

COMPOSTAJE EN LA ARGENTINA: EXPERIENCIAS DE PRODUCCIÓN, CALIDAD Y USO

María Julia Mazzarino y Patricia Satti
(editoras)



RÍO NEGRO
UNIVERSIDAD NACIONAL

ORIENTACION GRÁFICA EDITORA

COMPOSTAJE EN LA ARGENTINA: EXPERIENCIAS DE PRODUCCIÓN, CALIDAD Y USO

*María Julia Mazzarino y Patricia Satti
(editoras)*



ORIENTACION **GRAFICA**
EDITORIA

FICHA CATALOGRÁFICA

Mazzarino, María Julia

Compostaje en la Argentina : experiencias de producción, calidad y uso / María Julia Mazzarino y Patricia Satti. - 1a ed. - Buenos Aires : Orientación Gráfica Editora, 2012.

348 p. ; 23x16 cm.

ISBN 978-987-9260-93-7

1. Tecnología Agropecuaria. I. Satti, Patricia II. Título.

CDD 630

Fecha de catalogación: 27/03/2012

PRIMERA EDICION

Edición conjunta:

Universidad Nacional de Río Negro-Orientación Gráfica Editora
(Marzo 2012)

Queda hecho el depósito que marca la Ley 11.723.

Reservados todos los derechos.

Prohibida la reproducción o uso tanto en español o en cualquier otro idioma, en todo o en parte por ningún medio mecánico o electrónico, así como cualquier clase de copia, registro o transmisión para uso público o privado, sin la previa autorización por escrito de los autores y la editorial.

Copyright © 2012. ISBN 978-987-9260-93-7

Impreso en la Argentina – *Printed in Argentine*

Tirada: 1.000 ejemplares



ORIENTACION GRÁFICA EDITORA

Orientación Gráfica Editora S.R.L.
Gral. Rivas 2442 – C1417FXD Buenos Aires – Argentina
Tel./Fax (011) 4501-5427 – 4504-4851
e-mail: sergiowaldman@yahoo.com.ar
www.ogredit.com.ar

Agradecimientos



Cooperativa de Electricidad Bariloche



AACCS
ASOCIACION ARGENTINA
CIENCIA DEL SUELO

Nota de los autores

Los capítulos de este libro son las versiones ampliadas y mejoradas de presentaciones realizadas los días 21 y 22 de mayo de 2009 en Bariloche, durante el “Primer Taller sobre Compostaje: Tecnología para la producción y el medio ambiente” organizado por la Comisión Suelos y Ambiente de la Asociación Argentina de la Ciencia del Suelo (AACCS). Los conferencistas pertenecían mayormente a instituciones de investigación y enseñanza, como Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias (INTA), Universidad de Buenos Aires (UBA), Universidad Nacional del Comahue (UNCOMA), Universidad Nacional del Nordeste (UNNE), Universidad Nacional de La Plata (UNLP), Universidad Nacional de Río Negro (UNRN), Universidad Nacional de Santiago del Estero (UNSE), Universidad Nacional del Sur (UNS) y Colegio Agrotécnico N° 717. También participaron conferencistas provenientes de la Cooperativa de Electricidad Bariloche (CEB), Obras Sanitarias Mar del Plata (OSSE), Instituto Argentino de Certificación y Normalización (IRAM), Municipalidad de Moreno-Buenos Aires (IMDEL) y Servicio Nacional de Sanidad y Calidad Agroalimentaria (SENASA), y empresas privadas relacionadas con la construcción de caminos y la producción de césped.

Se contó con el auspicio de la AACCS, la UNCOMA y la Facultad de Agronomía de la UBA, y el apoyo económico de la CEB y las empresas CODI-CONEVIAL S.A., Excavar, Bertinat, Llao Llao Hotel & Resort y BEHA Ambiental S.R.L.

Los fondos para este libro fueron provistos por la CEB como responsable de la primera planta de compostaje de biosólidos del país, la UNRN en apoyo a sus carreras ambientales de grado y posgrado y Orientación Gráfica Editora S.R.L, editorial especializada en libros agropecuarios.

Autores

Autores

■ **ALBANESI Ada Susana**

Ingeniero Agrónomo de la Universidad Nacional de La Plata y Magister Scientiae en Suelos de la Universidad de Buenos Aires. Profesor Asociado Ordinario de Microbiología Agrícola y Ecología de la UNSE.

E-mail: albanesi@unse.edu.ar

■ **ANRIQUEZ Analía Liliana**

Ingeniero Agrónomo de la Universidad Nacional de Santiago del Estero (UNSE) y Magister de la Maestría en Desarrollo de zonas áridas y semiáridas. Ayudante profesional de Microbiología Agrícola y Ecología de la UNSE.

E-mail: ananriquez@hotmail.com

■ **BARBARO Lorena A.**

Ingeniera Agrónoma de la Universidad del Salvador. Magister en Cultivos Intensivos de la Universidad del Litoral. Investigadora del Instituto de Floricultura del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA).

E-mail: lbarbaro@cnia.inta.gov.ar

■ **BASIL Juan Gustavo A.**

Ingeniero Forestal de la Universidad Nacional de Santiago del Estero. Magister Scientiae en Manejo y Conservación de Bosques Tropicales y Biodiversidad, CATIE (Costa Rica). Jefe del Campo Forestal San Martín del INTA. Director Técnico de Vivero y Planta Procesadora de Semillas.

E-mail: gbasil@bariloche.inta.gov.ar

■ **BRANZINI Agustina**

Licenciada en Ciencias Biológicas de la Universidad de Buenos Aires. Estudiante del Doctorado en Ciencias Agropecuarias de la Universidad de Buenos Aires. Ayudante de Primera de la Universidad de Buenos Aires.

E-mail: branzini@agro.uba.ar

■ **CONTARDI Liliana Teresa**

Docente de la Fac.de Ingeniería (Sede Esquel) de la Univ. Nac. de la Patagonia S.J. Bosco - Profesional del Centro de Investigación y Extensión Forestal Andino Patagónico (Esquel, Chubut).
E-mail: lcontardi@ciefap.org.ar

■ **CURVETTO Néstor Raúl**

Lic. en Química y Lic. en Bioquímica de la Universidad Nacional del Sur; MScience, Guelph University (Canadá); Dr. en Bioquímica de la Universidad Nacional del Sur. Ex-Profesor Titular de la Universidad Nacional del Sur, Investigador principal del CONICET, Director de la Unidad Ejecutora CERZOS (CONICET/UNS) y Director del CCT CONICET BAHIA BLANCA.
E-mail: ficurvet@criba.edu.ar

■ **DE ERRASTI María Dolores**

Ingeniera Agrónoma esp. Fitotecnia, Facultad de Agronomía de la UBA. Encargada del Módulo producción plantas en vivero, Colegio Agrotécnico 717 de Cerro Radal en Chubut. Encargada de la producción de nativas en el Vivero de Forestal Patagonia en El Pedregoso, Chubut.
E-mail: doloresdeerrasti@hotmail.com

■ **DOMÍNGUEZ Paola**

Profesora en Química y Licenciada en Química, Universidad Nacional de Santiago del Estero. Estudiante Doctorado Regional en Ciencias de los Alimentos-Becada por CICyT-UNSE.
E-mail: pao_lald@yahoo.com.ar

■ **EYRAS Cecilia María**

Licenciada en Botánica y Doctora en Ciencias Naturales de la Universidad Nacional de La Plata. Investigadora Asociada del CENPAT-CONICET. Directora del Proyecto Compostaje de Algas Marinas.
E-mail: cecilia.eyras@gmail.com

■ **FERNÁNDEZ Horacio**

Licenciado en Química de la Universidad Nacional de La Plata. Diplomado en Química y Medio Ambiente, Universidad Nacional de Buenos Aires y en Gestión.

■ **GARAY Fernando**

Ingeniero Agrónomo de la Universidad Nacional de Santiago del Estero (UNSE) y Especialista en Producción Vegetal de la Universidad de Mar del Plata. Ayudante profesional de Cultivos Industriales de la UNSE.
E-mail: fegaray@unse.edu.ar

■ **GONZÁLEZ MATUTE Ramiro**

Médico Veterinario de la Universidad de Buenos Aires. MSc de la University of Guelph (Canadá) y Doctor en Agronomía de la Universidad Nacional del Sur. Profesional Adjunto (Comisión de Investigaciones Científicas de la Provincia de Buenos Aires) del CERZOS-CONICET.
E-mail: rmatute@criba.edu.ar

■ **GONZÁLEZ Roberto**

Técnico Químico de E.N.E.T. N°1 de Mar del Plata. A cargo del Laboratorio de Efluentes, Área Laboratorio de Aguas de OSSE, Mar del Plata.

■ **CREGO María P.**

Licenciada en Biología de la Universidad Nacional del Comahue. Jefe del Laboratorio de Química del CRUB-Univ. Nac. Comahue. Coresponsable de servicios analíticos del CRUB- UNComahue.

E-mail: paula.crego@crub.uncoma.edu.ar; mpcrego06@yahoo.com.ar

■ **KARLANIAN Mónica A.**

Técnica en Floricultura recibida en la Universidad de Buenos Aires. Responsable del laboratorio de sustratos y agua para riego del Instituto de Floricultura del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA).

E-mail: mkarlanian@cniia.inta.gov.ar

■ **KOWALJOW Esteban**

Biólogo y Doctor en Ciencias Biológicas de la Universidad Nacional de Córdoba. Investigador asistente del CONICET (CONICET/IMBIV, Córdoba).

E-mail: ekowaljow@gmail.com

■ **LAOS Francisca**

Ingeniera Agrónoma de la Universidad Nacional de La Plata y Dra. en Biología de la Universidad Nacional del Comahue. Profesora Asociada Regular y Directora del Departamento de Ciencias Exactas, Naturales e Ingeniería de la Universidad Nacional de Río Negro.

E-mail: flaos@unrn.edu.ar

■ **LAVADO Raúl S.**

Ingeniero agrónomo de la Universidad de Buenos Aires y Diplomado en Edafología y Biología Vegetal, Universidad de Granada (España). Profesor consulto de la Universidad de Buenos Aires. Investigador principal del CONICET.

E-mail: lavado@agro.uba.ar

■ **MAZZARINO María Julia**

Ingeniera agrónoma de la Univ. de Buenos Aires. Doctora en Ciencias Agrarias de la Universidad Georg-August, Göttingen, Alemania. Postdoc de la Univ. de Stanford y la Univ. de Florida, EEUU. Investigadora Principal CONICET. Directora Grupo de Suelos del CRUB (Univ. Nac. Comahue-INIBIOMA). Prof. Titular int. Univ. Nac. Río Negro.

E-mail: mariajulia.mazzarino@crub.uncoma.edu.ar

■ **MOLLER POULSEN L.**

Técnico Constructor. Jefe de Oficina Técnica. Servicio de Saneamiento, Cooperativa de Electricidad Bariloche Ltda.

E-mail: lpoulsen@ceb.coop

■ MONDINO Mario

Ingeniero Agrónomo de la Universidad Nacional de Córdoba y M. Sc. en Producción Vegetal de la Universidad de Mar del Plata. Profesor Adjunto de Cultivos Industriales de la UNSE e Investigador de INTA.
E-mail: mmondino@intasgo.gov.ar

■ NAMIOT Graciela Hebe

Ingeniera Forestal, Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, Universidad Nacional de La Plata. Diplomado superior en Docencia. Docente del Colegio Agrotécnico 717, Chubut. A cargo del vivero de plantas nativas. Integrante proyectos de restauración Parque Nacional Lago Puelo.
E-mail: gnchilco@gmail.com

■ PERALTA Elisabet

Ingeniera Química de la Universidad Nacional de Mar del Plata. Responsable de la Unidad de Gestión Ambiental de Obras Sanitarias de Mar del Plata (OSSE).

■ POLO Alfredo

Doctor en Química. Investigador y Director del Centro de Ciencias Medioambientales del Consejo de Investigaciones (CSIC), Madrid, España.
E-mail: apolo@ccma.csic.es

■ ROSELLI Lucía I.

Bioquímica de la Universidad Nacional de Buenos Aires. Ex Jefe del Laboratorio de Química del CRUB-Univ. Nac. Comahue. Actualmente jubilada, colaboradora en proyectos de investigación del Grupo de Suelos del CRUB.
E-mail: luciaros@arnet.com.ar

■ ROSTAGNO César Mario

Ingeniero Agrónomo de la Universidad Nacional de Córdoba; M. Sc. y Ph.D. de la Texas Tech University, Lubbock, Texas (EEUU de NA). Investigador Independiente del CONICET y Profesor Adjunto de la Universidad Nacional de la Patagonia-SJB, Sede Puerto Madryn.
E-mail: Rostagno@cenpat.edu.ar

■ ROVERE Adriana Edit

Licenciada en Ciencias Biológicas y Doctora en Biología de la Universidad Nacional del Comahue. Profesor Adjunto del Centro Regional Universitario Bariloche, Universidad Nacional del Comahue. Investigador Adjunto de CONICET.
E-mail: adrirovere@gmail.com

■ SÁNCHEZ DE PINTO María Inés

Licenciada en Química y Doctora en Química de la Universidad Nacional de Tucumán. Diplomada en Gestión Integral de Residuos Urbanos, Universidad ISALUD-ARS de Buenos Aires. Profesor Asociado de la Facultad de Agronomía y Agroindustrias, Universidad Nacional de Santiago del Estero (UNSE).
E-mail: inesdep@unse.edu.ar

■ **SATTI Patricia S.**

Licenciada en Química y en Bioquímica de la Universidad Nacional del Sur y Doctora en Biología de la Univ. Nac. del Comahue. Profesora de las Universidades Nacionales de Comahue y Río Negro. Directora de servicios analíticos del CRUB-UNComahue.

E-mail: patricia.satti@crub.uncoma.edu.ar; psatti@yahoo.com.ar

■ **SCAGLIOLA Marcelo**

Licenciado en Biología de la Universidad Nacional de Mar del Plata. Jefe Laboratorio de Aguas de OSSE. Responsable de Aspectos Ambientales de la Planta depuradora de efluentes cloacales de Mar del Plata.

■ **SEMENAS Liliana Graciela**

Licenciada en Biología y Doctora en Ciencias (mención Biología) de la Universidad Nacional de Buenos Aires. Profesor Titular Regular de la Universidad Nacional del Comahue. Directora del Laboratorio de Parasitología, Unidad Ejecutora INBIOMA (CONICET-CRUB-Univ.Nac. Comahue).

