



ESTUDIO DE TECNOLOGÍAS DE TRATAMIENTO DE BIORRESIDUOS EN LA COMUNIDAD AUTÓNOMA DE ARAGÓN

Documento elaborado para:



Equipo técnico y redactor:

Ramón Plana

Belén Puyuelo

Índice de contenidos

1.	ANTECEDENTES.....	7
1.1	Breve contexto histórico a los sistemas de compostaje	7
2.	DESCRIPCIÓN DE LAS TECNOLOGÍAS DE COMPOSTAJE	9
2.1	Modelos de compostaje doméstico y/o comunitario	12
2.2	Sistemas de compostaje electromecánicos.....	14
2.3	Sistemas de compostaje en pilas.....	15
2.4	Compostaje en mesetas	19
2.5	Compostaje en trincheras	21
2.6	Compostaje en silos aireados (sistema estático)	22
2.7	Sistema de tambores rotatorios.....	23
2.8	Silos verticales	24
2.9	Compotúneles/contenedores (sistemas estáticos y cerrados / reactores de compostaje)	25
2.10	Túneles.....	26
2.11	Otros sistemas con aplicaciones más limitadas	29
3.	ESTIMACIÓN ECONÓMICA DE LAS TECNOLOGÍAS	32
4.	SISTEMAS DE MONITORIZACIÓN, CONTROL DE PROCESO Y TRAZABILIDAD.....	43
5.	CONTROL AMBIENTAL DE LAS TECNOLOGÍAS DE COMPOSTAJE: GASES Y LÍQUIDOS	48
5.1	Emisión de gases/olores	48
5.2	Emisión de líquidos/lixiviados	53
6.	ESTRATEGIAS DE GESTIÓN DE RESTOS VEGETALES COMO MATERIAL ESTRUCTURANTE.....	57
6.1	Fuentes de material estructurante o complementario	57
6.2	Tareas y logística de la gestión del material estructurante	58
7.	MODELOS DE RECOGIDA DE FRACCIÓN ORGÁNICA	60
8.	INSTALACIONES REFERENTES EN DIFERENTES SISTEMAS Y MODELOS DE COMPOSTAJE	64
9.	REFERENCIAS.....	73

ANEXO 1. BASE DE DATOS COM LAS FICHAS DESCRIPTIVAS DE LAS TECNOLOGÍAS (FORMATO DIGITAL)

ANEXO 2. BASE DE DATOS DE COSTES DE TECNOLOGÍAS (FORMATO DIGITAL)

Índice de Figuras

Figura 1.- Clasificación de los distintos sistemas de compostaje a nivel existentes en base a su nivel de confinamiento y a su manejo (fuente: adaptado de Plana, R. 2008).	9
Figura 2.- Imagen de una pala mecánica en funciones de homogenización del material en proceso de compostaje (Fuente: Ramón Plana).	11
Figura 3.- Imagen de una volteadora específica para el proceso de mezclado del material en proceso de compostaje (Fuente: Ramón Plana).	11
Figura 4.- Compostador doméstico de varillas (izquierda) y zonas de compostaje comunitario con compostadores modulares en Pontevedra (Fuente: Ramón Plana).	13
Figura 5.- Sistemas de compostaje electromecánicos a escala industrial: unidades de compostaje HotRot 3518 (Fuente: Global Composting Solutions Ltd).	15
Figura 6.- Ejemplo de un sistema de compostaje en pilas (fuente: Ramón Plana).	15
Figura 7.- Imagen del uso de cazos separadores con sistema hidráulico para el volteo de las pilas de compostaje (Fuente: Ramón Plana).	16
Figura 8.- Ejemplos de plantas de pilas volteadas de diferentes dimensiones. (Izquierda) Planta con pilas de pequeñas dimensiones y volteadora remolcada por tractor. (Derecha) Planta de pilas de mayores dimensiones con volteadora autopropulsada. (fuente: Ramón Plana).	17
Figura 9.- Ejemplo de planta de compostaje en sistemas abierto en pilas estáticas con ventilación forzada. Planta de compostaje de FORM en pilas estáticas por el sistema Rutgers (Seiringer, en Weiselburg, Austria). (Fuente: Ramón Plana).	18
Figura 10.- Sistema semicerrado bajo lona semipermeable Gore™ Cover (Vegas del Genil, Granada). Se aprecia la salida de vapor de agua a través de la lona (fuente: Ramón Plana).	19
Figura 11.- Distintos ejemplos de plantas de compostaje en sistemas abiertos de mesetas. A) Planta de mesetas dinámicas para restos vegetales (Solingen, en Düsseldorf, Alemania). B) Planta de mesetas estáticas y ventiladas para el tratamiento de restos vegetales y algas en Denia (Alicante), se aprecian los canales de ventilación soterrados. C) Maduración en mesetas volteadas (ENERCORR XXI, en Langa de Duero, Soria). D) Meseta estática con ventilación forzada para restos vegetales (Migas Calientes., Madrid); (fuente: Ramón Plana).	20
Figura 12.- Varios ejemplos de plantas de compostaje en trincheras. A) Compostaje de Fracción Resto (Ecoparque de La Rioja, Logroño). B) Compostaje de estiércol de vacuno (Cistierna, León (actualmente cerrada)). C) Planta de compostaje de lodos de alperujo (Cooperativa Valdolivo, Jaén).	22
Figura 13.- Imagen tecnologías de silos aireados con ventilación forzada SIN y CON cubierta semipermeable referentes a la (Izquierda) Planta de compostaje de Sort (Lleida) y (Derecha) Planta de compostaje de Clariana de Cardener (Barcelona), respectivamente (Fuente: Ramón Plana).	23
Figura 14.- Ejemplos de sistemas de compostaje en tambores. (Izquierda) Planta Kibuttz Hannassi (Israel). (Derecha) Planta de compostaje de FORM para el vecindario del Plateau Mont Royal en el parque Jeanne Mance, Montreal (Canadá), (fuente: Ramón Plana). (Inferior) Unidades de compostaje HotRot 3518 (fuente: Global Composting Solutions Ltd).	24
Figura 15.- Imagen de silos aireados verticales cilíndricos (fuente: Berca Group).	25
Figura 16.- Ejemplos de sistemas de compostaje en contenedores. (Izquierda) Planta de compostaje en Milán (Italia); (Derecha) Planta de investigación en compostaje Universidad de Vigo (BIO.RES.OR); (fuente: Ramón Plana).	26
Figura 17.- A). Aspecto exterior de la zona de túneles en la planta de compostaje de Lousame (FCC, en Barbanza, A Coruña). B). interior de un túnel de compostaje de la planta de tratamiento de residuos en Ávila. Se aprecia el falso suelo perforado, las sondas de temperatura y la salida de aire en la pared del fondo. En las figuras C y D) se muestran los sistemas de ventilación en esas mismas plantas. En la imagen inferior (C) izquierda se aprecia el circuito que permite la recirculación de aire de nuevo al interior del túnel; (fuente: Ramón Plana).	27
Figura 18.- Un ejemplo de túnel continuo, el sistema Wright-in-vessel.(fuente: Wright Environmental Management Inc.).	28

Figura 19.- **A y B)** corresponden a una planta de compostaje en túnel cerrado y dinámico. Una volteadora entra en el túnel como si fuera un sistema en trinchera (en Can Canut, Mallorca). **C)** se observa otro sistema de volteo y descarga de túnel en una planta de Tratamiento Mecánico Biológico de Fracción Resto (Centro de Tratamiento de Residuos – CTR San Román de la Vega), en León); (fuente: Ramón Plana) 29

Figura 20.- Imágenes de plantas con la tecnología de compostaje en naves. Izquierda, Reactor Hardy desarrollado en 1950 (Díaz y Bertoldi, 2007); derecha, tecnología BIOMAX (Fuente: Sorain Cecchini Tecno Slr.) 31

Figura 21.- Imagen de la aplicación con la que se realiza el control y seguimiento del modelo de compostaje comunitario de la provincia de Pontevedra (Plan revitaliza); (Fuente: Plan Revitaliza; Deputación de Pontevedra, www.revitaliza.depo.gal) 47

Figura 22.- Ejemplos de lixiviación en plantas de compostaje. Izquierda, liberación de agua metabólica durante la fase de fermentación. Derecha, lixivios generados en una instalación de compostaje con una mezcla muy pobre en material estructurante y sin un sistema de captación de lixivios adecuado ni un protocolo de trabajo correctamente concebido (Fuente: Ramón Plana). 54

Figura 23.- Ejemplos balsas de lixivios en planta. Derecha, balsa abierta con bajo mantenimiento y potencial causante de afecciones ambientales negativas en forma de malos olores. Izquierda, balsa de compostaje cerrada o confinada donde se evita que los gases que se puedan generar en el tiempo de almacenamiento de los lixivios se liberen a la atmósfera incontroladamente. 55

Figura 24.- Imagen de la materia orgánica captada en función del modelo de recogida de residuos (Fuente: Ramón Plana). 63

Figura 25.- Coste económico comparativo de la recogida de la materia orgánica y de los costes de tratamiento biológico en función del contenido en impropios; datos de Italia (Fuente: Giavini, M. 2012)..... 63

Índice de Tablas

Tabla 1.- Catálogo de tecnologías y/o sistemas de compostaje más extendidos para el tratamiento de los residuos orgánicos (fuente: elaboración propia)..... 12

Tabla 2.- Cuadro de amortizaciones e intereses asociados a los costes de obra civil y equipos (Fuente: elaboración propia a partir de los datos de los proveedores). 32

Tabla 3.- Cuadro resumen de las necesidades de tratamiento de biorresiduos en cada Agrupación de la Comunidad Autónoma de Aragón (Fuente: elaboración propia a partir de los datos del Gobierno de Aragón). 32

Tabla 4.- Consideraciones previas al análisis del presupuesto para el sistema de compostaje doméstico. 34

Tabla 5.- Consideraciones previas al análisis del presupuesto para el sistema de compostaje comunitario. 34

Tabla 6.- Consideraciones previas al análisis del presupuesto para el sistema de compostadores electromecánicos. 35

Tabla 7.- Consideraciones previas al análisis del presupuesto para el sistema de pilas dinámicas con volteadora de puente. 35

Tabla 8.- Consideraciones previas al análisis del presupuesto para el sistema de pilas cubiertas con lonas semipermeables y dinámicas con volteadora de puente. 36

Tabla 9.- Consideraciones previas al análisis del presupuesto para el sistema de pilas cubiertas con lonas semipermeables y dinámicas con volteadora de puente. 36

Tabla 10.- Consideraciones previas al análisis del presupuesto para el sistema de mesetas dinámicas con volteadora lateral. 37

Tabla 11.- Consideraciones previas al análisis del presupuesto para el sistema de trincheras dinámicas para la fase de fermentación. 37

Tabla 12.- Consideraciones previas al análisis del presupuesto para el sistema de silos con ventilación forzada y cubiertos con lonas para la fase de fermentación.....	38
Tabla 13.- Consideraciones previas al análisis del presupuesto para el sistema de silos con ventilación forzada para la fase de fermentación.....	38
Tabla 14.- Consideraciones previas al análisis del presupuesto para el sistema de contenedores con ventilación forzada para la fase de fermentación.	39
Tabla 15.- Consideraciones previas al análisis del presupuesto para el sistema de silos verticales para la fase de fermentación.	39
Tabla 16.- Consideraciones previas al análisis del presupuesto para el sistema de contenedores con ventilación forzada para la fase de fermentación.	39
Tabla 17.- Consideraciones previas al análisis del presupuesto para el sistema de túneles con ventilación forzada para la fase de fermentación.	40
Tabla 18.- Cuadro resumen de los costes económicos de las instalaciones de compostaje según tecnología y capacidad de tratamiento (fuente: elaboración propia a partir de la información facilitada por los proveedores).....	41
Tabla 19.- Especificaciones de los parámetros (principales y secundarios) de monitorización de proceso (Fuente: elaboración propia).	43
Tabla 20.- Grupos de compuestos olorosos más comunes en plantas de tratamientos de residuos. (Fuente: Haug, 1993).	50
Tabla 21.- Clasificación de clases químicas de acuerdo con su índice de olor. (Fuente: Haug, 1993).	51
Tabla 22.- Tipos de técnicas de tratamiento de gases más frecuentes.	53
Tabla 23.- Modelos de segregación en origen de residuo domésticos (Fuente: elaboración propia).....	60
Tabla 24.- Modelos de recogida de fracción orgánica de residuo municipales y contenido en impropios que suelen alcanzar (Fuente: adaptado de Nohales, G. (2018); Giró, F. (2019)).....	61

1. ANTECEDENTES

1.1 Breve contexto histórico a los sistemas de compostaje

A pesar de que el proceso y la aplicación del compostaje en la producción de fertilizantes a partir de la transformación biológica de los residuos agrícolas y ganaderos ha sido una práctica conocida en Oriente desde hace más de 4.000 años, no sería hasta el siglo XI hasta que aparece el primer documento escrito donde se recoge el método para la aplicación práctica de crear un compuesto o “*compostum*” para mejorar la fertilidad de los cultivos a partir de restos orgánicos vegetales y animales de diferentes orígenes.

Aunque anteriormente ya existían trabajos científicos sobre la aplicación del compost, estando fechada la primera tesis doctoral en 1892 (Bidlingmaier, 2006), la revolución en el uso del compostaje no comenzaría hasta entrado el siglo XX. Sir Albert Howard (1873-1947), investigador agrícola afincado en la India entre 1905 y 1931, se inspiró en las prácticas ancestrales de manejo de estiércoles y restos agrícolas de China y Japón, recogidas por F.H. King en su obra “*Farmers of Forty Centuries*”, para desarrollar un método para la producción de un humus a partir de restos vegetales y animales, al que denominó “Proceso *Indore*”. Partía de la idea de que la fertilidad de los suelos pasaba por un reciclaje efectivo de todos los residuos orgánicos y la aplicación del producto obtenido. Con este método Howard se convirtió en el padre del compostaje moderno (Heckman, 2006) y alcanzó los dos objetivos que buscaba: demostrar que la organización de la investigación agrícola del momento era obsoleta e idear un método práctico de producción de humus.

El método o proceso *Indore* permite realizar el proceso en pilas o en hoyos excavados en el suelo, dependiendo de la época del año y la climatología de la zona. Se basa en dos principios fundamentales: la mezcla de restos vegetales y residuos animales con una base (arcilla, cal o cenizas) para neutralizar la acidez, y el tratamiento del material durante el proceso para que los microorganismos responsables del mismo estuvieran en las condiciones más adecuadas (humedad, tamaño de partícula y volteos periódicos del material).

Desde su publicación en 1931 la descripción del método se propagó rápidamente por todo el mundo, traduciéndose al alemán en 1936 y al español en 1937 (*Revista del Instituto de Defensa del Café de Costa Rica*). La primera planta industrial de compostaje cuyo sistema de tratamiento era una modificación del método *Indore* se construye en Wijster (Holanda) en 1931 (*American Public Wastes Association*, 1966). El propósito específico de esta instalación era el de utilizar residuos orgánicos como fertilizantes en el norte del país (Larsen, 1993). A partir de aquí el proceso de compostaje (basado en el método *Indore*) se extendió por todo el mundo como una forma de gestionar los residuos orgánicos, tanto de origen agrícola o ganadero y municipales.

La combinación de un modelo de gestión de los residuos urbanos basado casi exclusivamente en vertederos, la crisis económica de la década de 1930 y la popularidad de los descubrimientos de Sir Howard en algunos países, permitió el despegue de las instalaciones industriales de tratamiento de residuos mediante compostaje. Pero en las mentes de los responsables de la gestión de los residuos la incineración ya había alcanzado el primer puesto como alternativa al depósito en vertederos (Golueke, 1985), con lo que la aplicación del compostaje quedó como un sistema que sólo interesaba a una minoría, cuyo principal error fue el considerar el compostaje como la panacea del tratamiento de residuos. Este concepto tan irrealmente optimista del proceso de tratamiento llevó a desarrollar proyectos de instalaciones fallidos en muchas comunidades en las décadas de 1950 y 1960 (Golueke, 1985). De las 37 plantas de compostaje que había en Europa cerraron la mayor parte en esa década, mientras que en los Estados Unidos lo hicieron 14 de las 18 plantas existentes (del Val, 1998). La principal razón se debió a un cambio en la composición o caracterización de los residuos urbanos, que pasaron de estar formados fundamentalmente por restos orgánicos y cenizas (de los sistemas de calefacción y de las cocinas de las viviendas) a tener un contenido cada vez mayor de plásticos no degradables y otros materiales no orgánicos que dificultaban su manejo en planta, lo que, junto con el incremento en la concentración de

metales pesados, redujo drásticamente las posibilidades comerciales del compost al afectar negativamente a su calidad (Larsen, 1993).

