

La importancia del compostaje en la economía circular de los residuos ganaderos

Salustiano Mato e Iria Villar

Departamento de Ecología y Biología Animal. Universidad de Vigo.

Como consecuencia de las actividades habituales del ser humano se generan una gran cantidad y volumen de residuos de diferentes orígenes y que varían en composición y peligrosidad. En 2018, la cantidad de residuos generados por los países de la Unión Europea por la totalidad de actividades económicas y hogares ascendió a 2337 millones de toneladas (Eurostat, 2018). Una parte importante de estos residuos son materiales biodegradables orgánicos que presentan diferentes características y composición dependiendo, fundamentalmente, de su origen: agrícola, ganadero, forestal, agroindustrial o urbano. En el ámbito de la actividad ganadera, las deyecciones, tanto líquidas como sólidas, y los restos de las camas (purines y estiércoles) han sido tradicionalmente recuperados o reutilizados como abono agrícola. La producción de estos residuos derivados de la actividad ganadera es diversa y abundante en España y se genera tanto en explotaciones extensivas como intensivas. En el año 2011, por ejemplo, la producción de estiércol de la UE fue de 1400 millones de toneladas, de las cuales 118 millones de toneladas correspondieron a España (Foged *et al.*, 2011).

El aumento de la ganadería intensiva en las últimas décadas ha generado una problemática asociada a su gestión debido a la disposición indiscriminada de estos residuos en el suelo y la consecuente contaminación del medio. En general, no es conveniente el vertido directo al suelo debido a que su descomposición no controlada y/o su toxicidad pueden generar efectos perjudiciales. Estos residuos biodegradables poseen materia orgánica no estabilizada, un elevado nivel de fitotoxicidad, alta carga de contaminantes y, frecuentemente, agentes patógenos siendo, por lo tanto, un riesgo para el medio ambiente y para la salud. Puesto que estos residuos ganaderos son ricos en nutrientes y materia orgánica, es razonable que sean devueltos al suelo en condiciones óptimas para garantizar su fertilidad y completar el ciclo natural. De esta manera, estos residuos ganaderos deben ser estabilizados y acondicionados reduciendo los posibles riesgos anteriormente citados antes de su disposición al suelo. Dentro de los procesos que pueden ser empleados para la estabilización de compuestos orgánicos se encuentra el compostaje. Este proceso de reciclaje de la materia orgánica cumple con la prioridad de actuación en política de residuos (Figura 1) y con los requerimientos de la normativa vigente e impulsa la economía circular transformando residuos en recursos.

El origen del compostaje se pierde en la noche de los tiempos. Es un proceso natural que se da de forma espontánea, de manera que el hombre lo ha utilizado empleando técnicas artesanales desde los tiempos remotos. El uso de residuos de animales como fertilizante orgánico para los cultivos, mezclados con restos de las cosechas con las que se formaban las camas para el ganado, era una forma tradicional de fabricación de fertilizante por los agricultores casi desde el origen de las actividades agrícolas. Estas mezclas eran amontonadas y a través de la experiencia del agricultor, volteadas periódicamente y resguardadas del viento y de la lluvia y, de esta manera, se conseguía



Figura 1. Prioridad en la política de residuos según la Directiva 2008/98/CE.



Figura 2. Estrategia tradicional de preparación de abono con estiércol de ganado.

una fermentación aeróbica de una forma espontánea que estilizaba los materiales residuales que formaban estos montones (Figura 2). El producto resultante se aplicaba al suelo durante el abonado de los cultivos. Así, se establecía un modelo circular y sostenible en el cual la ganadería proporcionaba fertilizantes a la agricultura y esta, a su vez, proveía una fuente de alimento para el ganado, eliminando el concepto de residuo.

Con el paso del tiempo estas técnicas artesanales se fueron abandonando rompiendo con el flujo circular de materia y energía. El crecimiento poblacional y el elevado consumo de recursos naturales fomentaron la ganadería y agricultura intensiva y conllevaron la aparición y el uso excesivo de los fertilizantes químicos, entre otros problemas ambientales y sociales. El trabajo que suponía atender los montones de estiércol se evitaba, pero el uso incontrolado de estos productos fertilizantes ha provocado un desequilibrio químico de nutrientes y oligoelementos de gran cantidad de suelos cultivables, lo cual condujo a una disminución de la fertilidad de estos suelos.