E-mail: liliana.semenas@crub.uncoma.edu.ar

■ **UMBIDES Roberto**

Bioquímico de la Universidad Nacional de Tucumán. Master en Gestión Ambiental, Universidad de San Luis (Argentina). Auxiliar docente de la Facultad de Agronomía y Agroindustrias, UNSE.

E-mail: rumbides@yahoo.com.ar

■ **VARELA Santiago A.**

Licenciado en Ciencias Biológicas de la Universidad Nacional del Comahue. Magister en Recursos Naturales de la Universidad de Buenos Aires, Fac. de Agronomía. Investigador del INTA.

E-mail: svarela@bariloche.inta.gov.ar

■ **YACOVELLA Carlos Alberto**

Técnico Superior en Problemas Ambientales - Fundación Universitaria Patagónica, Bariloche, R.N. Profesor Turismo y Desarrollo Sustentable, Instituto Superior de Enseñanza Técnico Profesional de la Provincia Río Negro. Consultor Ambiental independiente.

E-mail: cay@bariloche.com.ar

■ **ZUBILLAGA Marta Susana**

Ingeniera Agrónoma de la Universidad de Buenos Aires. Magister Scientiae Area Ciencias del Suelo de la Universidad de Buenos Aires. Doctora en Toxicología de la Universidad de Buenos Aires. Directora de Proyectos de Investigación. Profesora adjunta de la Universidad de Buenos Aires.

E-mail: zubillag@agro.uba.ar

Gabriela Von Haeften y Ana Paula Comino (Licenciadas en Química de la Universidad Nacional de Mar del Plata); **Gustavo Gayoso, Sergio Vergara y Carlos Genga** (Técnicos Químicos de E.N.E.T. N° 1 de Mar del Plata). Laboratorio de Aguas de OSSE, Mar del Plata.

Prólogo

En 2009 fui invitada a participar en un taller pionero sobre compostaje en la Argentina, organizado en Bariloche por la Comisión Suelos y Ambiente de la Asociación Argentina de la Ciencia del Suelo. Los organizadores (Raúl Lavado, María Julia Mazzarino, Patricia Satti y Agustina Branzini) contaron con la colaboración del Grupo de Suelos del CRUB-Universidad Nacional del Comahue (Paula Crego, Mariana Agüero, Elisa Castán, Esteban Kowaljow y Lucía Roselli) y el resultado fueron dos días de presentaciones intensivas, mesas redondas y discusiones apasionadas.

El taller fue pionero en varios frentes. Fue el primero en reunir a los especialistas de la Argentina para discutir de manera colectiva el estado del arte en los temas de compostaje, evaluación de calidad de compost y uso de compost. Los conferencistas pertenecían a diferentes instituciones de investigación y enseñanza, municipios, servicios de ingeniería sanitaria, instituciones de control y certificación y empresas privadas, y se contó con la presencia de aproximadamente 100 asistentes provenientes de diversos ámbitos relacionados con el tema.

Las presentaciones incluyeron: (i) producción de compost a partir de materiales locales de diferente origen; (ii) limitaciones relacionadas con la calidad de compost, incluyendo contaminación con metales pesados u otros materiales, así como también parámetros físicos y biológicos en función de usos específicos; (iii) adaptación y estandarización de indicadores de estabilidad y madurez de fácil utilización en laboratorios de aguas y suelos del país, y (iv) comercialización diferencial de compost en base a calidad. Las presentaciones generaron mucha discusión sobre la necesidad de aplicar la fuerte base científica de la Argentina para el desarrollo de regulaciones a nivel federal, relacionadas tanto con la producción como con el uso de la creciente oferta de compost comerciales.

A casi tres años del taller, este libro constituye una recopilación del conocimiento actual en la Argentina sobre el tema. Es el primer libro que compila un rango tan amplio de experiencias de investigación a todo lo largo del país. Su llegada es muy oportuna. La mayor parte de los suelos de la Argentina tienen baja concentración de materia orgánica,

a excepción de la Región Pampeana cuyos suelos se han desarrollado bajo pastizales de raíces profundas. Menos del 25% del país recibe la lluvia adecuada para el crecimiento de los cultivos sin riego y la mayor parte del territorio se considera árido o semiárido con severos problemas de desertificación. Ante el avance del cambio climático global, el agua disponible para riego se está volviendo rápidamente un bien escaso. La necesidad de conservar la humedad del suelo mediante la adición de materia orgánica es enorme, tanto para sostener la producción agrícola como para la restauración de ecosistemas.

Finalmente, este libro proporciona una base sólida de investigación para el desarrollo de regulaciones tanto para la producción como para el uso de compost. Las ciudades y la agroindustria generan anualmente cantidades importantes de residuos orgánicos, desde lodos provenientes del tratamiento de líquidos cloacales (biosólidos) y residuos sólidos municipales (la fracción orgánica de la basura representa habitualmente 60% de su peso o volumen total) hasta estiércoles animales y desechos de la industria alimentaria. La disposición final de estos residuos ha sido realizada por la mayor parte de los generadores sin tener en cuenta la calidad del material desechado o su impacto ambiental. Por otro lado, muchos establecimientos se podrían beneficiar del uso de compost de alta calidad: en horticultura, paisajismo, biorremediación o reforestación, particularmente si estos compost fueran evaluados con normas claras de calidad. Es imperativo que existan regulaciones basadas en la investigación existente a fin de estimular la incipiente industria de producción de compost de la Argentina y al mismo tiempo garantizar que las tierras públicas y privadas no sean afectadas por el uso de compost de baja calidad o contaminados.

El libro está organizado en 5 secciones; en la Sección 1 se presentan aspectos generales de producción, calidad y uso de compost y las demás secciones se refieren específicamente a la Argentina: la Sección 2 a experiencias de compostaje con diferentes materiales locales, la Sección 3 a ensayos de uso productivo, la Sección 4 a experiencias de remediación y restauración, y la Sección 5 a aspectos legales. La amplitud de los temas cubiertos en el libro es impresionante, desde compostaje de materiales tan diversos como biosólidos, residuos orgánicos municipales, desechos de pisciculturas, algas marinas, residuos de mataderos, sustratos para producción de hongos y residuos de la industria maderera a uso de compost en viveros, remediación de suelos contaminados con petróleo y restauración de áreas desertificadas. En varios capítulos se discuten los parámetros y procedimientos utilizados para evaluar calidad de compost, particularmente estabilidad y madurez, mostrando la variedad de procedimientos que están siendo utilizados con este fin. La última sección sobre regulaciones presenta ejemplos de algunas normas locales y normas nacionales provisorias donde se han tenido en cuenta las experiencias de investigación del país. En general, este libro representa un buen intento de sintetizar el estado del arte del conocimiento en la Argentina sobre compostaje y merece ser leído con atención.

Leslie Cooperband, Ph.D.

Profesor Adjunto

Universidad de Illinois

Champaign, E.E.U.U.

Aclaración de términos utilizados

Algunos son usados como sinónimos o términos equivalentes por los distintos autores. Para el caso de los términos *compost* y *biosólidos* se aclara cuál es su uso correcto.

- Agente estructurante = agente soporte
- Etapa mesófila = etapa mesofílica = etapa mesotérmica
- Etapa termófila = etapa termofílica = etapa termogénica
- Etapa de maduración = etapa de curado
- Fósforo asimilable = fósforo extraíble = fósforo disponible
- Fracción orgánica de los residuos municipales = fracción orgánica de los residuos domiciliarios = fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos = residuos orgánicos municipales = residuos orgánicos urbanos
- Metales pesados = elementos traza = elementos potencialmente tóxicos = PTEs = ETP
- *Compost*: se usa igual en singular y en plural (no existe “*composts*”).
- Biosólidos: se usa solo en plural (no se debe usar “biosólido”).

Índice

Índice

Sección 1. COMPOSTAJE: PRODUCCIÓN, CALIDAD Y USO

Capítulo 1

Origen del compost, proceso y compostaje y potencialidad de uso

Raúl S. Lavado

El origen del compost.....	3
El compostaje.....	6
Sistemas de producción de compost	8
Tipos de compost	10
Futuro del compostaje y del compost	10
Bibliografía	12

Capítulo 2

Indicadores de estabilidad, madurez y calidad de compost

María Julia Mazzarino, Patricia Satti y Lucía Roselli

Resumen.....	13
Introducción.....	13
Límites para elementos y orgánicos traza	14
Reducción de patógenos	17
Inertes y semillas de malezas	17
Estabilidad y madurez	18
Indicadores de calidad.....	23
Conclusiones.....	25
Bibliografía	26

Capítulo 3

Patógenos en residuos orgánicos

Liliana Semenas

Resumen.....	29
Introducción.....	29
Patógenos.....	31
Residuos y patógenos.....	39
Bioaerosoles	43
Olores y vectores	45
Conclusiones.....	49
Bibliografía	50

Capítulo 4

Aspectos legales del uso de residuos orgánicos

Francisca Laos, María Julia Mazzarino y Patricia Satti

Resumen.....	55
Introducción.....	55
Los residuos orgánicos	56
Problemas globales y acciones locales.....	57
Las regulaciones	
Estados Unidos	58
La Unión Europea.....	61
En la Argentina	62
Conclusiones.....	65
Bibliografía	65

Capítulo 5

Presencia de semillas viables en compost

Esteban Kowaljow y Santiago Varela

Resumen.....	67
Introducción.....	67
Condiciones que determinan la pérdida de viabilidad de las semillas durante el proceso de compostaje.....	68
Reglamentaciones vigentes	70
Metodologías	
Bolsas en pilas	70
Germinación, identificación y recuento de plántulas	71
Evaluación de semillas viables en compost en experiencias de restauración con enmiendas orgánicas en la Patagonia	72

Consideraciones finales	73
Bibliografía	73

Sección II. EXPERIENCIAS DE COMPOSTAJE

Capítulo 6

Compostaje de materiales de diferente origen: experiencias del Grupo de Suelos del CRUB
Patricia Satti, María Julia Mazzarino, Francisco Laos, Lucía Roselli y María Paula Crego

Resumen.....	77
Introducción.....	77
Compost de eviscerado de pescado	79
Compost de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos.....	86
Compost de estiércol de gallina con aserrín y cascarilla de arroz.....	93
Consideraciones finales	96
Bibliografía	97

Capítulo 7

Compostaje de biosólidos: 12 años de la planta de Bariloche
*María Julia Mazzarino, Patricia Satti, Francisca Laos, Lucía Roselli, María Paula Crego,
 Esteban Kowaljow, Horacio Fernández y Leonardo Poulsen*

Resumen.....	99
Introducción.....	99
Proceso de compostaje y calidad del producto final.....	100
Marco legal.....	103
Usos del compost.....	104
Consideraciones finales	104
Bibliografía	105

Capítulo 8

El compostaje aplicado a los barros cloacales primarios de la ciudad de Mar del Plata
*Elisabet Peralta, Roberto González, Gabriela von Haefen, Ana Paula Comino, Gustavo Gayoso,
 Sergio Vergara, Gastón Genga y Marcelo Scagliola*

Resumen.....	107
Introducción.....	107
Resumen de la experiencia piloto	
Objetivos	110
Metodología operativa	110
Resultados del proceso de compostaje.....	113

Lixiviados generados	118
Características físico-químicas y microbiológicas del producto final	121
Compost de invierno	122
Consideraciones finales	122
Conclusiones	123
Bibliografía	123

Capítulo 9

Compostaje y lombricompostaje de residuos biodegradables de diferentes orígenes

María Inés Sánchez de Pinto, Roberto Umbides, Paola Domínguez, Ada Albanesi y Alfredo Polo

Resumen	125
Introducción	125
Experiencias desarrolladas en Santiago del Estero	
Residuos y su tratamiento	129
Biotecnologías aplicadas a los residuos biodegradables	130
Madurez y aptitud agrícola de los compost y lombricompost	132
Consideraciones finales	137
Conclusiones	138
Bibliografía	138

Capítulo 10

Compostaje de algas marinas: experiencias y perspectivas

María Cecilia Eyra y César Mario Rostagno

Resumen	141
Introducción	141
Experiencias de compostaje	145
Calidad de compost	146
Efecto del compost sobre las propiedades de los suelos	152
Efecto del compost sobre las plantas cultivadas	154
Consideraciones finales	157
Conclusiones	157
Bibliografía	158

Capítulo 11

El compostaje para el cultivo de hongos comestibles.

