

Modelos de predicción del índice de madurez de abonos orgánicos producidos con tres procesos de transformación

R. Sánchez-Rosales, O.A. Hernández-Rodríguez*, J.A. Jiménez-Castro, D.L. Ojeda-Barrios, V.M. Guerrero-Prieto y R.A. Parra-Quezada

Facultad de Ciencias Agrotecnológicas, Universidad Autónoma de Chihuahua, Ciudad Universitaria s/n Campus 1, Chihuahua, CP 31310, México

Resumen

Los residuos orgánicos sometidos a procesos de descomposición controlada reducen los riesgos de contaminación y adquieren valor agronómico. El principal indicador de calidad de un producto de compostaje es el índice de madurez, que se determina con diferentes parámetros físicos, químicos y biológicos, resultando un proceso muy complejo. Los modelos matemáticos han demostrado ser una herramienta eficiente para evaluar numerosas interacciones entre variables con fines diagnósticos y predictivos. El objetivo fue generar los modelos de predicción del índice de madurez de abonos orgánicos producidos a partir de estiércol vacuno y aserrín de pino sometidos a vermicompostaje, semicompostaje y compostaje. Una mezcla de residuos orgánicos con relación carbono/nitrógeno de 25 fue sometida por separado a tres procesos de transformación durante 183 días. Se monitoreó la temperatura ambiental, temperatura de los residuos orgánicos, nitrógeno total, carbono orgánico, pH, relación carbono/nitrógeno, actividad enzimática de ureasa y fitotoxicidad. Se realizó un análisis multivariado revelando gran interacción entre variables. El análisis de componentes principales permitió detectar que la relación carbono/nitrógeno, pH y temperatura de los residuos orgánicos fueron las variables de mayor interacción para predecir el índice de madurez. Se observaron similitudes entre vermicompostaje y semicompostaje, pero diferencias con compostaje, generando dos modelos predictivos. La aplicación de las ecuaciones generadas permitió estimar el índice de madurez a partir de los 155 días para vermicompostaje y semicompostaje, y de los 183 días para compostaje. La aplicación de estos modelos permitirá predecir el tiempo óptimo para obtener características de madurez en productos sometidos a procesos de transformación.

Palabras clave: Vermicompostaje, semicompostaje, compostaje, análisis multivariado.

Predictive models of maturity index of organic fertilizers produced with three transformation processes

Abstract

Organic waste subjected to controlled decomposition processes reduces risks of contamination and acquires agronomic value. The main indicator of quality of a composting product is maturity index, which is determined with different physical, chemical and biological parameters, resulting in a very complex process. Mathematical models have proven to be an efficient tool to evaluate numerous interactions between variables for diagnostic and predictive purposes. The objective was to generate prediction models of maturity index of organic fertilizers produced from organic waste subjected to vermicomposting, semi-composting and composting. A mixture of bovine manure and pine sawdust, with a carbon/nitrogen ratio of 25, was subjected separately to three transformation processes for 183 days. Environmental tem-

* Autor para correspondencia: aernande@uach.mx

perature, organic waste temperature, total nitrogen, organic carbon, pH, carbon/nitrogen ratio, enzymatic activity of urease and phytotoxicity were monitored. A multivariate analysis was performed revealing a great interaction among the variables. Analysis of principal components allowed detecting that the carbon/nitrogen ratio, pH and temperature of organic residues were variables with greatest interaction to predict maturity index. Similarities were observed between vermicomposting and semicomposting, but differences with composting, generating two predictive models. Application of the generated equations allowed estimating the maturity index from 155 days for vermicomposting and semicomposting, and from 183 days for composting. Application of these models will allow predicting optimal time to obtain maturity characteristics in products subjected to transformation processes.

Keywords: Vermicomposting, semicomposting, composting, multivariate analysis.

Introducción

Las actividades agrícolas generan grandes cantidades de residuos orgánicos que impactan negativamente en suelo, agua o atmósfera cuando no son manejados adecuadamente (Flotats-Ripoll y Solé-Mauri, 2008; Ho et al., 2010). Por esta razón, los residuos orgánicos deben ser sometidos a procesos de descomposición controlada con lo que adquieren características de un importante valor agronómico al suministrarse al suelo y mejorar su estabilidad, la capacidad de retención de agua y mantener la reserva y disponibilidad de nutrientes (Barral et al., 2009), mientras que en plantas favorecen el proceso fotosintético, y en semillas estimulan la germinación y la rizogénesis, incrementando la producción de los cultivos (Canellas et al., 2015).

Los procesos de compostaje (CP), vermicompostaje (VC) y semicompostaje (SC) son útiles para obtener abonos orgánicos de calidad a partir de la degradación de residuos orgánicos hasta llegar a la formación de moléculas polimerizadas estables (Martínez-Blanco et al., 2010). Si bien, CP y VC son prácticas de referencia frecuente, el SC se trata de un sistema de transformación de tipo aeróbico que no atiende totalmente las características de CP ni de VC; al ocurrir en volúmenes menores a 1 m³ no alcanza la fase termófila (Black et al., 2014), el contenido de humedad se mantiene entre 50 a 60% (Castillo et al., 2010),

y sus productos han demostrado un importante estímulo en la germinación de semillas de lechuga y tomate (Hernández-Rodríguez et al., 2017). Dichos procesos de transformación presentan amplias diferencias derivadas de las singularidades de cada sistema, de las condiciones ambientales, así como del origen de los residuos, lo que se ve reflejado en las características de los abonos obtenidos (Hubbe et al., 2010). Sin embargo, los productos inmaduros pueden provocar problemas de contaminación por presencia de nitratos y fosfatos (Flotats-Ripoll y Solé-Mauri, 2008), ligninas, aceites aromáticos y resinas (Achten y Hofmann, 2009), también pueden poseer características de pH ácido y alto contenido de sales que afecten a los cultivos (Ho et al., 2010). Por lo que el principal requisito para el uso seguro de un producto de compostaje es observar alto grado de estabilidad y madurez, lo que implica disminución de la actividad microbiológica, en el primer caso (Bazrafshan et al. 2016) y ausencia de compuestos fitotóxicos y contaminantes, así como la existencia de sustancias promotoras de germinación y crecimiento en el segundo, confiriéndole importancia agronómica (Martínez-Balmori et al., 2014).