Los siguientes avances en los métodos y técnicas de compostaje serían desarrollados en universidades de Estados Unidos. Las aportaciones más significativas fueron las relacionadas con la capacidad de control de proceso, fundamentalmente en lo referido a los parámetros: concentración de oxígeno intersticial y temperatura de la masa. Fruto de la investigación realizada en las universidades de Beltsville y de Rutgers (EE.UU.) sobre el compostaje de los lodos de depuradora, cuya gestión era un problema que se evidenciaba en aquellos momentos, se desarrollaron dos métodos de compostaje con ciertas similitudes, conocidos como: método *Beltsville* y método *Rutgers*. Ambos usan pilas de restos orgánicos mezclados con estructurante que no son volteadas o removidas (estáticas) y que tienen un sistema de ventilación forzada del material. La principal diferencia entre ambos métodos es que en el primero el ventilador trabaja únicamente de forma temporizada y con un sentido de la ventilación en aspiración; mientras que en el segundo el funcionamiento del ventilador sólo es bajo un control temporizado de encendido y apagado durante la primera fase, para ser luego controlado en función de la temperatura del material, impidiendo mediante una ventilación continuada que la temperatura supere ciertos valores. Además, el sentido de la ventilación en el método *Rutgers* es en soplado para asegurar una mayor eficiencia del paso del aire por el material.

Ambos sistemas marcaron un punto de inflexión en la historia del compostaje, pues demostraron que el conocimiento del proceso es clave para poder actuar sobre él de manera eficiente, conseguir mejores rendimientos y obtener un producto final de mayor calidad. Pero al mismo tiempo abrieron la puerta a la tecnificación y sofisticación de los sistemas compostaje, ya que basándose en sus modelos comenzaron a aparecer numerosas empresas que presentaron sistemas de compostaje cada vez más complejos y tecnológicamente sofisticados en los que se primaba y se daba más importancia a la cantidad de tecnología que portaban frente al conocimiento de las necesidades y características del proceso según las características del residuo a compostar. A partir de aquí se desarrollaron las tecnologías de compostaje en trincheras, los túneles de compostaje (estáticos y dinámicos, en una o dos fases) y tambores¹. Para todos los demás elementos que componen las plantas de compostaje y no intervienen específicamente sobre el proceso biológico se produjo un “préstamo tecnológico” de otros sectores industriales, especialmente de la minería, como las cribas o los trómeles. Esta carencia en el desarrollo de una tecnología específica ha provocado multitud de problemas funcionales en las tradicionales plantas de compostaje de residuo urbano recogido “todo en uno”, problemas que se agudizan en las nuevas plantas de recogida selectiva en origen.

¹ Si exceptuamos los tambores tipo DANO que aparecieron en 1937, aunque sobre ellos hay controversia a la hora de considerarlos como un sistema de compostaje por sí mismos, dado que el tiempo de residencia es extremadamente corto, de tres a cinco días (López-Real, 1990).

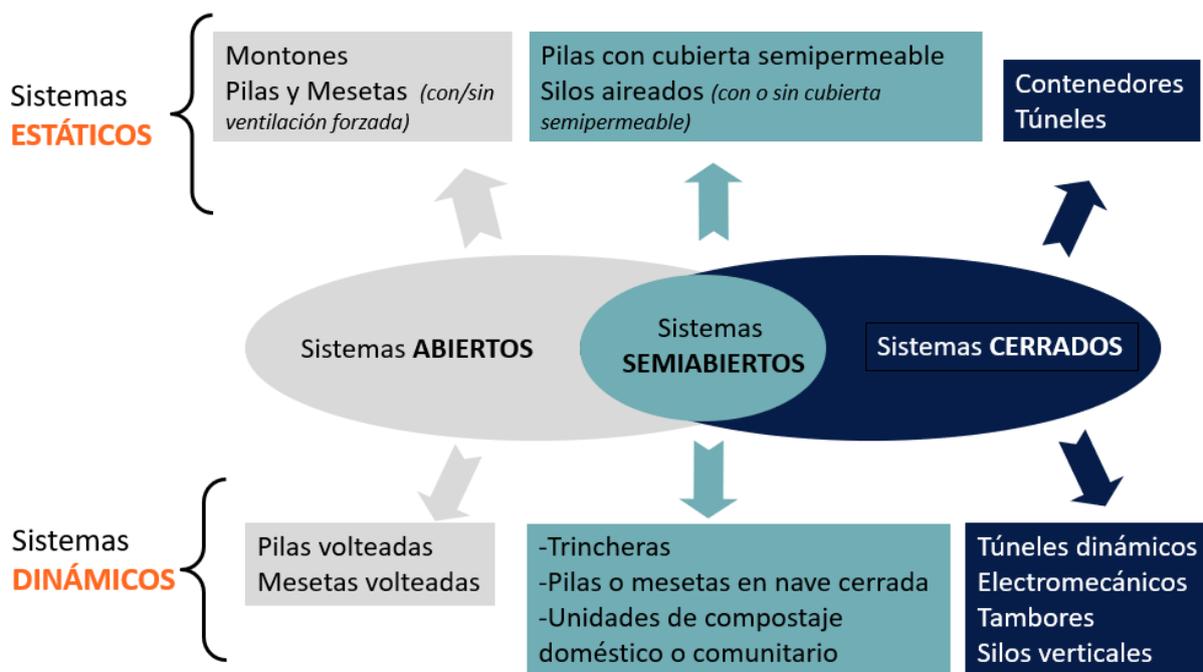
2. DESCRIPCIÓN DE LAS TECNOLOGÍAS DE COMPOSTAJE

La sofisticación y evolución de los métodos de compostaje junto con el desarrollo de maquinaria específica para el proceso, como son las volteadoras, han permitido la implementación de una gama de sistemas de compostaje que se **clasifican** en base a dos aspectos o características principales:

- El nivel de aislamiento del material con respecto al exterior y/o el control de las emisiones: **sistemas abiertos, cerrados o semiabiertos**.
- La práctica de volteos o mezclados periódicos del material a lo largo del proceso: **sistemas estáticos o dinámicos**.

Es una forma de clasificación artificial como muchas otras, pero atiende a la necesidad de poder comparar y agrupar los distintos modelos de compostaje existentes hoy en día. En la Figura 1 se muestra a partir de esta clasificación, los sistemas de compostaje a escala industrial más extendidos.

Figura 1.- Clasificación de los distintos sistemas de compostaje a nivel existentes en base a su nivel de confinamiento y a su manejo (fuente: adaptado de Plana, R. 2008).



Así, su clasificación en base al **nivel de aislamiento del exterior** y/o el control de emisiones los divide en:

1. **Sistemas abiertos**, donde los procesos se realizan sin ningún tipo de confinamiento del material. Dentro de esta categoría se incluyen las instalaciones donde el proceso se realiza bajo una cubierta, en naves abiertas.

Son los más primitivos, debiendo su eficiencia principalmente a que se combinen con sistemas estáticos o dinámicos. Suelen ser sistemas de bajo coste y tecnología sencilla, aplicables principalmente a pequeñas o medianas comunidades donde la disponibilidad de terrenos sea mayor, concibiéndose por tanto para zonas rurales o semi-rurales. Las características meteorológicas de la zona pueden ser determinantes, limitándose mucho esta influencia con cubiertas sencillas sin paredes que implicarían un encarecimiento de la instalación. En algunos casos, como solución menos costosa, se suele cubrir tan solo la zona de maduración o parte de

ella, con el fin de evitar rehumectaciones excesivas del material en fases próximas al cribado final que podrían entorpecer mucho esta operación. La forma de amontonamiento del material en este tipo de plantas es variada (pilas, mesetas, montones, etc.), así como los modos de tratamientos a los que se las somete. Lo más usual es combinarlos con sistemas dinámicos, sean por medio de dispositivos especializados (volteadoras) o bien con maquinaria inespecífica (normalmente palas cargadoras frontales). En general, a nivel global son menos frecuentes los que se decantan por métodos estáticos y suele deberse a carencias de espacio y/o de maquinaria apropiada en la instalación, así como a planteamientos teóricos sobre la reducción de costes de explotación al haber un menor manejo/acción sobre el material en proceso.

Obviamente, se trata de sistemas donde la disponibilidad de los recursos necesarios para garantizar las condiciones óptimas de proceso, especialmente en cuanto al material estructurante y complementario, son fundamentales para que los sistemas abiertos no sean vulnerables a las condiciones ambientales.

2. **Sistemas semiabiertos**, donde el proceso se realiza bajo algún tipo de confinamiento parcial del material con el exterior. Puede ser desde en naves cerradas que disponen de algún sistema de succión y envío de los gases a un tratamiento de depuración, como una cubrición del material con lonas de tejidos semipermeables que sólo permiten el paso de ciertas moléculas gaseosas de pequeño tamaño con el exterior.

Son sistemas concebidos inicialmente para plantas medianas o grandes y están diseñadas (al menos en teoría) para poder ser instaladas en las cercanías de la propia población, merced al control que permiten de los factores ambientales adversos. En general, se consigue un mejor aprovechamiento del espacio que en el caso de las pilas y aproximadamente igual que en el de las mesetas, pero con unas posibilidades de control de las operaciones de trabajo y del proceso superiores a las de los sistemas abiertos, aunque no siempre son aplicadas y existe el riesgo de permitir que el proceso se mantenga de forma continuada a temperaturas superiores a 70 °C durante largos períodos de tiempo, lo que afecta negativamente a la calidad agronómica del producto final.

3. **Sistemas cerrados**, donde el proceso se realiza en espacios confinados, sometidos a un exhaustivo control de ciertos parámetros y con conducción de todos los gases a tratamiento por limpieza (lavadores, humectadores, etc.) y depuración.

Se caracterizan porque el material en proceso no está nunca en contacto directo con el exterior y todas las entradas y salidas de gases y líquidos se realizan a través de un sistema de conductos y turbinas. Tecnológicamente se encuentran en esta categoría los sistemas de compostaje más sofisticados y complejos. Sus dos principales diferencias respecto a los anteriores son el excelente control de emisiones al medio y, potencialmente, una elevada capacidad de control de los principales parámetros del proceso, pero también ahorran espacio en la instalación pues algunas de las aplicaciones presentan una inmejorable relación entre el volumen de residuo tratado y la superficie ocupada. Teóricamente se podría permitir su instalación en medio de una población si fuera preciso, aunque eso conlleva un extremo control de las afecciones de todas las demás operaciones relacionadas con el movimiento y manipulación de materiales (recepción, mezclas, descargas, cribado, etc.) así como conocimiento y buenas prácticas en el manejo y control de los elementos de limpieza y depuración de las emisiones.

En general son dispositivos estancos de muy diversos y variados tipos por lo que es más sencillo clasificarlos directamente entre los que se corresponden también con sistemas dinámicos y los que corresponden a los estáticos.

Otra clasificación es la que depende que el material de proceso sea sometido a **homogenización** periódica (no constante) por algún dispositivo mecánico, permitiendo que las capas exteriores de la masa pasen a su interior y viceversa. En función de esto se crean dos grupos:

1. **Sistemas estáticos**, donde una vez constituida la pila, meseta o la acumulación de material, ésta no es movida hasta el final del proceso, o hasta que concluye su tiempo de permanencia en determinada fase del proceso y se transporta a otra zona.
2. **Sistemas dinámicos**, donde se realizan volteos o movimientos periódicos del material, fundamentalmente para recuperar sus condiciones de porosidad, homogeneidad y/o humedad. Estos volteos se pueden realizar básicamente con dos tipos de maquinaria:
 - a. Con una **pala cargadora**, siendo la opción menos eficiente ya que se necesita dedicar más tiempo y habilidad en el manejo de la pala para conseguir que el efecto en el material alcance los resultados mínimamente esperados.

Figura 2.- Imagen de una pala mecánica en funciones de homogenización del material en proceso de compostaje (Fuente: Ramón Plana).



- b. Con una **volteadora**, un tipo de maquinaria específicamente diseñado para la labor de mezclar y homogeneizar el material en proceso de compostaje y del que existen diferentes variantes en función del sistema de compostaje sobre el que se aplique: pilas, mesetas, trincheras, etc.

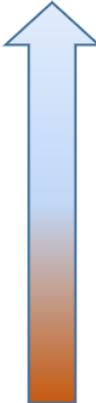
Figura 3.- Imagen de una volteadora específica para el proceso de mezclado del material en proceso de compostaje (Fuente: Ramón Plana).



De acuerdo con esta doble clasificación, es decir, sistemas estáticos o dinámicos, y sistemas abiertos, semiabiertos o cerrados, se pueden clasificar los diferentes sistemas y/o tecnologías de compostaje más aplicadas en la actualidad, tanto a nivel nacional como internacional. A continuación, en la Tabla 1 se

muestra el resumen del catálogo de tecnologías y/o sistemas de compostaje con su correspondiente clasificación en base a los parámetros anteriormente citados.

Tabla 1.- Catálogo de tecnologías y/o sistemas de compostaje más extendidos para el tratamiento de los residuos orgánicos (fuente: elaboración propia).

Grado de descentralización	Sistema/tecnología	SISTEMA		SISTEMA		Capacidad tratamiento	
		ESTÁTICO	DINÁMICO	CERRADO	SEMIABIERTO		ABIERTO
 <p>Mayor DESCENTRALIZACIÓN</p> <p>Mayor CENTRALIZACIÓN</p>	Compostaje doméstico	x	x	x	x	x	Hasta 3 t/año por unidad
	Compostaje comunitario	x	x	x			Hasta 50-55 t/año por zonas de 10 módulos
	Electromecánicos		x	x			3-370 t/año por equipo
	Pilas volteadas		x			x	100-10.000 t/año
	Mesetas	x	x			x	100-30.000 t/año
	Computúneles / contenedores	x		x			40-250 t/año por unidad
	Silos verticales		x	x			250-500 t/año por unidad
	Tambores		x	x			100-3.000 t/año por unidad
	Pilas ventilación forzada	x				x	300-10.000 t/año
	Pilas ventilación forzada cubiertas	x			x		300-10.000 t/año
	Silos aireados	x			x	x	400-20.000 t/año
	Túneles	x		x			A partir de 2.000 t/año
	Trincheras		x		x		A partir de 2.000 t/año

En el [anexo 1 \(anexo digital\)](#) de este documento se presenta en formato de fichas el resumen de los parámetros y características más destacados de cada sistema y/o tecnología.

De manera adicional a la información contenida en las fichas, en los siguientes apartados se presenta la descripción de detalle para cada sistema y/o tecnología.

2.1 Modelos de compostaje doméstico y/o comunitario

La aplicación del compostaje a escala local **busca evitar los modelos de gestión de biorresiduos basados en la recogida selectiva y transporte hasta una instalación de tratamiento**, de tal modo que se puedan tratar en el mismo lugar donde se generen. Para ello se basan en los siguientes principios:

- El compostaje se realiza en las viviendas o en sus proximidades, por lo que el sistema que se emplee debe reducir las posibilidades de que se produzcan afecciones ambientales negativas.
- Se debe poder manejar manualmente de forma adecuada y relativamente cómoda por las personas usuarias y/o por el personal técnico responsable.
- El proceso biológico debe poder desarrollarse de forma eficiente hasta obtener un compost, aunque este tenga un grado de madurez mínimo.

Por tanto, los sistemas de compostaje que se aplican en este modelo deben cumplir:

- Estar aislados o parcialmente aislados del exterior.
- Permitir un manejo y control intenso del proceso mediante técnicas sencillas de combinación de volteos y riegos.
- Permitir establecer lotes de tratamiento y, de esta forma, mantener la trazabilidad del proceso.

