solid waste composts compared to sewage sludge. *Environment International* 35 (1), 142–156.
- Soliva, M.; López, M.; Huerta, O. (2008). Pasado, presente y futuro del compost. II International Conference on Soil and Compost Eco-Biology. Puerto de la Cruz, Tenerife - November 26th-29th, 2008. <<http://upcommons.upc.edu/e-prints/bitstream/2117/9557/1/Soliva%202008%20futuro%20compost.pdf>> [Consulta: 15-02-11].
- Soumaré, M.; Demeyer, A.; Tack, F.M.G.; Verloo, M.G. (2002). Chemical characteristic of Malian and Belgian solid waste compost. *Bioresource Technology* 81 (2), 97–101.
- Soumaré, M.; Tack, F. M. G.; Verloo, M. G. (2003). Characterisation of Malian and Belgian solid waste composts with respect to fertility and suitability for land application. *Waste management* 23 (6), 517-522.
- SSPD - Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios. (2008). Diagnóstico sectorial. Plantas de aprovechamiento de residuos sólidos. 49. <http://www.superservicios.gov.co/c/document_library/get_file?uuid=73cfd722-c46e-4caf-b03f-486810f6536c&groupId=10122> [Consulta: 02-02-2010]
- Stabnikova, O.; Wang, J. Y.; Bo Ding, H. (2005). Biotransformation of vegetable and fruit processing wastes into yeast biomass enriched with selenium. *Bioresource technology* 96 (6), 747-751.
- Stave, K.A. (2002). Using system dynamics to improve public participation in environmental decisions. *System Dynamics Review* 18(2), 139-167.
- Stentiford, E. (1996). Composting control: principles and practice. En: European Commission (1996). International symposium. Editado por: de Bertoldi, M.; Sequi, P.; Lemmes, B.; Papi. Blackie Academic and Professional. 49-59.
- Stentiford, E.; de Bertoldi, M. (2010). Composting Process. In *Solid Waste Technology Management*. Ed. Christensen, T.; Vol 1- 2. Blackwell Publishing Ltd
- Sterman, J.D. (2000) *Business Dynamics: Systems Thinking and Modeling for a Complex World*. Boston: Irwin/McGraw-Hill.

-
- Sullivan, D.M.; Miller, R.O. (2001). Compost quality attributes, measurements, and variability. En: Compost Utilization in Horticultural Cropping Systems. Editado por: Stoffella, P.J.; Kahn, B.A. Lewis Publishers, Boca Raton, Florida, 95– 120.
- Sun, W.; Huang, G. H.; Zeng, G.; Qin, X.; Sun, X. (2009). A stepwise-cluster microbial biomass inference model in food waste composting. *Waste management* 29 (12), 2956-2968.
- Sundberg, C. (2003). Food waste composting – effects of heat, acids and size. Licentiate Thesis. Swedish University of Agricultural Sciences.
- Sundberg, C.; Smårs, S.; Jönsson, H. (2004). Low pH as an inhibiting factor in the transition from mesophilic to thermophilic phase in composting. *Bioresource Technology* 95 (2), 145–150.
- Sundberg, C.; Jönsson, H. (2005). Process inhibition due to organic acids in fed-batch composting of food waste– influence of starting culture. *Biodegradation* 16 (3), 205-213.
- Sundberg, C.; Jönsson, H. (2008). Higher pH and faster decomposition in biowaste composting by increased aeration. *Waste Management* 28 (3), 518–526.
- Sundberg, C.; Franke-Whittle, I.H.; Kauppi, S.; Yu, D.; Romantschuk, M.; Insam, H.; Jönsson, H. (2011). Characterisation of source-separated household waste intended for composting. *Bioresource Technology* 102 (3), 2859–2867.
- Sundberg, C.; Navia, T. (2014). Is there still a role for composting?. *Waste Management & Research* 32 (6), 459–460
- Tang, J. C.; Inoue, Y.; Yasuta, T.; Yoshida, S.; Katayama, A. (2003). Chemical and microbial properties of various compost products. *Soil science and plant nutrition*, 49(2), 273-280.
- Tchobanoglous, G.; Theisen, H.; Vigil, S. (1994). Gestión integral de residuos sólidos. McGraw-Hill.
- Tejada, M.; Gonzalez, J.L. (2007). Influence of organic amendments on soil structure and soil loss under simulated rain. *Soil Tillage Research* 93 (1), 197–205.
- Tittarelli, F.; Petruzzelli, B.; Civilini, A.; Benedetti, A.; Sequi, P. (2007). Quality and agronomic use of compost. En: Compost Science and Technology. Waste Management Series 8. Editado por: Diaz, L.F.; de Bertoldi, M.; Bidlingmaier, W.; Stentiford, E., 49-65.
- Tirado S.M.; Michel F.C. (2010). Effects of turning frequency, windrow size and season on the production of dairy manure / sawdust composts. *Compost science & utilization* 18 (2), 70-80.
- Tiquia S.M.; Richard T.L.; Honeyman M.S. (2002). Carbon, nutrient, and mass loss during composting. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 62 (1), 15–24.
- Tiquia, S.M. (2005). Microbiological parameters as indicators of compost maturity. *Journal of Applied Microbiology* 99 (4), 816-828.
-

-
- Tiquia, S.M. (2010). Reduction of compost phytotoxicity during the process of decomposition. *Chemosphere* 79 (5), 506-512.
- Tognetti, C. (2007). Compostaje de residuos orgánicos urbanos: optimización del proceso para una mayor calidad del producto final. Tesis Doctoral. Universidad Nacional Comahue, San Carlos de Bariloche, Argentina, 175 pp.
- Tognetti, C.; Mazzarino, M. J.; Laos, F. (2007). Improving the quality of municipal organic waste compost. *Bioresource Technology* 98 (5), 1067-1076.
- Tognetti, C.; Mazzarino, M. J.; Laos, F. (2008). Compost of municipal organic waste: Effects of different management practices on degradability and nutrient release capacity. *Soil Biology and Biochemistry* 40 (9), 2290-2296.
- Tognetti, C.; Mazzarino, M.J.; Laos, F. (2011). Comprehensive quality assessment of municipal organic waste composts produced by different preparation methods. *Waste Management* 31 (6), 1146–1152.
- Tontti, T.; Heinonen-Tanski, H.; Karinen, P.; Reinikainen, O.; Halinen, A. (2011). Maturity and hygiene quality of composts and hygiene indicators in agricultural soil fertilised with municipal waste or manure compost. *Waste Management & Research* 29 (2), 197-207.
- Tosun, I.; Gönüllü, M. T.; Arslankaya, E.; Günay, A. (2008). Co-composting kinetics of rose processing waste with OFMSW. *Bioresource technology* 99 (14), 6143-6149.
- Trautmann, N.; Krasny, M. (1997). Composting in the classroom. Scientific inquiry for high school students. Cornell Center for the Environmental. Cornell University
- Troschinetz, A.; Mihelcic, J. (2009). Sustainable recycling of municipal solid waste in developing countries. *Waste Management* 29 (2), 915 – 923.
- Tsai, S. H.; Liu, C. P.; Yang, S. S. (2007). Microbial conversion of food wastes for biofertilizer production with thermophilic lipolytic microbes. *Renewable Energy* 32 (6), 904-915.
- Turan, N. G.; Çoruh, S.; Akdemir, A.; Ergun, O. N. (2009). Municipal solid waste management strategies in Turkey. *Waste Management* 29 (1), 465-469.
- Tumuhairwe, J. B.; Tenywa, J. S.; Otabbong, E.; Ledin, S. (2009). Comparison of four low-technology composting methods for market crop wastes. *Waste Management* 29 (8), 2274-2281.
- Tuomela, M.; Vikman, M.; Hatakka, A.; Itävaara, M. (2000). Biodegradation of lignin in a compost environment: a review. *Bioresource Technology* 72 (2), 169-183.
- Vaccari, M.; Bella, V. D.; Vitali, F.; Collivignarelli, C. (2013). From mixed to separate collection of solid waste: Benefits for the town of Zavidovići (Bosnia and Herzegovina). *Waste management* 33 (2), 277-286.
- USDA – United State Departament of Agriculture (1999). Guía para evaluación y calidad y salud del suelo. USDA, Washington.