Los criterios usados frecuentemente para evaluar estabilidad y madurez poseen correspondencia, debido a que los materiales fitotóxicos son producto de la actividad microbiana en la materia orgánica (MO) inestable

(Selim et al., 2012), de ahí que temperatura, actividad enzimática o valoraciones respirométricas, son herramientas usadas para determinar estabilidad, aunque de manera indirecta, reflejan el estado de madurez, (Li et al., 2013). De igual manera la ausencia de cambios en los valores de pH y conductividad eléctrica (CE) durante el compostaje han sido relacionados con madurez (De Gannes et al., 2018). Además, el descenso de la relación carbono/nitrógeno (C/N) ha sido un valor usado frecuentemente para determinar la madurez de un compost, aunque se ha recomendado integrar otros parámetros como índice de germinación y NH_4/NO_3 (De Gannes et al., 2018); de esta manera los índices de madurez de productos sometidos a compostaje se han desarrollado a partir de estos indicadores, así como la relación entre compuestos aromáticos/compuestos alifáticos y parámetros de humificación (Fukushima et al., 2018).

Un abono maduro se caracteriza por presentar una temperatura estable, ausencia de olores desagradables, color de marrón a negro, valores de C/N menores a 13, un índice de germinación (IG) mayor a 80% (Zucconi et al., 1981), sin cambios significativos en los valores de pH, en la emisión de CO_2 , en el consumo de O_2 y en la actividad enzimática, entre otros aspectos. Sin embargo, habitualmente sólo se utiliza C/N para determinar el grado de madurez de los abonos (Iglesias-Jiménez et al., 2008), lo que no ha sido suficiente ya que se ha afirmado que se deben considerar diferentes criterios, representando un procedimiento muy complejo, pero fundamental, para definir el momento en el que el producto puede ser aplicado sin riesgo para los cultivos y el suelo (Majlessi et al., 2012). Por ello, se hace necesario desarrollar herramientas que permitan involucrar indicadores físicos, químicos y biológicos para realizar un diagnóstico integral de los productos durante el proceso (Komilis y Tziouvaras, 2009).

Los modelos matemáticos han sido aplicados para entender la dinámica de los residuos orgánicos durante procesos de transformación de compostaje a partir de la interacción de diferentes indicadores (Komilis y Tziouvaras, 2009), demostrando ser muy valiosos por su valor explicativo y diagnóstico cuando existe gran variedad de observaciones, de diversidad de residuos, de condiciones ambientales, así como de procesos de transformación (Ho et al., 2010). Sin embargo, la elaboración de las ecuaciones predictivas no es una práctica frecuente en la evaluación de compostaje y vermicompostaje (Li et al., 2013), por lo que existe la posibilidad de que sea una herramienta desaprovechada entre los productores, de manera que este trabajo aportaría una herramienta viable de fácil aplicación para realizar de manera indirecta el diagnóstico preciso de madurez en una mezcla de residuos orgánicos, optimizando la operación de los procesos de transformación (Magrí-Aloy et al., 2007). Por lo que el objetivo de este trabajo fue generar los modelos de predicción del índice de madurez de abonos orgánicos producidos a partir de estiércol vacuno y aserrín de pino sometidos a vermicompostaje, semicompostaje y compostaje. Los aportes de este trabajo permitirán ofrecer a los productores un enfoque alternativo para la toma de decisiones en la elaboración de abonos orgánicos de calidad.

Material y métodos

El experimento se estableció en las instalaciones de la Universidad Autónoma de Chihuahua, Chihuahua, México, ubicado en las coordenadas: 28° 39' 25,3" N, 106° 05' 13,5" O, con clasificación climatológica BSh, según Köppen modificado por García (García, 1981), con temperatura máxima de 34 °C y mínima de 9,6 °C, así como 403 mm al año de precipitación pluvial. La duración del experimento

fue de 183 días, llevándose a cabo de abril a octubre del 2014. Para la elaboración de las mezclas iniciales se utilizó como fuente de nitrógeno, estiércol vacuno de ganado de engorda, alimentado con alfalfa deshidratada, proveniente del rastro Tipo Inspección Federal de la ciudad de Chihuahua, el cual fue recogido de los corrales de descanso después de 35 días de su deposición conservado a temperatura ambiente a la sombra. Como fuente de carbono se utilizó aserrín de pino proporcionado por una comercializadora maderera local.

La caracterización del contenido de carbono orgánico total (COT), nitrógeno total (Nt) y humedad de los residuos orgánicos empleados, se realizó para calcular la cantidad de cada uno de ellos en la preparación de una mezcla inicial con C/N igual a 25, recomendado para obtener abonos de calidad en procesos de CP, VC (Sharma y Garg 2018) y SC (Castillo et al., 2010) (Tabla 1).

Esta mezcla se sometió por separado a tres procesos de descomposición: VC, SC y CP; para los dos primeros se usaron contenedores plásticos con capacidad de 60 L con seis perforaciones de 0,5 cm de diámetro en la base para permitir el drenaje, y para el CP se llenaron cajas tipo pallet de 84 x 115 x 115 cm, con una capacidad de 1110,9 L (Sánchez-Rosales et al., 2017). En el VC se inocularon 10 lombrices adultas de la variedad roja californiana (*Eisenia foetida* [Savigny, 1826]) por litro de sustrato a los seis días de compostaje (DDC) (Castillo et al., 2010). Los riegos se aplicaron diariamente en VC para mantener la humedad entre 75 a 85% (Castillo et al., 2010) y a criterio para mantener la humedad de 50 a 60% en SC y CP, lo que se determinó mediante la prueba al tacto (NRAES 1999; Soto y Muñoz, 2002). Las mezclas sometidas a SC y CP se removieron mecánicamente cada 28 días para homogenizar el contenido y reducir la formación de zonas anaerobias (Sánchez-Rosales et al., 2017).

Tabla 1. Características de los residuos orgánicos utilizados para la elaboración de la mezcla inicial sometida a transformación.

Table 1. Characterization of the waste used for the preparation of the initial mixture subjected to transformation.

Ingrediente	Humedad (%)	Nt (%)*	COT(%)*	C/N
Estiércol vacuno	20,3 ± 0,5	1,6 ± 0,1	23,0 ± 0,5	14,8 ± 0,5
Aserrín de pino	3,8 ± 0,1	0,66 ± 0,0	47,6 ± 1,8	71,1 ± 2,6

Nt: nitrógeno total. COT: carbono orgánico total. C/N: relación carbono/nitrógeno. * Base seca. (P ≤ 0,05).