- Tener un coste de inversión y tratamiento reducidos, acorde con la escala a la que operan.

Así, en estos escenarios donde la aplicación de los modelos de compostaje doméstico y comunitario se plantea como una alternativa o parte de la gestión de biorresiduos, los sistemas de compostaje empleados a esta escala se encuadran fundamentalmente en:

- A. Sistemas cerrados o semiabiertos, que limiten el contacto del material en proceso con el exterior y, a su vez, ofrezcan un aspecto o imagen más amable y positiva del modelo de gestión a la ciudadanía. Simultáneamente, al ser sistemas con un cierto grado de confinamiento, permite realizar más fácilmente la trazabilidad de los lotes que se van gestionando.
- B. Sistemas preferentemente dinámicos (aunque sea de forma parcial), para poder alcanzar un grado de eficiencia del proceso adecuado, tanto en el rendimiento (cantidad tratada) como en control de afecciones ambientales. Para ellos se dispone de herramientas específicas conocidas como “aireadores” que facilitan la labor de volteo del material en proceso en las unidades de compostaje. Complementariamente se utilizan otras herramientas ya convencionales como palas y rastrillos para mover y trasladar los materiales en tratamiento.

Dentro de estas categorías los más frecuentes en el compostaje a escala doméstica son los compostadores de forma cúbica, cónica o hexagonal, fabricados en piezas de plástico reciclado engarzadas por varillas. En el caso del compostaje a escala comunitaria, cada vez tienen más implantación los constituidos por unidades modulares de 1 m³ de volumen total, forma cúbica y fabricados con listones de madera plástica, donde los módulos se pueden combinar principalmente en series de 3, 6 o 10 módulos por zona de compostaje comunitario. Un segundo modelo son los que se construyen en madera con forma de caseta, con cuatro unidades de 1 m³ cada una; y, en tercer lugar, los del mismo tipo que los compostadores domésticos, pero de mayor volumen o capacidad (800 - 1.200 L) (Plana, 2019).

Figura 4.- Compostador doméstico de varillas (izquierda) y zonas de compostaje comunitario con compostadores modulares en Pontevedra (Fuente: Ramón Plana).



Obviamente, el compostaje a estas escalas se podría realizar por otros sistemas muchos más simples, desde un montón o pila tradicional a zanjas en el suelo donde depositar los restos orgánicos. Sin embargo, para este estudio nos centraremos en sistemas aplicados al tratamiento de biorresiduos y que puedan estar perfectamente integrados en núcleos de población para la gestión local de estos.

2.2 Sistemas de compostaje electromecánicos

Se definirían como un modelo de compostadores enfocados fundamentalmente a un tratamiento local de los biorresiduos por un sistema completamente automatizado en el que, según las informaciones comerciales que publicitan la mayoría de los fabricantes, se completaría el proceso de transformación en compost en un período de tiempo más reducido que mediante otros sistemas. En base a esto, y a que prácticamente todos los modelos comercializados poseen varias características comunes, se han planteado como un sistema específico de compostaje.

Dentro de la clasificación propuesta en la Figura 1 se trataría de sistemas cerrados y dinámicos, fundamentalmente con **forma de tambor con un elemento mecánico de agitación y desplazamiento del material en su interior**, de tal manera que funcionan en continuo, siendo alimentados por un extremo y obteniéndose el producto resultante por el otro extremo. La mayoría de los modelos están completamente automatizados en su funcionamiento desde el momento en que se aporta el residuo, contando con una serie de sensores para monitorizar diversos parámetros de proceso. No obstante, dada la dificultad técnica para medir de manera eficiente ciertos parámetros, es conveniente contar con un personal capacitado para realizar un diagnóstico de la evolución del proceso.

Es muy **frecuente que se recomiende el uso de pellets de madera como material complementario** en vez del triturado de madera más convencional en otros sistemas de compostaje. Esto se debe fundamentalmente a dos razones técnicas:

- La primera, que la principal debilidad de estos compostadores reside en el control de la humedad del material, especialmente de los lixiviados que se generan en los momentos iniciales del proceso, con lo que buscan utilizar un material que sea especialmente absorbente y que retenga el lixiviado según se genera. **Esto puede llegar a provocar que el proceso que se da en el interior de estos equipos sea más de biosecado que de compostaje**, ya que en ningún momento se plantean riegos del material.
- La segunda, que los pellets de madera forman un material que se puede dosificar de forma automática, lo que facilita diseños de equipos totalmente automatizados que pueden ser más atractivos para el tipo de clientes interesados en estos sistemas.

Es muy frecuente que el producto que se obtiene no cumpla con todos los requisitos para ser considerados como un compost a nivel legal y/o técnico, principalmente porque necesita un tiempo extra de maduración para completar el proceso y alcanzar el nivel de madurez y estabilidad requerido.

Debido a todos los sistemas de automatización del proceso y control de emisiones, el coste de inversión en proporción a la capacidad de tratamiento que ofrecen suele ser muy elevado, aunque los de tratamiento y explotación serían más reducidos.

Se pueden encontrar fabricantes internacionales que han escalado estas tecnologías hasta que alcanzan una capacidad industrial de tratamiento, bien por unidades de mayor tamaño como por la combinación de módulos (Figura 5).

Figura 5.- Sistemas de compostaje electromecánicos a escala industrial: unidades de compostaje HotRot 3518 (Fuente: Global Composting Solutions Ltd).



2.3 Sistemas de compostaje en pilas

Se deben a Sir Albert Howard (1931, desarrollador del primer modelo de compostaje moderno: el método Indore), que implementó el método de compostaje que hasta entonces se realizaba en simples montones o acumulaciones del material, convirtiéndolos en pilas o hileras alargadas. A partir de aquí se convirtieron en el sistema más clásico de compostaje y ha sido la base de los desarrollos posteriores (Pérez, 2000).

En estos sistemas, una vez preparada la matriz de materiales a compostar, con o sin mezclado y/o añadido de estructurantes dependiendo de la naturaleza del residuo, **se dispone en un montón alargado de sección aproximadamente triangular**. La forma y relación altura-anchura de la pila dependerá del ángulo estático propio del material a tratar, si es un material que se entrelaza bien y tiene estructura podremos dar más altura a la pila con una base concreta, pero si el material carece de estructura, el triángulo de la sección de pila será muy bajo para la misma anchura de base.

Figura 6.- Ejemplo de un sistema de compostaje en pilas (fuente: Ramón Plana).



Para la elección del tamaño de la pila hemos de fijarnos en la proporción de materiales fácilmente degradables presentes en el residuo (materia orgánica lábil o volátil) y en la estructura física del mismo. La primera nos marcará la tasa de consumo/demanda de oxígeno una vez que el proceso esté en marcha y la segunda nos marcará la capacidad de reposición de oxígeno a través de los poros del propio material en descomposición. En principio, si tenemos un material con una buena estructura física y porosidad, y con una degradabilidad media o baja podremos hacer una pila de mayores dimensiones sin temor de que se produzcan fenómenos de anaerobiosis. En casos de una matriz de materiales con baja porosidad y/o elevada degradabilidad, las dimensiones de las pilas, especialmente en cuanto a la altura, deberían ser limitadas.

Dentro de los sistemas genéricos de los sistemas de compostaje de pilas, se clasifican en función de su sistema de aireación, tres tecnologías principales:

- Tecnología de **pilas volteadas**.
- Tecnología de **pilas estáticas con ventilación forzada**:
 - o SIN sistema de cubrición del material de proceso.
 - o CON sistema de cubrición del material de proceso (lonas o membranas semipermeables).

2.3.1 Pilas volteadas (sistema dinámico y abierto)

El mecanismo de volteo del material se suele llevar a cabo a través de equipos específicos. La maquinaria más común para el volteo es la conocida como **volteadora** (ver Figura 3.- Imagen de una volteadora específica para el proceso de mezclado del material en proceso de compostaje (Fuente: Ramón Plana).) que puede ser **remolcada por un tractor**, o bien, **autopropulsada**. Es frecuente que la volteadora (sobre todo en el caso de las autopropulsadas) lleven integrado un sistema de riego con el que se facilita la acción simultánea de mezclado y riego proporcionando así una elevada eficiencia de homogenización del material. Adicionalmente, en algunas instalaciones sencillas en lugar de contar con esta maquinaria específicamente diseñada para el volteo del material, realizan esta acción a través de palas cargadoras mecánicas comunes (ver Figura 3) e incluso, utilizando en ocasiones cazos separadores con un sistema hidráulico avanzado (Figura 7).

Figura 7.- Imagen del uso de cazos separadores con sistema hidráulico para el volteo de las pilas de compostaje (Fuente: Ramón Plana).



En el caso de las **pilas volteadas se puede actuar sobre ciertos parámetros clave del proceso** de forma directa:

- La porosidad del material.
- La homogeneidad.
- El tamaño de partícula, afectada por el efecto mecánico abrasivo del volteo.
- La humedad, incrementándola si se combina el volteo con riegos o reduciéndola si sólo se volteo.

Esta capacidad de control se refleja de forma indirecta en la evolución de otros parámetros fundamentales del proceso, como la temperatura y la concentración de oxígeno en el interior de la pila. En cualquier caso, para llegar a conseguir un control eficiente de la temperatura se precisa una combinación de volteos y riegos y/o modificar las dimensiones de la pila para facilitar la pérdida o la conservación del calor generado en el proceso. El control por **volteos y riegos** (el mecanismo de volteo a través de volteadora suele llevar integrado un sistema de riego de elevada eficiencia) requiere mucha atención y experiencia para diagnosticar el estado del material y determinar cuál es la intensidad que se debe aplicar de estos. En general existe el error (muy extendido) de considerar que un volteo baja la temperatura de la pila, cuando la realidad es exactamente la contraria (salvo durante los minutos inmediatamente posteriores al volteo), pero combinado con riegos sí puede dar ese resultado (Pérez, 2000), siempre y cuando se evite un exceso de humedad en el material.

Los límites de las dimensiones de las pilas en un sistema dinámico vienen marcados por las volteadoras disponibles en el mercado, o la altura máxima que se puede conseguir con una pala. Las alturas usuales suelen oscilar entre 1 y 3 m, con anchuras en la base de entre 1,5 y 8 m. Existen máquinas volteadoras de gran eficacia, utilizables cuando las dimensiones de la instalación lo requieran y el presupuesto lo permita, si bien, con un mayor esfuerzo y una menor perfección también puede voltearse con una pala cargadora (Pérez, 2000). En la Figura 8 se muestra una imagen de plantas de pilas volteadas de diferentes dimensiones.

Figura 8.- Ejemplos de plantas de pilas volteadas de diferentes dimensiones. (Izquierda) Planta con pilas de pequeñas dimensiones y volteadora remolcada por tractor. (Derecha) Planta de pilas de mayores dimensiones con volteadora autopropulsada. (fuente: Ramón Plana).



Las pilas volteadas o dinámicas presentan las ventajas de conseguir una mayor homogeneización del material, una disminución mecánica del tamaño medio de partícula que contribuye a una mayor disminución de volumen y, por último, una mayor garantía de higienización del material al conseguirse que todo el material pase por fases termófilas tras alguno de los volteos. Todo esto se traduce en una mayor eficiencia del proceso degradativo, pudiendo obtener un compost maduro en menos tiempo de proceso que los sistemas estáticos. Por contra presentan la gran dificultad de controlar su temperatura, posibles problemas de deficiente oxigenación en capas profundas si la estructura no es la adecuada (que no puede garantizarse por los volteos (Manzano et al, 1998; Plana, 2006)) y el elevado coste de las máquinas volteadoras.

2.3.2 Pilas con ventilación forzada (sistema estático y abierto)

Este modelo se basa en el método *Rutgers*. Mediante un sistema de ventilación forzada formado por tubos enterrados en el material o en estrechas zanjitas hechas en el propio suelo sobre el que descansa la pila (Figura 9). Se puede diseñar únicamente para garantizar niveles de oxígeno adecuados dentro de

la pila sin pretender controlar la temperatura de la masa, lo que sería una aplicación del método *Beltsville*. Pero lo habitual es encontrar ya métodos con combinación de ambos métodos y alternando períodos de ventilación forzada por soplado con ventilación por aspiración (Haug, 1986; Sesay *et al*, 1998). Las ventajas de estas pilas son los buenos controles de oxígeno y temperatura, mientras que en su contra tienen las heterogeneidades que aparecen en el material entre capas externas y profundas, o entre las zonas laterales (más secas y frías) y las superiores (más húmedas y calientes) (Pérez, 2000).

Figura 9.- Ejemplo de planta de compostaje en sistemas abierto en pilas estáticas con ventilación forzada. Planta de compostaje de FORM en pilas estáticas por el sistema Rutgers (Seiringer, en Weiselburg, Austria). (Fuente: Ramón Plana).



El aspecto fundamental para conseguir garantizar la eficiencia de este sistema, y de cualquier sistema de compostaje estático, es garantizar la mayor homogeneidad posible de los restos orgánicos a compostar con el material estructurante o complementario. Para ello se recomienda disponer de un equipo específico de mezclado que permita asegurar que la mezcla es homogénea desde el primer momento de proceso. De no contar con este equipamiento, realizar el mezclado con una pala cargadora o un tractor con pala, dedicándole todo el tiempo que sea preciso hasta que se alcance una mezcla perfectamente homogénea. Además de esto, el protocolo de trabajo en la instalación debería incluir movimientos/traslados/mezclados del material cada 3 - 4 semanas como mínimo para recuperar las condiciones adecuadas de homogeneidad, porosidad y humedad en todo el volumen de material en proceso.

Prácticas más simples, pero las menos eficientes, consisten en constituir la pila con capas alternas de material estructurante y restos orgánicos hasta alcanzar la altura deseada y siempre terminando con una capa de estructurante por encima.

2.3.3 Pilas cubiertas con lonas y ventilación forzada (sistema estático y semiabierto)

Se trata de un sistema que combina un sistema estático con ventilación forzada con una cubrición por una membrana que permite el intercambio de ciertas sustancias gaseosas de bajo peso molecular con el exterior, con lo que se trataría de un confinamiento parcial. El primer modelo, empleando lonas de un tejido de *Gore-Tex®* se lanzó en 1990 con el nombre de *Gore™ Cover* y rápidamente se extendió por todo el mundo por las relativas ventajas prácticas que implicaba. Actualmente hay varias empresas que comercializan variantes de este modelo como *TopTex*, *ComposTex*, *FR-Composply (Incabo)*, *BC CoverTech...*

El modelo original consistía en una pila estática cubierta por una lona de un material semipermeable (*Gore-Tex®* o similar) y ventilada, en función de la demanda de oxígeno, por sobrepresión a través de unas tuberías enterradas en el suelo (Figura 10). La estructura de poros de la membrana es permeable al vapor de agua, pero no lo es al agua en estado líquido, por lo que el material puede liberar humedad al exterior, pero no sufre las condiciones meteorológicas de la zona. En cuanto al paso de gases, en general es permeable a los componentes mayoritarios del aire (CO_2 y O_2), pero posee una cierta capacidad de retención del NH_3 , tanto por el tamaño de poro como por la película de agua condensada que, durante el proceso, se forma en la superficie interior de la membrana, donde quedan retenidas las sustancias gaseosas solubles. De esta manera, una de las principales ventajas de este sistema es que permite la reducción de las afecciones medioambientales negativas por olores (Kiehl, 2007).

El sistema original también posee una monitorización de la temperatura, aunque el control del funcionamiento del ventilador sólo se hacía en función de las necesidades de oxígeno, lo que provoca que la temperatura de la masa alcance valores superiores a los 80 °C y los mantenga durante largos períodos de tiempo. Estas temperaturas limitan e inhiben en gran medida a la comunidad microbiana (Nell & Wiechers, 1978; Finstein *et al*, 1986; Fermor *et al*, 1989) y producen una gran reducción del número de especies que pueden mantener una actividad degradativa (Strom, 1985). Por lo tanto, y aunque en principio encajaría en la definición de compostaje, sería objeto de análisis y debate si lo que ocurre en este sistema es realmente el proceso biológico del compostaje y no una serie de procesos termoquímicos que también consiguen estabilizar e higienizar la materia orgánica.