-
- UNEP - United Nations Environment Programme y Calrecovery. (2005). Solid Waste Management. Nairobi, UNEP. 524 p.
- UNEP – United Nations Environment Programme (2010). Waste and Climate Change. Global Trends and Strategy Framework. Osaka, Japan.
- UNIVALLE - Universidad del Valle. (2010). Estrategias para el mejoramiento de opciones tecnológicas de aprovechamiento de residuos sólidos en cabeceras municipales del Valle del Cauca menores a 20.000 habitantes, con visión de sostenibilidad. Proyecto de Investigación. Cali: Vicerrectoría de Investigaciones, Universidad del Valle.
- UNIVALLE - Universidad del Valle. (2012). Metodología para mejorar la calidad del compost obtenido con biorresiduos de origen municipal acorde con las condiciones agroambientales del contexto regional. Proyecto de Investigación. Cali: Vicerrectoría de Investigaciones, Universidad del Valle.
- USEPA - U.S. Environmental Protection Agency (1994). Standards for the Use or Disposal of Sewage Sludge, vol. 58, No. 32. Federal Register, US Government Printing Office, Washington, DC, 9248–9415.
- USEPA - U.S. Environmental Protection Agency. (1995). Decision Maker's Guide to Solid Waste Management, Volume II. Chapter 7. Office of Solid Waste (5306), Municipal and Industrial Solid Waste Division. United State, 7 – 58.
- USEPA - U.S. Environmental Protection Agency (2012). Municipal Solid Waste Generation, Recycling, and Disposal in the United States: Facts and Figures for 2012.
<http://www.epa.gov/waste/nonhaz/municipal/pubs/2012_msw_fs.pdf> [Consulta: 15-06-2013]
- Van den Belt, M. (2004) Mediated Modeling: a system dynamics approach to environmental consensus building. Washington, D.C.: Island Press.
- Varnero M, M. T.; Rojas A, C.; Orellana R, R. (2007). Índices de fitotoxicidad en residuos orgánicos durante el compostaje. Revista de la ciencia del suelo y Nutrición Vegetal 7 (1), 28-37.
- Veeken, A.; Blok, W.; Mels, A.; Molenaar, S.; van Ewijk, H. (2007). Present and future strategies for Biowaste management. In: Waste matters. Integrating views. Editado por Lechner, P. 2nd BOKU Waste Conference 2007. Facultas.wuv. BOKU, 261.
- Ward, C.; Litterick, A.; Stephen, N. (2005). Assessment of the Potential for Site and Seasonal Variation of Composted Material Across the UK. WRAP, Banbury.
- Wolkowski, R. P. (2003). Nitrogen management considerations for landspreading municipal solid waste compost. Journal of environmental quality 32 (5), 1844-1850.
- Wong, J.; Fung, S.; Selvam, A. (2009). Coal fly ash and lime addition enhances the rate and efficiency of decomposition of food waste during composting. Bioresource Technology 100 (13), 3324–3331.

-
- Wu, L.; Ma, L. Q.; Martinez, G. A. (2000). Comparison of methods for evaluating stability and maturity of biosolids compost. *Journal of Environmental Quality* 29 (2), 424-429.
- Yang, F.; Li, G. X.; Yang, Q. Y.; Luo, W. H. (2013). Effect of bulking agents on maturity and gaseous emissions during kitchen waste composting. *Chemosphere* 93 (7), 1393–1399.
- Yu, H.; Huang, G. (2009). Effect of sodium acetate as a pH control amendment on the composting of food waste. *Bioresource Technology* 100 (6), 2005–2011.
- Yuan, H.; Chini, A. R.; Lu, Y.; Shen, L. (2012). A dynamic model for assessing the effects of management strategies on the reduction of construction and demolition waste. *Waste Management* 32 (3), 521–531.
- Yue, B.; Chen, T.B.; Gao, D.; Zheng, G.D.; Liu, B.; Lee, D.J. (2008). Pile settlement and volume reduction measurement during forced-aeration static composting. *Bioresource Technology* 99 (16), 7450–7457.
- Zapata, R. (2004). *La química de la acidez del suelo*. Medellín, Colombia: Universidad Nacional de Colombia.
- Zhang, R.; El-Mashad, H.; Hartman, K.; Wang, F.; Liu, G.; Choate, C.; Gamble, P. (2007). Characterization of food waste as feedstock for anaerobic digestion. *Bioresource Technology* 98 (4), 929–935.
- Zhu, N. (2007). Effect of low initial C/N ratio on aerobic composting of swine manure with rice straw. *Bioresource Technology* 98 (1), 9–13.
- Zmora-Nahum, S.; Hadar, Y.; Chen, Y. (2007). Physico-chemical properties of commercial composts varying in their source materials and country of origin. *Soil Biology and Biochemistry* 39 (6), 1263-1276.
- Zucconi, F.; Pera, A.; Forte, M.; de Bertoldi, M.; 1981. Evaluating toxicity of immature compost. *Biocycle* 22, 54–57.
- Zurbrügg C.; Drescher, S.; Patel A.; Sharatchandra, H. (2004). Decentralised composting of urban waste – an overview of community and private initiatives in Indian cities. *Waste Management* 24 (7), 655 – 662.
- Zurbrügg C.; Drescher, S.; Rytz, I.; Maqsood S.; Enayetullah, I. (2005). Decentralised composting in Bangladesh a win – win situation for all stakeholders. *Resources Conservation and Recycling* 43 (3), 281 – 292.
- Zurbrügg, C.; Rothenberger, S.; Vogeli, Y.; Diener, S. (2007). Organic solid waste management in a framework of millennium development goals and clean development mechanism – How can research contribute?. In: *Waste matters. Integrating views*. Ed. por Lechner, P. 2nd BOKU Waste Conference 2007. Facultas.wuv. BOKU, 31.
- Zurbrügg, C.; Gfrerer, M.; Ashadi, H.; Brenner, W.; Küper, D. (2012). Determinants of sustainability in solid waste management—The Gianyar Waste Recovery Project in Indonesia. *Waste management* 32 (11), 2126-2133.
- Zurbrügg, C.; Caniato, M.; Vaccari, M. (2014). How Assessment Methods Can Support Solid Waste Management in Developing Countries—A Critical Review. *Sustainability* 6 (2), 545-570.
- Zhao, W.; Ren, H.; Rotter, V. S. (2011). A system dynamics model for evaluating the alternative of type in construction and demolition waste recycling center – The case of Chongqing, China. *Resources, Conservation and Recycling* 55 (11), 933– 944.

ANEXOS

Anexo A. Matriz de influencia y dependencia de las estrategias para mejorar los sistemas de compostaje

La Tabla A.1 presenta la aplicación de la matriz de influencia y dependencia a las ocho estrategias para mejorar el funcionamiento de los sistemas de compostaje de biorresiduos en municipios menores de países en desarrollo. Las estrategias son: i) mejoramiento de la calidad del producto, ii) fortalecimiento de la comercialización, iii) la incorporación de conceptos de gestión empresarial para administración del sistema, iv) el mayor seguimiento y control de los aspectos financieros, v) el desarrollo tecnológico contextualizado, vi) adaptación a las condiciones locales de esquemas de control de la calidad de los sustratos, vii) la implantación de políticas y normas que favorezcan el funcionamiento del proceso y viii) el fortalecimiento de la participación comunitaria.