En los años treinta del siglo pasado se desarrolló en la India el llamado “proceso Indore”, que consistía en acumular los residuos ganaderos mezclados con restos de cosechas vegetales en montones de 1,5 metros de altura, durante periodos de 3 a 6 meses y removerlos dos veces durante ese periodo. Desde ese momento se desarrollaron multitud de pruebas y con el paso del tiempo se han diseñado multitud de técnicas que han posibilitado el control y monitorización completo de este proceso biológico, que conocemos como compostaje.

Así pues, el proceso de compostaje constituye una actividad agroecológica, que responde de manera completa y adecuada al objetivo de llevar a cabo una economía circular en la gestión de los residuos ganaderos al ser un proceso biológico en el que los residuos orgánicos son oxi-

El uso de residuos de animales como fertilizante orgánico para los cultivos, mezclados con restos de las cosechas con las que se formaban las camas para el ganado, era una forma tradicional de fabricación de fertilizante por los agricultores casi desde el origen de las actividades agrícolas

dados a formas biológicamente estables como el humus, promoviendo el dicho “hacer volver a la tierra lo que de la tierra ha salido”. La agroecología es, por lo tanto, un caso paradigmático de economía circular y una oportunidad de abordar retos de conservación ambiental y patrimonial, explorar otro modelo para producir y consumir alimentos reactivando los mercados locales, generar oportunidades de empleo, o renovar los instrumentos de programación y de ejecución del Desarrollo Rural. La actividad agroecológica del compostaje está demostrando que es una estrategia de alta sinergia, que aprovecha los residuos, reduce costes de gestión, reduce consumo de energía y las emisiones de gases de efecto invernadero, fija carbono fertilizando el suelo, y articula en proximidad a productores y a consumidores

¿Qué es el compostaje?

El compostaje hace referencia a la biodegradación controlada de una mezcla de sustratos en estado sólido y en condiciones aerobias llevada a cabo por comunidades microbianas. Es un proceso espontáneo y exotérmico que provoca la liberación de energía en forma de calor causando la elevación de la temperatura hasta condiciones termófilas. Durante el proceso de compostaje se generan diferentes condiciones térmicas que llevan a la sucesión de distintas comunidades microbianas, así mismo, a lo largo de esta biodegradación se produce la liberación de sustancias tóxicas (fitotoxinas) como los compuestos intermediarios amoníaco, ácidos orgánicos de bajo peso molecular y el óxido de etileno. La diferencia entre un proceso natural de degradación de sustratos orgánicos o una putrefacción –que se sucede habitualmente en acumulaciones sobre el suelo, pilas de estiércol o vertederos– frente al proceso de compostaje es que este último debe ser controlado. Este control hace alusión a la necesidad de monitorización de los parámetros tales como la tempe-

ratura, oxígeno, humedad, etc. a lo largo del proceso, así como de controlar la composición y naturaleza del sustrato heterogéneo en fase de compostaje.

Los cambios fisicoquímicos y biológicos que se suceden durante el compostaje dan como resultado la generación de calor, la formación de dióxido de carbono, agua y, como principal producto, el compost, formado por tres componentes básicos: materia orgánica estabilizada, materia mineral y microbiota (Figura 3). Por lo tanto, la principal finalidad del compostaje es la obtención de un producto final de uso agronómico a partir del tratamiento de residuos orgánicos y, por lo tanto, es una tecnología de valorización medioambientalmente respetuosa al transformar los residuos ganaderos en productos aplicables al suelo posibilitando el cierre del ciclo de los nutrientes y el desarrollo de la economía circular de la región.

Uno de los factores principales y determinantes del compostaje es la temperatura. Básicamente, se considera que el compostaje en óptimas condiciones puede dividirse en cuatro fases:



Figura 3. Esquema del proceso de compostaje (elaboración propia).

Fase mesófila inicial (desde la temperatura ambiental hasta los 45 °C): en esta etapa comienza la degradación de los compuestos más fácilmente biodegradables, como azúcares, grasas, almidón y proteínas, que tiene como consecuencia el aumento de la actividad microbiana y la elevación de la temperatura. Esta etapa puede durar desde horas hasta varios días.