Se tomaron muestras a los 4, 35, 68, 98, 127, 141, 155, 169 y 183 DDC. Una parte de la muestra se secó a la sombra a temperatura ambiente, se tamizó en malla No. 20 (1 mm de diámetro) y se empacó en bolsas de polietileno hasta su análisis químico. Para la determinación de la actividad enzimática de ureasa (AEU) se reservó muestra fresca en re-

frigeración a 4 °C. Las variables evaluadas fueron: temperatura ambiental con un termómetro de máximas y mínimas (Fisher Scientific, Pittsburgh, Pennsylvania, USA); temperatura de los sustratos (Temp) con termómetro de pistilo a un rango mínimo de -20 °C y máximo de 110 °C. En los residuos orgánicos se cuantificó por triplicado: Nt por el

método Micro-Kjeldahl (APHA 1992); COT con el método de Walkley-Black por oxidación de dicromato de potasio (ASTM 2001); pH con potenciómetro Fisher Scientific Ac-cument AB15 US, en dilución con agua des-ionizada en relación 1:10 (p/v); AEU midiendo el amonio liberado después de la incubación de la muestra con una disolución de urea a 37 °C durante 120 minutos, según el método de Kandeler et al., (1999); fitotoxicidad mediante el IG en semillas de lechuga (*Lactuca sativa*) expuestas a extractos acuosos de los residuos en transformación, usando el método descrito por Zucconi et al., (1981) a partir de los 141 DDC, ya que, Hernández-Rodríguez et al. (2011) encontraron valores de IG inferiores al 100% en compost de 130 días elaborados a partir de mezclas de gallinaza, aserrín y esquilmos de maíz en condiciones similares a las de este estudio, lo que sugiere que después de ese día, los residuos presentan menor riesgo de fitotoxicidad.

El experimento consistió en tres tratamientos con tres repeticiones y tres mediciones analíticas. Se utilizó un diseño de parcelas divididas con observaciones a través del tiempo, quedando definido el efecto de parcela principal por el tratamiento de descomposición de los residuos orgánicos, y la sub-parcela por la medición en el tiempo.

La evaluación estadística se realizó en dos etapas, en la primera se ajustó el modelo de parcelas divididas en el tiempo (ANOVA) y la comparación de medias mediante la prueba de Tukey ($P \leq 0,05$); en la segunda etapa se realizó la matriz de correlaciones y el análisis de componentes principales. Con los resultados de componentes principales se elaboraron los modelos predictivos de madurez mediante modelos no lineales de tipo exponencial negativo. Para el análisis estadístico se utilizó el programa SAS (Statistical Analysis System) versión 9.0.

Resultados

El detalle de las temperaturas registradas se presenta en la Figura 1. En los residuos orgánicos sometidos a CP se presentó la fase termófila desde los 4 a los 105 DDC, con el posterior enfriamiento de los residuos, en tanto que la Temp de la mezcla en VC y SC tuvo un comportamiento similar a la temperatura ambiental lo que está relacionado con los volúmenes de residuos orgánicos utilizados (Castillo et al., 2010).

Las medias de las variables analizadas en los residuos en estudio se presentan en la Tabla 2. El porcentaje de Nt en los residuos en transformación en los tres procesos a través del tiempo, presentó incremento paulatino siendo significativo a los 68 DDC para VC y CP, y a los 35 DDC para SC; en este mismo sentido se observaron también diferencias a los 98 y 155 DDC.

En cuanto a la concentración de COT en los residuos orgánicos se registraron descensos en los tres procesos, a los 68 DDC en VC y CP, con cambios posteriores no significativos, en tanto que el descenso en SC se registró a los 35 DDC con cambios subsecuentes no significativos, momento en el que también se observaron significancias entre VC, SC y CP.

El valor de C/N de los residuos orgánicos es el reflejo del contenido de Nt y COT, por lo que se vincula de manera directa con estos resultados; en este estudio mostró disminución a través del tiempo en los tres procesos. En VC y CP la disminución significativa fue detectada a los 68 DDC y los cambios posteriores no fueron significativos, mientras que en los residuos orgánicos transformados mediante SC se observó disminución significativa de C/N desde los 4 a los 169 DDC.

Los valores de pH en los residuos sometidos a VC registraron un descenso significativo

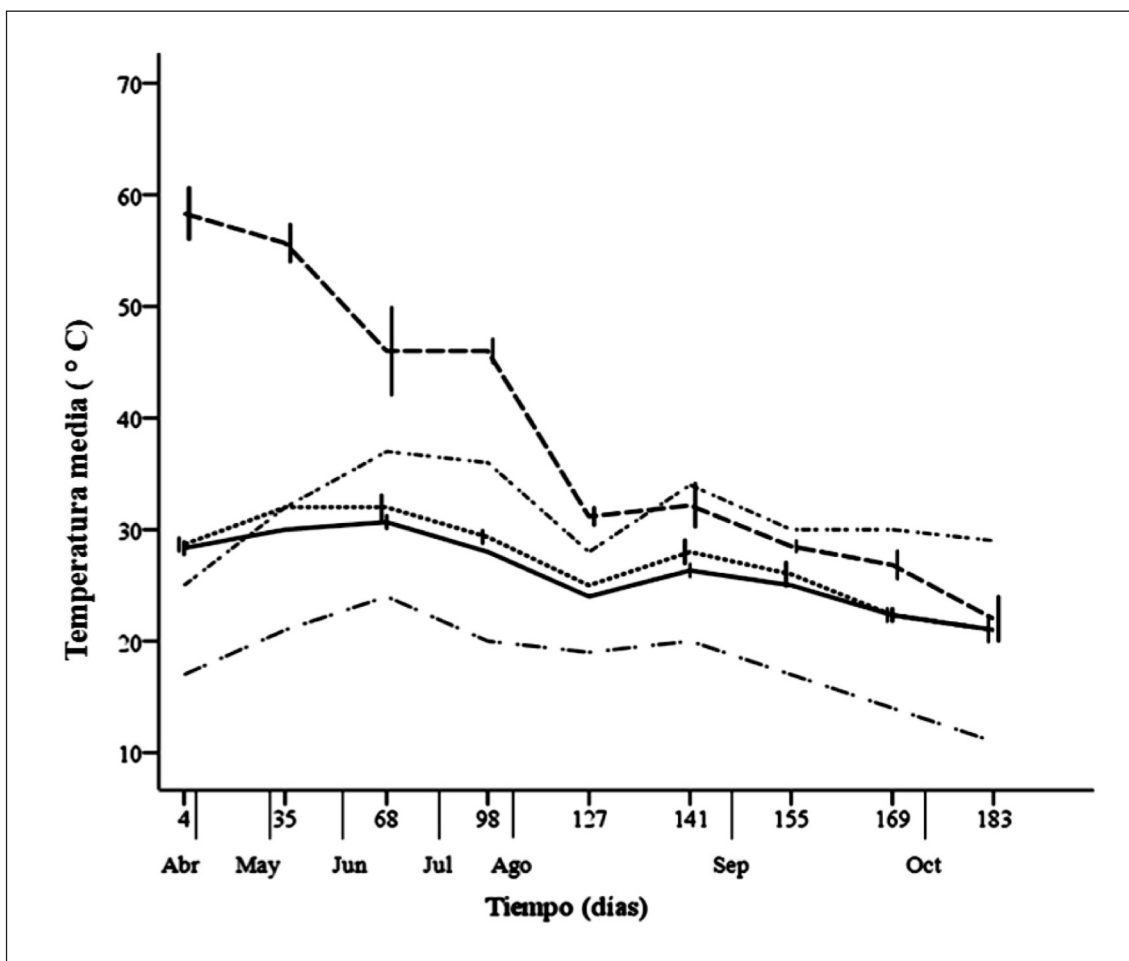


Figura 1. Variación de la temperatura ambiental y de los residuos orgánicos sometidos a tres procesos de transformación.