Tabla A.1. Matriz de influencia y dependencia de las estrategias para mejorar los sistemas de compostaje

		dependencia								TOTAL
		1	2	3	4	5	6	7	8	
Influencia	Calidad del producto	1	3	2	3	2	2	2	1	15
	Comercialización	2	3	2	3	2	1	1	1	13
	Administración	3	2	3	3	3	1	2	3	17
	Aspectos financieros	4	1	1	2	3	1	0	2	10
	Desarrollo Tecnología contextual.	5	3	2	2	3	3	2	1	16
	Calidad de los sustratos	6	3	2	0	1	2	2	0	10
	Políticas y normas	7	2	3	3	2	3	3	2	18
	Participación comunitaria	8	1	2	3	1	2	3	3	15
TOTAL		15	16	14	16	17	14	12	10	

Anexo B. Indicadores para los elementos del sistema de compostaje de biorresiduos

La Tabla B.1 presenta los indicadores propuestos para los elementos del sistema de compostaje de biorresiduos, cuyo propósito es hacer seguimiento al funcionamiento de los sistemas.

Tabla B.1. Indicadores propuestos para los elementos del sistema de compostaje de biorresiduos

Subsistema	Elemento	Descripción medición	Unidad de medida	
Calidad de producto y comercialización	Valor del producto	Costo unitario del producto	\$/Kg	
	Valor comercial del mercado	Costo unitario del compost comercial	\$/Kg	
	Aceptación del producto	Nivel de aceptación de los usuarios	%	
	Usos del producto	Agricultura	En función de los requerimientos del producto	
		Jardinería		
		Mejoramiento de suelos		
		Material de cobertura/remediación		
Calidad del producto	Compost	Cumplimiento estándares		
	Mejorador de suelo	Cumplimiento estándares		
Cantidad de producto	Cantidad producida	t/mes		
Gestión con visión empresarial del sistema	Comercialización del producto	Ingresos por comercialización	\$/mes	
		Cantidad comercializada	t/mes	
	Ingresos (I)	Sumatoria de todos los ingresos	\$/mes	
	Costos (C)	Sumatoria de todos los costos	\$/mes	
	Rentabilidad (R)	$R=(I-C)/activo$	\$/\$/	
	Gestión administrativa	Rentabilidad	\$/\$/	
		Nivel de comercialización del producto	%	
Tecnología contextualizada	Control y monitoreo	Nivel de requerimientos del proceso no atendidos	%	
		Características de calidad del producto	Cumplimiento estándares	
	Operarios capacitados	Proporción de operarios capacitados	%	
	Variabilidad calidad de biorresiduos	Desviación en las medias de parámetros de proceso	Coefficiente de variación	
	Variabilidad en hábitos alimenticios	Desviación en las medias de composición física de materia prima	Coefficiente de variación	
	Prácticas de manejo de biorresiduos	Nivel Separación en la fuente	%	
		Proporción de usuarios que alimentan animales	%	
		Proporción almacenamiento cubierto	%	
	Variación condiciones socioeconómicas	Condiciones socioeconómicas población	NBI	
	Ejecución oportuna de O&M	Nivel de requerimientos del proceso no atendidos	%	
	Funcionamiento de equipos	Nivel de equipos en funcionamiento	%	
	Funcionamiento proceso	Características de calidad del producto	Cumplimiento estándares	
		Tiempo del proceso	días/proceso	
Selección y diseño de tecnología	Nivel de tecnología en funcionamiento	%		
Corrupción	Nivel de tecnología que no están en funcionamiento	%		
Calidad de materias primas	Contaminación biorresiduos	Nivel de impurezas	%	
		Concentraciones de metales pesados	%	
	Separación en la fuente	Nivel de separación en la fuente	%	
	Recolección selectiva	Cobertura recolección selectiva	%	
	Crecimiento poblacional	Tasa de crecimiento anual	%	
Cantidad de biorresiduos	Cantidad generada en la localidad	t/mes		

Anexo C. Mediciones de los parámetros fisicoquímicos y composición física de los sustratos

La Tabla C.1 presenta los datos fisicoquímicos de los 39 muestreos y la Tabla C.2 contiene los datos de la composición física de los sustratos en el periodo de muestreo.

Tabla C.1. Datos Fisicoquímicos de los sustratos

No	COT (%)	N _{Total} (%)	C/N	K (%)	P (%)	Cenizas (%)	Extracto etereo (%)	Fibra Cruda (%)	Proteína (%)	Carbohidratos (%)	pH	Humedad (%)
1	33,16	1,76	18,80	1,72	0,23	25,57	5,29	18,52	11,02	39,59	4,90	77,32
2	29,55	1,50	19,73	1,24	0,23	34,83	4,87	13,48	9,36	37,45	5,96	73,30
3	31,31	1,41	22,13	1,60	0,23	14,62	4,24	16,50	8,84	55,80	4,61	78,79
4	29,47	1,76	16,70	1,72	0,11	23,38	3,26	15,44	11,03	46,89	5,57	77,33
5	30,21	2,11	14,35	1,68	0,15	20,00	5,26	11,05	13,16	50,53	6,66	81,00
6	28,71	1,41	20,40	1,58	0,11	23,22	3,52	6,69	8,80	57,78	4,85	71,58
7	29,04	2,58	11,24	1,11	0,37	22,14	5,54	8,12	16,14	48,06	4,66	72,90
8	28,41	1,70	16,70	2,02	0,39	26,21	4,41	15,17	10,63	43,57	5,43	78,25
9	35,40	3,39	10,43	2,67	0,19	13,72	6,60	12,42	21,22	46,05	4,95	79,38
10	34,15	2,65	12,90	1,60	0,17	28,56	2,56	7,60	16,54	44,74	5,85	76,19
11	34,29	2,87	11,94	1,71	0,16	17,82	7,66	8,77	17,94	47,81	5,26	74,92
12	32,98	1,37	24,05	1,85	0,15	18,53	5,97	26,94	8,57	40,01	5,34	73,01
13	32,17	1,27	25,41	1,37	0,27	24,47	5,37	31,83	7,91	30,42	5,62	70,78
19	34,97	1,37	25,53	1,88	0,17	15,03	3,21	11,30	8,56	61,90	5,53	76,64
15	28,42	1,37	20,77	1,74	0,18	25,59	3,09	11,96	8,55	50,82	6,47	71,82
16	28,71	1,24	23,24	1,58	0,43	29,52	3,54	10,03	7,72	49,19	5,67	76,56
17	28,41	1,34	21,18	1,99	0,23	27,95	3,71	8,84	8,38	51,11	5,63	73,88
18	31,32	1,21	25,87	1,58	0,24	23,15	3,93	13,56	7,57	51,80	6,01	75,29
19	26,95	1,20	22,51	1,46	0,19	29,80	3,93	8,62	7,48	50,16	6,07	84,23
20	32,77	1,80	18,18	1,60	0,24	22,48	5,00	6,07	11,26	55,19	5,41	79,40
21	28,46	1,37	20,82	1,79	0,24	26,14	4,48	4,39	8,54	56,44	6,70	78,81
22	28,63	1,40	20,42	1,53	0,36	30,25	3,63	2,91	8,76	54,44	5,35	75,24
23	25,58	1,32	19,36	1,34	0,42	37,17	3,34	10,25	8,26	40,98	5,01	73,96
24	24,92	1,26	19,73	2,10	0,34	31,45	3,61	9,66	7,89	47,39	6,65	73,39
25	34,73	1,37	25,35	1,49	0,50	24,18	2,29	9,80	8,56	55,17	5,15	79,90
26	30,80	1,38	22,32	1,78	0,47	34,98	4,23	13,00	8,63	39,17	5,33	78,70
27	30,05	1,32	22,76	1,87	0,23	31,31	2,94	12,57	8,25	44,93	5,36	78,60
28	36,32	1,29	28,16	2,60	0,30	27,27	2,99	11,95	8,06	49,73	5,41	76,90
29	32,60	1,42	22,96	1,42	0,37	26,71	2,97	11,30	8,88	50,15	5,49	75,40
30	35,17	1,76	19,98	2,78	0,76	27,85	6,32	11,71	11,00	43,12	5,58	75,15
31	41,66	1,44	28,93	1,24	0,46	22,61	5,56	11,62	9,00	51,21	5,41	75,90
32	39,04	1,70	22,96	0,53	0,64	25,35	4,39	12,99	10,63	46,65	5,64	81,30
33	43,35	1,34	32,35	0,87	0,17	14,29	4,71	13,17	8,38	59,46	5,07	75,78
34	41,75	1,31	31,87	0,71	0,25	19,55	4,01	13,71	8,19	54,53	5,05	80,31
35	40,40	1,47	27,48	1,88	0,24	25,94	3,91	14,55	9,19	46,42	5,57	78,76
36	35,53	1,88	18,90	1,87	0,35	31,06	4,71	14,90	11,75	37,57	5,43	71,15
37	40,65	1,40	29,03	1,32	0,05	22,82	4,90	12,44	8,75	51,09	5,14	79,58
38	39,06	1,74	22,45	1,49	0,20	25,99	5,35	8,91	10,88	48,88	5,67	79,80
39	38,85	1,45	26,79	1,72	0,15	25,49	4,03	9,82	9,06	51,60	5,56	79,64