Figura 10.- Sistema semicerrado bajo lona semipermeable Gore™ Cover (Vegas del Genil, Granada). Se aprecia la salida de vapor de agua a través de la lona (fuente: Ramón Plana).



Las posteriores adaptaciones del sistema por diferentes empresas, además de diversificar los tejidos de las lonas, incidieron en modificaciones en el sistema de ventilación, el sistema de monitorización y las dimensiones de las pilas. De esta forma, se ha conseguido poder llegar a controlar la temperatura del proceso o, por lo menos, mantenerla en valores no extremos, por lo que actualmente se trata de un sistema cercano a los sistemas cerrados y estáticos en cuando a control de parámetros y proceso. Una de las variantes del modelo consiste en introducir la mezcla de materiales a compostar dentro de una especie de saco o embutido de lona semipermeable en el que se insufla el aire a presión desde un extremo.

En los últimos diez años han surgido variantes del modelo adaptadas a sistemas de compostaje dinámicos, donde la máquina volteadora cuenta con un sistema para recoger la lona y extender una nueva según va avanzando a lo largo de la pila, lo que permite realizar el volteo sin tener que plegar y desenrollar la lona antes y después de cada volteo. Otras aplicaciones del modelo en plantas, cuentan con un dispositivo adaptado a la pala cargadora que facilita la recogida y extensión de las lonas sobre las pilas, haciendo más viable el que puedan ser volteadas de forma convencional.

2.4 Compostaje en mesetas

Es una variante de la pila desde su sección triangular a otra trapezoidal con una base de mucha mayor anchura y de hasta una altura que no debería superar los 3 metros. Su principal ventaja es el mayor aprovechamiento de superficie (mayor número de m³ dispuestos por cada m² de superficie ocupada) y su mayor capacidad de retención del calor generado por el metabolismo de la microbiota, lo que refuerza la capacidad del sistema para poder emplearse como sistema abierto en climas extremos, tanto fríos y húmedos como cálidos y desérticos, ya que también permite una mayor retención de la humedad del material (*Figura 11*).

Figura 11.- Distintos ejemplos de plantas de compostaje en sistemas abiertos de mesetas. A) Planta de mesetas dinámicas para restos vegetales (Solingen, en Düsseldorf, Alemania). B) Planta de mesetas estáticas y ventiladas para el tratamiento de restos vegetales y algas en Denia (Alicante), se aprecian los canales de ventilación soterrados. C) Maduración en mesetas volteadas (ENERCORR XXI, en Langa de Duero, Soria). D) Meseta estática con ventilación forzada para restos vegetales (Migas Calientes., Madrid); (fuente: Ramón Plana).



Sus principales inconvenientes se refieren a que son más difíciles de manejar y voltear de forma eficiente, ya que necesitan un tipo de volteadoras muy específico o el volteo debe realizarse con pala cargadora, además de que, por su mayor volumen y dimensiones, la meseta está sujeta a sufrir con más intensidad el efecto de la compactación del material (especialmente en las capas inferiores), lo que afecta a su capacidad de auto-oxigenación y, en consecuencia, a la eficiencia del proceso biológico. Debido a esto es frecuente que sea un modelo o sistema de compostaje que se aplica principalmente a fases de maduración, cuando la actividad biológica es menos intensa y las necesidades de los microorganismos pueden ser garantizadas en las condiciones ambientales que confiere la meseta. Cuando se utiliza en fases iniciales del proceso se suele recurrir a aireaciones forzadas, ya que es el momento en que se da la descomposición de los materiales más fácilmente degradables, lo que implica una importante demanda de oxígeno. Esta ventilación se obtiene, como en las pilas, mediante un circuito de tubos perforados embebidos en el suelo o por un falso suelo con orificios conectados a ventiladores centrífugos que insuflan o aspiran aire a través de la masa de la matriz de la meseta.

Se debe considerar que la altura máxima que se le puede dar a la meseta no debería sobrepasar los 3 metros (Mato, 2005) salvo casos excepcionales o puntuales, aunque hay ejemplos de mesetas de hasta 6 metros de altura (Cookson, 1995) pero en las que se han introducido redes de tubos a distintas alturas para permitir su ventilación.

Se trata de un sistema de compostaje que, además de para fases de maduración, resulta muy adecuado para el tratamiento de residuos de muy lenta degradación, como pueden ser restos vegetales leñosos, donde se busca conservar todo lo posible la humedad del material y el calor generado en el proceso,

siendo totalmente desaconsejable para las primeras etapas del compostaje de residuos de más fácil degradación como los biorresiduos. También es un sistema que se aplica en técnicas de biorremediación para la recuperación de suelos contaminados por residuos orgánicos, como pueden ser hidrocarburos (Benazon *et al*, 1995) o lodos de depuradora (Mato *et al*, 2006). En estos casos se plantean tiempos de residencia de meses con escasas actuaciones sobre el material, minimizando, e incluso anulando, los volteos.

Existe una variante de las mesetas, llamada "colchón", que se forma al aire libre en capas superpuestas, generalmente de restos de jardinería y poda, mediante una máquina que los tritura y compacta *in situ*. Este sistema suele demorar un largo período, después del cual el material se voltea y se criba.

2.5 Compostaje en trincheras

Este sistema es, en realidad, una variante de las tradicionales pilas volteadas, pero en las que en este caso el material se coloca entre muros longitudinales. Los canales, calles o trincheras tienen entre 3 y 5 m de anchura, los muros entre 2 y 3 m de altura (aunque hay casos excepcionales de menor altura que sólo limitan o marcan la zona de paso de la volteadora) y la longitud puede ser la que se desee, aunque normalmente oscila entre los 60 y los 140 m (Figura 12). El número de trincheras por planta también es un parámetro variable, pero normalmente no suelen ser más de dieciséis por motivos operativos.

El aporte de material fresco a compostar puede llegar hasta el inicio de la trinchera por un sistema de cintas provisto de un sistema que permite descargarlo en el principio de una u otra trinchera a voluntad, o bien es depositado directamente al inicio de la trinchera por una pala cargadora (Figura 12). La característica más relevante de este sistema es el método de volteo (se trata de un sistema dinámico), por medio de una volteadora que circula sobre unos raíles situados a lo largo de la parte superior de los muretes y que puede ser pasada de una a otra calle por medio de un sistema *transfer* situado al principio y/o al final de las mismas. Dependiendo del tipo de volteadora esta puede atacar el material por medio de un rodillo provisto de un sistema de deflectores que carga el material en proceso sobre una cinta transportadora que lo traslada varios metros hacia atrás de la volteadora, con lo que se consigue que todo el material de la trinchera se desplace esos metros cada vez que la volteadora hace un recorrido completo. Otras tecnologías de máquinas volteadoras prescinden de cintas y es la inercia del giro de la fresa o rodillo el que lanza y desplaza el material hacia atrás, como las volteadoras de puente convencionales.

Tras un número de volteos, determinado según el diseño y dimensionamiento de la instalación, el material en proceso habrá recorrido toda la trinchera y (supuestamente) habrá cumplido un tiempo de residencia mínimo que le haya permitido completar la fase de proceso, fermentación o maduración. A partir de aquí el material es transportado a la zona de maduración, post-maduración o cribado/afino en función de la fase de proceso que haya completado.

Es habitual, en especial para restos orgánicos con una elevada biodegradabilidad, que una parte de las calles, normalmente la primera mitad o el primer tercio, disponga de un falso suelo perforado unido a una turbina con la que se puede insuflar o aspirar aire a presión a través del material, controlando así la temperatura por convección forzada y/o garantizando una presencia suficiente de oxígeno en la masa en descomposición. Como vemos se puede llegar a considerar un proceso en continuo, con una transición paulatina de descomposición a maduración a medida que el material va avanzando en la calle conforme va siendo volteado. Una deficiencia es la dificultad de llevar la monitorización de los parámetros de proceso en continuo a causa de los pasos de la volteadora, por lo que hasta el momento es preciso que un operario introduzca las sondas en el material y las extraiga entre las pasadas de la volteadora.

Figura 12.- Varios ejemplos de plantas de compostaje en trincheras. **A)** Compostaje de Fracción Resto (Ecoparque de La Rioja, Logroño). **B)** Compostaje de estiércol de vacuno (Cistierna, León (actualmente cerrada)). **C)** Planta de compostaje de lodos de alperujo (Cooperativa Valdolivo, Jaén).



Otra de las limitaciones o debilidades de este sistema está en la captación de lixiviados, ya que acceder al fondo de las trincheras para comprobar periódicamente su estado requiere vaciarlas completamente, algo que conlleva un esfuerzo y coste importante. Por ello, desde el diseño inicial hasta el protocolo de trabajo en planta, se debe considerar que este es un factor muy relevante para asegurar la eficiencia y buen funcionamiento de la instalación.

Además, hay que contemplar que, en caso de avería de la máquina volteadora, la planta pierde toda su operatividad hasta que esta sea reparada, ya que no se puede operar las trincheras con una pala cargadora u otra de las maquinarias que habitualmente podemos encontrar operando en una planta de compostaje.

2.6 Compostaje en silos aireados (sistema estático)

Es un modelo de compostaje estático con ventilación forzada, que se realiza en zonas con forma de troje o de silo delimitadas por tres lados y cuyo suelo tiene un sistema de tuberías embebido en zanjas o en el mismo hormigón (usando *spigots*) a través de las cuales se insufla el aire en la masa desde un ventilador centrífugo. El objetivo es únicamente el de garantizar condiciones aerobias, con lo que la potencia instalada del ventilador es relativamente baja en comparación con otros sistemas. En la Figura 13 se muestran ejemplos de esta tecnología con y sin el uso de lonas semipermeables para la cubrición del material de proceso.

Figura 13.- Imagen tecnologías de silos aireados con ventilación forzada SIN y CON cubierta semipermeable referentes a la (Izquierda) Planta de compostaje de Sort (Lleida) y (Derecha) Planta de compostaje de Clariana de Cardener (Barcelona), respectivamente (Fuente: Ramón Plana).



El dimensionamiento de los silos se hace en función del tiempo de residencia del material que, habitualmente, se marca en cuatro a seis semanas para la fase de fermentación y ocho a diez semanas para la maduración, con el equivalente a un volteo en el paso del material de una zona a otra. Suelen disponer de un sistema de riego superficial. Como en todos los sistemas estáticos tiene una gran dependencia de un sistema de mezclado eficiente del residuo/s a tratar con el material estructurante y complementario en el pretratamiento.

Sus principales ventajas radican en las mínimas necesidades de movimiento de material, la reducida ocupación (inicialmente) de superficie por cantidad de residuos a compostar y el control de olores al garantizar las condiciones aerobias en todo momento. Todo esto reduce de forma notable los costes teóricos de explotación.

Sus limitaciones vienen dadas por tiempos de residencia demasiado largos en los que se generan estratificaciones y heterogeneidades muy importantes en el material, tanto en cuanto a humedad y porosidad, lo que ralentiza o reduce la eficiencia del proceso de compostaje. A nivel global esto se traduce en que se necesite prolongar el proceso más allá de los tiempos establecidos en el criterio inicial de dimensionamiento, pudiendo ser necesario alcanzar períodos de meses de postmaduración del compost hasta que completa la maduración deseada. Es muy frecuente que este sistema se combine con una maduración en sistemas de pilas dinámicas, para poder llegar a obtener un compost maduro en el margen de tiempo de operación habitual en plantas.

2.7 Sistema de tambores rotatorios

A diferencia de los sistemas de compostadores electromecánicos, los tambores rotatorios suelen trabajar a una mayor escala (aunque actualmente existen versiones a escala doméstica) y no disponen de un sistema de agitación interna, sino que es el propio giro del cilindro el que realiza la homogeneización del material.

El primer sistema de compostaje cerrado y dinámico aparece en Holanda en 1937 (López-Real, 1990; Larsen 1993). Se le denomina sistema DANO y se trata de **tambores cilíndricos rotatorios generalmente en disposición horizontal** de unos 30 metros de longitud y 3 de diámetro por donde avanza el material de un extremo al otro gracias a una rotación a aproximadamente 2 rpm (Figura 14). Las versiones actuales disponen de sistemas de ventilación forzada, sondas de temperatura de la masa y captación de los gases generados en el interior del tambor para su posterior depuración. Pero no se le debería considerar en sí mismo un sistema de compostaje ya que el material permanece en el interior del tambor no más de tres días, período en el cual es homogeneizado y desmenuzado, mejorando las condiciones físicas del material para que su posterior compostaje en pilas, o en otro sistema, sea más eficiente (López-Real, 1990).

Figura 14.- Ejemplos de sistemas de compostaje en tambores. (Izquierda) Planta Kibutz Hannassi (Israel). (Derecha) Planta de compostaje de FORM para el vecindario del Plateau Mont Royal en el parque Jeanne Mance, Montreal (Canadá), (fuente: Ramón Plana). (Inferior) Unidades de compostaje HotRot 3518 (fuente: Global Composting Solutions Ltd).



Otros sistemas en tambor que evolucionaron a partir del modelo DANO son el diseño *Eweson*, en el que el interior del cilindro está compartimentado de manera que se pueden alargar los tiempos de residencia del material a lo largo del cilindro; o el sistema *Ruthner*, el sistema *Envital* y el sistema *PLM-BIAS*, de los que actualmente ya no se comercializa ninguno.

De estos modelos han evolucionado los actuales compostadores electromecánicos, al adaptar la escala a modelos de menor capacidad (Barrington *et al*, 2005), ya que se pueden dimensionar y diseñar tambores de compostaje a una escala pequeña o comunitaria para gestionar cantidades de residuos orgánicos no muy altas, como pueden ser las de una pequeña comunidad o vecindario, que no justificarían la inversión de una planta industrial de tratamiento.

2.8 Silos verticales

A mediados del siglo XX, se desarrollaron en EE.UU. una serie de dispositivos cerrados cuya principal característica definitoria era la de permitir el movimiento del material en descomposición dentro de ellos mediante algún procedimiento mecánico, y en los que se suele insuflar aire y controlar diversos parámetros como temperatura, nivel de oxígeno, desprendimiento de CO₂, etc. Los modelos actuales pueden estar fabricados en metal protegido o en hormigón, aunque dispongan de mecanismos internos metálicos. Algunos de estos sistemas operan en discontinuo o por partidas (*batch* en la bibliografía anglosajona), pero lo más común y además una de sus principales ventajas, es que permiten un funcionamiento en continuo, como podrían ser los sistemas en trincheras o en tambores (López-Real, 1990; Pérez, 2000).

Algunos modelos presentan un elemento agitador que a la vez es insuflador de aire en la masa. Se trata de reactores cilíndricos con un brazo rotatorio que dispone de una serie de lanzas con forma espiral que se introducen en la masa y la remueven mientras el brazo va girando. A su vez estas lanzas están perforadas y a través de ellas se introduce aire a presión en el interior del material para mantener las condiciones aerobias del proceso. Al modelo inicial de este sistema se le conoce como reactor *Fairfield*. Para tiempos de residencia inferiores a tres semanas es preciso disponer de una fase de maduración posterior, generalmente en pilas.

Existen también tecnologías de silos aireados en **disposición vertical** (sección circular o rectangular), con carga superior y descarga por la base mediante dispositivos de extracción mecánicos suelen insuflar aire a presión por la parte inferior y/o por los laterales y recoger el gas saliente por la parte superior,

donde suele ir también el sistema de riego para corregir el nivel de humedad de la matriz (ver Figura 15).

Figura 15.- Imagen de silos aireados verticales cilíndricos (fuente: Berca Group).



La ventilación eficiente es uno de los principales retos de este sistema. Esto se debe a la dificultad técnica que supone ventilar de forma homogénea una carga de material que generalmente supera los 3 metros de altura, ya que el aire tiende a pasar por el espacio que queda entre el material y las paredes y a través de vías preferenciales que se forman en el mismo material, lo que provoca que la mayor parte del caudal de aire introducido circule por esos espacios y no por todo el volumen de material, resultando en una oxigenación deficiente para el proceso. Se les suele denominar sistemas en torre o silos verticales y fue implantado principalmente en EE.UU. y en Asia (en este caso asociados al tratamiento de deyecciones ganaderas), mientras que en Europa su presencia se ha ido incrementando durante los últimos 15 - 20 años, motivados inicialmente por el Reglamento (CE) nº 1774/2002 del Parlamento Europeo y del Consejo de 3 de octubre de 2002 por el que se establecieron las normas sanitarias aplicables a los subproductos animales no destinados al consumo humano (SANDACH).