Fase termófila (45-70°C): a medida que se eleva la temperatura los organismos adaptados a temperaturas altas reemplazan a los organismos mesófilos. En esta etapa comienza la degradación de los compuestos más complejos y resistentes por parte de la microbiota termófila y continúa la degradación de los compuestos más lábiles. Se desarrolla una actividad metabólica elevada que genera la

prolongación de las altas temperaturas y se produce la higienización del sustrato al eliminarse los patógenos, parásitos y semillas de malas hierbas. Esta etapa puede durar desde varios días a incluso meses dependiendo del tipo de residuo, las características del sistema de compostaje y el control sobre el proceso.

Fase de enfriamiento: el agotamiento de los materiales fácilmente biodegradables conlleva la disminución de la actividad microbiana y, con ello, el descenso térmico hasta temperaturas ambientales, produciéndose la recolonización por parte de la microbiota mesófila con capacidad para degradar compuestos como la celulosa, hemicelulosa y otros polímeros. Esta fase puede durar desde varios días a semanas por eso, en ocasiones, la fase de enfriamiento y maduración se consideran como una única etapa del proceso.

Fase de maduración: el material orgánico se estabiliza, predominando los procesos de degradación de los compuestos más recalcitrantes y la polimerización de sustancias similares al humus. Esta etapa del proceso suele requerir varios meses.

Condiciones previas (Acondicionamiento del residuo ganadero)

El proceso de compostaje es dirigido por la actividad de los microorganismos, por lo que los factores que puedan limitar el desarrollo de la microbiota particular en cada fase, afectarán al desarrollo del proceso de compostaje. Por ello, el compostaje de un residuo ganadero requiere una serie de requisitos previos que van a condicionar el desarrollo de la actividad microbiana. Las características del material inicial determinan la evolución del proceso de compostaje, su eficacia y la calidad del compost. A continuación, se presentan algunos de los parámetros más importantes:

■ Estructura

La matriz de compostaje es una masa de partículas sólidas que debe contener suficientes poros e intersticios para posibilitar que se desarrolle un proceso aerobio, de manera que, el aire circule por el interior de la masa aportando una concentración óptima de oxígeno, eliminando el dióxido de carbono y el exceso de humedad y limitando la acumulación excesiva de calor (Haug, 1993). Por lo tanto, como el residuo ganadero no presenta la estructura óptima, como ocurre, por ejemplo, con residuos pastosos como los purines de cerdo, es necesario adicionar un material que aporte espacio libre entre las partículas. Por lo general, se emplean como agentes estructurantes materiales de naturaleza orgánica como los residuos agroforestales (Figura 4).



Figura 4. A la izquierda madera triturada que puede ser empleada como agente estructurante y a la derecha purín de cerdo.

■ Humedad

Es importante que el contenido de agua disponible sea suficiente para hacer frente a los requerimientos fisiológicos de la microbiota. El agua actúa como medio de transporte, no sólo para las sustancias solubles con las que se alimentan los microorganismos sino también, para eliminar los productos de desecho resultado del metabolismo celular. El contenido óptimo de humedad al inicio del proceso depende del tipo de material a compostar, pero varía entre 50–70 % (Bernal *et al.*, 2009; de Bertoldi *et al.*, 1996). Contenidos mayores de humedad pueden provocar que el agua ocupe los microporos de la mezcla dificultando la oxigenación, mientras que, contenidos menores provocan el descenso de la actividad biológica.

■ Relación C/N

Se considera que los microorganismos emplean para su metabolismo 30 partes de carbono por cada parte de nitrógeno, requiriendo carbono como fuente de energía y como componente de las células y nitrógeno para la síntesis proteica y los ácidos nucleicos. Se considera que la matriz de compostaje es adecuada cuando presenta un ratio inicial de C/N entre 25-35 (Bernal *et al.*, 2009; Díaz and Savage, 2007; Haug, 1993). Valores bajos del ratio C/N, como ocurre en los purines y estiércoles por su elevado contenido de nitrógeno conllevan la pérdida de este nutriente por volatilización o por lixiviación. La adición de material estructurante ayuda a mejorar este ratio al proveer de carbono orgánico a la mezcla.

Seguimiento y control del proceso

Una vez establecidos y corregidos los parámetros relativos a la naturaleza del residuo ganadero, es necesario el seguimiento y control del proceso dentro de valores adecuados para cada una de las fases del compostaje. Los principales parámetros que deben tenerse en cuenta son la tempera-

tura, oxígeno y la humedad. El control del proceso puede realizarse de forma manual *in situ* con la ayuda de sondas de mano y la toma de muestras (Figura 5) o mediante sistemas más o menos automatizados (Figura 6).