Tabla C.2. Datos de la composición física de los sustratos

No	Comida sin procesar (%)	Comida procesada (%)	Papel y carton (%)	Poda y jardin (%)	Otros No biodegradables (%)	Ricos en Carbohidratos (%)	Frutas citricas (%)	Frutas no citricas (%)	Verduras, legumbres hortalizas (%)	Mezcla de material (%)
1	96,23	0,57	1,51	0,75	0,94	36,01	11,00	0,15	5,76	43,31
2	79,47	7,95	4,64	2,65	5,30	30,32	8,00	3,58	4,99	32,58
3	82,12	7,28	5,96	1,99	2,65	28,10	10,28	2,33	9,87	31,53
4	93,28	2,37	1,58	1,58	1,19	20,87	24,18	2,05	9,56	36,62
5	92,64	0,54	1,36	3,41	2,04	34,26	13,55	1,04	4,32	39,47
6	87,43	2,40	4,19	4,19	1,80	23,53	23,53	0,71	8,47	31,18
7	91,95	2,87	0,57	2,87	1,72	54,52	21,08	3,63	10,90	1,82
8	95,56	2,39	0,68	0,34	1,02	25,19	10,29	7,08	3,72	49,28
9	82,47	2,06	7,22	5,67	2,58	23,30	8,13	0,76	1,84	48,44
10	94,51	3,85	0,55	0,55	0,55	32,57	13,03	6,51	12,08	30,32
11	94,38	3,12	0,69	0,35	1,46	36,64	9,07	0,74	1,21	46,72
12	93,17	2,01	2,41	1,61	0,80	28,33	14,95	6,37	5,59	37,93
13	92,16	1,96	3,43	1,96	0,49	37,58	11,33	0,51	2,06	40,67
19	94,02	0,85	2,56	1,28	1,28	44,51	13,99	1,44	2,71	31,37
15	96,73	0,41	1,70	0,14	1,02	24,68	9,94	1,41	3,45	57,25
16	94,12	0,78	1,57	2,75	0,78	28,78	19,91	5,13	8,01	32,28
17	94,39	3,12	1,25	0,62	0,62	39,56	17,57	5,13	3,74	28,38
18	90,91	2,69	3,03	2,36	1,01	23,48	18,18	3,69	6,31	39,25
19	93,22	2,97	2,12	0,85	0,85	41,11	21,35	1,27	5,61	23,88
20	95,03	0,89	2,97	0,37	0,74	39,53	10,62	6,88	8,20	29,80
21	95,21	0,07	1,69	2,36	0,68	43,33	16,49	0,91	3,52	30,95
22	91,69	3,70	2,28	1,99	0,34	26,61	13,88	3,89	8,43	38,88
23	96,66	0,41	0,20	2,04	0,68	31,84	13,73	1,77	13,45	35,88
24	90,85	1,83	1,52	4,88	0,91	34,73	14,62	2,72	5,50	33,28
25	92,07	4,10	1,37	1,37	1,09	30,10	10,90	5,06	8,85	37,16
26	95,72	0,50	1,26	2,01	0,50	37,09	16,15	4,54	8,17	29,77
27	96,12	0,39	0,97	0,58	1,94	32,40	19,40	3,69	10,17	30,46
28	95,05	0,53	0,35	1,41	2,65	32,19	14,68	3,43	7,78	36,96
29	92,28	3,57	2,18	1,09	0,87	29,71	13,04	3,98	5,75	39,80
30	96,02	2,09	1,05	0,42	0,42	32,97	14,91	1,68	9,28	37,17
31	93,65	0,00	1,87	2,06	2,43	28,59	11,21	2,84	9,53	41,48
32	91,15	2,36	1,57	3,15	1,77	34,19	11,46	2,57	10,91	32,02
33	91,40	2,31	2,31	1,65	2,31	29,85	13,08	2,85	4,53	41,09
34	95,26	1,01	1,29	1,15	1,29	42,23	17,29	5,04	6,92	23,78
35	92,96	1,92	1,54	1,28	2,30	18,18	18,05	4,23	5,38	47,12
36	97,38	0,19	1,07	0,97	0,39	30,23	12,40	3,78	4,26	46,71
37	97,11	0,00	1,22	1,06	0,61	42,86	17,02	1,67	7,60	27,96
38	93,36	2,09	1,52	1,14	1,90	29,22	11,01	3,80	15,75	33,59
39	95,46	0,49	1,13	0,81	2,11	31,07	10,84	5,18	13,59	34,79

Anexo D. Información recolectada durante la caracterización y muestreo de materia prima del compostaje

La Tabla D.1 presenta la información recolectada durante el periodo de caracterización y muestreo de la materia prima del compostaje en la localidad objeto de estudio.

Tabla D.1. Información recolectada durante la caracterización y muestreo de la materia prima del compostaje

No	Día de Recolección	Día de Montaje	Número de carretadas (muestreo)	Días entre recepción y montaje	Tipo de vehículo	Sitio de descarga	Precipitación	Día Festivo	Ferias, fiestas municipales, eventos	Irregularidad en servicio
1	Martes	Miércoles	22	1	S	AC	Si	Si	Si	Si
2	Jueves	Viernes	12	1	SS	TR	Si	No	No	Si
3	Martes	Miércoles	27	1	S	AC	Si	Si	Si	Si
4	Jueves	Viernes	18	1	S	AC	Si	No	No	No
5	Lunes	Martes	19	1	S	AC	Si	No	No	No
6	Jueves	Viernes	19	1	S	AC	Si	No	No	No
7	Lunes	Martes	13	1	SS	TR	Si	No	No	No
8	Jueves	Viernes	10	1	SS	TR	No	No	No	No
9	Lunes	Miércoles	36	2	SS	TR	Si	No	No	Si
10	Jueves	Viernes	20	1	SS	TR	No	No	No	Si
11	Lunes	Miércoles	29	2	SS	TR	Si	No	No	Si
12	Jueves	Viernes	22	1	SS	TR	No	No	No	Si
13	Lunes	Miércoles	25	2	SS	TR	No	No	No	Si
14	Jueves	Viernes	19	1	SS	TR	No	No	No	Si
15	Lunes	Miércoles	31	2	SS	TR	No	No	No	Si
16	Jueves	Viernes	23	1	SS	TR	No	No	No	Si
17	Lunes	Miércoles	32	2	SS	TR	No	No	No	Si
18	Jueves	Viernes	22	1	SS	TR	No	No	No	Si
19	Lunes	Miércoles	32	2	SS	TR	No	No	No	Si
20	Jueves	Viernes	18	1	SS	TR	Si	No	No	Si
21	Lunes	Martes	17	1	SS	TR	Si	No	No	Si
22	Jueves	Viernes	19	1	SS	TR	Si	No	No	Si
23	Martes	Jueves	26	2	SS	TR	Si	Si	Si	Si
24	Jueves	Viernes	24	1	SS	TR	Si	Si	Si	Si
25	Lunes	Martes	21	1	S	TR	No	No	No	No
26	Jueves	Viernes	26	1	S	TR	No	No	No	No
27	Lunes	Martes	24	1	S	TR	No	No	No	No
28	Jueves	Viernes	18	1	S	TR	No	No	No	No
29	Lunes	Martes	38	1	S	TR	No	No	No	No
30	Jueves	Viernes	28	1	S	TR	No	No	No	No
31	Lunes	Martes	33	1	S	TR	Si	No	No	No
32	Jueves	Viernes	23	1	S	TR	No	No	No	No
33	Lunes	Martes	34	1	S	TR	No	No	No	No
34	Jueves	Viernes	23	1	S	TR	No	No	No	No
35	Lunes	Martes	37	1	S	TR	No	No	No	No
36	Lunes	Martes	32	1	S	TR	No	No	No	No
37	Jueves	Viernes	28	1	S	TR	Si	No	No	No
38	Lunes	Martes	31	1	S	TR	Si	No	No	No
39	Jueves	Viernes	23	1	S	TR	No	No	No	No