— Vermicompostaje, Semicompostaje, --- Compostaje, ·-·-· • Temperatura máxima ambiental, ·-·-·-· Temperatura mínima ambiental.

Figure 1. Variation of environmental temperature and that of organic waste subjected to three transformation processes.

— Vermicomposting, Semicomposting, --- Composting, ·-·-· • Maximum temperature, ·-·-·-· Minimum temperature.

Tabla 2. Análisis de varianza y medias de parámetros de los residuos orgánicos durante el proceso de transformación.
 Table 2. Analysis of variance and mean of parameters of organic waste during transformation process.

Sistemas	Días de compostaje								
	4	35	68	98	127	141	155	169	183
	Nitrógeno total (%)*								
VC	1,4 ± 0,1 ^{Aa}	1,5 ± 0,2 ^{Ba}	1,8 ± 0,1 ^{Ab}	1,7 ± 0,1 ^{Bb}	1,7 ± 0,1 ^{Ab}	1,7 ± 0,1 ^{Bb}	1,7 ± 0,0 ^{Bb}	1,6 ± 0,1 ^{Ab}	1,8 ± 0,1 ^{Ab}
SC	1,4 ± 0,2 ^{Aa}	1,7 ± 0,0 ^{Abc}	1,7 ± 0,1 ^{Abc}	1,7 ± 0,1 ^{Bbc}	1,8 ± 0,1 ^{Bbc}	1,8 ± 0,0 ^{Bbc}	1,8 ± 0,1 ^{Bbc}	1,7 ± 0,1 ^{Ab}	1,9 ± 0,1 ^{Ac}
CP	1,5 ± 0,1 ^{Aa}	1,6 ± 0,1 ^{Aab}	1,7 ± 0,1 ^{Ab}	1,5 ± 0,0 ^{Aa}	1,6 ± 0,0 ^{Aab}	1,5 ± 0,1 ^{Aab}	1,6 ± 0,1 ^{Aab}	1,5 ± 0,0 ^{Aab}	1,7 ± 0,1 ^{Ab}
	Carbono orgánico total (%)*								
VC	29,9 ± 2,8 ^{Aa}	28,9 ± 1,9 ^{Ba}	21,2 ± 0,6 ^{Cb}	23,4 ± 1,3 ^{Ab}	20,3 ± 1,3 ^{Abc}	18,1 ± 2,8 ^{Bc}	23,2 ± 0,6 ^{Abc}	20,3 ± 3,4 ^{Abc}	23,2 ± 0,6 ^{Bb}
SC	30,1 ± 2,6 ^{Aa}	25,8 ± 2,2 ^{Bab}	25,7 ± 1,2 ^{Bb}	23,9 ± 2,4 ^{Bbc}	21,8 ± 2,2 ^{Bbc}	19,6 ± 0,6 ^{Abc}	22,6 ± 1,3 ^{Abc}	16,6 ± 1,2 ^{Bc}	23,2 ± 0,1 ^{Bb}
CP	28,8 ± 0,9 ^{Aa}	23,6 ± 0,3 ^{Ab}	18,3 ± 0,9 ^{Ac}	19,9 ± 1,7 ^{Ac}	18,0 ± 2,0 ^{Ac}	21,5 ± 3,1 ^{Abc}	20,7 ± 2,3 ^{Abc}	19,2 ± 2,1 ^{Ac}	19,1 ± 1,2 ^{Ac}
	Relación Carbono/Nitrógeno								
VC	21,1 ± 1,0 ^{Aa}	20,2 ± 3,0 ^{Aa}	12,1 ± 0,7 ^{Bbc}	14,2 ± 1,2 ^{Ab}	12,4 ± 1,2 ^{Ab}	10,6 ± 2,5 ^{Bc}	13,3 ± 0,2 ^{Ab}	12,5 ± 2,6 ^{Abc}	12,9 ± 1,1 ^{Ab}
SC	21,6 ± 1,3 ^{Aa}	15,7 ± 1,2 ^{Bb}	15,6 ± 1,5 ^{Ab}	13,8 ± 1,6 ^{Ab}	12,1 ± 0,4 ^{Abc}	10,9 ± 0,2 ^{Bcd}	13,0 ± 1,1 ^{Abc}	9,8 ± 0,3 ^{Bd}	12,3 ± 0,5 ^{Ac}
CP	19,6 ± 1,6 ^{Aa}	14,6 ± 1,3 ^{Bb}	11,1 ± 0,1 ^{Bc}	13,6 ± 1,0 ^{Abc}	11,5 ± 1,3 ^{Ac}	14,5 ± 3,3 ^{Ab}	13,5 ± 2,5 ^{Abc}	12,8 ± 1,4 ^{Abc}	11,2 ± 1,3 ^{Ac}
	pH								
VC	8,9 ± 0,1 ^{Aa}	7,7 ± 0,2 ^{Cb}	7,6 ± 0,1 ^{Cb}	7,1 ± 0,2 ^{Cc}	7,3 ± 0,1 ^{Cc}	7,5 ± 0,2 ^{Bbc}	7,6 ± 0,1 ^{Cb}	7,3 ± 0,1 ^{Bc}	7,5 ± 0,1 ^{Cbc}
SC	8,6 ± 0,1 ^{Aa}	8,1 ± 0,2 ^{Bb}	7,9 ± 0,4 ^{Bb}	7,5 ± 0,0 ^{Bc}	7,9 ± 0,2 ^{Bb}	7,6 ± 0,1 ^{Bc}	8,1 ± 0,1 ^{Bb}	7,6 ± 0,2 ^{Bc}	7,9 ± 0,2 ^{Bb}
CP	8,8 ± 0,2 ^{Aa}	8,9 ± 0,4 ^{Aa}	8,9 ± 0,2 ^{Aa}	8,9 ± 0,2 ^{Aa}	9,6 ± 0,3 ^{Ab}	8,2 ± 0,3 ^{Ac}	9,6 ± 0,0 ^{Ab}	8,9 ± 0,2 ^{Aa}	9,6 ± 0,2 ^{Ab}
	Actividad enzimática de ureasa (µmoles de N-NH4+/g)								
VC	461 ± 297 ^{Aab}	496 ± 62 ^{Aa}	402 ± 58 ^{Aab}	554 ± 58 ^{Aa}	436 ± 32 ^{Aab}	464 ± 73 ^{Aab}	465 ± 56 ^{Aa}	460 ± 22 ^{Aab}	301 ± 43 ^{Ab}
SC	289 ± 66 ^{Aa}	609 ± 119 ^{Ab}	437 ± 36 ^{Aab}	566 ± 136 ^{Aab}	525 ± 154 ^{Aab}	405 ± 99 ^{Aab}	284 ± 169 ^{Ac}	424 ± 39 ^{Aab}	197 ± 39 ^{Bc}
CP	598 ± 176 ^{Aab}	651 ± 230 ^{Aab}	352 ± 96 ^{Ab}	620 ± 143 ^{Aab}	819 ± 302 ^{Aa}	634 ± 325 ^{Aab}	371 ± 108 ^{Aab}	411 ± 89 ^{Aab}	307 ± 41 ^{Ab}
	Índice de germinación (%)								
VC	-	-	-	-	-	96,8 ± 11,4 ^{Aa}	146,1 ± 22,7 ^{Ab}	132,8 ± 1,9 ^{Bb}	100,2 ± 0,9 ^{Aa}
SC	-	-	-	-	-	137,5 ± 5,7 ^{Bab}	152,9 ± 17,7 ^{Ab}	116,9 ± 9,7 ^{Aa}	102,8 ± 8,4 ^{Aa}
CP	-	-	-	-	-	124,3 ± 17,5 ^{Ba}	156,6 ± 39,3 ^{Ab}	105,7 ± 11,5 ^{Aac}	96,8 ± 12,8 ^{Ac}