Hay versiones de este sistema de compostaje en el que se colocan en serie dos o tres reactores, de manera que el proceso se va desarrollando en distintas fases, según va pasando el material de un reactor a otro. Al mismo tiempo dentro de cada cilindro puede haber distintos pisos, por lo que el material pasa además por una serie de “volteos” en la caída de un piso al inmediatamente inferior (de Bertoldi & Civilini, 2006).

2.9 Compostúneles/contenedores (sistemas estáticos y cerrados / reactores de compostaje)

Los contenedores son **recipientes paralelepípedicos herméticos**, generalmente de acero con tratamiento anticorrosión, con doble suelo para la ventilación y recogida de lixiviados, con volúmenes generalmente comprendidos entre los 20 y 50 m³. Dados su tamaño y peso presentan la interesante ventaja de poder ser trasladados de un lugar a otro a voluntad, pudiendo llenarse en el área de producción del residuo y trasladarlos llenos al área de operación, donde son conectados a los sistemas de control y ventilación. O disponerlos en una zona próxima a donde se genera el residuo para realizar allí mismo una primera fase de fermentación/estabilización que reduzca masa y volumen de los residuos antes de llevarlos posteriormente a otro lugar donde completar la fase de maduración. Los parámetros que se controlan y el modo de hacerlo son por entero similares a los empleados en los túneles que se exponen en el punto 2.10, por lo que nos remitimos a las explicaciones que allí se den. Resultan relativamente caros, pero su modularidad los hace muy versátiles y tremendamente útiles para aquellos casos de lugares en los que se produzca una gran variedad de residuos orgánicos diferentes en no muy grandes cantidades. Para el caso concreto de la FORM no parecen los más indicados, aunque no estaría de más estudiar la posibilidad de que sean compartidos por varias poblaciones pequeñas por medio de recogidas

alternativas y secuenciales en las diversas poblaciones y tratamiento en un lugar centralizado y común (Pérez, 2000).

Figura 16.- Ejemplos de sistemas de compostaje en contenedores. (Izquierda) Planta de compostaje en Milán (Italia); (Derecha) Planta de investigación en compostaje Universidad de Vigo (BIO.RES.OR); (fuente: Ramón Plana).



2.10 Túneles

2.10.1 Túneles estáticos

Los túneles de compostaje es una tecnología cuyo origen hay que buscarlo en la tradicional industria de obtención de sustratos para el cultivo de champiñones, que, tras una gran experiencia práctica en un tipo muy concreto de materiales fue adaptando su diseño a fin de poder aplicarlo a compostar otros diferentes tipos de residuos orgánicos.

Consiste en reactores cerrados en disposición horizontal donde la **ventilación se efectúa a través de un falso suelo perforado, ya sea por depresión (aspirado) o por sobrepresión (soplado), pudiendo disponerse la recirculación del aire del proceso** (ver Figura 17). Los túneles estáticos funcionan en régimen discontinuo (*batch*).

Se trata de una tecnología que presenta una gran robustez, acentuada por el hecho de que ninguna de las partes delicadas del sistema está en contacto con el material en descomposición. El control de parámetros del proceso que permite es excelente mediante combinación de sondas de medición para diferentes parámetros y en diferentes lugares del sistema. Así, las distintas empresas fabricantes ofrecen variaciones en las posibilidades de monitorización de la temperatura en masa y en conductos, de la humedad del aire en diferentes zonas del circuito de ventilación, de la concentración de ciertos gases (fundamentalmente O₂, aunque potencialmente también se podría monitorizar CO₂, NH₃...) en muestras tomadas de diferentes zonas, como en el propio material en proceso, en los conductos de ventilación o en la atmósfera libre de la parte superior del túnel (aunque debido a la dificultad de garantizar la fiabilidad de la medición en la mayoría de los modelos al cabo de cierto tiempo de operatividad de la planta, actualmente no se suele ofrecer la monitorización de estos parámetros), la presión del aire en el *plenum* de ventilación, el caudal de riego, las horas de funcionamiento y el consumo eléctrico de los ventiladores,... Todos estos valores medidos son transmitidas a un autómata programable (PLC) que a su vez las envía de forma directa o por un servidor a un ordenador provisto de un programa específico de control a través del cual se controla y rectifica a voluntad el proceso mediante el uso de ventilación forzada y riego. El banco de datos que va recogiendo la memoria del ordenador no sólo garantiza la trazabilidad del tratamiento de los diferentes lotes, si no que permite poder realizar

un análisis y diagnóstico de la evolución del proceso, pudiendo anticiparse a potenciales problemas o deficiencias en su manejo.

Figura 17.- **A).** Aspecto exterior de la zona de túneles en la planta de compostaje de Lousame (FCC, en Barbanza, A Coruña). **B).** interior de un túnel de compostaje de la planta de tratamiento de residuos en Ávila. Se aprecia el falso suelo perforado, las sondas de temperatura y la salida de aire en la pared del fondo. En las figuras **C y D)** se muestran los sistemas de ventilación en esas mismas plantas. En la imagen inferior **(C)** izquierda se aprecia el circuito que permite la recirculación de aire de nuevo al interior del túnel; (fuente: Ramón Plana).



En ocasiones la matriz a compostar suele introducirse muy húmeda (normalmente por encima del 70% de humedad inicial), utilizándose como riego los propios lixiviados producidos en las anteriores operaciones del túnel. El alto nivel de humedad no suele representar ningún problema grave de una posible caída en anaerobiosis gracias al sobredimensionamiento habitual de las turbinas de ventilación que garantizan un caudal de aire suficiente para recuperar las condiciones aerobias del material. Todos los lixiviados generados son recogidos, conducidos a un depósito (normalmente junto con las pluviales de suelo) y reutilizados para la humectación de ese lote (túnel) o de los siguientes. Ningún líquido sale del proceso al exterior ya que es un circuito cerrado. Los gases que no se recirculan en el túnel son conducidos a sistemas de depuración, generalmente constituidos por biofiltros, con posibilidad incorporar previamente sistemas de lavado (*scrubbers*), refrigeración y/o humectación.

Las principales ventajas de este sistema de compostaje son la extrema robustez de las instalaciones, lo que les permite trabajar con biorresiduos independientemente del porcentaje de impropios que contengan, la reducida ocupación de espacio en relación a la capacidad de tratamiento y su elevado control de las afecciones ambientales.

El tiempo de permanencia normal del material en el túnel está entre dos y tres semanas, con lo que cuando manejan adecuadamente se suele alcanzar un grado de estabilidad del residuo razonable para

el tiempo transcurrido, pero que todavía no es suficiente, por lo que es requerido un período de maduración posterior a la permanencia en túnel, generalmente mediante pilas o mesetas volteadas. Se pueden encontrar instalaciones que también disponen de túneles para la maduración del material de salida de los túneles donde se ha dado la descomposición inicial, aunque en estos casos la falta de volteos del material incide negativamente sobre la calidad y madurez del compost final (Illmer & Schinner, 1997). Cada vez es más frecuente introducir diseños donde la fase de fermentación incluye una transferencia o paso del material por dos túneles consecutivos. Así tiene una primera etapa de tratamiento en túnel durante dos semanas, transcurridas las cuales el túnel se vacía y se traslada el material a un nuevo túnel donde permanecerá otras dos semanas (2 + 2 semanas) para pasar luego a la fase de maduración. Esto permite corregir los fenómenos de heterogeneidad que se producen en el material en los sistemas estáticos, recuperando la porosidad y la homogeneidad del material en el paso de un túnel a otro, lo que permite ganar eficiencia en el proceso biológico en la fase de fermentación.

Al tratarse de un sistema de compostaje que permite un gran nivel de control y monitorización de los parámetros de proceso, resulta muy adecuado para el desarrollo de la investigación experimental en compostaje, ya que el confinar la mezcla de residuo y estructurante en un recipiente cerrado, con una ventilación forzada, y diversas sondas de temperatura y medición de gases, se obtiene una representación de la evolución del proceso en túnel. Esta aparente simplicidad y comodidad es la principal razón por la que históricamente se trasladó la mayor parte de la experimentación en este campo a una pequeña escala de laboratorio, extrapolando luego los resultados al mundo industrial e ignorando o menospreciando el factor masa o escala, lo que ha llevado a cometer errores de diseño y dimensionamiento en instalaciones. Actualmente se está superando esta etapa y ya se realizan investigaciones a escala piloto, semiindustrial e industrial (Plana *et al*, 2001).

2.10.2 Túneles dinámicos

Los reactores dinámicos horizontales vienen siendo el paso final de la evolución de las pilas volteadas al compostaje en trincheras (semi-abierto) y de este al túnel dinámico (cerrado). Su forma y dimensiones son muy semejantes a las de los reactores o túneles estáticos, aunque con la diferenciación que disponen de unos elementos mecánicos, bien fijos en el interior o bien externos y que entran periódicamente, para voltear y homogenizar el material en proceso. También disponen de un falso suelo perforado que permite la captación de lixiviados y la ventilación de la masa. El ejemplo más representativo de estas tecnologías son los modelos *Wright* (Figura 18).

Por su elevado coste se han enfocado a instalaciones de biosecado más que de compostaje (Figura 19), donde los tiempos de residencia son menores y no hay necesidad de controlar los niveles de humedad, una de las mayores debilidades de todas las versiones de los sistemas cerrados y dinámicos.

Figura 18.- Un ejemplo de túnel continuo, el sistema *Wright-in-vessel*.(fuente: *Wright Environmental Management Inc.*).

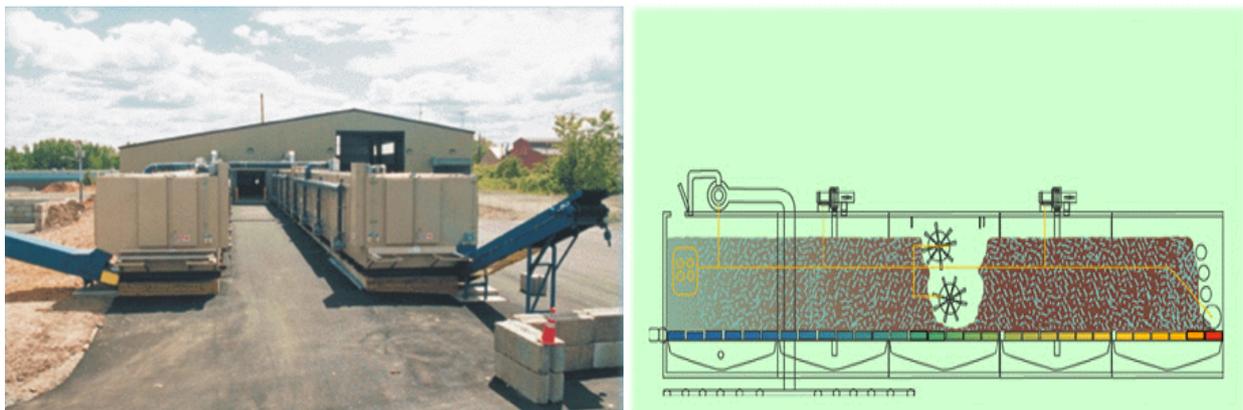


Figura 19.- **A y B)** corresponden a una planta de compostaje en túnel cerrado y dinámico. Una volteadora entra en el túnel como si fuera un sistema en trinchera (en Can Canut, Mallorca). **C)** se observa otro sistema de volteo y descarga de túnel en una planta de Tratamiento Mecánico Biológico de Fracción Resto (Centro de Tratamiento de Residuos – CTR San Román de la Vega), en León); (fuente: Ramón Plana).



2.11 Otros sistemas con aplicaciones más limitadas

En el sector se pueden encontrar otras tecnologías de compostaje que, o bien no se aplican a los biorresiduos por no cubrir todas las necesidades de estos o por no dar el rendimiento adecuado para poder ser aplicados en una gestión industrial.

Se ha considerado apropiado citar aquí los más relevantes o que se encuentran con más frecuencia en el mercado como información complementaria.

2.11.1 Compostaje en zanjas

Se consideran una de las variantes del método *Indore* desarrollado por Sir Howard, desarrollada a partir de una de las formas históricamente más antiguas de la gestión de residuos en núcleos urbanos. En cierto modo serían pilas en cota negativa, donde el material a compostar se deposita dentro de nichos o agujeros practicados en el suelo. Son sistemas de uso poco común y tan solo apropiados para climas muy secos y cálidos o para algunos casos muy específicos. Su principal ventaja es la de aprovechar al máximo, tanto el agua de riego, como la de la lluvia, pero se acrecientan los riesgos de entrada en anaerobiosis. En algunos casos se utilizan en combinación con la acción de lombrices de tierra, especialmente en zonas tropicales, con la doble función de retención del terreno frente a la erosión por lavado y

fertilización adicional, pero son siempre variantes del método *Indore*, como es el caso del método *Mazibuko* desarrollado en Sudáfrica para la recuperación de suelos muy degradados.

2.11.2 Pilas abiertas estáticas

Son modelos muy sencillos en cuanto a su manejo y formación, pero al mismo tiempo, al ser un modelo tan simple, su eficiencia es más reducida. El material se dispone en forma de pila sobre una superficie determinada y ya no se ejercen más acciones sobre él en un período de tiempo de semanas, con la única excepción puntual de riegos superficiales si así se considera. La única posibilidad de relativo control de la temperatura se basa en variar el intercambio de calor de la pila con el exterior modificando la superficie libre o la relación superficie/volumen de la misma. Una mayor relación superficie/volumen de la pila favorece la pérdida de calor del material, mientras que las menores relaciones ayudan a conservar el calor generado en el proceso biológico degradativo.

2.11.3 Reactores exprés

Esta categoría se ha creado para englobar a sistemas de tratamiento de residuos orgánicos que se comercializan desde hace ya algún tiempo ofreciendo tiempos de proceso extremadamente cortos, de pocos días o incluso horas. La mayoría se basan en forzar una fase hidrolítica previa mediante procesos fundamentalmente físicos y químicos, que permita favorecer la actividad biológica de los microorganismos que, en ocasiones, corresponden a cepas específicamente seleccionadas y comercializadas. Todas estas tecnologías están sometidas a patentes tanto tecnológicas como de proceso, con lo que su comercialización y aplicación debe pasar en cualquier caso por las empresas fabricantes.

Las principales limitaciones en su uso vienen tanto desde el punto de vista del uso y comercialización del producto final, que no cumpliría con los requerimientos de la normativas estatales e internacionales exigidas a los productos fertilizantes y sustratos que son denominados como “compost”, como la de introducir un modelo de gestión de los residuos municipales donde la administración pública no tiene posibilidad de incidir y en el que las fuertes necesidades de inversión empujan a que se deba desarrollar un modelo de economía de escala para asegurar la rentabilidad de la instalación durante (al menos) el período de amortización, sin que políticas de minimización y prevención en la generación de residuos tengan cabida.

2.11.4 Nave de compostaje

La aplicación del compostaje a escala industrial ha sido casi siempre enfocada desde un aspecto puramente técnico bajo un enfoque de economía de escala. Así desde los años 50 del pasado siglo han ido desarrollándose tecnologías cada vez más complejas y/o con mayor incorporación de elementos mecánicos y automatismos que permitieran maximizar la capacidad de gestión de residuos en la planta en el menor tiempo y con la menor necesidad de personal. El mayor nivel de aplicación de estos conceptos ha recaído en los sistemas cerrados y dinámicos (nave de compostaje) donde, en un único espacio confinado, el material va siendo desplazado y volteado por un gran elemento volteador que se desplaza mediante un brazo mecánico o mediante un puente grúa a través de toda la nave. Además, es habitual que la nave cuente con una ventilación forzada del material.