Nota: TR: Tolva de recepción; SS: Sin Separación; S: Separado; AC: Área de compostaje

Anexo E. Formato de inspección aplicado a establecimientos con potenciales materiales de soporte o enmienda

Información General

Número de la Encuesta: _____ Fecha: _____ Encuestador: _____

Nombre de la Empresa: _____ Actividad: _____

Dirección: _____ Municipio: _____ Localidad: _____

Nombre(s) y Apellido (s): _____ Cargo: _____

Teléfono: _____ E-mail: _____

Información Específica

1. Insumo (s) de producción: _____

_____ Cantidad: _____

2. Producto (s): _____ Cantidad: _____

3. Periodo de producción (En un año): _____

4. Residuo (s): _____ Cantidad: _____

4.1. Usos:

_____ Se Aprovechan en el proceso. Como: _____

_____ Se Tratan. Como: _____

_____ Se comercializan. En donde: _____ Precios (\$): _____

_____ Se regalan. A quien (s) _____

_____ Otra. Cual: _____

4.2. Almacenamiento:

Lugar: _____ Tiempo: _____ Condiciones: _____

4.3. Transporte

Tipo: _____ Capacidad: _____ Condiciones: _____

OBSERVACIONES

Anexo F. Aplicación de la herramienta para la selección de materiales de enmienda y soporte

F.1. Descripción de los indicadores propuestos

- Calidad Requerida del material

Está compuesto por cinco sub-indicadores que consideran las características fisicoquímicas de los potenciales materiales de enmienda y/o soporte y las de los biorresiduos, buscando que sean residuos que se complementen. La aplicación de este criterio requiere el conocimiento de las características fisicoquímicas tanto de los biorresiduos como de los potenciales materiales de soporte y/o enmienda. La información de las características fisicoquímicas fue obtenida de la siguiente manera: bagazo de caña, material pre-compostado, pasto estrella y cenizas de caracterizaciones realizadas en este estudio; información de estiércol bovino, porcino y de pollo en las referencias Bernal et al. (2009), Rynk (2003) y University of Plymouth (2005). Los criterios establecidos son:

- a) Criterio de C/N: teniendo en cuenta que la C/N deseada al inicio del proceso está en el rango entre 25 a 30 y que los biorresiduos se caracterizan por tener una C/N inferior al rango propuesto (21,7), se planteó la condición de que los potenciales materiales tuvieran una C/N mayor a 27 para que satisfaga esta condición. Por lo tanto, se tiene la opción de cumple o no cumple el criterio.
- b) Criterio de humedad: La humedad recomendada al inicio del proceso está en el rango de 60 a 65% mientras que los biorresiduos tienen una humedad 76,7%, por lo que este criterio considera que el material a incorporar debe satisfacer la condición de tener una humedad inferior a 60%.
- c) Criterio de pH: Es deseable tener un pH alrededor de valores neutros al inicio del proceso; no obstante, los biorresiduos están caracterizados por pH en el rango ácido (5,5 unidades). Se espera que los materiales incorporados contribuyan a incrementar el pH de la mezcla, por lo que deben cumplir el criterio de tener pH superiores a valores neutros.
- d) Criterio de otros nutrientes: el análisis fisicoquímico de los biorresiduos mostró deficiencias en nutrientes como el fósforo y así mismo, enriquezcan la mezcla con otros nutrientes menores que mejoren el potencial agrícola de los posibles productos. Es deseable que los potenciales materiales suministren otros nutrientes (diferentes del N) por lo que se planteó el cumplimiento de esta condición.
- e) Criterio de suministro de porosidad: Dadas las condiciones húmedas de los biorresiduos y su posibilidad de compactación, es deseable que los materiales a incorporar cumplan con el criterio de suministro de porosidad, que permitan tener mayores espacios libres para un mejor intercambio gaseoso en el proceso de transformación.

- Cantidad requerida del material

Es deseable que los potenciales materiales a incorporar, estén en cantidades adecuadas, de manera que los biorresiduos sean la cantidad mayoritaria en la planta de compostaje. Una cantidad superior a 30% puede tener implicaciones significativas en el funcionamiento y en la operación del proceso. De otro lado, cantidades inferiores a 0% muestran que los potenciales materiales tienen relaciones C/N inferiores a la de los biorresiduos, por lo que no son apropiadas para complementar los materiales. Las estimaciones de la cantidad de material a emplear fue realizados utilizando el concepto de balances de masa.

$$\left(\frac{C}{N}\right)_M * M = \left(\frac{C}{N}\right)_A * A + \left(\frac{C}{N}\right)_B * B$$

Dónde:

R: relación C/N de la mezcla

W_n : masa del material n (peso húmedo)

C_n : Carbono (%) del material n

N_n : Nitrógeno (%) del material n

M_n : Contenido de humedad (%) del material n

Para materiales de enmienda particulares, como la ceniza de madera, se utilizó un criterio diferente, que incluyó la revisión de literatura técnica y científica para analizar las cantidades que han tenido mejores resultados en el compostaje de biorresiduos. En este caso particular se revisaron las experiencias de: Koivula et al. (2004), Kuba et al. (2008), Yu y Huang (2009), Wong et al. (2009), Kurola et al. (2011) y An et al. (2012).

- Menor costo de adquisición

Es deseable que los materiales a incorporar en el proceso de compostaje de biorresiduos sean de costo mínimo, debido a que serán empleados de manera continua en el funcionamiento de la planta y podrían incrementar los costos de producción del producto, incidiendo en el costo de comercialización y en la sostenibilidad financiera. La aplicación de la herramienta de encuesta en el inventario de enmienda y soporte fue empleada para hacer las estimaciones de costo de adquisición de los materiales.

- Distancia de transporte del material de los potenciales materiales

Es deseable que los potenciales materiales de enmienda o de soporte estén disponibles lo más próximos a la instalación de compostaje, debido a que pueden ser requeridos de manera eventual o frecuente para satisfacer los requerimientos de operación de la planta y además, porque mayores desplazamientos también tienen un efecto en aspectos económicos que podrían incrementar los costos de producción. La estimación fue realizada a través de la ubicación de los sitios en un mapa digital, la identificación de las vías de acceso y el cálculo de la distancia hasta la planta de compostaje.

- Acceso para consecución del material

El fácil acceso de medios de transporte a los sitios donde se suministran los materiales de soporte o de enmienda puede facilitar una mayor disponibilidad en planta para las actividades operativas. Además de la distancia, es fundamental la condición de acceso, teniendo como posibilidades: pavimentada, afirmado, carretable, trocha y no existe. La identificación de las condiciones de acceso fue realizada al momento de aplicar la encuesta.