Caso de estudio sobre la cáscara de girasol

Ramiro González Matute y Néstor Curvetto

Resumen	161
---------------	-----

Introducción.....	161
Un caso de estudio: contenedores para el compostaje a base de cáscara de girasol para el cultivo de hongos Agaricus	
El sistema de contenedor para el compostaje a pequeña escala.....	164
La formulación del sustrato a compostar.....	165
El procedimiento.....	165
Consideraciones finales.....	171
Bibliografía.....	173

Sección III. VALORIZACIÓN PRODUCTIVA EN LA ARGENTINA

Capítulo 12

Uso del compost en la formulación de sustratos para plantas

Lorena A. Bárbaro y Mónica A. Karlanian

Resumen.....	177
Introducción.....	177
Propiedades del sustrato.....	178
Uso de compost como sustrato.....	180
Bibliografía.....	183

Capítulo 13

Producción de flores de bordura utilizando compost de biosólidos

Raúl S. Lavado y Marta S. Zubillaga

Resumen.....	185
Introducción.....	185
Estudios de caso sobre el efecto del compost de biosólidos en las propiedades de sustratos	
Propiedades físicas.....	188
Propiedades químicas.....	189
Respuesta de <i>Petunia hybrida</i> y <i>Vinca</i> sp.....	190
Conclusiones.....	193
Bibliografía.....	193

Capítulo 14

Producción de plantines de arbóreas nativas. Experiencias con ciprés de la cordillera

Graciela Namiot, Gustavo Basil, M. Dolores de Errasti

Resumen.....	195
Introducción.....	195
Experiencias en el Colegio Agrotécnico N° 717.....	197

Experiencias en el campo forestal Gral. San Martín del INTA.....	202
Experiencias de supervivencia de plantines de ciprés en ensayos de restauración	204
Conclusiones.....	206
Bibliografía	206

Capítulo 15

Efectos del compost y lombricompost de residuos domiciliarios y de matadero en el suelo y la productividad y calidad del algodón

Ada Albanesi, Analia Anriquez, Fernando Garay, Mario Mondino, María Inés Sánchez de Pinto y Alfredo Polo

Resumen.....	209
Introducción.....	209
Materiales y métodos	210
Resultados y discusión	
Efecto de una aplicación de los dos tipos de compost.....	212
Efecto de una aplicación de los dos compost + <i>Melilotus albus</i>	214
Conclusiones.....	219
Bibliografía	219

Capítulo 16

Elementos potencialmente tóxicos en compost y sustratos con biosólidos

Raúl S. Lavado y Marta S. Zubillaga

Resumen.....	221
Introducción.....	221
Estudios locales sobre el contenido de PTEs en compost de biosólidos y sustratos conteniendo biosólidos	223
Conclusiones.....	228
Bibliografía	228

Capítulo 17

Fitotoxicidad con compost de biosólidos

Marta S. Zubillaga y Raúl S. Lavado

Resumen.....	231
Introducción.....	231
Efecto de PTEs utilizando lechuga como planta indicadora	232
Experimento de ecotoxicidad durante el proceso de compostaje	234
Conclusiones.....	237
Bibliografía	238

Sección IV. ESTUDIOS DE RESTAURACIÓN CON COMPOST EN LA ARGENTINA

Capítulo 18

Restauración de ecosistemas naturales. Estudio de caso en la estepa patagónica
con compost de biosólidos y residuos orgánicos urbanos

Esteban Kowaljow y María Julia Mazzarino

Resumen.....	243
Introducción.....	243
Materiales y métodos.....	244
Resultados.....	247
Conclusiones.....	255
Bibliografía.....	255

Capítulo 19

Remediación de suelos contaminados con hidrocarburos de petróleo

Fancisca Laos, María Julia Mazzarino, Lucía Roselli y Patricia Satti

Resumen.....	257
Introducción.....	257
Experiencias con biopilas utilizando ROU, estiércol de gallina y compost de biosólidos.....	259
Experiencias con biopilas utilizando orujo y lombricompost de manzana frente a fertilización inorgánica.....	265
Efecto de las sales versus hidrocarburos en el crecimiento vegetal.....	266
Conclusiones.....	268
Bibliografía.....	268

Capítulo 20

Uso de compost de biosólidos en la remediación de suelos

Agustina Branzini y Marta Susana Zubillaga

Resumen.....	271
Introducción.....	271
Remediación: reducción de riesgos ambientales por estabilización de PTEs.....	272
Estudios de casos.....	273
Conclusiones.....	279
Bibliografía.....	279

Sección V. ALGUNAS EXPERIENCIAS CON NORMAS

Capítulo 21

Gestión municipal para el manejo de barros cloacales generados en la planta de tratamiento de San Carlos de Bariloche (1996-1999)

Carlos Alberto Yacovella

Resumen.....	285
El problema ambiental.....	285
Los contextos legal, social y ambiental.....	286
Las soluciones.....	286
Los resultados.....	287
El presente y el futuro.....	288
Conclusiones.....	288
Bibliografía.....	288

Capítulo 22

Normas sobre utilización de residuos orgánicos en la Argentina

Normas del SENASA

Decreto Reglamentario provisorio sobre utilización de compost de biosólidos y residuos orgánicos urbanos (1999)..... 289

Reglamento para el Registro de Fertilizantes y Enmiendas (2011)..... 293

Normas del Ministerio de Desarrollo Social y Medio ambiente (2001)

Reglamento para el manejo sustentable de barros generados en plantas de tratamiento de efluentes líquidos..... 333

Normas del IRAM..... 349

Sección I

Compostaje: producción, calidad y uso

1. Origen del compost, proceso de compostaje y potencialidad de uso
2. Indicadores de estabilidad, madurez y calidad del compost
3. Patógenos en residuos orgánicos
4. Aspectos legales del uso de los residuos orgánicos
5. Presencia de semillas viables en compost

Origen del compost, proceso de compostaje y potencialidad de uso

1

Raúl S. Lavado¹

¹INBA-CONICET, Facultad de Agronomía-UBA. Buenos Aires, Argentina. lavado@agro.uba.ar

El compostaje es considerado el mejor método para aprovechar en la agricultura y el paisajismo, barros, lodos y residuos de distintos orígenes y calidades. Este proceso elimina patógenos, semillas de malezas y los problemas de inestabilidad de sustancias orgánicas. También se registra disminución variable de contaminantes orgánicos (PAH, PCBs, PCDD/F y algunos pesticidas) y reducción en la biodisponibilidad de metales pesados. Se trata de un producto estable, sin olor, sin patógenos y con alto valor agregado (National Research Council, 1996).

El vocablo compost se originó a partir del francés antiguo “composte” el que, a su vez, proviene del latín “componere” que en español significa “juntar”. De aquí que el compost puede ser considerado como la agrupación de un conjunto de residuos orgánicos que, a través de un proceso de descomposición, origina un nuevo producto. Los residuos, en su acepción más sencilla y general, son partes que quedan de un todo que ha sufrido un proceso de transformación natural o artificial, que pudo o no modificar sus características físico-químicas y estructurales iniciales. En términos estrictamente físicos, los residuos son consecuencia de la transformación de la materia y la energía. En el caso específico de los residuos agrícolas, se definen como todo material sobrante o desperdiable generado en un establecimiento agropecuario. Existe un vínculo entre residuos urbanos y rurales desde hace miles de años, ya que desde el comienzo de la civilización y con la instalación de los primeros tipos y niveles de agrupaciones humanas, han existido ambos tipos de residuos y, de una manera u otra, su gestión y tratamiento (Epstein, 1997).

El compost surge de la combinación de varios factores físicos, químicos y biológicos, como muestra la Figura 1-1, que actúan a través del tiempo.

EL ORIGEN DEL COMPOST

No se conoce una fecha que pueda ser considerada como el punto de inicio de la utilización de los restos orgánicos en agricultura, si bien se sabe que rápidamente se diferen-

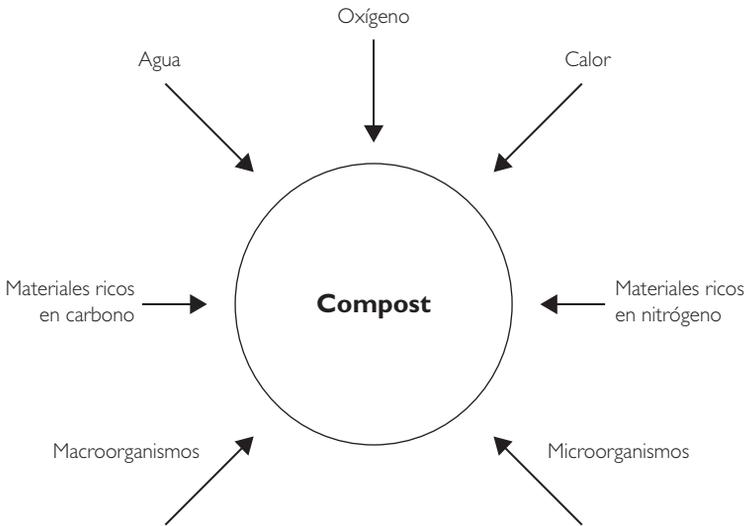


Figura 1-1. Factores determinantes de la producción de compost.

ciaron las visiones que se tenían en medios rurales y medios urbanos acerca de ellos. En el ámbito rural prontamente se los consideró un recurso y se aprovecharon con diferente intensidad los restos orgánicos provenientes de actividades humanas y agropecuarias.

En los asentamientos urbanos, en cambio, los residuos eran considerados un problema y durante milenios se los sacó fuera de las murallas con la idea de deshacerse de ellos. Sin embargo, se sabe que hubo asentamientos humanos muy primitivos que cavaban pozos en el suelo para enterrar los residuos que generaban. Este sistema se mantuvo en las antiguas civilizaciones, como la de los sumerios y los griegos, y es el origen de los vertederos (Epstein, 1997). Ambos procedimientos se continuaron con algunas variantes en diferentes civilizaciones antiguas.

Por otro lado, en la ciudad de Roma del emperador Augusto, se recogían los residuos orgánicos que pasaban a ser utilizados en agricultura. Esa metodología continuó a lo largo de los siglos y está registrado que en la ciudad de Florencia del siglo XV, los campesinos que entraban en la ciudad por las mañanas trayendo productos del campo en sus carros, retiraban al atardecer todos los restos orgánicos urbanos (residuos domésticos, excrementos de animales y humanos y restos de los productos traídos a la mañana), para utilizarlos en sus campos. Con esto se apuntaba a resolver el problema sanitario de los residuos generados, así como los olores y el impacto visual. No existían conocimientos para un manejo estandarizado y las técnicas utilizadas eran procesos incompletos e inseguros. Debido a la descomposición incontrolada con períodos de anaerobiosis, normalmente el material resultante no llegaba a niveles de calidad adecuada, pero se conseguía transformar a los residuos en productos más manejables y aprovechables como abonos y mejoradores de suelos (Diaz *et al.*, 2007; Epstein, 1997).

Este procesamiento de residuos orgánicos de distinto origen no conducía al compost. Las primeras referencias al desarrollo de técnicas primitivas de compostaje se registran en China, India y Japón, hace unos 4.000 años. Luego, el contacto entre pueblos y civilizaciones a través de invasiones y conquistas, fueron transmitiendo estas técnicas hacia otras áreas, entre ellas Europa. Lucio Columela en “Los doce libros de agricultura” (año 42 de nuestra era) describió cómo “la aplicación de agua a mezclas apiladas de residuos de cosecha con excrementos animales producía calor y transformaba esa mezcla en un producto diferente, un abono orgánico”. Existen, también, referencias de autores árabes del siglo XI y la primera cita escrita del proceso de compostaje está fechada en 1182, aparentemente escrita por un caballero Templario. En este texto se describe el proceso de compostaje, ofreciendo distintas recetas según los componentes utilizados y considerando el tamaño de las partículas, la humedad y el tiempo. También Moses Maimónides (1135-1204) escribió sobre estos productos orgánicos, así como autores italianos y franceses del siglo XVII. En EEUU se señala que su primer presidente, George Washington, fue el primer compostador del país. En el siglo XIX comenzaron a desarrollarse investigaciones científicas y tecnológicas en el área del compostaje y la primera tesis doctoral sobre la aplicación del compost se llevó a cabo en Alemania en 1892 (Diaz *et al.*, 2007; Epstein, 1997).

Quien dio un paso trascendental en este tema fue Sir Albert Howard, científico inglés que trabajó entre 1905 y 1931 como investigador, asesor y finalmente, director de un instituto de investigación agrícola en la India. Howard consideraba que la fertilidad de los suelos pasaba por el reciclaje de todos los residuos orgánicos y durante su período en la ciudad de Indore (1924-1931), en la región central de la India, ideó un proceso para producir compost al que denominó “Proceso Indore”. La primera descripción del método apareció en su libro “The Waste Products in Agriculture” (1931) y posteriormente fue mejorada. Los principios fueron la mezcla de los residuos, la neutralización de la acidez si fuera necesario, y permitir que los microorganismos responsables del proceso se encontraran en las mejores condiciones. El sistema original de Howard se realizaba en superficies alisadas o zanjas, durante tres meses con dos volteos y riego periódico (National Research Council, 1996).

El método se propagó rápidamente por todo el mundo y en el mismo año de la publicación del libro se construyó en Holanda la primera planta industrial de compostaje sobre la base “método Indore”. En 1937 aparece en Dinamarca el primer sistema de compostaje cerrado; para ese año, el libro de Howard ya tenía varias traducciones, incluyendo al español. Sin embargo, el compostaje perdió fuerza y se mantuvo durante muchos años como un sistema de minorías que lo consideraban la panacea del tratamiento de todo tipo de residuos. Además, existían problemas científicos no resueltos, por ejemplo, la idea que una fase del proceso debía ocurrir en ausencia de oxígeno. Esta falta de conocimiento del proceso limitó su adopción, a lo que se sumó que en los residuos, especialmente los urbanos, comenzaban a aparecer problemas nuevos: plásticos no degradables, sustancias orgánicas de difícil biodegradación y metales pesados, que redujeron drásticamente las posibilidades comerciales del compostaje.

Los siguientes avances fueron desarrollados en los Estados Unidos y se refirieron principalmente al control del proceso, en parámetros tales como contenido de oxí-

geno y temperatura de la pila. El primer desarrollo se llevó a cabo en el USDA de Beltsville, Maryland, para el tratamiento de lodos de plantas depuradoras. Se trabajó con el manejo de la ventilación de aire, lo que fue un paso muy importante pues fue la primera vez que se pudo manejar y controlar uno de los factores clave del proceso. El segundo desarrollo se llevó a cabo en la Universidad de Rutgers (New Jersey) y su principal característica fue el sistema de control de temperatura de la masa. Ambos sistemas marcaron un punto de inflexión en la historia del compostaje, ya que se sumaron a un conocimiento exponencial de las causas del proceso y abrieron camino a la tecnología moderna del compostaje. De esa manera, comenzaron a aparecer sistemas cada vez más complejos y tecnológicamente sofisticados, con traspaso de tecnologías desde otras industrias (National Research Council, 1996).

EL COMPOSTAJE

Como se dijo, el compost es el producto resultante de la transformación mediada por microorganismos de material orgánico procedente de distintas fuentes. Los carbohidratos son fácilmente atacables por los microorganismos y constituyen la base de las transformaciones que tienen lugar durante el proceso de compostaje (a menor peso molecular, mayor la facilidad de descomposición microbiana). Los compuestos orgánicos con otras estructuras, como grasas, ceras, ligninas, etc., suelen ser de más difícil descomposición. El proceso se puede simplificar considerando que la degradación de la materia orgánica, llevada a cabo por microorganismos, se representa por la siguiente ecuación (de Bertoldi, 1987):



La cinética de evolución del carbono se puede ajustar a una exponencial

$$C = C_0 * e^{-kt} \quad \text{donde } C = \% \text{ peso seco de C y } t = \text{ tiempo días}$$

Las pérdidas de amoníaco por volatilización en el proceso de compostaje son importantes alcanzando en algunos casos valores del 16% del N inicial de la mezcla (Zubillaga *et al.*, 2004).