La evolución de la temperatura a lo largo del tiempo es un parámetro clave del proceso de compostaje (Figura 7),

***La agroecología es,
por lo tanto, un caso
paradigmático de
economía circular y una
oportunidad de abordar
retos de conservación
ambiental y patrimonial,
explorar otro modelo
para producir y consumir
alimentos reactivando los
mercados locales, generar
oportunidades de empleo,
o renovar los instrumentos
de programación
y de ejecución
del Desarrollo Rural***



Figura 5. Medición de la temperatura y el oxígeno en pilas de compostaje aireadas a través de volteos (Mato, 2005).

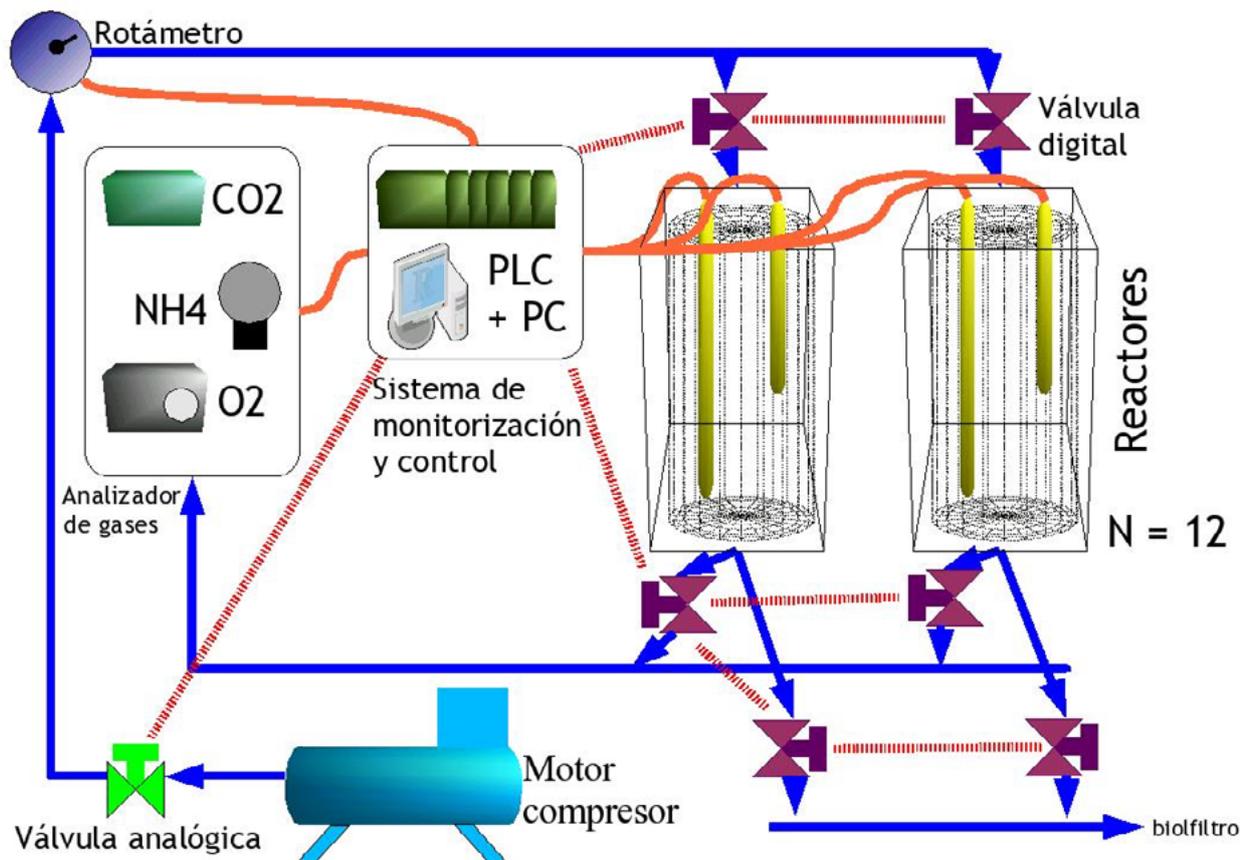


Figura 6. Esquema del dispositivo de reactores de laboratorio para la monitorización y control del proceso de compostaje del grupo de investigación Biología Ambiental de la Universidad de Vigo.