Dados los elevados costes de inversión necesarios, este tipo de tecnologías sólo pueden ser rentables para instalaciones de capacidad de gestión, superiores a las 100.000 t/año, por lo que suelen restringir cualquier estrategia de prevención y reducción en la generación de residuos por parte de las administraciones, ya que el balance económico de estas plantas se basa en la cantidad de residuos de entrada y no se ven afectadas por la “calidad” del residuo de entrada, relativa a la presencia de materiales impropios mezclados con la materia orgánica.

Por otra parte, no hay un control preciso y diferenciado de las condiciones de proceso del material, ya que la instalación funciona bajo un modelo continuo. El tiempo de residencia, bajo la justificación de la agitación y la ventilación forzada, se reduce a 3 + 3 semanas (fermentación + maduración), pero también bajo condiciones de proceso de elevadas alturas de carga de más de 3 m. Todo ello conlleva una reducida eficiencia del proceso biológico degradativo, que se enfoca más hacia un biosecado que hacia un compostaje para obtener un producto final de calidad agronómica.

En la Figura 20 se muestran, a modo de ejemplos, dos imágenes de instalaciones de este tipo de tecnología desde sus inicios hasta la actualidad.

Figura 20.- Imágenes de plantas con la tecnología de compostaje en naves. Izquierda, Reactor Hardy desarrollado en 1950 (Díaz y Bertoldi, 2007); derecha, tecnología BIOMAX (Fuente: Sorain Cecchini Tecno Srl.).



Todos estos factores hacen que estos modelos y tecnologías acaben estando más enfocados hacia aplicaciones de bioestabilización de la Fracción Resto que a compostaje de los biorresiduos recogidos selectivamente.

3. ESTIMACIÓN ECONÓMICA DE LAS TECNOLOGÍAS

A continuación, se presenta una estimación de los costes económicos de las principales tecnologías industriales asociadas al proceso de compostaje. Los costes principales se han clasificado como **costes de inversión** (en el que se incluye la obra civil y los equipos), así como los **costes anuales de explotación** de las mismas. En cuanto a los costes de inversión se refiere, éstos llevan asociadas unas amortizaciones. En la Tabla 2 se resume las amortizaciones fijadas para los trabajos de obra civil y para los equipos, respectivamente.

Tabla 2.- Cuadro de amortizaciones e intereses asociados a los costes de obra civil y equipos (Fuente: elaboración propia a partir de los datos de los proveedores).

Amortización	Obra Civil	Maquinaria
Años	20	6
Intereses	6%	6%

Los costes de las tecnologías se han estimado para diferentes capacidades de tratamiento. En el caso concreto de este estudio se han calculado previamente las **necesidades de tratamiento de biorresiduos en las diferentes Agrupaciones** de residuos. Para hacer este cálculo se han tenido en cuenta los datos proporcionados por el Gobierno de Aragón en cuanto a la generación de fracción resto (LER 200301) y el porcentaje de biorresiduo obtenido en las caracterizaciones de esta fracción de residuos. Específicamente para la Agrupación de Alcañiz (nº7) no existen datos específicos de la caracterización de fracción resto. En este sentido, para esta Agrupación se ha estimado el porcentaje de biorresiduos a través del promedio calculado de las otras 7 Agrupaciones de la Comunidad Autónoma. En la Tabla 3 se muestra el resumen de las necesidades máximas de tratamiento de biorresiduo para cada zona.

Tabla 3.- Cuadro resumen de las necesidades de tratamiento de biorresiduos en cada Agrupación de la Comunidad Autónoma de Aragón (Fuente: elaboración propia a partir de los datos del Gobierno de Aragón).

Agrupación	Nº municipios	Comarca	Generación de fracción resto (t/año) 2019	Contenido en biorresiduos ¹ (%) 2019	Generación estimada biorresiduo (t/año)
1-HUESCA	77	La Jacetania	8.776	39,8	3.494
		Alto Gállego	5.973		2.378
		Hoya de Huesca	24.589		9.790
2-BARBASTRO	105	Sobrarbe	3.990	47,4	1.892
		Ribagorza	4.879		2.314
		Somontano de Barbastro	8.964		4.252
		Cinca Medio	7.281		3.453
		La Litera	6.505		3.085
3-FRAGA	33	Bajo Cinca	7.961	29,0	2.309
		Monegros	6.038		1.752
4-EJEA	82	Cinco Villas	11.114	53,2	5.916
		Tarazona y el Moncayo	5.351		2.848
		Campo de Borja	4.776		2.542
		Ribera Alta del Ebro	10.125		5.389
5-CALATAYUD	146	Aranda	3.680	39,4	1.448

Agrupación	Nº municipios	Comarca	Generación de fracción resto (t/año) 2019	Contenido en biorresiduos ¹ (%) 2019	Generación estimada biorresiduo (t/año)
		Valdejalón	12.210		4.805
		Comunidad de Calatayud	14.311		5.632
		Campo de Cariñena	4.134		1.627
		Campo de Daroca	2.395		942
6-ZARAGOZA	45	Zaragoza	239.723		100.004
		Ribera Baja del Ebro	2.787	41,7	1.163
		Campo de Belchite	1.670		697
7-ALCAÑIZ	63	Bajo Aragón-Caspe	4.718		1.981
		Bajo Martín	2.102		882
		Andorra-Sierra de Arcos	2.939	42,0*	1.234
		Bajo Aragón	9.759		4.097
		Matarraña	2.592		1.088
8-TERUEL	180	Jiloca	4.894		2.119
		Cuencas Mineras	2.383		1.032
		Comunidad de Teruel	16.768	43,3	7.261
		Maestrazgo	1.844		798
		Sierra de Albarracín	1.781		771
		Gúdar-Javalambre	3.852		1.668
TOTAL			450.864	-	190.666

* Valor estimado a partir del promedio de los datos reales de las otras Agrupaciones.

¹ Fuente: caracterizaciones de fracción resto (2019).

Teniendo en cuenta los datos anteriores se ha determinado que la capacidad máxima de tratamiento se concentra en la comarca de **Zaragoza con una estimación de generación anual de 100.004 toneladas de biorresiduo**. No obstante, y dado que en esta comarca se sitúa el Complejo para el tratamiento de residuos urbanos de Zaragoza que cuenta con zonas específicas para el tratamiento de la materia orgánica, se ha considerado descartar esta comarca del rango de tratamiento de las instalaciones a valorar económicamente. Por lo tanto, **sin considerar la comarca de Zaragoza**, las necesidades de tratamiento de biorresiduo se situarán entre un **mínimo 697 t/año** (comarca de Campo de Belchite) y un **máximo de 9.790 t/año** (comarca de Hoya de Huesca).

Teniendo en cuenta los datos y la argumentación anterior, las estimaciones económicas de las instalaciones se han solicitado a los proveedores para una capacidad mínima de 500 t/año y para un máximo de 10.000 t/año, aunque para algunas tecnologías se han planteado capacidades mayores ya que estarían más próximas al equilibrio entre inversión necesaria y capacidad de tratamiento. En la Tabla 18 se presentan los datos económicos obtenidos hasta la fecha.

Es importante señalar que realizar una comparativa entre sistemas de compostaje y costes económicos de inversión y tratamiento es una tarea que tiene la dificultad de la gran diversidad de escenarios que se pueden plantear en cualquier proyecto. No sólo en cuanto a la capacidad, características del residuo/s a tratar, disponibilidad y tipología del material estructurante, superficie disponible y forma de la parcela, climatología de la zona, cercanía a núcleos de población, tipología del compost/s que se quiere producir, modelo de gestión centralizado o descentralizado,... Todas estas (y otras) variables influyen

directamente en el diseño y configuración de la instalación de compostaje que se puede plantear y, por tanto, en el presupuesto de la misma. Por todo ello, y con el fin de poder ofrecer una tabla comparativa de costes estimados, se ha considerado el siguiente planteamiento:

- No se considera el efecto que tendría en el diseño la calidad del biorresiduo que se recibiría en planta. Es un parámetro que afecta en el diseño de la instalación, ya que puede ser necesario incorporar un pretratamiento (abrebolsas, trómel, separadores de metales férricos y no férricos,...) y/o post-tratamiento (extractor de plásticos, mesa densimétrica...). Obviamente, todos los costes de inversión relacionados con estos equipos y su ubicación (en naves cerradas o, por lo menos, bajo cubiertas) y de operación, mantenimiento de los mismos, así como de gestión de sus flujos de salida, supondrían una notable variación en los balances comparativos presentados en este documento. A este respecto resulta recomendable la información presentada en el Capítulo 7.
- No se ha incluido la construcción de cubiertas en la planta, ya que se trata de un elemento no imprescindible, influenciado por las características climatológicas de la ubicación de la instalación, el protocolo de trabajo diseñado, la disponibilidad de material estructurante... Además, existe en el mercado una amplia variedad de tipo de cubiertas: estructuras prefabricadas de hormigón, cubiertas autoportantes, de membranas, de paneles... lo que no sólo supone una gran variabilidad en los costes, si no también en definir cual es la más adecuada en cada proyecto.
- En algunos sistemas las empresas tecnológicas ofertan modelos llave en mano, donde se incluyen en un mismo paquete todos los elementos y equipos necesarios para el funcionamiento de esa parte de la planta de compostaje. En esos casos los costes específicos de cada unidad no aparecen desglosados en el presupuesto.

Bajo estos criterios y para facilitar la comprensión de la Tabla 18, donde se presentan los resultados de este análisis, se han desarrollado las siguientes fichas por cada sistema valorado donde se exponen las consideraciones específicas incluidas en cada categoría del presupuesto estimativo (Tabla 4 a Tabla 17).

Tabla 4.- Consideraciones previas al análisis del presupuesto para el sistema de compostaje doméstico.

Compostaje doméstico	
Obra civil	No se precisa
Maquinaria	No se precisa
Equipos	Compostador
Otros	Aireadores
Personal	No hay un coste de personal asociado al manejo del compostador, pero sí se debe considerar la necesidad de personal técnico de soporte a los usuarios y para visitas de seguimiento a los usuarios. Se han considerado 3 visitas anuales de seguimiento.
Comentarios	Es un sistema donde se precisa una inversión general en el personal para el seguimiento y monitorización en todos los compostadores cedidos, además de las campañas ciudadanas de participación.

Tabla 5.- Consideraciones previas al análisis del presupuesto para el sistema de compostaje comunitario.

Compostaje comunitario	
Obra civil	Acondicionamiento de suelo e instalación de celosías de hormigón. Toma de agua Opcional: cierre perimetral y cartelera.
Maquinaria	No se precisa
Equipos	6 módulos de compostaje de 1 m3 e instalación

Compostaje comunitario	
	Cajón para el material estructurante
Otros	Aireadores y sonda de temperatura
Personal	Es necesario contar con un personal formado técnicamente como maestro/as compostadores que lleve la monitorización y mantenimiento de las zonas de compostaje comunitario. Dependiendo del modelo de zona, la dedicación necesaria de este personal será variable ² . Se han estimado los costes derivados de un equipo de dos personas que realicen las visitas de seguimiento anuales al equivalente a un máximo de 17 zonas de compostaje comunitario (17 módulos de aportación) siendo esta la referencia de mayor intensidad y eficiencia de trabajo.
Comentarios	Es un sistema donde se precisa una inversión general en la formación y/o la contratación de personal técnico especialista en el sistema, que sea responsable para el seguimiento y monitorización en todas las zonas de compostaje comunitario. Las campañas ciudadanas de comunicación, información y participación son también estrictamente necesarias en este modelo.

Tabla 6.- Consideraciones previas al análisis del presupuesto para el sistema de compostadores electromecánicos.

Compostadores electromecánicos	
Obra civil	Acondicionamiento de suelo y hormigonado Opcional: cierre perimetral y cartelería.
Maquinaria	Compostador/es Según la escala puede ser necesario alguna maquinaria para la alimentación del compostador.
Equipos	Generalmente incluidos en el compostador
Otros	-
Personal	Aunque la mayoría de las empresas comercializadoras minimizan el tiempo de dedicación del personal, estos equipos necesitan atender su alimentación (incluyendo el material complementario), análisis de los datos registrados, retirada del producto final (además de su posible necesidad de maduración posterior para completar el proceso), mantenimiento del equipo y de la zona donde se ubica...
Comentarios	Hay una gran variedad de modelos de compostadores según su capacidad de tratamiento, así como según el tiempo de retención/tratamiento real que proponen. Algunas corresponderían a capacidades equivalentes a plantas de tratamiento industrial, por lo que necesitarían inversiones equivalente en obra civil y maquinaria.

Tabla 7.- Consideraciones previas al análisis del presupuesto para el sistema de pilas dinámicas con volteadora de puente.

Pilas volteadas	
Obra civil	Considerando una solera de hormigón armado, con movimiento de tierras, mallazo, gravas y pendiente para captación de lixiviados. Balsa o depósito de lixiviados.
Maquinaria	Se necesita la siguiente maquinaria: <ul style="list-style-type: none"> • Pala cargadora (variable según el tamaño de la planta). • Volteadora (puede ser autopropulsada o remolcada, en cuyo caso se necesitará un tractor con toma de fuerza que puede hacer las veces de pala). • Trómel o criba.
Equipos	Sondas de temperatura para la monitorización del proceso.
Otros	Caseta de obras para oficina/vestuario/aseos. Iluminación. Cierre perimetral. Sistema de riego.
Personal	Dependerá mucho de la frecuencia de entradas a planta y de la capacidad de la instalación, por lo que se ha considerado una persona a tiempo completo contando la necesidad de volteos del material, tanto por proceso como para el mezclado inicial con el material estructurante.

² Acorde a la *Guía práctica para la implementación del compostaje comunitario como alternativa para la gestión local de los biorresiduos*. 2019. Asociación Profesional Fertile Auro. www.fearesiduos.com

Comentarios	<p>El modelo puede variar mucho en cuanto a superficie necesaria (por el tipo de volteadora y la cantidad de residuo a gestionar), por como sea la fase de maduración, el tiempo de proceso...</p> <p>Se debe tener en cuenta la superficie de la planta no cubierta donde se realice el proceso, ya que todas las aguas pluviales recogidas en ella serían consideradas técnicamente como lixiviados, que deberán ser gestionados.</p>
--------------------	---

Tabla 8.- Consideraciones previas al análisis del presupuesto para el sistema de pilas cubiertas con lonas semipermeables y dinámicas con volteadora de puente.

Pilas ventilación forzada cubiertas	
Obra civil	<p>Considerando una solera de hormigón armado, con movimiento de tierras, mallazo, gravas y pendiente para captación de lixiviados.</p> <p>Además, se ha considerado el sistema de ventilación de las pilas en tuberías de PVC embebidas en el hormigón. Balsa o depósito de lixiviados.</p>
Maquinaria	<p>Se necesita la siguiente maquinaria:</p> <ul style="list-style-type: none"> • pala cargadora (variable según el tamaño de la planta). • Mezcladora. Puede ser un remolque esparcidor de estiércoles o un remolque <i>unifeed</i>, pero en ambos casos se necesita un tractor con toma de fuerza para operarlos. • Trómel o criba.
Equipos	Sistema de monitorización de proceso.
Otros	<p>Caseta de obras para oficina/vestuario/aseos.</p> <p>Iluminación.</p> <p>Cierre perimetral.</p> <p>Lonas semipermeables, sistema de extensión y recogida de lonas.</p> <p>Sistema de riego.</p>
Personal	<p>Requiere menos personal que la versión de pilas dinámicas, ya que no se dedica tiempo a los volteos.</p> <p>Dependiendo de las frecuencias de entrada, del sistema de mezclado disponible y de la capacidad de la planta, el requerimiento de personal puede pasar de una persona a media jornada a dos o más operarios a jornada completa.</p>
Comentarios	<p>La principal variación en las diferentes escalas del modelo viene dada por la necesidad real de espacio de maduración y postmaduración para completar el proceso y obtener un compost realmente maduro. Por eso es un sistema más eficiente cuando se combina con una fase de maduración en sistemas dinámicos.</p>

Tabla 9.- Consideraciones previas al análisis del presupuesto para el sistema de pilas cubiertas con lonas semipermeables y dinámicas con volteadora de puente.