El proceso de compostaje se suele dividir en etapas, períodos o fases, según los autores (Haug, 1993). Generalmente se reconocen cuatro etapas principales: etapa mesófila, etapa termófila, segunda etapa mesófila y etapa maduración (Fig. 1-2).

Un somero detalle de las etapas es el siguiente (Insam *et al.*, 2002; Moreno y Moral, 2008):

- **Etapla inicial:** algunos autores la consideran como la etapa que transcurre desde la conformación de la pila hasta que se constatan incrementos de temperatura con respecto a la temperatura del material inicial. Esta etapa es notoria cuando el material ingresa fresco al compostaje, en cambio, si el material tiene ya un tiempo de acopio puede pasar inadvertida. La diferencia se debe a la presencia de compuestos

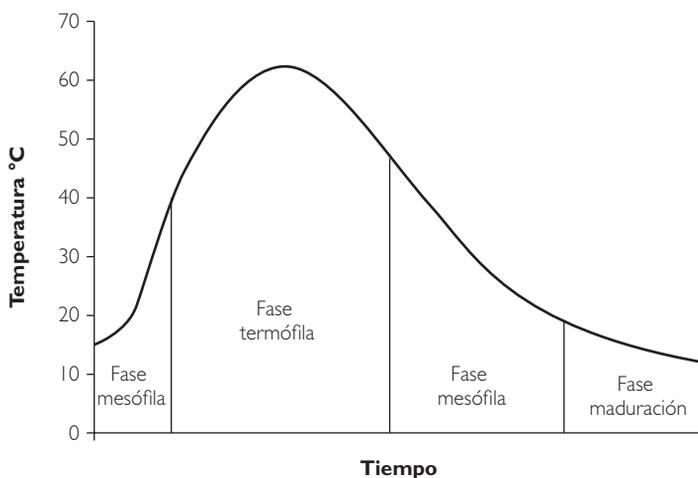


Figura 1-2. Síntesis de las fases de la producción de compost con énfasis en los cambios de temperatura.

carbonados de bajo peso molecular y, por lo tanto, rápidamente atacables por los microorganismos. La duración de esta etapa varía entre 24 y 72 horas dependiendo de la relación C/N, el pH, la concentración parcial de oxígeno, la temperatura ambiente y la carga microbiana.

- **Etapa mesófila o mesotérmica:** se caracteriza por temperatura entre 10-45 °C, oxidación aeróbica de compuestos carbonados por microflora mesófila (bacterias y hongos), nitrificación y oxidación de compuestos reducidos de azufre. La actividad metabólica y la falta de disipación del calor incrementan paulatinamente la temperatura y, consecuentemente, la microflora termófila, que se encuentra en estado latente en los residuos. La duración de esta etapa es variable y depende de numerosos factores siendo particularmente sensible a las condiciones de humedad y aireación.
- **Etapa termófila o termogénica:** el rasgo diferencial de esta etapa es su alta temperatura (45-75 °C). La microflora mesófila es sustituida por la termófila y normalmente en esta etapa se eliminan los patógenos mesófilos, hongos, esporas, semillas, larvas de insectos y la mayoría de los compuestos u organismos indeseables. A medida que se agotan los compuestos degradables y aumenta la proporción de CO₂ se produce la disminución de la flora termófila interviniente. Esta etapa es crítica para la higienización del material, por lo que se ha regulado la temperatura mínima a alcanzar y su duración.
- **Segunda etapa mesófila:** esta fase comienza con el descenso de la temperatura, que se sitúa por debajo de los 40 °C. En esta etapa se desarrollan nuevamente microorganismos mesófilos que utilizan los materiales más resistentes a la biodegradación, tales como restos de celulosa y lignina.

- **Etapa de maduración:** la temperatura desciende hasta valores muy cercanos a la temperatura ambiente. En esta etapa se producen reacciones secundarias de condensación y polimerización que llevan a la formación de sustancias del tipo de las sustancias húmicas y se degradan sustancias fitotóxicas. Su duración depende de numerosos factores y al final el material se presenta estable biológicamente y se da por culminado el proceso. Desde el punto de vista microbiológico, la finalización del proceso de compostaje se caracteriza por el descenso de la actividad metabólica. Las características del compost se diagnostican a través de diversos parámetros (ver Capítulo 2).

SISTEMAS DE PRODUCCIÓN DE COMPOST

Existe un gran número de sistemas de producción, que se simplifican en la Figura 1-3. El uso de estos sistemas de producción no depende sólo del conocimiento del proceso o de las materias primas disponibles o del tipo de comercialización. La viabilidad técnica y económica de un proyecto y el uso de tecnología que se haga es un complejo equilibrio que depende del tipo de productor de compost, del destino de este compost y de la localización de la planta de compostaje. La Figura 1-4 simplifica toda esta problemática en base a tres tipos de productores: (i) el productor agropecuario que composte sus propios residuos para uso propio y eventualmente, para venta; a este tipo de producción puede sumarse la efectuada a nivel hogareño; (ii) las instituciones oficiales o de servicios, ejemplificados en la Municipalidad, que maneja volúmenes y objetivos distintos a la categoría previa; en este caso, una parte sustancial del compost producido tiene objetivos paisajísticos y (iii) las empresas cuya actividad es la producción comercial de compost, generalmente para fines productivos (Haug, 1993; Moreno y Moral, 2008).

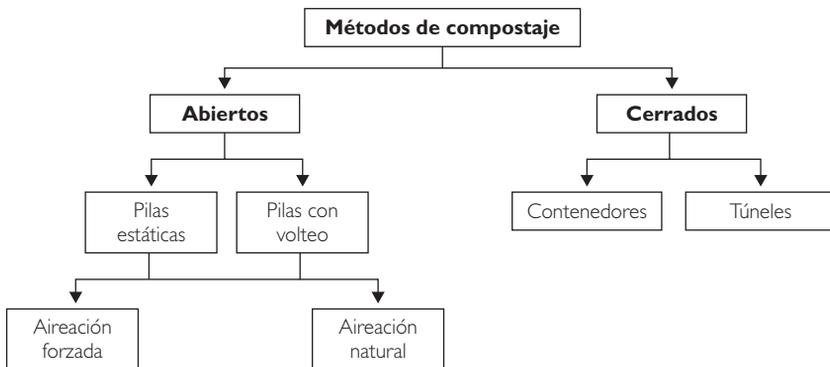


Figura 1-3. Simplificación de los métodos de compostaje.

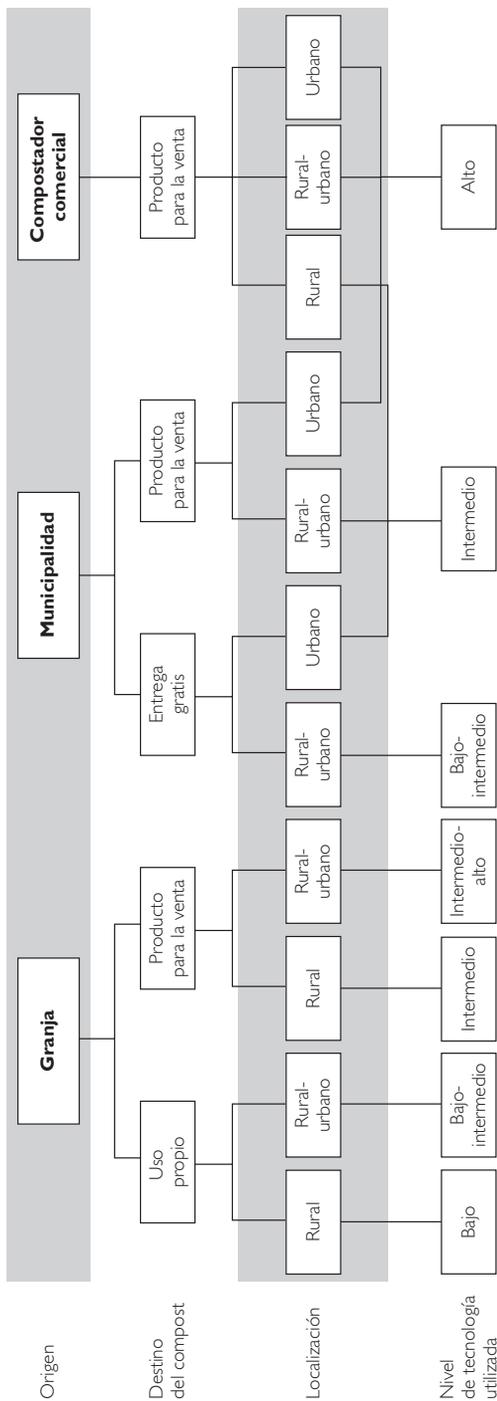


Figura 1-4. Diagrama de flujo de los distintos actores en la producción de compost, tipo de comercialización, localización y nivel tecnológico.

TIPOS DE COMPOST

Los materiales que dan origen a los compost son muy diversos y se pueden destacar los procedentes de barros o lodos de plantas depuradoras de agroindustrias o líquidos cloacales, residuos municipales en bruto, la fracción orgánica de esos residuos municipales, restos vegetales de producción agrícola y forestal, residuos ganaderos, residuos de las agroindustrias, etc. Cada materia prima tiene características propias, lo que obliga a realizar pretratamientos en algunos casos y distintos tipos de mezclas, para asegurar el funcionamiento del proceso de compostaje y también la calidad del compost (Haug, 1993).

Por motivos económicos o de espacio, no siempre se tienen en cuenta las diferencias entre los diversos materiales. Esto provoca problemas en el funcionamiento de las instalaciones o falta de calidad en el producto final para distintos usos, pudiendo conducir, en casos extremos, al rechazo del compost. También hay que tener en cuenta la composición del material de origen para dar cumplimiento a las legislaciones, en lo que respecta a nutrientes, contaminantes, etc. (Haug, 1993). En la Tabla 1-1 se presenta una valoración general de compost de distinto origen, que muestra porqué no todos los compost son adecuados para los mismos usos. El desconocimiento de este hecho por parte de los usuarios perjudica su comercialización.

Tabla 1-1. Valoración de distintos parámetros de compost obtenidos a partir de materias primas de distinto origen, a grandes rasgos.

Material	pH	CE	MO	Estabilidad	Nutrientes	Contaminantes	Índice germinación	Aspecto/olor
Estiércoles en general	R - I	R - I	B	B - R	B	B	R	B - R
Residuos forestales	B	B	B	B	I	B	B	B
Residuos cultivos (RC)	B	B	B	B	R - I	B	B	B
Barros cloacales + RC	B - R	B	B	B	B	R - I	B	B
Residuos municipales (RM)	B - R	I	R - I	R - I	R - I	I	I	R - I
Fracción orgánica de RM	B - R	R	B	B	B - R	B - R	B - R	B

CE= conductividad eléctrica, MO= materia orgánica
Valoración: Bueno: B; Regular: R; Insuficiente: I

FUTURO DEL COMPOSTAJE Y DEL COMPOST

Al presente existe la necesidad de gestionar la gran cantidad de residuos orgánicos generados y aprovechar ese material principalmente para producir alimentos. El futuro del compostaje y del compost no puede desligarse de la gestión de los residuos en

general y de los tratamientos a aplicar, ya que debe considerarse que pueden coexistir distintos sistemas de tratamiento. Debe tenerse en cuenta que hay que seleccionar el sistema más adecuado para cada situación concreta, considerando los balances ambientales y económicos más convenientes (National Research Council, 1996).

En general, puede decirse que los aspectos tecnológicos son conocidos y sólo cabe esperar avances continuos en el tema. Desde el punto de vista científico un área de preocupación creciente es el estudio de la presencia de antibióticos, hormonas de crecimiento y otros compuestos de uso en salud humana y animal, en estiércoles, barros en general y barros cloacales en particular, inclusive en compost. En la Argentina, la carencia más grande en el tema de compostaje se refiere a la ordenación legal debido a la carencia de leyes y regulaciones sobre uso beneficioso de residuos orgánicos. Sin embargo, a nivel mundial existen leyes y resoluciones, y ejemplos de cómo distintos países fueron evolucionando en estos aspectos, que pueden servir de base para resolver nuestras falencias (ver Capítulo 4). Las causas de nuestras limitaciones son variadas y se requiere un esfuerzo entre distintos actores, para superar la limitación existente.

En la II International Conference on Soil and Compost Eco-Biology, desarrollada en Tenerife en 2008, se estableció que el compostaje tendrá futuro si:

- Se ajustan las instalaciones de compostaje, las que deben tratar residuos con el objetivo de fabricar compost, primando los fundamentos biológicos del compostaje frente a otros conceptos (las nuevas tecnologías y maquinarias son sólo herramientas en el proceso).
- Se establecen claramente los objetivos del compostaje. Esto incluye las características mínimas a exigir a los materiales de entrada, las condiciones sanitarias e higiénicas de las instalaciones y los controles de emisiones.
- Se garantiza el cumplimiento de las condiciones anteriores, mediante la aplicación de adecuados controles.
- Se informa a la sociedad de los problemas derivados de la generación excesiva de residuos y que el compostaje no es la salida para todo tipo de residuos sólidos o líquidos.
- Se definen las condiciones mínimas para que un producto pueda denominarse compost, estableciendo a su vez las diferencias que existen entre distintos orígenes para poder aconsejar su uso más adecuado. Se pueden ofertar materiales con distintos grados de estabilidad en función del uso previsto, pero siempre que hayan alcanzado un mínimo estado de madurez.
- Se facilita la divulgación de las características del compost, estableciendo parámetros mínimos para cumplir e informar.
- Se clarifican y diferencian las instalaciones de compostaje de aquellas que simplemente estabilizan la materia orgánica, para poder destinarlas a un destino final, con la mínima afectación ambiental.
- Se evita, o incluso se prohíbe, asignar el nombre de compost a productos que proceden del tratamiento de residuos que no cumplen requisitos mínimos o que no han recibido el tratamiento de compostaje correcto.

- Se facilita la formación de técnicos involucrados en este tema, ya sean de la administración pública o de empresas que participen en distintas etapas de la gestión.
- Se sitúa el compost como un producto competitivo en el mercado de fertilizantes orgánicos ofreciendo a los usuarios una información adecuada sobre su uso y aplicación. Hay que garantizar la suficiente regularidad en las características del producto, para satisfacer las necesidades y vencer las reticencias potenciales.
- Se divulgan las ventajas de los tratamientos biológicos de los residuos orgánicos con participación de la sociedad
- Se evita o reduce la competencia entre compost de distintos orígenes.