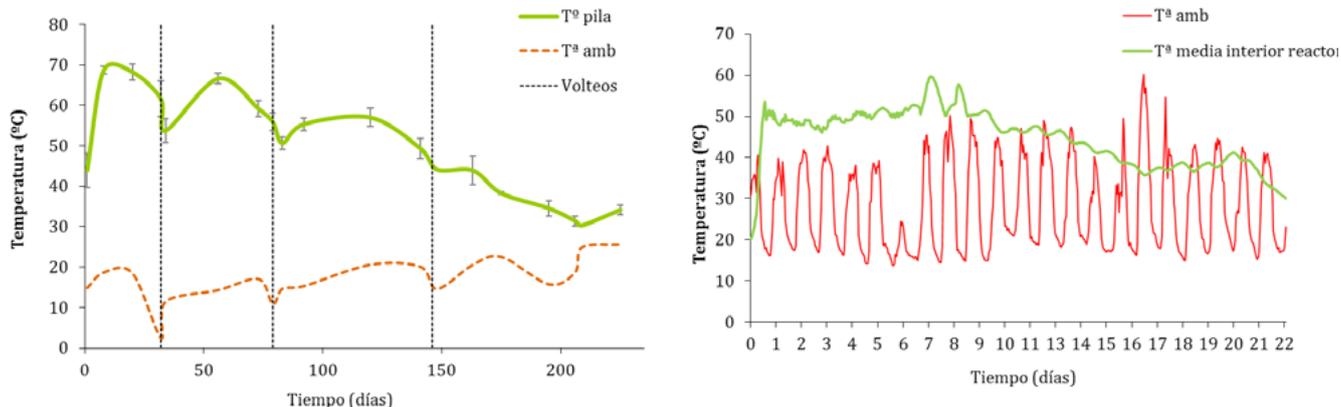


Figura 7. A la izquierda, evolución de la temperatura en una pila volteada de estiércol de 40m3 durante 230 días y a la derecha, evolución de la temperatura en un reactor estático de 600L con ventilación forzada durante 22 días.

consecuencia de la elevada actividad microbiana, con relación directa en la degradación de la materia orgánica.

Para una correcta higienización del material y la obtención de un compost libre de parásitos y semillas de malas hierbas se han de mantener en continuo temperaturas por encima de 55°C durante 15 días (European Commission, 2001). De esta manera, la temperatura durante el proceso debe ser controlada asegurando que se alcancen temperaturas termófilas y que se sostengan en el tiempo lo suficiente para garantizar la higienización pero sin exceder de los 70°C (un exceso puede provocar la muerte de la mayoría de los microorganismos, retardar la colonización en las fases posteriores y, como consecuencia, retrasar la degradación del residuo). El control de temperatura se puede realizar para

enfriar la masa o bien, para reactivar el proceso y se suele efectuar mediante la introducción de aire por ventilación forzada y/o por operaciones de volteo del material.

La concentración de oxígeno en la masa de compostaje no debe ser inferior al 5 % (Epstein, 2011), ya que se produciría una sucesión hacia microorganismos anaerobios y, por lo tanto, hacia procesos de fermentación no deseables y la generación de malos olores. La aireación puede ser proporcionada mediante sistemas de ventilación, y operaciones de volteo o ambos. Así mismo, también se puede producir la aireación pasiva de manera natural cuando tanto la estructura y porosidad de la mezcla, así como, la forma y tamaño de la pila posibilitan el intercambio de gases (Figura 8).