Pilas cubiertas con lonas y volteadas	
Obra civil	<p>Considerando una solera de hormigón armado, con movimiento de tierras, mallazo, gravas y pendiente para captación de lixiviados.</p> <p>Balsa o depósito de lixiviados.</p>
Maquinaria	<p>Se necesita la siguiente maquinaria:</p> <ul style="list-style-type: none"> • pala cargadora (variable según el tamaño de la planta). • volteadora, que en estos casos generalmente es autopropulsada y con un sistema para recoger y extender las lonas a la vez que volteas. • Trómel o criba.
Equipos	<p>Sondas de temperatura para la monitorización del proceso.</p> <p>En algunas tecnologías incorporan sistemas de monitorización del consumo de O₂.</p>
Otros	<p>Caseta de obras para oficina/vestuario/aseos.</p> <p>Iluminación.</p> <p>Cierre perimetral.</p> <p>Lonas semipermeables, sistema de extensión y recogida de lonas.</p> <p>Sistema de riego.</p>
Personal	<p>Dependerá mucho de la frecuencia de entradas a planta y de la capacidad de la instalación, por lo que se ha considerado una persona a tiempo completo contando la necesidad de volteos del material, tanto por proceso como para el mezclado inicial con el material estructurante.</p>

Pilas cubiertas con lonas y volteadas	
Comentarios	<p>El tipo de volteadora y su capacidad de gestionar el manejo de las lonas mientras se voltea influirá en la superficie necesaria de la planta, pero también directamente en el tiempo de operación necesario para el manejo de las pilas.</p> <p>Hay opciones donde la labor del manejo de las lonas se realiza mediante un rodillo acoplado a la pala cargadora.</p>

Tabla 10.- Consideraciones previas al análisis del presupuesto para el sistema de mesetas dinámicas con volteadora lateral.

Mesetas dinámicas (con volteadora lateral)	
Obra civil	<p>Considerando una solera de hormigón armado, con movimiento de tierras, mallazo, gravas y pendiente para captación de lixiviados.</p> <p>Balsa o depósito de lixiviados.</p>
Maquinaria	<p>Se necesita la siguiente maquinaria:</p> <ul style="list-style-type: none"> • pala cargadora (variable según el tamaño de la planta). • volteadora lateral, puede ser autopropulsada o remolcada por tractor. • Trómel o criba.
Equipos	<p>Sondas de temperatura para la monitorización del proceso.</p> <p>Sistema de registro de datos.</p>
Otros	<p>Caseta de obras para oficina/vestuario/aseos.</p> <p>Iluminación</p> <p>Cierre perimetral.</p>
Personal	<p>Dependerá mucho de la frecuencia de entradas a planta y de la capacidad de la instalación, por lo que se ha considerado una persona a tiempo completo contando la necesidad de volteos del material, tanto por proceso como para el mezclado inicial con el material estructurante.</p> <p>Se ha considerado una persona a tiempo completo.</p>
Comentarios	<p>Es un sistema que no se recomienda para el compostaje de biorresiduos, aunque su aplicación en fases de maduración sí presenta numerosas ventajas.</p> <p>Independientemente del residuo tratado, aquí se presentan los elementos necesarios para un manejo eficiente, pudiendo plantearse la no necesidad de la volteadora lateral en fases de maduración.</p>

Tabla 11.- Consideraciones previas al análisis del presupuesto para el sistema de trincheras dinámicas para la fase de fermentación.

Trincheras dinámicas	
Obra civil	<p>Las empresas que comercializan estos sistemas lo hacen bajo un modelo de llave en mano, donde se incluyen generalmente los siguientes elementos:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Solera, • Trincheras (número de unidades consideradas para la capacidad de planta: 16), • Sistema de ventilación de trincheras, • Losas de ventilación, • Tuberías, codos, compuertas, etc. para ventilación de trincheras, • Ventiladores de trincheras (6) y ventilador de cola (1), • Instalación eléctrica (potencia), instalación de control, • Sistema informático de control, • instalaciones para movimiento de transfer.
Maquinaria	<p>Se necesita la siguiente maquinaria:</p> <ul style="list-style-type: none"> • pala cargadora (variable según el tamaño de la planta). • volteadora de trincheras. • Trómel o criba.
Equipos	En este caso la mayoría de los sistemas suelen ir integrados en los costes de obra civil.
Otros	En este caso la mayoría de los sistemas suelen ir integrados en los costes de obra civil.
Personal	Aunque la zona de trincheras puede automatizarse en su casi totalidad, este sistema suele aplicarse únicamente en la fase de fermentación, con lo que realmente sigue habiendo necesidad de un determinado número de operarios para poder dar servicio a toda la instalación. Considerando las tareas de recepción, manejo de materiales, maduración, gestión... se han estimado dos operarios.
Comentarios	Los costes de obra civil en este sistema son claramente mayoritarios, en los que además se ha de considerar que es fundamental que la empresa que los realice tenga referencias en la construcción, por

Trincheras dinámicas	
	la necesidad de que todos los muros deben estar perfectamente alineados y cimentados para que el paso de la volteadora sea correcto. Además, la captación de lixiviados y el sistema de ventilación suponen un desafío para garantizar que funcionan correctamente.

Tabla 12.- Consideraciones previas al análisis del presupuesto para el sistema de silos con ventilación forzada y cubiertos con lonas para la fase de fermentación.

Silos ventilación forzada con lonas	
Obra civil	Solera de hormigón armado, muros de hormigón, sistema de ventilación forzada. Balsa o depósito de lixiviados.
Maquinaria	Se necesita la siguiente maquinaria: <ul style="list-style-type: none"> • pala cargadora (variable según el tamaño de la planta). • Mezcladora o elemento mezclador. • Trómel o criba.
Equipos	Ventiladores. Bombas de riego. Sistema de riego
Otros	Caseta de obras para oficina/vestuario/aseos Iluminación Cierre perimetral. Lonas semipermeables, sistema de extensión y recogida de lonas.
Personal	Es un modelo que necesita poca mano de obra en comparación con otros de la misma capacidad al ser un sistema estático. Dependerá mucho de la frecuencia de entradas a planta y de la capacidad de la instalación. Se ha considerado una o dos personas a tiempo completo según el tamaño de planta.
Comentarios	Los principales costes del sistema residen en la obra civil, aunque hay ciertos elementos, como los sistemas para recoger y extender las lonas sobre los silos que, en algunos casos, se ofrecen con costes muy elevados independientemente de la capacidad de la instalación. Al igual que todos los sistemas estáticos, es importante destacar que, si la maduración no se realiza bajo sistemas dinámicos, el tiempo total de proceso debería incrementarse para garantizar que se alcanza la madurez adecuada para el compost.

Tabla 13.- Consideraciones previas al análisis del presupuesto para el sistema de silos con ventilación forzada para la fase de fermentación.

Silos ventilación forzada	
Obra civil	Solera de hormigón armado, muros de hormigón, sistema de ventilación forzada. Balsa o depósito de lixiviados.
Maquinaria	Se necesita la siguiente maquinaria: <ul style="list-style-type: none"> • pala cargadora (variable según el tamaño de la planta). • Mezcladora o elemento mezclador. • Trómel o criba.
Equipos	Ventiladores. Bombas de riego. Sistema de riego
Otros	Caseta de obras para oficina/vestuario/aseos. Iluminación. Cierre perimetral.
Personal	Es un modelo que necesita poca mano de obra en comparación con otros de la misma capacidad al ser un sistema estático. Dependerá mucho de la frecuencia de entradas a planta y de la capacidad de la instalación. Para una planta de pequeña capacidad puede ser suficiente con una persona a media jornada.
Comentarios	Los principales costes del sistema residen en la obra civil.

Silos ventilación forzada	
	Al igual que todos los sistemas estáticos, es importante destacar que, si la maduración no se realiza bajo sistemas dinámicos, el tiempo total de proceso debería incrementarse para garantizar que se alcanza la madurez adecuada para el compost.

Tabla 14.- Consideraciones previas al análisis del presupuesto para el sistema de contenedores con ventilación forzada para la fase de fermentación.

Tambores	
Obra civil	Solera de hormigón armado donde ubicar los tambores. Se considera también la zona de maduración que será necesaria para completar el proceso. Zonas de trabajo.
Maquinaria	Se necesita la siguiente maquinaria: <ul style="list-style-type: none"> • Pala cargadora (variable según el tamaño de la planta). • Trómel o criba.
Equipos	Tambores, que incluyen los sistemas de control de proceso y de monitorización.
Otros	Obras auxiliares.
Personal	Una vez realizada la recepción y la carga de los tambores con los residuos orgánicos y el material estructurante, los equipos funcionan de forma autónoma, con lo que tienen una baja necesidad de personal.
Comentarios	Los costes de inversión son principalmente en los tambores y la maquinaria, aunque deben ser considerados también de qué forma se va a realizar la maduración del material de salida de los tambores en la mayoría de los casos. En la gestión es importante considerar que la necesidad de material estructurante y/o complementario es más elevada en este sistema que en otros, por la necesidad de controlar la humedad del material en el interior del tambor.

Tabla 15.- Consideraciones previas al análisis del presupuesto para el sistema de silos verticales para la fase de fermentación.

Silo vertical	
Obra civil	Solera de hormigón armado donde ubicar los tambores. Se considera también la zona de maduración que será necesaria para completar el proceso. Zonas de trabajo.
Maquinaria	Se necesita la siguiente maquinaria: <ul style="list-style-type: none"> • Pala cargadora (variable según el tamaño de la planta). • Trómel o criba.
Equipos	Silos, que incluyen los sistemas de control de proceso y de monitorización.
Otros	Obras auxiliares.
Personal	Una vez realizada la recepción y la carga de los silos con los residuos orgánicos y el material estructurante, los equipos funcionan de forma autónoma, con lo que tienen una baja necesidad de personal.
Comentarios	Los costes de inversión son principalmente en los silos y la maquinaria, aunque deben ser considerados también de qué forma se va a realizar la maduración del material de salida de los silos en la mayoría de los casos. En la gestión es importante considerar que la necesidad de material estructurante y/o complementario es más elevada en este sistema que en otros, por la necesidad de controlar la humedad del material en el interior del silo.

Tabla 16.- Consideraciones previas al análisis del presupuesto para el sistema de contenedores con ventilación forzada para la fase de fermentación.

Contenedores (fermentación)	
Obra civil	Solera de hormigón armado donde ubicar los contenedores. Se considera también la zona de maduración que será necesaria para completar el proceso. Zonas de trabajo.

Contenedores (fermentación)	
Maquinaria	Se necesita la siguiente maquinaria: <ul style="list-style-type: none"> • pala cargadora (variable según el tamaño de la planta). • Se debería considerar la conveniencia de un sistema de mezclado para optimizar la fase de proceso en los contenedores. • Trómel o criba.
Equipos	Los contenedores, que incluyen los sistemas de control de proceso y de monitorización.
Otros	Obras auxiliares.
Personal	Una vez realizada la recepción y la carga de los tambores con los residuos orgánicos y el material estructurante, los equipos funcionan de forma autónoma, con lo que tienen una baja necesidad de personal.
Comentarios	Los costes de los equipos es lo más relevante de las necesidades de inversión en estos sistemas, aunque es necesario recordar la necesidad de contar con una zona de maduración para completar el proceso de compostaje.

Tabla 17.- Consideraciones previas al análisis del presupuesto para el sistema de túneles con ventilación forzada para la fase de fermentación.

Túneles (fermentación)	
Obra civil	Túneles de hormigón armado, soleras, plenums de ventilación, depósitos de lixiviados, sistema de ventilación, Las empresas que comercializan estos sistemas lo hacen bajo un modelo de llave en mano, donde se incluyen generalmente los siguientes elementos: <ul style="list-style-type: none"> • Solera, • Túneles de hormigón armado (10), • Sistema de ventilación de túneles, • Losas de ventilación, • Tuberías, codos, compuertas, etc.
Maquinaria	Se necesita la siguiente maquinaria: <ul style="list-style-type: none"> • Pala cargadora (variable según el tamaño de la planta). • Mezcladora o elemento mezclador. • Trómel o criba.
Equipos	En este caso la mayoría de los sistemas suelen ir integrados en los costes de obra civil.
Otros	Obras auxiliares, incluyendo oficinas y edificio de control, así como un sistema de depuración de la atmósfera de salida de los túneles.
Personal	Las tareas de personal están relacionadas con la recepción y manejo de materiales, carga y descarga de túneles (los sistemas de carga y descarga automática dan problemas a medio plazo). Además, deben realizar tareas de limpieza y mantenimiento de los túneles periódicamente.
Comentarios	Los costes de obra civil en este sistema son claramente mayoritarios, a los que hay que incluir el sistema de depuración de gases, habitualmente mediante biofiltro. En la maquinaria, la mezcladora, un elemento imprescindible en este sistema, tiene unos costes elevados.

Tabla 18.- Cuadro resumen de los costes económicos de las instalaciones de compostaje según tecnología y capacidad de tratamiento (fuente: elaboración propia a partir de la información facilitada por los proveedores)³.