Para finalizar, los aspectos a considerar en el futuro del compost, se basan en el concepto de que los residuos pueden ser un recurso y que su gestión sustentable significa compromiso e interacción entre entorno, economía y sociedad. Para ello se deben gestionar los residuos para un destino o un tratamiento adecuado, considerando globalmente la generación, acopio, transporte y tratamiento. Esto no es sencillo, ya que intervienen diversos actores en la toma y cumplimiento de las decisiones, por eso, deben sumarse esfuerzos y crear sinergias beneficiosas para todos (Díaz *et al.*, 2007).

BIBLIOGRAFÍA

- de Bertoldi, M.; Ferranti M.P.; L'Hermite P. y Zucconi F.** 1987. Compost: Production, Quality and Use. Elsevier Applied Science, Londres, Inglaterra. 870 pp
- Díaz, L.F.; de Bertoldi M. y Bidlingmaier, W.** 2007. Compost Science and Technology. Elsevier Science, Amsterdam, Holanda. 380 pp.
- Epstein, E.** 1997. The Science of Composting. CRC Press, EEUU. 504 pp.
- Haug, R.T.** 1993. Practical Handbook of Compost Engineering. Lewis Publishers, EEUU. 717 pp.
- Insam, H.; Riddech N. y Klammer S. (eds.)** 2002. Microbiology of Composting. Springer Verlag, Heidelberg, Alemania. 644 pp.
- International Conference on Soil y Compost Eco-Biology.** 2008. Proceedings of the II Int. Conf. Soil and Compost Eco-Biology. Tenerife, España.
- Moreno, J. y Moral R.** 2008. Compostaje. Ed. Mundi-Prensa, Madrid, España. 570 pp.
- National Research Council.** 1996. Use of Reclaimed Water and Sludge in Food Crop Production. National Academic Press. Washington D.C., EEUU. 178 pp.
- Zubillaga, M.S.; Civeira G.; Rimski-Korsakov H. y Lavado R.S.** 2004. Las pérdidas de amoníaco durante el compostaje de biosólidos y su posible impacto ambiental. *Ingeniería Sanitaria y Ambiental* 77: 88-90.

Indicadores de estabilidad, madurez y calidad de compost

2

María Julia Mazzarino^{1,2,3}, Patricia Satti^{1,3} y Lucía Roselli¹

¹Grupo de Suelos del CRUB (Universidad Nacional del Comahue), ²CONICET,

³Universidad Nacional de Río Negro, Bariloche, Argentina.

mazzarinomj@comahue-conicet.gob.ar

RESUMEN

El compostaje es un proceso biooxidativo controlado que involucra un sustrato orgánico heterogéneo, una etapa termofílica de reducción de patógenos y semillas de malezas, y una etapa de maduración de degradación de sustancias fitotóxicas, que finaliza en un producto estable, inocuo e "inodoro". Los términos estabilidad y madurez se usan muchas veces de manera indistinta, a pesar de que se refieren a aspectos diferentes: la estabilidad, a la degradabilidad de la materia orgánica remanente y la madurez, a la finalización del proceso en un producto sin sustancias fitotóxicas. La calidad se refiere generalmente al "valor agronómico" para diferentes usos. La tendencia mundial es usar indicadores económicos y fáciles de analizar en laboratorios comunes de suelo y vegetación. Entre los indicadores de estabilidad más utilizados figuran: temperatura, consumo de O₂, producción de CO₂, carbono soluble en agua (CSA) y relación CSA/N total, mientras que para madurez se recomienda amonio, relación amonio/nitratos, índice de germinación y test rápidos de crecimiento vegetal. La calidad agronómica de los compost se evalúa a través de parámetros relacionados con su valor como enmienda (mejorador del suelo) y como fertilizante (aumento del rendimiento vegetal). Entre los más utilizados figuran pH, conductividad eléctrica, materia orgánica, relación C/N, nutrientes totales y disponibles, humedad, densidad, tamaño de partículas, porosidad, capacidad de retención de agua, capacidad de degradabilidad y de liberación de nutrientes, biomasa microbiana, actividad enzimática y ensayos con plantas. Los compost presentan características diferentes dependiendo de los materiales originales, lo que se refleja en sus efectos en el suelo y sus posibilidades de uso. Mientras que es factible establecer indicadores de estabilidad y madurez para compost de diferentes materiales originales, las exigencias de calidad agronómica deberían enfocarse en las posibilidades de uso. Sería muy importante que las normas que contemplan estos diferentes aspectos a nivel nacional tengan en cuenta la combinación de indicadores sencillos y confiables, a fin de no desalentar el aprovechamiento de los residuos orgánicos en el país o "promover" su utilización sin controles.

INTRODUCCIÓN

La experiencia de la humanidad en el uso de residuos orgánicos se remonta a milenios, pero recién en las últimas décadas la degradación continua de los suelos y la acumulación

exponencial de residuos han conducido al uso intensivo de los mismos como fuentes de materia orgánica para minimizar erosión, de nutrientes para reemplazar fertilizantes sintéticos (especialmente de P, de disponibilidad natural limitada), y como alternativa para reducir la disposición final en vertederos (cara y limitada por espacio) o incineración (riesgo para el medio ambiente) (Schulz y Röemheld, 1997). El compostaje es la forma de manejo de residuos más recomendada a nivel mundial, pero aún existe confusión respecto al uso de términos como compostaje, estabilidad o madurez. Debe tenerse en cuenta que hasta 1985 estos conceptos, así como los métodos para analizarlos, eran prácticamente desconocidos (Brinton, 2000). Es en este marco que surge la necesidad de establecer definiciones de procesos e indicadores que faciliten la comprensión de aquellos que se inician en el tema, la comunicación entre los que ya están trabajando y la elaboración de normas que regulen la utilización racional de los residuos orgánicos en la Argentina.

Las definiciones clásicas de compostaje consideran que este proceso consiste en la transformación de materiales orgánicos crudos en un producto con valor agrícola: se origina en un material orgánico que pasa por una etapa termofílica, durante la cual se produce la reducción de patógenos y de semillas de malezas, y otra etapa de maduración durante la cual se degradan sustancias fitotóxicas, finalizando en un producto inocuo, que no atrae vectores (“inodoro”) y que contiene nutrientes y materia orgánica estable, de lenta liberación de N (Zucconi y de Bertoldi, 1987; Costa *et al.*, 1991; USEPA, 1993). A esta definición clásica, las normas regulatorias de los países del Hemisferio Norte y Australia han agregado algunas limitaciones del material original (por ejemplo, elementos orgánicos traza potencialmente tóxicos, contenido de material inerte), que no son modificadas por el proceso de compostaje (o muy poco).

Por lo tanto, en base a la definición de compostaje y a los posibles contaminantes de los residuos orgánicos, la calidad del compost depende, en primer lugar, del cumplimiento de “criterios ambientales precautorios” (Siebert, 2007), que incluyen valores límites de elementos orgánicos traza, patógenos, semillas viables de maleza, estabilidad de la materia orgánica y ausencia de sustancias fitotóxicas (madurez). Una vez cumplimentados estos criterios, el concepto de calidad se focaliza en el valor agronómico, esencialmente en su valor como enmienda (mejorador de suelo) o fertilizante (aumento del rendimiento vegetal).

El objetivo de este capítulo no es ofrecer un detalle exhaustivo de los indicadores existentes, sino presentar aquellos más recomendados a nivel mundial, y la base conceptual de su utilización.

LÍMITES PARA ELEMENTOS Y ORGÁNICOS TRAZA

Los elementos traza son comúnmente denominados “metales pesados”, si bien algunos de ellos no son metales (selenio), otros son metaloides (arsénico, boro) y la definición de “pesado” es poco clara. En general, se habla de metales con una densidad relativamente alta ($> 5-6 \text{ g/cm}^3$) o peso atómico mayor que el del hierro (en el caso del cromo esto no se cumple), que son tóxicos a bajas concentraciones. Sin embargo, varios son micronutrientes esenciales para las plantas (Cu, Zn, Mo, Mn, Ni) y los animales (Mn, Cu, Zn, Co), y su deficiencia limita la producción agropecuaria en

muchos lugares del mundo (Alloway, 1995). Otra forma de denominarlos, de mayor aceptación actual, es “elementos potencialmente tóxicos” o PTEs de las siglas en inglés; de manera similar, los orgánicos traza son denominados “contaminantes orgánicos persistentes” o POPs (Gómez Palacios y Estrada de Luis, 2005).

En ambos casos, son limitaciones básicas que originalmente se establecieron para lodos cloacales (definidos como “biosólidos” cuando han tenido algún tipo de tratamiento y cumplen con las normas establecidas para su uso beneficioso, USEPA, 2003), y luego se extendieron a otros residuos orgánicos de diferente origen. En algunos casos se analizan en el material original antes del compostaje, como por ejemplo, biosólidos (USEPA, 1993), ya que se trata de material homogéneo que se aplica muchas veces al suelo sin compostar. En el caso de materiales muy heterogéneos como la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos, en general se miden al final del proceso de compostaje. Actualmente, varios países regulan la concentración de elementos traza en el producto final independientemente del origen, si bien se tiende a mantener separadas las regulaciones sobre lodos cloacales del resto de los residuos orgánicos (ver AbfKlärV, 1992; BioAbfV, 1998; AFNOR, 2002, 2005; BOE, 2005).

Las normas europeas han sido siempre mucho más estrictas que las norteamericanas respecto a los límites establecidos para PTEs, si bien regulan menos elementos (Tablas 2-1 y 2-2). Mientras los europeos se han basado en “principios de precaución”, los norteamericanos han utilizado “estimaciones de riesgo”, que han conducido aparentemente a valores demasiado permisivos (Brinton, 2000). Además de la concentración de PTEs, se regula la carga máxima admitida en el suelo, la carga anual, y los europeos establecen diferentes límites en base al pH del suelo (Tablas 2-1 y 2-2). Actualmente, algunos países europeos también regulan diferentes clases de compost según la concentración de PTEs, con el objetivo de aplicar los valores más estrictos a productos de uso en horticultura (Tabla 2-3).

Tabla 2-1. Límites de elementos potencialmente tóxicos (PTEs o metales pesados) en biosólidos según la regulación de la USEPA (1993).

	Concentración máxima (mg/kg)	Carga máxima (kg/ha)	Concentración alta calidad (mg/kg)	Carga anual (kg/ha/año)
As	75	41	41	2,0
Cd	85	39	39	1,9
Cu	4.300	1.500	1.500	75
Pb	840	300	300	15
Hg	57	17	17	0,85
Mo	75	18	18	0,90
Ni	420	420	420	21
Se	100	100	100 ^a	5,0
Zn	7.500	2.800	2.800	140

Todos los valores se refieren a sólidos secos. El Cr no es incluido por haber sido eliminado *a posteriori* de la reglamentación de 1993.

^aEl límite de Se cambió de 36 a 100 mg/kg (USEPA, 1999).

Tabla 2-2. Límites de PTEs en biosólidos y suelos establecidos por la Unión Europea en la normativa vigente (Council Directive, 1986) y en la modificación propuesta (adaptado de Gómez Palacios y Estrada de Luis, 2005).

	Normativa vigente			Borrador propuesto			
	Lodos (mg/kg)	Suelos (mg/kg) ^a	Suelos (kg/ha/año)	Lodos (mg/kg)	Suelos por pH (mg/kg)		
					5-7	6-7	> 7
Cd	20-40	1-3	0,15	10	0,5	1	1,5
Cu	1.000-1.750	50-140	12	1.000	20	50	100
Ni	300-400	30-75	3	300	15	50	70
Pb	750-1.200	50-300	15	750	70	70	100
Zn	2.500-4.000	150-300	30	2.500	60	150	200
Hg	16-25	1-1,5	0,1	10	0,1	0,5	1
Cr	–	–	–	1.000	30	60	100

Todos los valores se refieren a sólidos secos. ^aValores correspondientes a suelos de pH 6-7; se admiten valores hasta 50% más altos para suelos de pH > 7.

Tabla 2-3. Límites de PTEs en compost de diferente origen según algunas normas europeas (BioAbfV, 1998; AFNOR, 2005; BOE, 2005).

	Norma española			Norma francesa	Norma alemana	
	Clase A	Clase B	Clase C		Categoría I	Categoría II
Cd	0,7	2	3	3	1,5	1
Cu	70	300	400	300	100	70
Ni	25	90	100	60	50	45
Pb	45	150	200	180	150	100
Zn	200	500	1.000	600	400	300
Hg	0,4	1,5	2,5	2	1	0,7
Cr	70	250	300	120	100	70
As	–	–	–	18	–	–
Se	–	–	–	12	–	–

Todos los valores se refieren a mg/kg de sólidos secos.

En el caso de los contaminantes orgánicos, el primer país en establecer límites fue Alemania en lodos cloacales (AbfKlärV, 1992; Düring y Gäth, 2002). Actualmente se han propuesto límites para lodos y compost que formarían parte de las nuevas directivas de la Unión Europea (Tabla 2-4). Generalmente, los contaminantes más estudiados y regulados pertenecen al grupo de los PAHs (hidrocarburos policíclicos aromáticos), PCBs (bifenilos policlorados), dioxinas (dibenzodioxinas policlorinadas) y furanos (dibenzofuranos policlorinados). En EEUU por ahora se recomienda, pero no se exige, el análisis de varios contaminantes de los grupos de dioxinas, furanos y PCBs (USEPA, 1999).

Tabla 2-4. Límites de contaminantes orgánicos persistentes (POPs u orgánicos traza) según borradores propuestos en la Unión Europea (adaptado de Gómez Palacios y Estrada de Luis, 2005).