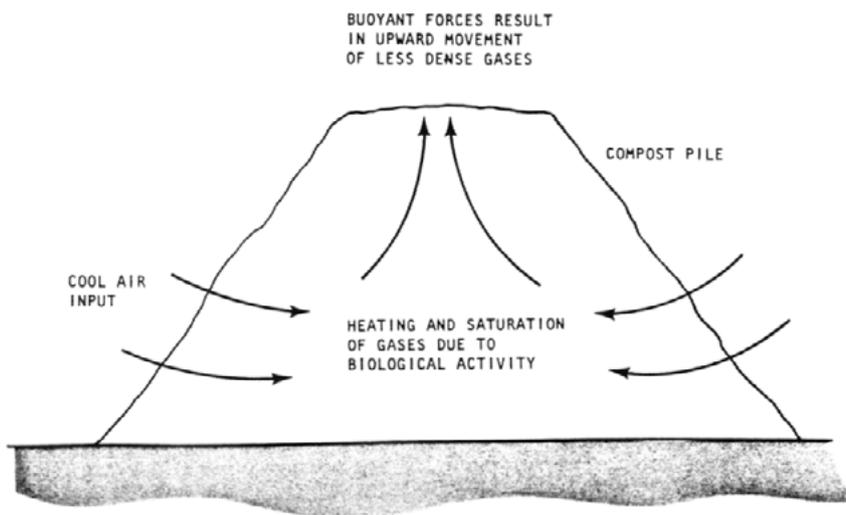


Figura 8. Esquema de la ventilación natural en una pila de compostaje (Haug, 1993).



Figura 9. Evaporación de agua durante el compostaje en una pila con volteo mecánico (Mato, 2005).

El proceso de compostaje tiene como efecto asociado la pérdida de agua como consecuencia de su evaporación debido a las altas temperaturas (Figura 9), de manera que los valores son más altos al inicio y decrecen a medida que el proceso avanza. Debe incorporarse agua, especialmente en las fases iniciales, cuando los valores de humedad sean limitantes considerando que por debajo de 30-35 % se inhibe el proceso.

Compost

A lo largo del proceso de compostaje la materia orgánica desciende debido a su mineralización y a la pérdida de carbono en forma de dióxido de carbono como resultado

de la respiración microbiana, sobre todo, en las primeras fases. En la fase de maduración prevalecen los procesos de síntesis de compuestos húmicos que condicionan la calidad del compost final obtenido y determinan el grado de estabilización y madurez de la materia orgánica. Si el proceso de compostaje se realiza adecuadamente se obtiene materia orgánica higienizada y estabilizada rica en compuestos húmicos y nutrientes que actúa como enmienda orgánica de los suelos mejorando las propiedades y características físicas, químicas y biológicas del suelo. La aplicación del compost permite la rehabilitación y mejora de los suelos agrícolas, asegurando el uso sostenible de los recursos.

Tabla 1. Clasificación de los sistemas de compostaje más comúnmente empleados (Epstein, 2011; Moreno and Moral, 2008).

	Sistemas abiertos	Sistemas semiabiertos	Sistemas cerrados
Estáticos	Montones/Pilas/ Mesetas con aireación pasiva o forzada	Pilas con cubierta semipermeable aireadas	Contenedores/Túneles aireados
Dinámicos	Pilas volteadas Mesetas volteadas	Trincheras Pilas/Mesetas en naves cerradas volteadas	Túneles dinámicos Tambores



Figura 10. Sistema abierto dinámico de una pila de compostaje a la izquierda y detalle de un volteo con pala a la derecha.



Figura 11. Sistema semiabierto dinámico de una planta de compostaje de estiércol de vacuno con trincheras móviles a la izquierda y detalle del proceso de volteo a la derecha.

Planta de compostaje de residuos ganaderos

Priorizar el tratamiento de los residuos orgánicos generados en la propia explotación ganadera, o lo más cerca posible del punto de generación, permite no sólo reducir los costes de transporte sino también las emisiones y otros problemas ambientales asociados. La autogestión de los residuos y el uso del compost obtenido en la propia explotación es un ejemplo de residuo cero y un eje prioritario de la economía circular.

De manera general, la elección de un sistema o tecnología de compostaje depende de varios factores como pueden

ser: tipología y cantidad de residuos, espacio requerido, consideraciones económicas, aspectos legales, localización, aspectos ambientales y calidad del producto, entre otros (Epstein, 2011). En la tabla 1 se presentan algunos de los sistemas más comunes, clasificados según su relación con el medio y la mezcla o cambio de posición.

De manera habitual, el sistema más empleado para el tratamiento de estiércoles y purines son los sistemas dinámicos, tanto abiertos como semiabiertos (Figura 10 y 11). Las pilas volteadas y las trincheras consisten en montones o acúmulos del material a compostar en hileras más o menos alargadas que se mezclan periódicamente mediante volteos.

Priorizar el tratamiento de los residuos orgánicos generados en la propia explotación ganadera, permite no sólo reducir los costes de transporte, sino también las emisiones y otros problemas ambientales asociados. La autogestión de los residuos y el uso del compost obtenido en la propia explotación es un ejemplo de residuo cero y un eje prioritario de la economía circular



Figura 12. Biorreactor de residuos orgánicos (BIORESOR) del Equipo de Biotecnología Ambiental de la Universidad de Vigo (Patente 009900981).