VC: Vermicompostaje. SC: semicompostaje. CP: compostaje. * Base seca.

Valores con letras mayúsculas superíndices distintas (ABC) son significativamente diferentes para tratamiento y con letras minúsculas superíndices distintas (abcd) significativamente diferentes para tiempo, según prueba de Tukey ($P \leq 0,05$).

para VC a los 98 DDC. Ascensos y descensos significativos fueron observados en SC hasta los 183 DDC, en tanto que en los residuos del CP los valores de pH observados aumentaron significativamente de los 98 a los 127 DDC, con cambios posteriores no significativos.

Un incremento significativo de la AEU se presentó durante el tiempo en los tres procesos; los mayores valores de la AEU se registraron a los 98, 35 y 121 DDC en las mezclas de VC, SC y CP, respectivamente, en tanto que se registró el rango significativo menor a los 183 DDC para VC, SC y CP.

La fitototoxicidad de los residuos es indirectamente proporcional al IG, el cual mostró un incremento en los tres procesos a los 155 DDC respecto a lo observado a los 141 DDC, siendo significativo en VC y CP, disminuyendo posteriormente. En VC y CP estos cambios no tuvieron significancia desde los 169 DDC y en los residuos de SC fue después de los 155 DDC.

El modelaje estadístico se inició con la identificación de los indicadores asociados con el índice de madurez a partir del análisis de correlaciones entre los parámetros evaluados (Tabla 3), con lo que se evidenciaron aquellos que presentaron los valores mayores de correlación, siendo estos Temp, pH, C/N, COT y Nt. Se consideró omitir los valores referentes a COT y Nt, usando C/N, ya que esta representa la proporción del valor numérico del contenido de COT y Nt, y es usada frecuentemente para evaluar la madurez de los productos del compostaje (Raj y Antil, 2011).

Los valores de correlación entre los tres parámetros seleccionados fueron positivos para VC y SC, lo que se relaciona con la disminución de las medias de las tres variables durante el tiempo (Tabla 3). Para el CP el valor de correlación entre C/N y Temp fue positivo, mientras que los valores de las correlaciones entre pH con C/N y Temp fueron negativos, observándose que mientras C/N y Temp disminuyen, el pH se mantiene constante o aumenta.

Posteriormente se procedió a realizar el análisis de componentes principales, lo que permitió cuantificar la significancia de las variables seleccionadas por su participación en explicar el índice de madurez de los residuos orgánicos a través del tiempo (Tabla 4), lo que se evaluó por medio de los eigenvalores y los eigenvectores. Este análisis permitió agrupar las variables de mayor correlación por bloques o componentes principales (CPRIN), logrando con el CPRIN 1 una explicación de aproximadamente el 70% del índice de madurez, lo que es considerado un valor razonable de correlación (Montanero, 2008).

Para generar las ecuaciones de los modelos de predicción del índice de madurez, se utilizó el CPRIN 1 con una constante aditiva, mediante el procedimiento de estimación de modelos no lineales ajustando el modelo exponencial negativo, según la siguiente ecuación:

$$Y_t = a + be^{-ct} + E_i$$

Donde:

Y = Índice de Madurez

t = Tiempo (días)

a = Parámetro del modelo

b = Parámetro del modelo

e^{-ct} = Exponente del parámetro del modelo por el tiempo

E_i = Incertidumbre

Los valores para cada uno de los parámetros de estimación fueron similares para VC y SC, por lo que se decidió elaborar un modelo conjunto; por otro lado, en CP la variación entre los intervalos de confianza fue tan amplia, que el modelo de predicción no logró ajustarse satisfactoriamente, aun así, la línea de predicción pasó por el medio de las observaciones (Tabla 5).

De acuerdo a estos resultados se elaboraron las ecuaciones de los modelos predictivos del

Tabla 3. Matriz de correlaciones de las variables observadas en residuos orgánicos sometidos a tres procesos de transformación.

Table 3. Matrix of correlations with variables observed in organic waste subjected to three transformation processes.

	COT	Nt	C/N	pH	AEU	Temp
VC						
COT	1					
Nt	-0,5839	1				
C/N	0,9227	-0,8357	1			
pH	0,6866	-0,5370	0,7194	1		
AEU	0,0686	-0,0871	0,0688	-0,1595	1	
Temp	0,3734	-0,3461	0,4279	0,3589	0,2753	1
SC						
COT	1					
Nt	-0,4008	1				
C/N	0,9082	-0,7278	1			
pH	0,6600	-0,4980	0,7481	1		
AEU	0,0917	-0,2402	0,1346	-0,1853	1	
Temp	0,5214	-0,4310	0,5184	0,1877	0,4487	1
CP						
COT	1					
Nt	-0,2305	1				
C/N	0,9258	-0,4656	1			
pH	-0,3997	0,1674	-0,4468	1		
AEU	0,0819	-0,0191	-0,0049	0,1826	1	
Temp	0,6961	0,0030	0,6183	-0,6583	0,1992	1

COT: carbono orgánico total. Nt: nitrógeno total. C/N: relación carbono/nitrógeno. AEU: actividad enzimática de ureasa. Temp: temperatura. VC: Vermicompostaje. SC: semicompostaje. CP: compostaje.