Contaminantes orgánicos		Borrador para lodos	Borrador para residuos orgánicos tratados biológicamente		
			Compost Clase 1	Compost Clase 2	Residuo estabilizado
AOXs	Suma de compuestos orgánicos halogenados adsorbibles	500 mg/kg			
LAS	Alquilbencensulfonatos lineales	2.600 mg/kg			
DEHP	Di(2-etilhexil)ftalato	100 mg/kg			
NPEs	Nonilfenol y nonilfenol-etoxilatos (con 1 o 2 grupos etoxi)	50 mg/kg			
PAHs	Suma de hidrocarburos policíclicos aromáticos ^a	6 mg/kg	Ausencia	Ausencia	3 mg/kg
PCBs	Bifenilos policlorados (suma congéneres 52, 101, 118, 138, 153 y 180)	0,8 mg/kg	Ausencia	Ausencia	0,4 mg/kg
PCDDs y PCDFs	Dibenzodioxinas y dibenzofuranos policlorinados	100 ng TE/kg			

^aPAHs: acenafteno, fenantreno, fluoreno, fluorantreno, pireno, benzo(b+j+k)pireno, benzo(a)pireno, benzo (ghi)perileno, indeno(1,2,3-c,d) pireno

REDUCCIÓN DE PATÓGENOS

El concepto de reducción de patógenos fue desarrollado en un principio en EEUU y luego adoptado en Europa. Se basa en el “principio de mejor tecnología disponible” (Best Available Technology o BAT) e incluye exigencias de proceso (tiempo de determinadas temperaturas termofílicas) y límites de patógenos, generalmente coliformes fecales, *Escherichia coli* y/o *Salmonella*. En Europa las normas habitualmente establecen un límite de *E. coli* < 1.000 NMP/g de materia seca y ausencia de *Salmonella* en 25 g. Normas más restrictivas como la francesa para lodos o la propuesta como modificación de las directivas vigentes en la Unión Europea, también incluyen límites para *Clostridium perfringens* y ausencia de huevos viables de helmintos y *Listeria monocytogenes* (AFNOR, 2002; Gómez Palacios y Estrada de Luis, 2005). En la Tabla 2-5 se presentan como ejemplo las normas de EEUU y Alemania. La regulación de la USEPA (1993) sobre reducción de patógenos fue desarrollada originalmente para lodos cloacales, pero actualmente se utiliza de hecho para todo tipo de compost (Brinton, 2000). La norma australiana también exige que las bolsas de venta indiquen que los compost son fuente posible de polvo y microorganismos vivos potencialmente peligrosos (Australian Standard, 2003).

INERTES Y SEMILLAS DE MALEZAS

Otras limitaciones que están siendo reguladas como criterio básico de calidad de compost es la presencia de semillas de malezas, que se desarrolla con más detalle en el Capítulo 5, y la presencia de inertes. En este último caso, generalmente se separan

Tabla 2-5. Límites de indicadores de reducción de patógenos y requerimientos de temperatura durante el compostaje según normas de EEUU para biosólidos (USEPA, 1993) y de Alemania para residuos orgánicos (BioAbfV, 1998).

	Norma EEUU		Norma Alemania
	Clase A	Clase B ^a	
Coliformes fecales	< 1.000 NMP/g m.s.	< 2 x 10 ⁶ NMP/g m.s. o < 2 x 10 ⁶ UFC/g m.s.	–
<i>Salmonella</i> sp.	< 3 NMP/ 4g m.s.	–	No detectable en 25 g
Requerimientos de temperatura			
	Hileras con volteos: ≥ 55 °C, 15 días, 5 volteos		Sistemas abiertos: ≥ 55 °C, 2 semanas o ≥ 65 °C, 1 semana
	Pilas estáticas: ≥ 55 °C, 3 días consecutivos		Sistemas cerrados: ≥ 60 °C, 1 semana
		Todo tipo de sistemas: ≥ 40 °C, 5 días + 4horas ≥ 55 °C.	

^aLos compost Clase B tienen restricciones de uso.

las piedras de los materiales artificiales no degradables como plásticos, vidrios o metales, que afectan más a los compost derivados de fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos, más aún cuando la separación no se hace en origen. Si bien algunos países exigen que no haya contaminación visible con inertes artificiales, otros regulan un límite para un determinado tamaño de tamiz, generalmente < 0,5% para la fracción > 2 mm (Brinton, 2000).

ESTABILIDAD Y MADUREZ

Los términos estabilidad y madurez se usan muchas veces de manera indistinta, a pesar de que se refieren a aspectos diferentes. Posiblemente esto se debe a que para evaluarlos, se pueden utilizar varios atributos similares. **La estabilidad** está relacionada con la disminución de carbono degradable y actividad microbiana (a mayor estabilidad, menor degradabilidad y actividad microbiana), mientras que la **madurez** se refiere a la finalización efectiva del proceso de compostaje en un producto sin sustancias fitotóxicas que puedan afectar el crecimiento vegetal (Iglesias-Jiménez y Pérez-García, 1992; Bernal *et al.*, 1998a; Brewer y Sullivan, 2003; Cooperband *et al.*, 2003).

Los indicadores de estabilidad se relacionan con determinaciones de materia orgánica lábil, materia orgánica estable o intensidad de la actividad microbiana. Dentro de estos indicadores, los más básicos son la disminución de la temperatura de la masa en compostaje a temperatura ambiente; el cambio de olor (que puede ser desagradable durante el proceso debido a la liberación de ácidos grasos volátiles y a productos de anaerobiosis parcial como sulfhídrico) a un olor semejante a hojarasca de bosque o tierra mojada, y el cambio de color (la masa se va oscureciendo con la madurez) ha-

cia marrón oscuro o negro (Costa *et al.*, 1991; Rynk *et al.*, 1992; Laos *et al.*, 2002). Sin embargo, estos parámetros son insuficientes y es necesario complementarlos con indicadores más precisos. En la bibliografía, se sugieren parámetros químicos, físico-químicos y biológicos de mayor o menor complejidad que, solos o combinados, permiten estimar un producto estable.

Entre los indicadores de **estabilidad** más complejos o costosos en términos de materiales o de tiempo figuran:

- La producción de CO₂ o consumo de O₂: la disminución de CO₂ o el aumento de O₂ en el tiempo indican disminución de actividad microbiana (Forster *et al.*, 1993; Iannotti *et al.*, 1994; Hue y Liu, 1995; Cooperband y Middleton, 1996) (Tabla 2-6).
- La mineralización de N y/o C en ensayos de compost y suelos: la disminución de las tasas de mineralización en el tiempo, e incluso la inmovilización de N, se consideran indicadores de materia orgánica estable (Hadas y Portnoy, 1994; García *et al.*, 1994; Bernal *et al.*, 1998b; Laos *et al.*, 2000). Se remarca comúnmente que una de las principales ventajas de los compost es la liberación lenta de N, lo que minimiza el riesgo de contaminación de acuíferos con este nutriente (USEPA, 1993; Pierzynski, 1994; Cooperband, 2000).
- La biomasa microbiana (por conteo de microorganismos, retención de C y/o N en biomasa microbiana o concentración de ATP) y actividad enzimática: durante el compostaje se producen cambios en los grupos funcionales de microorganismos y, en general, disminución de biomasa microbiana, ATP y actividad de enzimas hidrolasas (García *et al.*, 1992a; Laos *et al.*, 2000; Levanon y Pluda, 2002). Sin embargo, la concentración de enzimas extracelulares puede aumentar por unidad de C orgánico debido a la formación de complejos enzima-humus (García *et al.*, 1994); en general se considera que no es posible establecer valores límites de actividad enzimática debido a los diferentes sustratos involucrados durante el proceso (Gómez-Brandón *et al.*, 2008).
- El grado de humificación: los ácidos húmicos aumentan en el tiempo y, por lo tanto, aumenta el índice de humificación (C en ácidos húmicos/C orgánico * 100) y la relación ácidos húmicos/ácidos fúlvicos (Iglesias-Jiménez y Pérez-García, 1992; Adani *et al.*, 1995) (Tabla 2-6). También aumenta la capacidad de intercambio iónico, debido al aumento de los grupos funcionales activos de la materia orgánica. Sin embargo, varios trabajos reportan que el uso de la humificación y la capacidad de intercambio iónico como indicadores de estabilidad, produce resultados inconsistentes (Mathur *et al.*, 1993; Bernal *et al.*, 1998a; Gómez-Brandón *et al.*, 2008). En base a los trabajos que indican aumento de grupos carboxilos, alquilos y aromáticos durante el compostaje, actualmente también se recomienda la caracterización espectroscópica de sustancias húmicas utilizando NMR, infrarrojo y pirólisis (Chen, 2003).
- La separación de la materia orgánica en fracciones de menor a mayor recalcitrancia (degradabilidad): por ejemplo, el fraccionamiento bioquímico basado en Van Soest y Wine (1967), recientemente incluido en la norma francesa (AFNOR, 2005), que consiste en determinar la fracción soluble, hemicelulosa, celulosa, lignina y cutina, y calcular un índice de estabilidad biológica (ISB).

Entre los indicadores más simples de estabilidad que se recomiendan a nivel mundial debido a su eficiencia y factibilidad de análisis en laboratorios de rutina, figuran:

- La concentración de C soluble en agua (CSA), que indica la cantidad de C fácilmente degradable (lábil) remanente, y se usa como valor absoluto o por unidad de N total (García *et al.*, 1992b; Hue y Liu, 1995; Bernal *et al.*, 1998a; Laos *et al.*, 2002; Gómez-Brandón *et al.*, 2008) (Tabla 2-6).
- La concentración de amonio y relación amonio/nitratos, cuya disminución indica la finalización de la etapa termofílica de intensa actividad biológica (Zucconi y de Bertoldi, 1987; Bernal *et al.*, 1998a; CCQC, 2001; Zmora-Nahum *et al.*, 2005; Gómez-Brandón *et al.*, 2008) (Tabla 2-6). Dado el carácter inespecífico de los microorganismos que intervienen en la transformación de N orgánico a amonio, en la etapa termofílica se produce acumulación de amonio, mientras que la nitrificación es un proceso mediado por bacterias específicas, que requiere condiciones definidas de humedad, pH y temperaturas mesofílicas.
- Otras relaciones que incluyen a los anteriores: por ejemplo, en base a la relación entre disminución de actividad microbiana y aumento de nitrificación durante el compostaje, Chefetz *et al.* (1996) recomiendan el aumento en el tiempo de nitratos y bicarbonatos, y Cooperband *et al.* (2003) proponen la relación entre nitratos y producción de CO₂ durante 7 días (Tabla 2-6).

Uno de los indicadores más utilizados ha sido tradicionalmente la relación C/N (como C y N orgánico total), recomendándose valores menores a 20-25 para evitar inmovilización de N del suelo. Sin embargo, este indicador es afectado por el material original, como es el caso de los estiércoles y biosólidos con valores muy inferiores a 20 en el material crudo y que aumenta durante el compostaje, por lo que muchos trabajos no recomiendan su uso (Zucconi y de Bertoldi, 1987; Costa *et al.*, 1991; Laos *et al.*, 2002). En lugar de la relación C/N, la norma australiana recomienda evaluar inmovilización de N a través de la retención de N soluble agregado en condiciones controladas (Australian Standard, 2003). A pesar de estas consideraciones, varias normas siguen exigiendo valores límites de C/N como característica básica de estabilidad y madurez, por ejemplo, el California Composting Quality Council requiere un valor < 25 (CCQC, 2001) para todo tipo de compost, y la ley española < 15 para compost de origen vegetal (hojas, césped, poda) y < 20 para otros compost de origen diverso (estiércol, residuos agroindustriales, forestales, etc.) (BOE, 2005).

Los indicadores de **madurez** se basan en estudios de fitotoxicidad, directos en ensayos con plantas e indirectos a través de la determinación de productos potencialmente fitotóxicos como amonio, fenoles y ácidos grasos volátiles. Como se puede observar, el amonio y la relación amonio/nitratos que se describieron más arriba como indicadores de estabilidad, también son utilizados como indicadores de madurez y de hecho, los valores límites recomendados (Tabla 2-6) se han establecido en base a la toxicidad para las plantas (Zucconi y de Bertoldi, 1987; Forster *et al.*, 1993; CCQC, 2001). Si bien en algunos trabajos se sugiere medir ácidos grasos volátiles y fenoles (DeVleeschauwer *et al.*, 1981; Himanen *et al.*, 2006), los indicadores de madurez más

Tabla 2-6. Algunos valores límites recomendados para varios indicadores de estabilidad y madurez de compost.

	Valores recomendados	Fuente
Producción CO ₂	≤ 120 mg C-CO ₂ /kg/h	Hue y Liu (1995)
	< 200 mg C-CO ₂ /kg/h	Rynk <i>et al.</i> (1992)
CO ₂ /C orgánico	< 5 mg C-CO ₂ /g C org	García <i>et al.</i> (1992b)
Amonio	< 400 mg N-NH ₄ ⁺ /kg	Zucconi y de Bertoldi (1987); Bernal <i>et al.</i> (1998a)
	< 500 mg N-NH ₄ ⁺ /kg	CCQC (2001)
Carbono soluble en agua (CSA)	< 17 g/kg	Bernal <i>et al.</i> (1998a)
	≤ 10 g/kg	Hue y Liu (1995)
	< 5 g/kg	García <i>et al.</i> (1992b)
	< 4 g/kg	Zmora-Nahum <i>et al.</i> (2005); Gómez-Brandón <i>et al.</i> (2008)
CSA/N total	≤ 0,7	Hue y Liu (1995); Laos <i>et al.</i> (2002)
	< 0,3	García <i>et al.</i> (1992b)
CSA/N soluble agua	< 2	García <i>et al.</i> (1992b)
Amonio/nitratos	< 0,16	Bernal <i>et al.</i> (1998a)
	< 0,3	CCQC (2001)
Nitratos/CO ₂	> 8 mg N-NO ₃ /mg C-CO ₂ /día	Cooperband <i>et al.</i> (2003)
C _{AH} /C _{AF} ^a	> 1,9	Iglesias-Jiménez y Pérez-García (1992)
Índice germinación	> 50%	Costa <i>et al.</i> (1991); Bernal <i>et al.</i> (1998a)
	> 60%	Gómez-Brandón <i>et al.</i> (2008)
	> 80%	CCQC (2001)
Crecimiento plantas	> 90% ensayos con cebada a 25% y 50% de compost	Norma alemana (Bundesgüte-gemeinschaft Kompost e.V., 1998)
	> 60% ensayos con rabanito y 100% compost lavado	Norma australiana (Australian Standard, 2003)

^aAH= ácidos húmicos, AF= ácidos fúlvicos.

recomendados son el amonio, la relación amonio/nitratos y los ensayos de germinación. Estos últimos se basan en la propuesta original de Zucconi *et al.* (1981 a, b) que consiste en utilizar un extracto diluido de compost y semillas de *Lepidium sativum*, y calcular un índice de germinación en base a la cantidad de semillas germinadas y el largo de la radícula. Actualmente, no existe un método estandarizado, utilizándose varias especies (ryegrass, rabanito, cebada, tomate, etc.) y diferentes diluciones del extracto de compost, lo que dificulta la interpretación de los resultados y el establecimiento de un valor límite (Tabla 2-6). Otra forma de evaluar la fitotoxicidad es la determinación del crecimiento de ciertas especies en mezclas de turba o arena y

compost, por ejemplo, ryegrass (*Lolium perenne*) en una mezcla, en volumen, 1:3 de compost : turba durante 21 días (Iannotti *et al.*, 1994; Chen *et al.*, 1996; Cooperband *et al.*, 2003).