En menor medida se pueden emplear sistemas cerrados para algunos tipos de residuos ganaderos que requieren mayor control del proceso (tratamiento de gases, recogida de lixiviados, sistema de toma de datos, etc.) (Figura 12).

El compostaje tiene la gran ventaja, frente a otros procesos de valorización de residuos, de poder realizarse tanto de un modo más tradicional, con una baja inversión, como con una fuerte inversión tecnológica que conlleve la automatización del proceso. En la figura 13 se presenta un esquema sencillo de una planta de autogestión de residuos ganaderos. La planta debe zonificarse para que no se produzcan contaminaciones entre residuos y productos con distinto grado de degradación y nivel de patógenos. Primeramente, se diferencia una zona de acopio de los materiales destinados a compostaje (residuos ganaderos y material estructurante). Debido a que los purines y es-

tiércoles son generados de manera continua, el tiempo de permanencia en esta zona debe ser minimizado ya que al tratarse de residuos con elevada degradabilidad se pueden generar fermentaciones indeseables, producción de lixiviados y malos olores.

En esta zona se puede realizar la trituración o procesado previo de los sustratos y su pesaje. Como sistema de compostaje, se proponen las pilas dinámicas ya que son adecuadas para este tipo de residuos y porque requieren mínima infraestructura, con lo cual, la inversión inicial es baja. En esta zona de compostaje más intensiva, debe realizarse un control riguroso de la degradación de la materia orgánica optimizando el tiempo de proceso. En la fase de maduración, también en pilas, se limitan los volteos y las labores de control son menores. El compost debe almacenarse separadamente para evitar contaminaciones y mantener sus propiedades. Aunque el balance de masas del proceso de compostaje va a depender de la tipología del residuo, el sistema empleado y el desarrollo y tiempo de proceso, la reducción de masa y volumen es claramente significativa. Así, a partir de 100 toneladas de purín fresco, tras un proceso dinámico de compostaje de 4 meses de duración, se obtiene tras el cribado entre 20-25 toneladas de compost.

La selección de la tecnología de compostaje debe realizarse de manera que permita gestionar adecuadamente el volumen de residuos ganaderos generados en la explotación, se realice en el menor tiempo posible y se obtenga como resultado un producto con calidad agronómica. Con una inversión acorde a sus posibilidades, las explotaciones pueden gestionar sus residuos de un modo local, obteniendo un producto de uso agronómico y, por lo tanto, promoviendo la optimización de los recursos, la reducción en el consumo de materias primas y el aprovechamiento de los residuos, objetivos, todos ellos, de la economía circular. ✿