índice de madurez para VC-SC y CP, las que se describen como sigue:

$$IM_{(VC-SC)} = 2,351 + 4,8016^{(-0,0123 \times t)}$$

$$IM_{(CP)} = 1,358 + 5,2636^{(-0,00762 \times t)}$$

En la Figura 2 se presenta la predicción del índice de madurez a través del tiempo, la que refleja la interacción entre C/N, pH y Temp, y en donde el valor menor de la pendiente de la curva está vinculado con la madurez de los productos.

Tabla 4. Eigenvalores y eigenvectores del primer componente principal para las variables relación carbono/nitrógeno, pH y temperatura en tres procesos de transformación.

Table 4. Eigenvalues and eigenvectors of first principal component for C/N ratio, pH and temperature in three transformation processes.

		Proceso		
		VC	SC	CP
Eigenvalor (%)		67,4	66,8	71,8
Eigenvector	C/N	0,5280	0,5330	0,5333
	pH	0,4383	0,4121	-0,3993
	Temp	0,3048	0,3585	0,4831

C/N: relación carbono/nitrógeno. Temp: temperatura. VC: vermicompostaje. SC: semicompostaje. CP: compostaje.

Tabla 5. Valores estadísticos de los límites de confianza para los modelos de predicción del índice de madurez en residuos sometidos a sistemas de transformación.

Table 5. Statistical values of confidence limits for maturity index prediction models in waste subjected to transformation systems.

Sistema	Parámetro del modelo	Estimación	Error estándar	Límite de confianza aproximado (95%)	
VC	a	2,4938	0,3288	1,8151	3,1725
	b	4,8327	0,3243	4,1652	5,5002
	c	0,0139	0,00291	0,00791	0,0199
SC	a	2,129	0,7717	0,5363	3,7216
	b	4,8464	0,6782	3,4467	6,2462
	c	0,0106	0,00414	0,00208	0,0191
VC-SC	a	2,3510	0,3479	1,6526	3,0495
	b	4,8016	0,3183	4,1626	5,4405
	c	0,0123	0,00248	0,00738	0,0173
CP	a	1,3580	1,7246	-2,2284	4,9444
	b	5,2636	1,5430	2,0547	8,4724
	c	0,00762	0,00487	-0,00251	0,0178

VC: vermicompostaje. SC: semicompostaje. CP: compostaje.

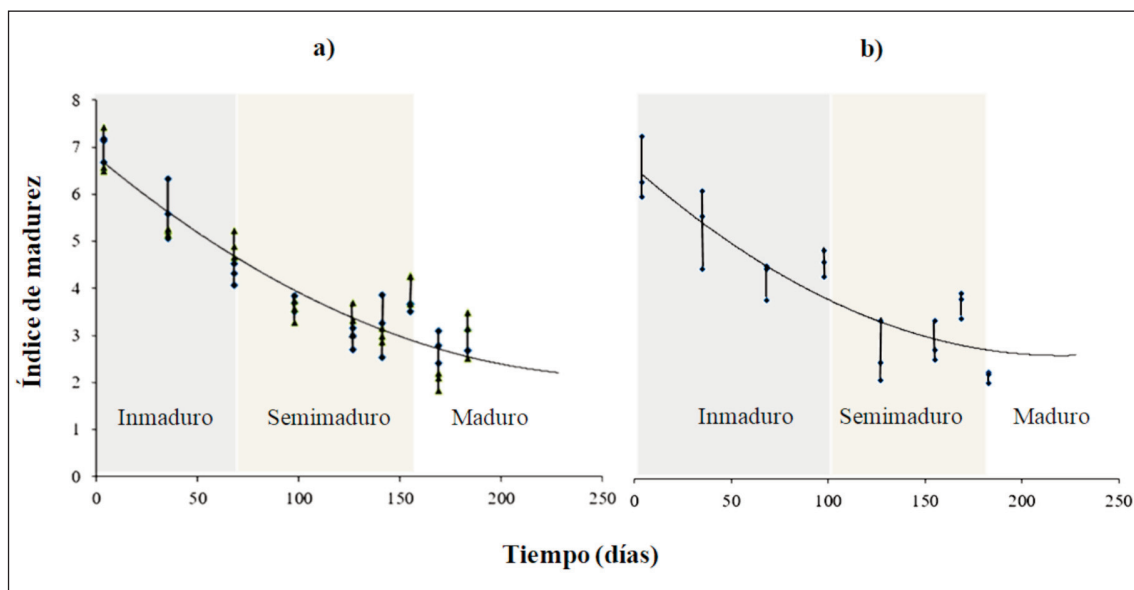


Figura 2. Modelos de predicción del Índice de Madurez y Gradación de Madurez para los procesos de descomposición de residuos orgánicos.

a) Vermicompostaje-Semicompostaje, b) Compostaje.

Figure 2. Prediction models of Maturity Index and Maturity Gradation for organic waste decomposition processes.

a) Vermicomposting-Semicomposting, b) Composting.

A partir de dicha curva de ajuste se desarrolló la gradación de madurez, estableciéndose tres grados: estado inmaduro, representado por la fase en la que el elevado nivel de procesamiento proporciona a la curva una pronunciada pendiente; estado semimaduro, en que la curva posee una pendiente menos pronunciada, dada por un grado de transformación moderado, y estado maduro, caracterizado por una pendiente suave o nula y que refleja un bajo grado de transformación (Figura 2). Los parámetros observados correspondientes a cada gradación de madurez, para los tres sistemas, se presentan en la Tabla 6. De acuerdo a lo anterior, el estado maduro fue determinado a partir de los 155 DDC para VC y SC, en tanto que para CP fue a partir de los 183 días.

Discusión

De acuerdo a los modelos generados, los residuos orgánicos transformados presentaron madurez similar en tiempo cuando fueron sometidos a VC y SC, y diferente cuando fueron transformados mediante CP. Para el caso de VC y SC a partir de los 155 DDC los residuos mostraron valores de C/N menor a 15 y pH de 6,0 a 7,5, características de un abono orgánico de calidad (Majlessi et al., 2012). Para CP los residuos presentaron valores de C/N menor a 13, pH entre 6,7 y 8,0 y Temp con una diferencia menor a 10 °C de la ambiental, a los 183 DDC, lo que es considerado como un compost de calidad agronómica (Bernal et al., 2009); sin embargo, la aplicación de la ecuación generada revela que, de continuar

Tabla 6. Gradación del estado de madurez de residuos orgánicos en relación con valores de parámetros indicadores observados.

Table 6. Gradation of the state of maturity of organic waste in relation to values of observed indicator parameters.