Un aspecto importante en la determinación de madurez es la posible causa de la fitotoxicidad, ya que muchas veces está asociada a la presencia de sales solubles, lo que no puede mejorarse aumentando el tiempo de madurez (Iannotti *et al.*, 1994; CCQC, 2001). Por lo tanto, en el caso de fitotoxicidad es importante descartar que la causa principal sea una alta concentración de sales a través de una simple determinación de conductividad eléctrica. Teniendo en cuenta este aspecto, la norma australiana para determinar madurez, recomienda lavar el compost antes de realizar los ensayos de fitotoxicidad (Australian Standard, 2003).

Como puede observarse en la Tabla 2-6, los valores límites recomendados para varios parámetros son muy diferentes. Esta variación puede atribuirse, por un lado, a la problemática de la escasa estandarización de las metodologías, pero también está relacionada con las características del material original; muchas recomendaciones se han hecho en base a estudios de 2 ó 3 mezclas que no son extrapolables a otros residuos orgánicos. Dentro de nuestra experiencia, hemos observado que muchos de los valores recomendados para estabilidad y madurez pueden alcanzarse antes de finalizar el período termofílico (Tognetti *et al.*, 2007), pero generalmente con fluctuaciones que desaparecen en el tiempo (Leconte *et al.*, 2009); por eso resulta importante no solo el valor límite, sino la constancia del valor a través de varias mediciones durante la fase de madurez.

Dos métodos rápidos muy utilizados en EEUU y Europa son el test de autocalentamiento (test Dewar) y el test de Solvita®. El test Dewar consiste en un termo de metal sellado donde se evalúa la capacidad de levantar temperatura de una mezcla de compost a una determinada humedad después de 5-10 días; se originó en Alemania y es uno de los test más usados en Europa. El test de Solvita consiste en dos geles que adquieren color en contacto con CO₂ y NH₃ liberados a partir de compost húmedo después de 4 horas de equilibrio; este test es muy rápido y es utilizado y recomendado en muchos estados de EEUU y varios países europeos (Brinton, 2000; CCQC, 2001; Cabañas-Vargas *et al.*, 2005).

Como destaca Rynk (2003) en una revisión sobre el tema, no parece que exista un único parámetro de madurez que sirva para todo tipo de material original (e incluso todo tipo de uso del producto final). En general, las recomendaciones actuales se basan en el análisis de varios parámetros, por ejemplo, el California Composting Quality Council y el US Composting Council recomiendan determinar la relación C/N y después elegir un parámetro entre varios de estabilidad (Grupo A) y otro entre varios de madurez (Grupo B), o sea, un conjunto de 3 parámetros. El Grupo A comprende producción de CO₂, consumo de O₂, test Solvita para CO₂, C biológicamente activo (Demanda Química de Oxígeno) y test Dewar. El grupo B comprende concentración de amonio, relación amonio/nitrato, ácidos grasos volátiles, test Solvita para NH₃, test de germinación y test con plantas. En base a los 3 parámetros elegidos se elabora un índice que clasifica a los compost en muy maduros, maduros e inmaduros (CCQC, 2001; TMECC, 2001-2002). Otro ejemplo es el caso de Alemania, donde se utiliza

para madurez una combinación del grado de descomposición según el test Dewar (Rottegrade), un test de germinación con *Lepidium sativum*, un test de crecimiento de cebada a 25 y 50% y una prueba de inmovilización de N (Bundesgütegemeinschaft Kompost e.V., 1998).

INDICADORES DE CALIDAD

Una vez cumplimentados los requerimientos en cuanto a límites de contaminantes, estabilidad y madurez, se evalúa la “calidad agronómica”, que depende del uso final del producto y generalmente contempla su valor como enmienda y como fertilizante. Por lo tanto, se utilizan parámetros relacionados con ambos aspectos que pueden agruparse en:

- Características químicas y físicas, de las cuales las más comunes son: pH, conductividad eléctrica, materia orgánica, relación C/N, nutrientes totales y disponibles (N, P, Ca, Mg, K, S y micronutrientes), humedad, densidad, tamaño de partículas, porosidad y capacidad de retención de agua.
- Parámetros biológicos relacionados con la capacidad de degradabilidad y de liberación de nutrientes en el tiempo, como mineralización de C y N, liberación de P y cationes, biomasa microbiana y actividad enzimática, y
- Respuesta de la vegetación, a través de ensayos de rendimiento con plantas indicadoras y cantidad de nutrientes en la vegetación.

Otra característica importante que todavía no se incluye en los análisis de calidad, es la capacidad de los compost para controlar fitopatógenos (Hoitink *et al.*, 1991, 1996; Recycled Organics Unit, 2006). La magnitud de los atributos mencionados depende marcadamente del material original. Como se puede observar en la Tabla 2-7 donde se presentan características químicas de compost de diferente origen con los que hemos trabajado, la variación en el contenido de materia orgánica y nutrientes es enorme. Así por ejemplo, los compost de la fracción orgánica de residuos sólidos urbanos presentan valores muy bajos de materia orgánica y de N y P y muy altos de pH y Ca, mientras que los demás compost tienen valores más bajos de pH y más altos de C, lignina (como indicador de C recalcitrante) y nutrientes, especialmente P.

Estas características diferenciales de los compost se reflejan en su efecto en el suelo y, por lo tanto, en sus posibilidades de uso. Así, por ejemplo, el pH y el contenido de sales (generalmente estimado como conductividad eléctrica) son parámetros básicos que determinan la posibilidad de uso como sustrato en la producción hortícola y ornamental. La calidad del C agregado es otro aspecto importante que regula su estabilidad en el suelo o su pérdida a la atmósfera como CO₂; el uso de indicadores como la concentración de lignina o el índice bioquímico de la norma francesa ya mencionado, permitirían predecir el efecto a largo plazo en la materia orgánica del suelo (Gabrielle *et al.*, 2004; Houot *et al.*, 2005; Kowaljow y Mazzarino, 2007).

Otro ejemplo son el contenido y capacidad de liberación de N y P disponibles para las plantas, que tienen importantes implicancias a nivel ambiental. A fin de evitar pér-

didadas y contaminación de acuíferos por lixiviación de nitratos, durante muchos años se recomendó aplicar residuos orgánicos de acuerdo al contenido de N soluble, la capacidad de mineralización del N orgánico y la necesidad de N de los cultivos. Sin embargo, debido a la mayor proporción de P en los estiércoles y biosólidos (N/P ~ 3-4) respecto a las necesidades de los cultivos (N/P ~ 6-10), esta recomendación condujo a la acumulación de P en el suelo. Como consecuencia, se incrementaron las pérdidas de P por escorrentía y lixiviación y la contaminación de aguas, de manera que actualmente se considera que el uso de residuos orgánicos en agricultura es la principal fuente de contaminación difusa de P a nivel mundial (Sims y Sharpley, 2005). Si bien a diferencia del N los suelos tienden a retener P, y durante muchos años se consideró que las pérdidas de este nutriente eran en forma particulada, actualmente se ha demostrado que el riesgo de lixiviación aumenta marcadamente cuando los valores de P-Olsen son > 60 mg/kg (Hesketh y Brookes, 2000). La solubilidad y retención del P agregado con los residuos depende del material original, así por ejemplo, hay mayor liberación y peligro de lixiviación en suelos abonados con estiércol de gallina que con estiércol de vaca y biosólidos (Cooperband y Good, 2002; Siddique y Robinson, 2003), y no se han encontrado diferencias entre residuos compostados y sin compostar (Sharpley y Moyer, 2000). Por el contrario, los compost de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos, aportan cantidades mucho más bajas de P total y extraíble (Tabla 2-7), y la liberación de P en el tiempo es muy baja, posiblemente debido a la formación de fosfatos de Ca de baja solubilidad (Kowaljow y Mazzarino, 2007; Mazzarino *et al.*, 2008).

Dado que uno de los beneficios más importantes del uso de compost es el mejoramiento de las propiedades físicas del suelo, los parámetros de calidad que se ofrecen en las bolsas de venta deberían incluir las características físicas más relevantes, pero generalmente se limitan a humedad y densidad. En una detallada revisión del tema, Agnew y Leonard (2003) destacan que es esencial establecer no solo los parámetros, sino definirlos claramente (existen varios términos confusos como por ejemplo, densidad, densidad aparente, densidad húmeda, etc.; retención de agua, capacidad de campo, retención de agua a saturación, etc.), y calibrar las metodologías de análisis que se vienen adaptando de los análisis de suelos con resultados no siempre felices.

Las diferencias en los atributos físicos, químicos y biológicos de los compost determinan que no puedan establecerse rangos de calidad aplicables universalmente y cuando existen regulaciones, se establecen generalmente en función de los posibles usos. Así por ejemplo, en Alemania se utiliza una clasificación del producto final en compost fresco, compost terminado y compost para sustrato. Los tres deben cumplir con las normas para patógenos, metales pesados y semillas de malezas, pero el concepto de madurez y los test mencionados en el ítem anterior se aplican a los dos últimos productos, los que a su vez se diferencian entre sí por límites más estrictos en el contenido de nutrientes y sales solubles en el compost para sustrato (Bundesgüte-gemeinschaft Kompost e.V., 1998). Otro ejemplo, son las recomendaciones de Rynk *et al.* (1992) y Cooperband (2000) en EEUU; los primeros separan productos de acuerdo a su valor (grado) como sustrato para contenedores (uso puro), enmienda para contenedores (uso en la formulación de mezclas), fertilización de césped (apli-

Tabla 2-7. Características físico-químicas y químicas de diferentes compost (adaptado de Laos *et al.*, 2002; Satti, 2007; Tognetti *et al.*, 2007; Kowaljow y Mazzarino, 2007; Leconte *et al.*, 2009).

	Eviscerado pescado + aserrín y viruta	Biosólidos + viruta y chips de poda	Estiércol de gallina + aserrín o cascarilla arroz	Fración orgánica de residuos urbanos
pH	6,4-6,8	6,5-6,7	5,8-7,2	7,7 -9,0
CE (dS/m)	1,9-4,5	1,2-2,4	2,5-3,0	1,7-3,2
C orgánico (%)	43-48	23-27	20-26	11-14
Lignina (%)	n.d.	5-7	7-10	1-2
N total (%)	2,4-2,7	1,4-1,9	2,2-2,9	0,8-1,2
P total (g/kg)	16-17	13-14	9-13	4-5
P extractable (g/kg)	2,5-3,2	1,3-1,8	6,0-7,7	0,2-0,3
Ca (%)	2,0-2,2	1,4-1,5	2,0-2,4	4,0-5,2
K (%)	0,5-0,9	0,3-0,5	0,5-0,8	0,3-0,5
Mg (%)	0,2	0,6	0,4-0,6	0,5-0,6
Na (%)	0,3	0,1	0,1	0,3

Todos los valores se refieren a sólidos secos. CE = conductividad eléctrica; n.d. = no determinado.

cación superficial) y enmienda de suelos (mejorador de suelos agrícolas, restauración de suelos disturbados, paisajismo). Cooperband (2000) recomienda analizar calidad en función del tipo de uso de la tierra (agricultura, silvicultura, horticultura, restauración, biorremediación) y de objetivos específicos dentro de cada uso, como por ejemplo, mejoramiento de la estructura del suelo, neutralización del pH o control de enfermedades.

Por último, es importante destacar que los conceptos de estabilidad, madurez y calidad desarrollados en este capítulo se focalizan en el uso de los compost a nivel agrícola: aplicación a campo, almácigos, mezclas para sustratos, etc. Sin embargo, el uso final puede no ser agronómico y por lo tanto, estos requerimientos no ser necesarios, como por ejemplo, en la biorremediación de suelos contaminados, donde compost inmaduros de alta actividad microbiana son más eficientes que compost maduros (Ver Capítulo 19). Otros ejemplos son el uso de compost con niveles de PTEs por encima de los límites establecidos en el cierre de vertederos, o el uso de compost contaminados con semillas en restauración o fijación de taludes (ver Capítulo 5).

CONCLUSIONES

Si bien la lista de posibles parámetros para establecer indicadores de estabilidad, madurez y calidad de compost es muy larga, un pequeño número de ellos puede ser suficiente. En el caso de los índices de estabilidad y madurez, 3 o 4 parámetros serían adecuados para materiales de diferente origen (por ej., carbono soluble, amonio, nitratos e índice de germinación), pero es necesario establecer experimentalmente valores límites para las di-

CONCLUSIONES (Continuación)

ferentes mezclas y, cuando ya existen a nivel mundial, asegurar su constancia en el tiempo. En el caso de calidad, los parámetros más adecuados dependen del uso final, y pueden ser definidos de acuerdo a objetivos específicos (sustrato acidificante, reemplazo parcial de turba, fuente de P, mejorador de estructura, etc.). El establecimiento de normas de calidad en función de usos específicos contribuiría a garantizar la homogeneidad del producto, un aspecto generalmente descuidado en la producción de compost, que termina limitando su aceptación en el mercado (Cooperband, 2000). El principal desafío para identificar indicadores es lograr seleccionar aquellos que sean lo suficientemente representativos, y a la vez fáciles de interpretar y de medir en análisis de rutina, a fin de facilitar el aprovechamiento de los residuos orgánicos disponibles en el país y desalentar su uso sin controles.