- Disponibilidad para la entrega del material

El generador del potencial material de soporte o enmienda esté en disposición de suministrarlo de manera continua y sin restricciones a la instalación de compostaje. Se presentan limitaciones cuando el generador del material lo

emplea o aprovecha para beneficio propio, en la fertilización de sus suelos. La encuesta efectuada permitió precisar la disponibilidad de entrega del material.

- Facilidades para el manejo del material

Los potenciales materiales de enmienda o de soporte podrían requerir acondicionamientos específicos como separación, clasificación y trituración. Estos acondicionamientos demandan labores adicionales en la instalación de compostaje. Es deseable que los acondicionamientos a efectuar sean mínimos, debido a las limitaciones de personal y equipos en las plantas de compostaje en el contexto de este tipo de poblaciones. Para la determinación de este criterio, se consideraron las características físicas de los materiales.

F.2. Síntesis de la Herramienta para la evaluación y ponderaciones de los indicadores

La Tabla F.1 presenta la herramienta propuesta para la evaluación de los potenciales materiales de enmienda y soporte. Adicionalmente, se observan tres escenarios de ponderación de los indicadores considerados en el estudio.

Tabla F.1. Herramienta propuesta para la evaluación de los materiales y ponderaciones para análisis

1 (%)	2 (%)	3 (%)	Indicadores	%	Medición	Valores Posibles	Valor Deseado	Calificación (Puntos)
25	30	20	Calidad requerida del material (CARM)	28	Cumple criterio de C/N	Si/No	Si	Si: 5 No: 1
				24	Cumple criterio de humedad	Si/No		
				24	Cumple criterio de pH	Si/No		
				12	Cumple criterio de otros nutrientes	Si/No		
				12	Suministra porosidad	Si/No		
20	15	15	Cantidad requerida de material (CRM)	100	CRM para complementar sustrato en términos de masa	-99% < CRM < 99	0% < CRM < 15%	< 0%: 0 ≥ 30%: 1 15 a 30%: 3 < 15%: 5
15	15	20	Menor costo de adquisición (Ind _{costo})	100	Costo material / mayor costo de todos los materiales	Ind _{costo} ≥ 0	Ind _{costo} ≤ 0,5	Ind _{costo} ≤ 0,5: 5 0,5 < Ind _{costo} ≤ 0,8: 3 0,8 < Ind _{costo} : 1
10	5	10	Acceso para consecución del material	100	Tipo de vía acceso	Pavimentada	Pavimentada	Pavimentada: 5 Afirmado: 4 Carreteable: 3 Trocha: 2 No existe: 0
						Afirmado		
						Carreteable		
						Trocha		
						No existe		
10	10	10	Distancia al SA	100	Distancia al SA (D)	D ≥ 0	D = 0	D = 0 km: 5 1 < D < 3 km : 4 3 ≤ D < 5 : 3 D ≥ 5 : 1
10	15	15	Disposición para la entrega de material	100	Presenta restricciones para suministro continuo	Si	No	Si: 1 No: 5
						No		
10	10	10	Facilidades de manejo del material	100	Requerimientos operativos	Separ. y tritur. (ST)	No requiere	ST: 1 Trituración: 3 No requiere: 5
						Trituración		
						No requiere		

F.3. Asignación de valores para cada variable

La Tabla F.2 presenta los valores para la aplicación de los indicadores propuestos en la herramienta para cada uno de los materiales de soporte y enmienda identificados en la localidad objeto de estudio.

Tabla F.2. Valores de cada indicador para los potenciales materiales identificados en la localidad objeto de estudio

Indicadores	Medición	Residuos de Mora	Bagazo de cana	Residuos de poda	Material en proceso	Cenizas de madera	Estiercol Bovino	Estiercol Porcino	Estiercol de Pollo
Calidad requerida del material	C/N	40	91,8	26,61	9,91	3,3	19	14	10
	Humedad (%)	80	41	74,19	26	baja	81	80	89,8
	pH	Ácido	5,67	8,4	9,34	13,1	7,1	7	8
	Nivel de otros nutrientes	Bajo	Bajo	Bajo	Bajo	Alto	Bajo	Bajo	Bajo
	Porosidad	Baja	Alta	Media	Media	Baja	Medio	Pobre	Pobre
Cantidad de material	Proporción en mezcla (%)	32%	25%	19%	0%	2 a 8%	< 0%	< 0%	< 0%
Costo de adquisición	Costo material (\$/kg)	0	0	0	0	0	20	0	15
Acceso	Tipo de vía acceso	Paviment.	Paviment.	Paviment.	Paviment.	Carreteable	Carreteable	Carreteable	Carreteable
Distancia	Distancia al SA (km)	3	5	0	0	1	6	6	5
Disposición	Presenta restricciones	si	si	no	no	no	si	No	si
Manejo del material	Requerimientos	No requiere	Trituración	Trituración	No requiere	No requiere	No requiere	No requiere	No requiere

F.4. Evaluación de cada uno de los indicadores en cada una de las tres evaluaciones

Las Tablas F.3 a F.5 presentan los resultados de la aplicación de la herramienta con los tres escenarios de ponderación considerados.

Tabla F.3. Resultados de la aplicación de la herramienta con el escenario 1 de ponderaciones

Indicadores	Medición	Residuos de Mora	Bagazo de cana	Residuos de poda	Material en proceso	Cenizas de madera	Estiercol Bovino	Estiercol Porcino	Estiercol de Pollo
Calidad requerida del material	C/N	0,4	0,4	0,4	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
	Humedad (%)	0,1	0,3	0,1	0,3	0,3	0,1	0,1	0,1
	pH	0,1	0,1	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
	Nivel de otros nutrientes	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	0,0	0,0	0,0
	Porosidad	0,0	0,2	0,1	0,1	0,0	0,1	0,0	0,0
Cantidad de material	Proporción en mezcla (%)	0,2	0,6	0,6	0,0	1,0	0,0	0,0	0,0
Costo de adquisición	Costo material (\$/kg)	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,2	0,8	0,2
Acceso	Tipo de vía acceso	0,5	0,5	0,5	0,5	0,3	0,3	0,3	0,3
Distancia	Distancia al SA (km)	0,3	0,3	0,5	0,5	0,4	0,1	0,1	0,1
Disposición	Presenta restricciones	0,1	0,1	0,5	0,5	0,5	0,1	0,5	0,1
Manejo del material	Requerimientos	0,5	0,3	0,3	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
	Total	2,9	3,4	4,0	3,5	4,3	1,7	2,6	1,6

Tabla F.4. Resultados de la aplicación de la herramienta con el escenario 2 de ponderaciones

Indicadores	Medición	Residuos de Mora	Bagazo de cana	Residuos de poda	Material en proceso	Cenizas de madera	Estiercol Bovino	Estiercol Porcino	Estiercol de Pollo
Calidad requerida del material	C/N	0,4	0,4	0,4	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
	Humedad (%)	0,1	0,4	0,1	0,4	0,4	0,1	0,1	0,1
	pH	0,1	0,1	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
	Nivel de otros nutrientes	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	0,0	0,0	0,0
	Porosidad	0,0	0,2	0,1	0,1	0,0	0,1	0,0	0,0
Cantidad de material	Proporción en mezcla (%)	0,2	0,5	0,5	0,0	0,8	0,0	0,0	0,0
Costo de adquisición	Costo material (\$/kg)	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,2	0,8	0,2
Acceso	Tipo de vía acceso	0,3	0,3	0,3	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2
Distancia	Distancia al SA (km)	0,3	0,3	0,5	0,5	0,4	0,1	0,1	0,1
Disposición	Presenta restricciones	0,2	0,2	0,8	0,8	0,8	0,2	0,8	0,2
Manejo del material	Requerimientos	0,5	0,3	0,3	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Total		2,7	3,3	4,0	3,7	4,3	1,7	2,8	1,6