Estado	Parámetro	Sistema	
		VC-SC	CP
Inmaduro	C/N	$\geq 17,7$	$\geq 15,1$
	pH	7,6-8,9	8,8-9,1
	Temp	28,0-32,3	$\geq 50,0$
Semimaduro	C/N	12,4-17,6	12,8-15,0
	pH	7,3-7,5	9,2-9,6
	Temp	24,0-27,9	35,0-49,9
Maduro	C/N	$\leq 12,3$	–
	pH	7,3-7,6	–
	Temp	22,9	–

C/N: relación carbono/nitrógeno, Temp: temperatura, VC: vermicompostaje, SC: semicompostaje, CP: compostaje.

con el proceso de CP se mejorarían las características de madurez del producto final.

Esta información es interesante ya que permite inferir que existen diferencias relacionadas con la calidad de los abonos orgánicos, así como predecir el tiempo adecuado para obtener características de madurez en los abonos finales según el sistema en el que fueron producidos.

Sun et al. (2011) informaron sobre la utilidad de los modelos estadísticos para realizar diagnósticos sobre el proceso de transformación de residuos orgánicos y concluyeron que, para determinar la madurez de un compost con un análisis multivariado, la mayor correlación fue entre C/N y las poblaciones de microorganismos de tipo mesófilo, lo que coincide con los resultados del presente estudio, debido a que fue C/N la que presentó el valor más elevado de correlación con pH y

Temp. Por otro lado Komilis y Tziouvaras (2009) al evaluar la madurez de diferentes mezclas basadas en estiércol vacuno y pollinaza, encontraron que C/N sólo tuvo correlación directa con el contenido de N.

La fuerte correlación entre C/N, pH y Temp observada en este estudio también coincide con Saldarriaga et al. (2018) quienes informaron que, a partir de C/N, es posible elaborar un índice de madurez, debido a que este parámetro está altamente vinculado con COT y pH, parámetros reconocidos para estimar de manera efectiva la madurez en residuos sólidos municipales sometidos a CP.

En el presente estudio, los porcentajes de explicación con el CPRIN 1 para VC, SC y CP con los parámetros C/N, pH y Temp fueron similares a lo observado por Senthil et al. (2014) quienes reportaron una explicación del 80% con el CPRIN 1 al caracterizar residuos flora-

les sometidos a VC, con los parámetros C/N, pH y COT. Por otro lado, Zbytniewski y Buszewski (2005) lograron explicar con el CPRIN 1 sólo el 41,9% a partir de 18 parámetros químicos y biológicos, considerando que C/N fue el parámetro que presentó la mayor correlación.

Las gradaciones de madurez observadas en este experimento coinciden con lo observado por Zbytniewski y Buszewski (2005) quienes, a partir del análisis multivariado, identificaron tres estados de madurez en lodos residuales sometidos a CP. En este mismo sentido Ho et al. (2010) encontraron que los valores de humedad, temperatura, pH, C/N e IG estuvieron altamente correlacionados al evaluar procesos de transformación y establecieron tres fases de madurez: de 1 a 3 semanas, fase de inicio; de 4 a 7 semanas, fase termófila, y de 8 a 15 semanas, fase de enfriamiento.

Aunque los modelos generados en este experimento refieren al índice de madurez, este puede orientar sobre la estabilidad de los residuos, ya que Young et al. (2016) encontraron que los índices de estabilidad y madurez en residuos agropecuarios estuvieron fuertemente correlacionados entre sí.

Conclusiones

El índice de madurez de una mezcla de estiércol vacuno y aserrín de pino sometidos a vermicompostaje, semicompostaje y compostaje se vinculó mayormente con las variables C/N, pH y temperatura.

El análisis de las variables de cada uno de los procesos de descomposición generaron dos modelos, uno que correspondió a la predicción del índice de madurez de los residuos orgánicos sometidos a vermicompostaje y semicompostaje, y otro para compostaje.

Los modelos generados revelaron la predicción del índice de madurez de los residuos sometidos a transformación, a partir de los 155

días para vermicompostaje y semicompostaje, y a partir de los 183 días para el compostaje.

Debido a que los resultados del presente estudio respondieron a condiciones específicas relacionadas con el tipo de residuos orgánicos, procesos de transformación y condiciones ambientales, es necesario validar la capacidad de predicción de los modelos generados en futuras investigaciones bajo características experimentales similares, con el objeto de obtener un grado de confianza que permita desarrollar una herramienta para la elaboración de abonos orgánicos de calidad.

Agradecimientos

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, a través del Programa Nacional de Posgrados de Calidad en el posgrado de Hortofruticultura de la Facultad de Ciencias Agrotecnológicas de la Universidad Autónoma de Chihuahua.

Referencias bibliográficas

- Achten C, Hofmann T (2009). Native polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH) in coals-A hardly recognized source of environmental contamination. *Science of the total Environment* 407: 2461-2473.
- APHA (1992). Standard methods for the examination of water and wastewater. 18th ed. American Public Health Association. Washington, EUA. 541 pp.
- ASTM (2001). Standard test methods for moisture, ash and organic matter of peat and other organic soils. *Annual Book of ASTM*. American Society for Testing and Materials. West Conshohocken, Pennsylvania, USA. 631 pp.
- Barral MT, Paradelo R, Moldes AB, Domínguez M, Díaz-Fierros F (2009). Utilization of MSW compost for organic matter conservation in agricultural soils of NW Spain. *Resources, Conservation and Recycling* 53: 529-534.