BIBLIOGRAFÍA

- AbfklärV.** 1992. Klärschlammverordnung vom 15.04.1992. Bundesgesetzblatt, Jahrgang 1992, Teil 1, 912-934 (Sewage Sludge Ordinance).
- Adani, F.; Genevini P.L. y Tambone F.** 1995. A new index of organic matter stability. *Compost Science and Utilization* 3: 25-37.
- AFNOR.** 2002. Amendements organiques - Composts contenant des matières d'intérêt agronomique, issues du traitement des eaux. NF U 44-095. Association Française de Normalisation. (Organic soil improvers : Composts containing substances essential to agriculture, stanning from water treatment).
- AFNOR.** 2005. Dénominations, spécifications et marquage. Pr NF U 44-051. Association Française de Normalisation. (Organic soil improvers : Designations, specifications and marking. Sludge is excluded).
- Agnew, J.M. y Leonard J.J.** 2003. Physical properties of compost-Literature review. *Compost Science and Utilization* 11: 238-264.
- Allaway, B.J. (ed.).** 1995. Heavy Metals in Soils. 2nd Edition, Blackie Academic & Professional, London, Inglaterra. 390 pp.
- Australian Standard.** 2003. Composts, soil conditioners and mulches. AS 454-2003. Standards Australia International Ltd., Sidney, Australia.
- Bernal, M.P.; Paredes C., Sánchez-Monedero M.A. y Cegarra J.** 1998a. Maturity and stability parameters of composts prepared with a wide range of organic wastes. *Bioresource Technology* 63: 91-99.
- Bernal, M.P.; Navarro A.F.; Sánchez-Monedero M.A.; Roig A. y Cegarra J.** 1998b. Influence of sewage sludge compost stability and maturity on carbon and nitrogen mineralisation in soil. *Soil Biology and Biochemistry* 30: 305-313.
- BioAbfV.** 1998. German Bioabfallverordnung, Bundesgesetzblatt G 5702 Bonn 28. Sept. 1998 (revised March 1999). English Translation: Utilisation of Bio-Wastes on Land used for Agricultural, Silvicultural and Horticultural Purposes.
- BOE.** 2005. Real Decreto N° 824 sobre productos fertilizantes. BOE N° 171, 25592-25669, Ministerio de la Presidencia. España.
- Brewer, L. y Sullivan D.M.** 2003. Maturity and stability evaluation of composted yard trimmings. *Compost Science and Utilization* 2: 96-112.
- Brinton, W.F.** 2000. Compost Quality Standards and Guidelines. Woods End Research Laboratory. Final Report for New York State Association of Recyclers, EEUU. 42 pp.
- Bundesgütegemeinschaft Kompost e.V.** 1998. Methodenbuch zur Analyse von Kompost. Kompost-Information Nr. 222, Köln (Hrsg.), Verlag Abfall Now e.V., 4. Auflage, 1998, Stuttgart, Alemania.
- Cabañas-Vargas, D.D.; Sánchez-Monedero M.A.; Urpilainen S.T.; Kamilaki A. y Stentford E.I.** 2005. Assessing the stability and maturity of compost at large-scale plants. *Ingeniería* 9: 25-30.
- CCQC (California Compost Quality Council).** 2001. Compost Maturity Index. Technical Report. <http://www.ccqc.org>
- Chefetz, B.; Hatcher P.G.; Hadar Y. y Chen Y.** 1996. Chemical and biological characterization of organic matter during composting of municipal solid waste. *Journal of Environmental Quality* 25: 776-785.
- Chen, Y.** 2003. Nuclear magnetic resonance, infra-red and pyrolysis: application of spectroscopic methodologies to maturity determination of composts. *Compost Science and Utilization* 11: 152-168.
- Chen, L.; Dick W.A.; Streeter J.G. y Hoitink H.A.J.** 1996. Ryegrass utilization of nutrients released from composted biosolids and cow manure. *Compost Science and Utilization* 4: 73-83.
- Costa, F.; García C.; Hernández T. y Polo A.** 1991. Residuos orgánicos urbanos. Manejo y utilización. CSIC-CEBAS, Murcia, España. 181 pp.

- Cooperband, L.** 2000. Sustainable use of by-products in land management. *En: Bartels, J.M. y Dick W.A. (eds.). Land application of agricultural, industrial, and municipal by-products. SSSA Book Series N° 6, Madison, EEUU.* pp. 215-235.
- Cooperband, L.R. y Middleton J.H.** 1996. Changes in chemical, physical and biological properties of passively-aerated cocomposted poultry litter and municipal solid waste compost. *Compost Science and Utilization* 4: 24-34.
- Cooperband, L. y Good L.W.** 2002. Biogenic phosphate minerals in manure: implications for phosphorus loss to surface waters. *Environmental Science and Technology* 36: 5075-5082.
- Cooperband, L.R.; Stone A.G.; Fryda M.R. y Ravet J.L.** 2003. Relating compost measures of stability and maturity to plant growth. *Compost Science and Utilization* 11: 113-124.
- Council Directive.** 1986. CEC-Council of the European Communities. Council directive on the protection of the environment, and in particular of the soil, when sewage sludge is used in agriculture. 86/278/EEC.
- DeVleeschauwer, D.; Verdonk O. y Van Assche P.** 1981. Phytotoxicity of refuse compost. *En: Staff of Compost Science/Land Utilization (ed.). Composting: Theory and practice for city, industry and farm. JG Press, Emmaus, EEUU.* pp. 54-60.
- Düring, R.A. y Gäth S.** 2002. Utilization of municipal organic wastes in agriculture: where do we stand, where will we go? *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 165: 544-556.
- Forster, J.C.; Zech W. y Wurdinger E.** 1993. Comparison of chemical and microbiological methods for the characterisation of the maturity of composts from contrasting sources. *Biology and Fertility of Soils* 16: 93-99.
- Gabrielle, B.; Da-Silveira J.; Houot S. y Francou C.** 2004. Simulating urban waste compost effects on carbon and nitrogen dynamics using a biochemical index. *Journal of Environmental Quality* 33: 2333-2342.
- García, C.; Hernández T.; Costa F.; Ceccanti B. y Ciardi C.** 1992a. Changes in ATP content, enzyme activity and inorganic nitrogen species during composting of organic wastes. *Canadian Journal of Soil Science* 72: 243-253.
- García, C.; Hernández T.; Costa F. y Ayuso M.** 1992b. Evaluation of the maturity of municipal waste compost using simple chemical parameters. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 23: 1501-1512.
- García, C.; Hernández T.; Costa F. y Ceccanti B.** 1994. Composting: biochemistry and characterization. *En: Environmental Biochemistry in Practice. I. Wastes and Soil Management. Ceccanti B. y García C. (eds.). Consiglio Nazionale delle Ricerche-Istituto per la Chimica del Terreno, Pisa, Italia.* pp. 51-78.
- Gómez Palacios, J.M. y Estrada de Luis I.B.** 2005. Índices de calidad de suelos y compost desde la perspectiva agro-ecológica. II Congreso sobre Residuos Biodegradables y Compost - El reto de fomentar el consumo de los productos finales. 20 y 21 octubre, Sevilla, España. 15 pp.
- Gómez-Brandón, M.; Lazzano C. y Domínguez J.** 2008. The evaluation of stability and maturity during the composting of cattle manure. *Chemosphere* 70: 436-444.
- Hadas, A. y Portnoy R.** 1994. Nitrogen and carbon mineralization rates of composted manures incubated in soil. *Journal of Environmental Quality* 23: 1184-1189.
- Hesketh, N. y Brookes P.C.** 2000. Development of an indicator for risk of phosphorus leaching. *Journal of Environmental Quality* 29: 105-110.
- Himanan, M.; Kyösti L.K.; Itävaara M. y Hänninen K.** 2006. A method for measuring low-weight carboxylic acids from biosolid compost. *Journal of Environmental Quality* 35: 516-521.
- Hoitink, H.A.J.; Inbar Y. y Boehm M.J.** 1991. Status of composted-amended potting mixes naturally suppressive to soilborne diseases of floricultural crops. *Plant Disease* 75: 869-873.
- Hoitink, H.A.J.; Stone A.G. y Grebus M.E.** 1996. Suppression of plant diseases by composts. *En: De Bertoldi M., Sequi P., Lemmes B. y Papi T. (eds.). The Science of Composting. Blackie Academic & Professional, Glasgow, Inglaterra.* Vol. 1: 373-381.
- Houot, S.; Bodineau G.; Rampon J.N.; Annabi M.; Francou C. y Poitrenaud M.** 2005. Agricultural use of different residual waste composts – current situation and experiences in France. *En: Proceedings of the Conference: "The Future of Residual Waste Management in Europe", ORBIT e.V., Weimar, Alemania.* 8 pp.
- Hue, N.V. y Liu J.** 1995. Predicting compost stability. *Compost Science and Utilization* 3: 8-15.
- Iannotti, B.A.; Grebus M.E.; Toth B.L.; Madden L.V. y Hoitink H.A.J.** 1994. Oxygen respirometry to assess stability and maturity of composted municipal solid waste. *Journal of Environmental Quality* 23: 1177-1183.
- Iglesias-Jiménez, E. y Pérez-García V.** 1992. Determination of maturity indices for city refuse composts. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 38: 331-343.
- Kowaljaw, E. y Mazzarino M.J.** 2007. Soil restoration in semiarid Patagonia: Chemical and biological response to different compost quality. *Soil Biology and Biochemistry* 39: 1580-1588.
- Laos, F.; Satti P.; Walter I.; Mazzarino M.J. y Moyano S.** 2000. Nutrient availability of composted and non-composted residues in a Patagonian Xeric Mollisol. *Biology and Fertility of Soils* 31: 462-469.
- Laos, F.; Mazzarino M.J.; Walter I.; Roselli L.; Satti P. y Moyano S.** 2002. Composting of fish offal and biosolids in NW Patagonia. *Bioresource Technology* 81: 179-186.

- Leconte, M.C.; Mazzarino M.J.; Satti P.; Iglesias M.C. y Laos F.** 2009. Composting poultry manure with rice hulls and/or sawdust in NE Argentina. *Waste Management* 29: 2446-2453.
- Lavanon, D. y Pluda D.** 2002. Chemical, physical and biological criteria for maturity in composts for organic farming. *Compost Science and Utilization* 4: 339-346.
- Mathur, S.; Owen G.; Dinel H. y Schnitzer M.** 1993. Determination of compost biomaturity. *Biological Agriculture and Horticulture* 10: 65-85.
- Mazzarino, M.J.; Satti P. y Kowaljew E.** 2008. Enmiendas orgánicas y fósforo disponible: entre la deficiencia y el riesgo de contaminación. XXIII Reunión Arg. de Ecología. San Luis, Argentina (Actas en CD Rom).
- Pierzynski, G.M.** 1994. Plant nutrient aspects of sewage sludge. En: Clapp C.E., Larson W.E. y Dowdy R.H. (eds.). *Sewage Sludge: Land Utilization and the Environment*. SSSA Miscell. Publ., Madison, EEUU. pp. 21-25.
- Recycled Organics Unit.** 2006. Compost use for pest and disease suppression in NSW. Recycled Organics Unit. The Univ. of New South Wales, Australia. www.recycledorganics.com
- Rynk, R.** 2003. The art in the science of compost maturity. *Compost Science and Utilization* 11: 94-96.
- Rynk, R.; van der Kamp M.; Willson G.B.; Singley M.E.; Richard T.L.; Kolega J.J.; Gouin F.R.; Laliberty L.; Kay Jr. D.; Murphy D.W.; Hoitink H.A. y Brinton W.F.** 1992. On-farm composting handbook. Northeast Regional Agricultural Engineering Service, Coop. Extension Service. Ithaca, EEUU. 186 pp.
- Satti, P.** 2007. Biodisponibilidad de P y N en suelos volcánicos bajo bosque nativo, disturbados y enmendados. Tesis Doctoral Biología, CRUB-UNComahue, Bariloche, Argentina.
- Schulz, R. y Röemheld V.** 1997. Recycling of municipal and industrial organic wastes in agriculture: benefits, limitations, and means of improvement. *Soil Science and Plant Nutrition* 43: 1051-1056.
- Sharpley, A.N. y Moyer B.** 2000. Phosphorus forms in manure and compost and their release during simulated rainfall. *Journal of Environmental Quality* 29: 1462-1469.
- Siddique, M.T. y Robinson J.S.** 2003. Phosphorus sorption and availability in soils amended with animal manures and sewage sludge. *Journal of Environmental Quality* 32: 1114-1121.
- Siebert, S.** 2007. Compost from biodegradable waste-status and results of quality assurance in Germany. Advances in Bio-treatment in Europe: Part II. US Composting Council, 15th Annual Confer. & Tradeshow, Jan.21-24, Orlando, EEUU.
- Sims, J.T. y Sharpley A.N. (eds.).** 2005. Phosphorus, Agriculture and the Environment. American Soc. of Agronomy Monogr. ASA, Madison, EEUU. 1121 pp.
- TMECC.** 2001-2002. Test Methods for the Examination of Composting and Compost. Composting Council Research and Education Foundation (CCREF), Ronkonkoma, New York, EEUU.
- Tognetti, C.; Mazzarino M.J. y Laos F.** 2007. Improving the quality of municipal organic waste compost. *Bioresource Technology* 98: 1067-1076.
- USEPA.** 1993. Standards for the use or disposal of sewage sludge. U.S. Gov. Print. Office, Federal Register 58: 9248-9415. Washington D.C., EEUU.
- USEPA.** 1999. Standards for the use or disposal of sewage sludge. 40CFR Part 503. Proposed rule. Federal Register 64: 72045-72062. Washington, D.C., EEUU.
- USEPA.** 2003. Environmental Regulations and Technology Control of Pathogens and Vector Attraction in Sewage Sludge. EPA/625/R-92/013. EEUU.
- Van Soest, P.J. y Wine R.H.** 1967. Use of detergents in the analysis of fibrous feeds. IV. Determination of plant cell-wall constituents. *Journal of The Association of Official Analytical Chemists* 50: 50-55.
- Zmora-Nahum, S.; Markovitch O.; Tarchitzky J. y Chen Y.** 2005. Dissolved organic carbon (DOC) as a parameter of compost maturity. *Soil Biology and Biochemistry* 37: 2109-2116.
- Zucconi, F.; Pera A.; Forte M.E. y de Bertoldi M.** 1981a. Evaluating toxicity of immature compost. *BioCycle* 22: 54-57.
- Zucconi, F.; Forte M.; Monaco A. y de Bertoldi M.** 1981b. Biological evaluation of compost maturity. *BioCycle* 22: 27-29.
- Zucconi, F. y de Bertoldi M.** 1987. Compost specification for the production and characterization of compost from municipal solid waste. En: de Bertoldi M., Ferranti M.P., Hermite P.L. y Zucconi F. (eds.). *Compost: Production, Quality and Use*. Elsevier Applied Science Publishers, Barking, Inglaterra, pp. 30-50.