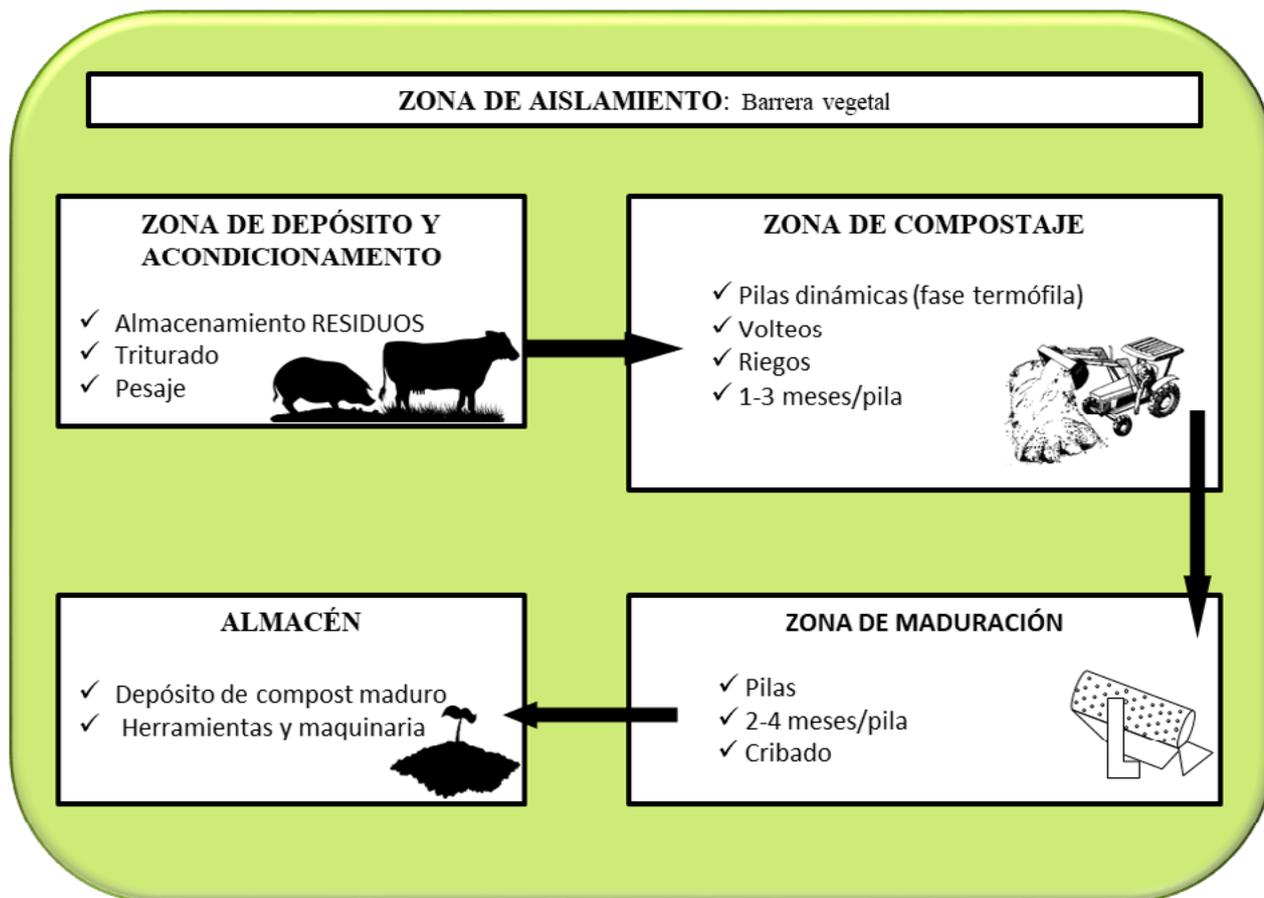


Figura 13. Esquema de una planta de compostaje para la autogestión de residuos ganaderos.

Bibliografía

Bernal, M.P., Albuquerque, J.A., Moral, R., 2009. Composting of animal manures and chemical criteria for compost maturity assessment. A review. *Bioresour. Technol.* 100, 5444–5453. doi:10.1016/j.biortech.2008.11.027

Bertoldi, M., Sequi, P., Lemmes, B., Papi, T. (Eds.), 1996. *The Science of Composting*. Springer Netherlands, Dordrecht. doi:10.1007/978-94-009-1569-5

Diaz, L.F., Savage, G.M., 2007. Factors that affect the process, in: Diaz, L.F., De Bertoldi, M., Bidlingmaier, W., Stentford, E. (Eds.), *Compost Science and Technology, Waste Management Series*. Amsterdam, pp. 49–65.

Directiva 2008/98/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 19 de noviembre de 2008 sobre los residuos y por la que se derogan determinadas Directivas. (DO L 312 de 22.11.2008, p. 3)

Epstein, E., 2011. *Industrial composting*. Environ. Eng. Facil. Manag. Taylor Francis Group LLC

European Commission, 2001. Working document: biological treatment of biowaste, 2nd draft. Dir. Gen. Environ. 22–22

Eurostat, 2018. Waste statistics - Statistics Explained [WWW Document]. URL http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Waste_statistics (accessed 14.05.21).

Foged, H. L., Flotats, X., Blasi, A. B., Palatsi, J., Magri, A., & Schelde, K. M. (2011). Inventory of manure processing activities in Europe. Technical Report No. I concerning “manure processing activities in Europe” to the European commission. In Directorate-General Environment.

Haug, R.T., 1993. *The Practical Handbook of Compost Engineering*. Lewis Publishers, Boca Raton.

Mato, S. (2005). Compostaxe de Residuos Orgánicos. En: Galicia. *Ecoloxía (Enciclopedia): Volume XLVIII Ciencia e Tecnoloxías Ambientais*. 18-42. Hércules Ediciones. A Coruña

Moreno, J., Moral, R., 2008. *Compostaje*. Ediciones Mundi-Prensa, Madrid.