- Bazrafshan E, Zarei A, Mostafapour FK, Poormollae N, Mahmoodi S, Zazouli MA (2016). Maturity and stability evaluation of composted municipal solid wastes. *Health Scope* 5: e33202.
- Bernal MP, Albuquerque JA, Moral R (2009). Composting of animal manures and chemical criteria for compost maturity assessment. A review. *Bioresource technology* 100: 5444-5453.
- Black RA, Taraba JL, Day GB, Damasceno FA, Newman MC, Akers KA, Wood CL, McQuerry KJ, Bewley JM (2014). The relationship between compost bedded pack performance, management, and bacterial counts. *Journal of dairy science* 97: 2669-2679.
- Canellas LP, Olivares FL, Aguiar NO, Jones DL, Nebioso A, Mazzei P, Piccolo A (2015). Humic and fulvic acids as biostimulants in horticulture. A review. *Scientia Horticulturae* 196: 15-27.
- Castillo H, Hernández A, Domínguez D, Ojeda D (2010). Effect of Californian red worm (*Eisenia foetida*) on the nutrient dynamics of a mixture of semicomposted materials. *Chilean Journal of Agricultural Research* 70: 465-473.
- De Gannes V, Eudoxie G, Hickey WJ (2018). Feedstock Carbon Influence on Compost Biochemical Stability and Maturity. *Compost Science & Utilization* 26: 59-70.
- Flotats-Ripoll X, Solé-Mauri F (2008). 2. Situación actual en el tratamiento de los residuos orgánicos: aspectos científicos, económicos y legislativos. En: *Compostaje*. (Ed. Moreno Casco J y Moral Herrero R), pp. 43-73. Mundi-Prensa, Madrid, España.
- Fukushima M, Tu X, Aneksampant A, Tanaka A (2018). Analysis of branched-chain fatty acids in humic substances as indices for compost maturity by pyrolysis-gas chromatography/mass spectrometry with tetramethylammonium hydroxide (TMAH-py-GC/MS). *Journal of Material Cycles and Waste Management* 20: 176-184.
- García E (1981). Modificaciones al proceso de clasificación climática de Köppen para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana, 3ª Ed. Editorial Laros, México. 252 pp.
- Hernández-Rodríguez OA, Arras-Vota AM, López-Díaz JC, Velázquez-Martínez N, Ojeda-Barrios D, Vences-Contreras C (2011). Índice de fitotoxicidad de enmiendas orgánicas en lechuga (*Lactuca sativa* L.). *Revista Mexicana de Agrogocios*. Quinta época. Número especial. Julio-Diciembre. 123-130.
- Hernández-Rodríguez A, Robles-Hernández L, Ojeda-Barrios D, Prieto-Luévano J, González-Franco AC, Guerrero-Prieto V (2017). Semi-compost and vermicompost mixed with Peat moss enhance seed germination and development of lettuce and tomato seedlings. *Interiencia* 42: 774-779.
- Ho CP, Yuan ST, Jien SH, Hseu ZY (2010). Elucidating the process of co-composting of biosolids and spent activated clay. *Bioresource technology* 101: 8280-8286.
- Hubbe MA, Nazhad M, Sánchez C (2010). Composting as a way to convert cellulosic biomass and organic waste into high-value soil amendments: A review. *BioResources* 5: 2808-2854.
- Iglesias-Jiménez E, Barral-Silva MT, Marhuenda-Egea FC (2008). 11. Indicadores de la estabilidad y madurez del compost. En: *Compostaje*. (Ed. Moreno Casco J y Moral Herrero R), pp. 243-283. Mundi-Prensa, Madrid, España.
- Kandeler E, Stemmer M, Klimanek EM (1999). Response of soil microbial biomass, urease and xylanase within particle size fractions to long-term soil management. *Soil Biology and Biochemistry* 31: 261-273.
- Komilis DP, Tziouvaras IS (2009). A statistical analysis to assess the maturity and stability of six composts. *Waste Management* 29: 1504-1513.
- Li Z, Lu H, Ren L, He L (2013). Experimental and modeling approaches for food waste composting. A review. *Chemosphere* 93: 1247-1257.
- Magrí-Aloy A, Flotats-Ripoll X, Illa-Alobés J, Solé-Mauri F (2007) Estudios de procesos biológicos de tratamiento de residuos basado en la modelización. *Residuos* 90: 24-31.
- Majlessi M, Eslami A, Saleh HN, Mirshafieean S, Babaii S (2012). Vermicomposting of food waste: Assessing the stability and maturity. *Iranian journal of environmental health science & engineering* 9: 1-25.

- Martínez-Balmori D, Spaccini R, Aguiar NO, Novotny EH, Olivares FL, Canellas LP (2014). Molecular characteristics of humic acids isolated from vermicomposts and their relationship to bioactivity. *Journal of agricultural and food chemistry* 62: 11412-11419.
- Martínez-Blanco J, Colón J, Gabarrell X, Font X, Sánchez A, Artola A, Rieradevall J (2010). The use of life cycle assessment for the comparison of biowaste composting at home and full scale. *Waste Manage* 30: 983-994.
- Montanero J (2008). *Análisis multi variante*. 1era ed. Servicio de publicaciones, Universidad de Extremadura, Cáceres, España. 286 pp.
- NRAES (1999). *Field guide to on-farm composting*. Nature Resource, Agriculture and Engineering Service (NRAES), Cooperative Extension, Ithaca, New York, USA. p. 27-28, 32.
- Raj D, Antil RS (2011). Evaluation of maturity and stability parameters of composts prepared from agro-industrial wastes. *Bioresource technology* 102: 2868-2873.
- Saldarriaga JF, Gallego JL, López JE, Aguado R, Olazar M (2018). Selecting monitoring variables in the manual composting of municipal solid waste based on principal component analysis. *Waste and biomass valorization*. "En prensa".
- Sánchez-Rosales R, Hernández-Rodríguez A, Ojeda-Barrios D, Robles-Hernández L, González-Franco AC, Parra-Quezada R (2017). Comparison of three systems of decomposition of agricultural residues for the production of organic fertilizers. *Chilean journal of agricultural research*. 77: 287-292.
- Selim SM, Zayed MS, Atta HM (2012). Evaluation of phytotoxicity of compost during composting process. *Nature and science* 10: 69-77.
- Senthil KD, Satheesh KP, Rajendran NM, Uthaya KV, Anbuganapathi G (2014). Evaluation of vermicompost maturity using scanning electron microscopy and paper chromatography analysis. *Journal of agricultural and food chemistry* 62: 2738-2741.
- Sharma K, Garg VK (2018). Comparative analysis of vermicompost quality produced from rice straw and paper waste employing earthworm *Eisenia fetida* (Sav.). *Bioresource technology* 250: 708-715.
- Soto G, Muñoz C (2002). Consideraciones teóricas y prácticas sobre el compost, y su empleo en la agricultura orgánica. *Manejo Integrado de Plagas y Agroecología (Costa Rica)* 65: 123-129.
- Sun W, Huang GH, Zeng G, Qin X, Yu H (2011). Quantitative effects of composting state variables on C/N ratio through GA-aided multivariate analysis. *Science of the Total Environment* 409: 1243-1254.
- Young BJ, Rizzo PF, Riera NI, Della Torre V, López VA, Molina CD, Fernández FE, Crespo DC, Barrera R, Komilis D, Sánchez A (2016). Development of phytotoxicity indexes and their correlation with ecotoxicological, stability and physicochemical parameters during passive composting of poultry manure. *Waste Management* 54: 101-109.
- Zbytniewski R, Buszewski B (2005). Characterization of natural organic matter (NOM) derived from sewage sludge compost. Part 2: multivariate techniques in the study of compost maturation. *Bioresource technology* 96: 479-484.
- Zucconi F, Pera A, Forte M, de Bertoli M (1981). Evaluating toxicity in immature compost. *Biocycle* 22:54-57.

(Aceptado para publicación el 4 de diciembre de 2018)