Tabla F.5. Resultados de la aplicación de la herramienta con el escenario 3 de ponderaciones

Indicadores	Medición	Residuos de Mora	Bagazo de cana	Residuos de poda	Material en proceso	Cenizas de madera	Estiercol Bovino	Estiercol Porcino	Estiercol de Pollo
Calidad requerida del material	C/N	0,3	0,3	0,3	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
	Humedad (%)	0,0	0,2	0,0	0,2	0,2	0,0	0,0	0,0
	pH	0,0	0,0	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
	Nivel de otros nutrientes	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0
	Porosidad	0,0	0,1	0,1	0,1	0,0	0,1	0,0	0,0
Cantidad de material	Proporción en mezcla (%)	0,2	0,5	0,5	0,0	0,8	0,0	0,0	0,0
Costo de adquisición	Costo material (\$/kg)	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	0,2	1,0	0,2
Acceso	Tipo de vía acceso	0,5	0,5	0,5	0,5	0,3	0,3	0,3	0,3
Distancia	Distancia al SA (km)	0,3	0,3	0,5	0,5	0,4	0,1	0,1	0,1
Disposición	Presenta restricciones	0,2	0,2	0,8	0,8	0,8	0,2	0,8	0,2
Manejo del material	Requerimientos	0,5	0,3	0,3	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Total		3,0	3,4	4,2	3,9	4,4	1,7	3,0	1,6

Anexo G. Calidad fisicoquímica de la materia prima para los dos días de monitoreo

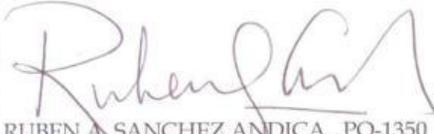
La Tabla G.1 presenta información de la calidad fisicoquímica de la materia prima en la instalación de compostaje de la zona de estudio, para los dos días de montaje.

Tabla G.1. Calidad fisicoquímica de la materia prima para los dos días de montaje de las pilas de compostaje.

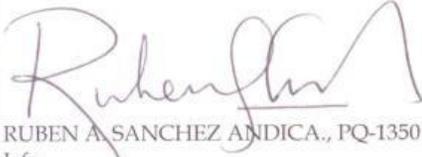
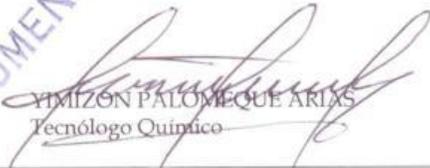
Variable	Unidad	Promedio día Lunes	desviación estándar	Promedio día Jueves	desviación estándar
pH	Unidades	5,51	0,51	5,54	0,39
Humedad	% (b.s.)	76,69	3,16	76,72	2,73
COT	% (b.s.)	33,02	4,82	33,01	4,72
N _{TOTAL}	% (b.s.)	1,61	0,49	1,52	0,33
C/N	--	21,66	5,28	22,35	4,79
K _{TOTAL}	% (b.s.)	1,64	0,45	1,67	0,53
P _{TOTAL}	% (b.s.)	0,28	0,15	0,29	0,19
Ceniza	% (b.s.)	25,05	5,64	25,78	5,24
Extracto Etéreo	% (b.s.)	4,34	1,17	4,12	0,97
Fibra Cruda	% (b.s.)	12,12	5,21	11,81	4,91
Proteína	% (b.s.)	10,09	3,06	9,53	2,07
Carbohidratos	% (b.s.)	48,40	6,66	48,75	6,52

Anexo H. Reportes de laboratorio de la caracterización de los materiales de enmienda y de soporte

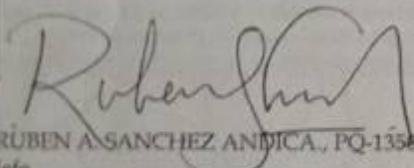
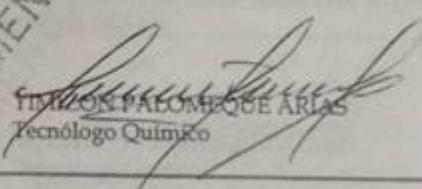
H.1. Pasto Estrella

 Universidad del Valle Departamento de Química LABORATORIO DE ANÁLISIS INDUSTRIALES		   
CERTIFICADO DE ANALISIS DE LABORATORIO		Certificado N° BC 7267-1 Certificado N° BC 7267-2 Certificado N° BC 7267-3
Número de registro: 28512-D		Fecha de emisión: 29 de octubre de 2012
Empresa: FACULTAD DE INGENIERÍA - ESCUELA EIDENAR		Solicitado por: Dr. Edgar Ricardo Oviedo Coinvestigador del Proyecto C.I. 655
Dirección: Ciudad Universitaria Meléndez		Teléfono: _____ Fax: _____
Nombre de la muestra: Pasto Estrella (Tomada el 27 de septiembre)		
DETERMINACION	RESULTADO	MÉTODO
Humedad, en % (m/m)	76,20 CV = 0,1 n = 2	NTC 5167
Nitrógeno Total como N, en % (m/m)	1,42 CV = 3,01 n = 2	NTC 370
Carbono Orgánico Oxidable Total, en % (m/m)	8,76 CV = 3,79 n = 2	NTC 5167
pH (solución saturada) a 25°C	7,96	NTC 5167
NOTA: NTC Significa Norma Técnica Colombiana del ICONTEC Los anteriores resultados están reportados en base húmeda (base real) (CV, en %) = Coeficiente de Variación n= número de datos		
Los anteriores análisis fueron elaborados por el Tecnólogo Químico Yimizon Palomeque Arias Para cualquier información adicional sírvase citar el No 28512-D correspondiente a su muestra.		
Resultados válidos únicamente para la(s) muestra(s) analizada(s) y no para otros material(es) de la misma procedencia. La(s) muestra(s) analizada(s) se guardará(n) por el tiempo de dos meses a partir de la emisión de este informe, transcurrido este tiempo se desechará(n) o se devolverá(n) al cliente si éste lo solicita.		
El presente documento no posee validez alguna sin el sello del laboratorio y las firmas respectivas. Se prohíbe su reproducción total o parcial, excepto con aprobación de la Universidad del Valle.		
 RUBEN A. SANCHEZ ANDICA., PQ-1350 Jefe Laboratorio de Análisis Industriales		 YIMIZON PALOMEQUE ARIAS Tecnólogo Químico
Digitado: Ruby X. Rivas A.		
Universidad del Valle Ciudad Universitaria Meléndez Teléfono. 2 - 333 4920 – Telefax 2 - 321 2145 Correo-e: labind@quimica.univalle.edu.co Apartado Aéreo 25360 Cali - Colombia		

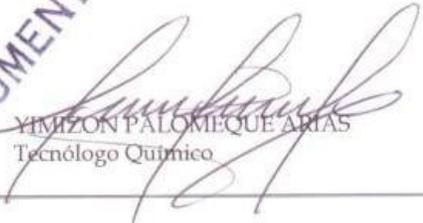
H.2. Bagazo de Caña

 Universidad del Valle Departamento de Química LABORATORIO DE ANÁLISIS INDUSTRIALES		   	
Certificado N° SC 7267-1 Certificado N° SC 7267-2 Certificado N° SC 7267-3		Certificado N° GP 196-1	
CERTIFICADO DE ANALISIS DE LABORATORIO			
Número de registro: 28512-B		Fecha de emisión: 29 de octubre de 2012	
Empresa: FACULTAD DE INGENIERÍA - ESCUELA EIDENAR		Solicitado por: Dr. Edgar Ricardo Oviedo Coinvestigador del Proyecto C.I. 655	
Dirección: Ciudad Universitaria Meléndez		Teléfono:	Fax:
Nombre de la muestra: Bagazo de una semana (Tomada el 27 de septiembre)			
DETERMINACION	RESULTADO	MÉTODO	
Humedad, en % (m/m)	32,50 CV = 4,90 n = 2	NTC 5167	
Nitrógeno Total como N, en % (m/m)	0,25 CV = 2,39 n = 2	NTC 370	
Carbono Orgánico Oxidable Total, en % (m/m)	28,76 CV = 0,31 n = 2	NTC 5167	
pH (solución saturada) a 25°C	4,28	NTC 5167	
NOTA: NTC Significa Norma Técnica Colombiana del ICONTEC Los anteriores resultados están reportados en base húmeda (base real) (CV, en %) = Coeficiente de Variación n= número de datos			
Los anteriores análisis fueron elaborados por el Tecnólogo Químico Yimizon Palomeque Arias Para cualquier información adicional sirvase citar el No 28512-B correspondiente a su muestra.			
Resultados válidos únicamente para la(s) muestra(s) analizada(s) y no para otro(s) material(es) de la misma procedencia. La(s) muestra(s) analizada(s) se guardará(n) por el tiempo de dos meses a partir de la emisión de este informe, transcurrido este tiempo se desechará(n) o se devolverá(n) al cliente si éste lo solicita. El presente documento no posee validez alguna sin el sello del laboratorio y las firmas respectivas. Se prohíbe su reproducción total o parcial, excepto con aprobación de la Universidad del Valle.			
 RUBEN A. SANCHEZ ANDICA., PQ-1350 Jefe Laboratorio de Análisis Industriales		 YIMIZON PALOMEQUE ARIAS Tecnólogo Químico	
Digno: Ruby X. Rivas A.			
Universidad del Valle Ciudad Universitaria Meléndez Teléfono. 2 - 333 4920 - Telefax 2 - 321 2145 Correo-e: labind@quimica.univalle.edu.co Apartado Aéreo 25360 Cali - Colombia			

H.3. Cenizas de Madera

 Universidad del Valle Departamento de Química LABORATORIO DE ANÁLISIS INDUSTRIALES		   	
CERTIFICADO DE ANALISIS DE LABORATORIO			
Número de registro: 06412		Fecha de emisión: 06 de marzo de 2012	
Empresa: FACULTAD DE INGENIERÍA - ESCUELA EIDENAR		Solicitado por: Dr. Luis Fernando Marmolejo	
Dirección: Ciudad Universitaria Meléndez		Investigador principal del proyecto C.I. 2655	
Nombre de la muestra: Cenizas		Teléfono:	Fax:
DETERMINACION	RESULTADO	MÉTODO	
pH (solución saturada) a 25°C	13,99	Potenciometría	
Alcalinidad como NaOH, en % (m/m)	5,46 CV = 0,39 n = 2	Volumetría Ácido - Base	
NOTA: Los anteriores resultados están reportados en base húmeda (base real) (CV, en %) = Coeficiente de Variación n= número de datos			
Los anteriores análisis fueron elaborados por el Tecnólogo Químico Yimizon Palomeque Arias Para cualquier información adicional sírvase citar el No. 06412 correspondiente a su muestra.			
Resultados válidos únicamente para la(s) muestra(s) analizada(s) y no para otro(s) material(es) de la misma procedencia. La(s) muestra(s) analizada(s) se guardará(n) por el tiempo de los meses a partir de la emisión de este informe, transcurrido este tiempo se desechará(n) o se devolverá(n) al cliente si éste lo solicita.			
El presente documento no posee validez alguna sin el sello del laboratorio y las firmas respectivas. Se prohíbe su reproducción total o parcial, excepto con aprobación de la Universidad del Valle.			
 RÚBEN A. SANCHEZ ANDICA, PQ-1358 Jefe Laboratorio de Análisis Industriales <small>Dignat: Rubén A. Andica</small>		DOCUMENTO ORIGINAL  YIMIZON PALOMEQUE ARIAS Tecnólogo Químico	
Universidad del Valle Ciudad Universitaria Meléndez Teléfono: 2 - 333 4920 - Telefax 2 - 321 2145 Correo-e: labind@quimica.univalle.edu.co Apartado Aéreo 25360 Cali - Colombia			

H.4. Material en Proceso

 Universidad del Valle Departamento de Química LABORATORIO DE ANÁLISIS INDUSTRIALES		   	
CERTIFICADO DE ANALISIS DE LABORATORIO			
Número de registro: 28512-A		Fecha de emisión: 29 de octubre de 2012	
Empresa: FACULTAD DE INGENIERÍA - ESCUELA EIDENAR		Solicitado por: Dr. Edgar Ricardo Oviedo Coinvestigador del Proyecto C.I. 655	
Dirección: Ciudad Universitaria Meléndez		Teléfono:	Fax:
Nombre de la muestra: Bagazo Fresco (Tomada el 27 de septiembre)			
DETERMINACION	RESULTADO	MÉTODO	
Humedad, en % (m/m)	82,06 CV = 2,70 n = 2	NTC 5167	
Nitrógeno Total como N, en % (m/m)	0,04 CV = 2,40 n = 2	NTC 370	
Carbono Orgánico Oxidable Total, en % (m/m)	7,04 CV = 5,35 n = 2	NTC 5167	
pH (solución saturada) a 25°C	7,22	NTC 5167	
NOTA: NTC Significa Norma Técnica Colombiana del ICONTEC Los anteriores resultados están reportados en base húmeda (base real) (CV, en %) = Coeficiente de Variación n= número de datos			
Los anteriores análisis fueron elaborados por el Tecnólogo Químico Yimizon Palomeque Arias Para cualquier información adicional sírvase citar el No 28512-A correspondiente a su muestra.			
Resultados válidos únicamente para la(s) muestra(s) analizada(s) y no para otro(s) material(es) de la misma procedencia. La(s) muestra(s) analizada(s) se guardará(n) por el tiempo de dos meses a partir de la emisión de este informe, transcurrido este tiempo se desechará(n) o se devolverá(n) al cliente si éste lo solicita.			
El presente documento no posee validez alguna sin el sello del laboratorio y las firmas respectivas. Se prohíbe su reproducción total o parcial, excepto con aprobación de la Universidad del Valle.			
 RUBEN A. SANCHEZ ANDICA., PQ-1350 Jefe Laboratorio de Análisis Industriales		 YIMIZON PALOMEQUE ARIAS Tecnólogo Químico	
Digitó: Ruby X. Rivas A.			
Universidad del Valle Ciudad Universitaria Meléndez Teléfono. 2 - 333 4920 - Telefax 2 - 321 2145 Correo-e: labind@quimica.univalle.edu.co Apartado Aéreo 25360 Cali - Colombia			

Anexo I. Valores p de las pruebas estadísticas efectuadas a los productos de los experimentos

La Tabla I.1 presenta los valores de las pruebas de aleatorización de los experimentos efectuados en el marco de la tesis doctoral.

Tabla I.1. Valores p de las pruebas estadísticas efectuadas a los productos de los experimentos

Parámetro	Unidad	Valores de $p < 0,05$			
		Experimento 1	Experimento 2	Experimento 5	Experimento 6
pH	Unidad	0	0,318	0,054	0
Humedad	% (m/m)	0,411	0,714	0,167	0
COT	% (m/m)	0	0	0,578	0
N _{Total}	% (m/m)	0,378	0	0,068	0,092
C/N	--	0,399	0,098	0,018	0,122
Cenizas	% (m/m)		0	0,020	0
K _{Total}	% (m/m)	0,902	0,293	0,518	0
P _{Total}	% (m/m)	0	0	0,572	0
Densidad	g/cm ³	0	0	0,168	0
CRA	%	0	0	0,588	0
CE	dS/m	0	0,907	0,128	0
CIC	meq/100g	0,288	0,694	0,071	0
CT	NMP/g	0,905	0,703	0,137	0,888
CF	NMP/g	0,385	0,903	0,181	0,814