Sistema	Capacidad tratamiento (t/año)	COSTES INVERSIÓN								COSTES EXPLOTACIÓN							COSTE TOTAL	Coste por tonelada (€/t) con	
		Costes inversión total (desglosado)																	
		Coste inversión total	Preproyecto (0,4 % coste proyecto)	Proyecto (2-3 % coste proyecto)	Obra Civil (no incluye cubiertas)	Maquinaria (no incluye costes de pretratamiento)	Equipos	Otros	Coste anual amortización Obra Civil	Coste anual amortización Maquinaria	Mantenimiento	Personal	Energía	Combustible	Otros	Coste explotación (con amortización)			Coste explotación (sin amortización)
Compostaje doméstico ¹	3	125 €	n.a. muy variable	0 €	0 €	75 €	50 €	- €	- €	- €	60 €(10)	n.a.	n.a.	100 €	160 €	160 €	285 €	53,3 €/t	
Compostaje comunitario ¹	18	5.790 €	n.a. muy variable	1.500 €	250 €	3.840 €	200 €	466 €	51 €	97 €	2.100 €	n.a.	n.a.	CAMPAÑAS	2.714 €	2.197 €	8.504 €	150,8 €/t	
Compostadores electromecánicos	600	274.000 €	n.a. muy variable	2.500 €	269.000 €	n.a.	2.500 €	218 €	54.705 €	500 €	15.000 €	700 €	n.a.	50 €	71.173 €	16.250 €	345.173 €	118,6 €/t	
Pilas volteadas	1.000	345.500 €	2.000 €	8.500 €	2.500 €	329.000 €	3.500 €	218 €	66.906 €	500 €	15.000 €	1.200 €	n.a.	50 €	83.874 €	16.750 €	429.374 €	83,9 €/t	
Pilas volteadas	2.000	551.850 €	2.150 €	13.500 €	260.000 €	260.000 €	500 €	24.032 €	52.874 €	14.800 €	30.000 €	n.a.	20.500 €	n.a.	142.207 €	65.300 €	694.057 €	71,1 €/t	
Pilas con ventilación forzada cubiertas con lonas	2.500	783.331 €	3.200 €	20.000 €	340.131 €	420.000 €	n.a.	31.677 €	85.412 €	5.500 €	15.000 €	3.500 €	6.800 €	4.000 €	151.889 €	34.800 €	935.220 €	60,8 €/t	
Pilas con ventilación forzada cubiertas con lonas	5.000	1.146.853 €	4.600 €	30.000 €	542.253 €	570.000 €	n.a.	50.293 €	115.917 €	6.500 €	30.000 €	4.000 €	10.300 €	6.000 €	223.009 €	56.800 €	1.369.862 €	44,6 €/t	
Pilas con ventilación forzada cubiertas con lonas y volteadas ^{2,3}	10.000	1.633.007 €	6.500 €	42.000 €	1.014.507 €	570.000 €	n.a.	92.678 €	115.917 €	7.500 €	60.000 €	5.500 €	17.160 €	8.200 €	306.954 €	98.360 €	1.939.961 €	30,7 €/t	
Pilas cubiertas con lonas y volteadas ^{2,3}	1.000	599.495 €	2.500 €	15.000 €	278.395 €	175.000 €(8)	128.600 €	25.797 €	35.588 €	18.360 €	32.500 €	5.400 €	8.595 €	n.a.	126.241 €	64.855 €	725.736 €	126,2 €/t	
Pilas cubiertas con lonas y volteadas ^{2,3}	30.000	1.665.350 €	6.500 €	42.000 €	596.360 €	795.000 €	20.050 €	56.222 €	161.673 €	48.506 €	60.000 €	9.200 €	60.000 €	n.a.	395.601 €	177.706 €	2.060.951 €	13,2 €/t	
Mesetas (con volteadora lateral)	10.000	796.720 €	3.000 €	20.000 €	335.000 €	421.000 €(9)	2.000 €	31.212 €	85.616 €	21.100 €	30.000 €	2.500 €	76.132 €	15.000 €	261.560 €	144.732 €	1.058.280 €	26,2 €/t	
Trincheras (dinámicas) ^{2,4}	30.000	3.782.050 €	15.000 €	95.000 €	2.875.000 €	777.000 €	20.050 €	260.246 €	158.013 €	110.164 €	60.000 €	59.900 €	95.723 €	n.a.	744.046 €	325.787 €	4.526.096 €	24,8 €/t	
Silos ventilación forzada cubiertos con lonas	10.000	1.656.225 €	6.500 €	42.000 €	325.440 €	406.095 €	145.975 €	730.215 €	32.602 €	82.585 €	49.687 €	60.000 €	20.000 €	n.a.	244.873 €	129.687 €	1.901.098 €	24,5 €/t	
Silos ventilación forzada cubiertos con lonas	5.000	1.145.975 €	4.500 €	30.000 €	171.755 €	406.095 €	111.625 €	422.000 €	17.982 €	82.585 €	34.379 €	30.000 €	9.500 €	n.a.	174.446 €	73.879 €	1.320.421 €	34,9 €/t	
Silos ventilación forzada	750	485.688 €	1.888 €	11.800 €	180.000 €	190.000 €	50.000 €	52.000 €	16.887 €	38.639 €	14.000 €	15.000 €	5.500 €	4.000 €	94.026 €	38.500 €	579.714 €	125,4 €/t	
Tambores	2.000	693.800 €	3.000 €	17.000 €	200.000 €	190.000 €	280.000 €	3.800 €	19.181 €	38.639 €	3.500 €	15.000 €	10.000 €	2.000 €	88.320 €	30.500 €	782.120 €	44,2 €/t	
Tambores	1.752	242.500 €	1.000 €	6.000 €	35.000 €	197.000 €	3.500 €	3.662 €	40.062 €	600 €	15.000 €	4.730 €	n.a.	64.054 €	20.330 €	306.554 €	36,6 €/t		
Silo vertical ⁵	3.950	403.000 €	1.500 €	10.000 €	78.000 €	310.000 €	n.a.	3.500 €	7.803 €	850 €	15.000 €	9.823 €	n.a.	96.518 €	25.673 €	499.518 €	24,4 €/t		
Silo vertical ⁵	10.000	578.500 €	2.500 €	15.000 €	125.000 €	432.500 €	3.500 €	12.424 €	87.954 €	1.000 €	15.000 €	18.921 €	n.a.	135.299 €	34.921 €	713.799 €	13,5 €/t		
Contenedores (fermentación) ⁶	2.000	620.500 €	2.000 €	12.500 €	193.000 €	120.000 €	290.000 €	3.000 €	18.091 €	24.404 €	20.000 €	15.000 €	3.500 €	1.000 €	83.994 €	41.500 €	704.494 €	42,0 €/t	
Túneles (fermentación) ⁷	25.000	4.525.900 €	20.000 €	110.000 €	3.639.000 €	586.900 €	20.000 €	150.000 €	328.599 €	119.354 €	109.170 €	81.250 €	60.000 €	87.800 €	12.000 €	798.172 €	350.220 €	5.324.072 €	31,9 €/t

n.a.: no aplica

¹ No hay que incluir los costes de recogida.

² Para estas tecnologías los proveedores contactados han facilitado una estimación de costes para una capacidad de 30,000 toneladas/año.

³ Datos facilitados por el proveedor Bianna.

⁴ Datos facilitados por metrocompost.

⁵ Datos facilitados por el proveedor Berca.

⁶ Incluye maduración en pilas estáticas.

⁷ Incluye maduración en pilas volteadas.

⁸ Con volteadora Bakhus.

⁹ Incluye volteadora lateral de mesetas.

¹⁰ Coste de visitas técnicas de seguimiento realizadas a una vivienda.

En la tabla anterior se muestra de manera resumida e incluyendo las amortizaciones los costes preliminares proporcionados por los distintos proveedores contactados y que han facilitado la información. Los costes restantes han sido estimados por el equipo redactor en base a la experiencia propia, tipología de planta, capacidad, tiempo de tratamiento necesario para obtener un compost maduro, entre otros.

³ En el Anexo 2 (formato digital) se adjunta la base de datos de los costes de tecnologías con los cálculos de las amortizaciones.

Es **IMPORTANTE** destacar que, en la actualidad, debido a la situación de falta de suministro de materias primas que ha provocado la crisis global causada por la pandemia generado por el virus SARS-CoV-2 y causante de la enfermedad COVID19, **los precios de la mayoría de los suministros para obra civil y ciertos componentes tecnológicos está sufriendo una gran variabilidad prácticamente diaria y alza**. Por ello, todos los proveedores hacen hincapié en que no se puede garantizar que los costes facilitados en los presupuestos se puedan mantener más allá de unas pocas semanas sin necesidad de ser revisados.

4. SISTEMAS DE MONITORIZACIÓN, CONTROL DE PROCESO Y TRAZABILIDAD

Los parámetros clave para la **monitorización del proceso de compostaje** son la **temperatura**, la **humedad** y el **contenido/disponibilidad en oxígeno** en el interior de la masa de material en proceso. Si bien la temperatura es un parámetro cuya monitorización es tecnológica y económicamente viable, el seguimiento del oxígeno y de la humedad, con las tecnologías actuales disponibles, no presenta tal robustez y fiabilidad. En cualquier caso, **la temperatura es el único parámetro que a nivel de normativa requiere un seguimiento para garantizar el alcance de temperaturas termófilas para evitar la presencia de patógenos en el producto final** según el RD 506/2013 y RD 865/2010 (y actualizaciones), Reglamento (UE) 2019/1009 del Parlamento Europeo y del Consejo de 5 de junio de 2019 por el que se establecen disposiciones relativas a la puesta a disposición en el mercado de los productos fertilizantes UE y el Reglamento (CE) n°1069/2009, de 21 de octubre de 2009, de Subproductos Animales No Destinados Al Consumo Humano (SANDACH).

A parte de estos tres parámetros, existen otras medidas como el pH, porosidad, el contenido en dióxido de carbono de los gases de salida, relación C/N disponibles en condiciones aerobias, entre otros, cuyo control requiere de sistemas de medición más precisos y/o que, en la mayoría de los casos, requiere de una toma representativa de muestras para su posterior análisis en laboratorio.

En la Tabla 19 se detallan los sistemas de medida y análisis actuales para, tanto los parámetros principales (temperatura, humedad y/u oxígeno intersticial) y de los otros parámetros adicionales (o secundarios) de monitorización del proceso.

Tabla 19.- Especificaciones de los parámetros (principales y secundarios) de monitorización de proceso (Fuente: elaboración propia).

Parámetro	Tipo de medida		Especificaciones
	Continua	Manual	
Parámetros principales			
Temperatura	x		<p>Temperatura del material en proceso y ambiental. Es el parámetro más comúnmente usado para el seguimiento y control del proceso. Su medida da una medida directa de la actividad de proceso. Además, su medición requiere de componentes tecnológicamente sencillos pero robustos que permiten a su vez su seguimiento en continuo.</p> <p>A nivel normativo, la temperatura es el parámetro que requiere de un control para garantizar la higienización del producto final. Por lo tanto, la monitorización de la temperatura (de manera continua o intermitente) es obligatoria.</p> <p>Sistemas de medida: Existen diversas opciones de medición a través de sondas de temperatura. Las opciones del mercado se basan principalmente en PT-100 o termopar tipo K o tipo J, aunque a pequeña escala se pueden aplicar termómetros domésticos como los de varilla empleados en la cocina.</p>
Oxígeno	x	x	<p>El oxígeno es la medida que permite conocer la actividad biológica aerobia de proceso. Por una parte, la medida de oxígeno permite determinar si, en el caso de sistemas con aireación forzada, existe un exceso de ventilación o, por otro lado, si hay riesgo de entrar en condiciones de anaerobiosis. El contenido que conlleva una posible</p>

Parámetro	Tipo de medida		Especificaciones
	Continua	Manual	
			<p>limitación de en oxígeno del proceso se sitúa, a escala industrial, entre un 5 y un 10%.</p> <p>En función de la tecnología o sistema de compostaje implementado, la medida de oxígeno se puede realizar en continuo (en sistemas cerrados) a través de los gases de salida o de manera puntual (en sistemas abiertos) tomando muestras de la atmósfera interior de diferentes puntos del material en proceso y analizando directamente su concentración en oxígeno para obtener una medida lo más representativa posible.</p> <p>Sistemas de medida: El oxígeno se mide a través de analizadores específicos con células electroquímicas que requieren de calibrados periódicos y sustituciones anuales, como mínimo. Además, con el fin de alargar la vida útil de estas celdas es importante que el flujo de gases donde se toma la medición se someta un pretratamiento para evitar el contacto de agua y otros gases como el amoniaco en la célula. Para ello, normalmente se utiliza una cámara de condensación y posterior filtrado de partículas. Cada vez hay menos tecnologías que incorporan este parámetro en monitorización continua por la dificultad que resulta obtener una medición fiable y por los altos costes de mantenimiento de los equipos.</p>
Humedad de proceso		x	<p>La humedad de proceso es un parámetro vital para garantizar las condiciones biológicas y, por lo tanto, el proceso de compostaje. Idealmente, la humedad debe estar en torno a un 40-60%, siendo el óptimo el 60%.</p> <p>Sistema de medida: Aunque para suelos si que existen sondas específicas para medir su humedad directamente y en continuo, éstas no son viables técnicamente para la medida de la humedad del material sometido al proceso de compostaje, especialmente en fases activas, debido a las condiciones de temperatura y elevado punto de rocío que causan la condensación en cualquier sensor metálico que se introduzca en el material, alterando las medidas de humedad. Actualmente, la medida de humedad se realiza bajo dos protocolos:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Medición cualitativa en campo: el conocido como el Test del Puño, donde el técnico encargado de la medición, bajo los protocolos de seguridad establecidos, toma una pequeña cantidad de muestra en su mano y la presiona. Tras esta presión, si la masa de material queda compactada y no genera más de 2 ó 3 gotas de agua, la humedad está en el intervalo correcto. Por el contrario, si la masa no queda compactada significa que falta humedad en el proceso y si genera más lixiviación de la

Parámetro	Tipo de medida		Especificaciones
	Continua	Manual	
			comentada como Ideal significa que la masa tiene demasiada humedad. - Medición en laboratorio: requiere de la toma de muestra de masa conocida y su secado a 105°C durante un tiempo mínimo de 24 horas.
Parámetros secundarios			
pH		x	El pH es un parámetro que condiciona la presencia y/o actividad de los microorganismos, ya que los valores extremos son perjudiciales para la mayoría de las especies responsables del proceso, así como la combinación con otros parámetros como la temperatura pueden crear ambientes de inhibición para el desarrollo de la actividad biológica. El rango óptimo durante el proceso evoluciona entre 6 y 8, alcanzando valores alcalinos en torno a 8 hacia el final del proceso. Sistema de medida: Para medir el pH se requiere de una toma de muestra, su disolución y filtrado para su posterior análisis en laboratorio o en campo a través de una sonda de pH.
Compactación		x	La compactación (o por diferencia la porosidad) del material muestra el espacio libre de aire que hay disponible en el interior de la masa de proceso y, por lo tanto, la facilidad con la que el oxígeno se distribuye. Sistema de medida: La porosidad del material se mide manualmente a través de una toma de muestra representativa y posterior análisis en laboratorio. Para ello se utiliza el método de la picnometría.
Densidad (t/m ³)		x	Corresponde a dos valores o indicadores diferentes. La densidad sobre materia fresca indica la compactación del material que puede ser corregida mediante volteos. La medición periódica de la densidad sobre materia seca (densidad real) corresponde a la caída de la materia orgánica a lo largo del proceso, lo que ofrece una información indirecta de la eficiencia del proceso.

Nota: medida continua se refiere en que se puede medir de manera automática durante el proceso. Medida manual se refiere en que la medición requiere de una toma de muestra y posterior análisis.

Otros parámetros que en ocasiones se siguen en el proceso de compostaje, pero que no son tan habituales sería el contenido de CO₂ en los gases de salida como medida indirecta de oxígeno y la presión del aire. No obstante, a nivel de instrumentación la medida de CO₂ requiere de sistemas que presentan las mismas limitaciones que la medida de oxígeno y que, en ocasiones presentan menos robustez. En lo que se refiere a la medida de la presión de aire se realizan en los sistemas cerrados con ventilación forzada, concretamente en los sistemas de ventilación, para tener una indicación de la resistencia del material al paso del aire a su través, lo que, a su vez, es una medición indirecta de su compactación y resistencia al paso del aire.

Dentro de los sistemas de **control de proceso**, a nivel industrial los más empleados son los siguientes:

- En **instalaciones sin ventilación forzada** o sistemas de compostaje doméstico o comunitario, el control de proceso se realiza a través de volteos periódicos (cuya periodicidad dependerá de la

fase del proceso en la que se encuentre) y de la evolución de la temperatura, humedad y grado de compactación.

- En instalaciones con ventilación forzada:
 - o Sistema de control de proceso a través de cambios en los flujos de ventilación según ciclos de tiempo predefinidos. Se trata del sistema más sencillo y, a su vez, es el más empleado.
 - o Sistema de control de proceso en función de los cambios de temperatura del material. En estos modelos el caudal se reduce en el rango de temperaturas entre 55-70 °C.
 - o Sistemas de control en función de la medida de oxígeno de los gases de salida. Requiere de una monitorización constante de temperatura, por lo que su aplicación, se basa únicamente en sistemas cerrados. En general, se implementan caudales de aire superiores para contenidos de oxígeno por debajo de 5-10%, evitando así los riesgos de anaerobiosis. Este sistema es el más complejo, ya que requiere de instrumentación más sensible como son las celdas de medición de los sensores de oxígeno, las cuales necesitan de un pretratamiento del flujo de gases de salida para evitar su deterioro (ver detalles en la Tabla 19).

En lo que se refiere a la trazabilidad, es importante que en todo momento de proceso las diferentes entradas de material estén identificadas para que cada lote de compost pueda ser relacionado con los parámetros de proceso de su tratamiento y las condiciones de entrada. Para cumplir con la normativa de referencia es importante que los fabricantes garanticen que tienen una definición del concepto de lote de compost considerando que, para cada lote, deben garantizar tener la información disponible referente a los siguientes parámetros:

- Procedencia.
- Composición de entrada (cantidades y códigos LER).
- Composición de la mezcla de entrada a proceso.
- Fechas.
- Condiciones de proceso (tiempo de proceso, temperatura, volteos, riegos, trasvases, incidencias, otros).
- Características finales (en caso de comercialización debe estar dado de alta en el Ministerio de Agricultura y en el registro de productos fertilizantes⁴).

En el caso específico del compostaje comunitario, la definición de lote tiene unas consideraciones adicionales por tal de no limitar ni técnica ni económicamente el modelo, pero siempre garantizando la trazabilidad y seguridad del producto final. En este caso, la definición de lote no se individualiza a nivel de instalación, es decir, de zona de compostaje, sino que cada lote puede venir asociado al compost resultante de diversas zonas de compostaje o, incluso, todas las zonas de un mismo municipio o localidad. No obstante, como en el caso de las instalaciones de mayor escala, cada lote resultante deberá tener la trazabilidad suficiente para poder identificar los parámetros de proceso, materiales de entrada, entre los otros parámetros listados anteriormente.

Con el fin de facilitar a los productores de compost esta trazabilidad, existen hoy en día en el mercado una gran variedad de aplicaciones que permiten este control exhaustivo de la información del material

⁴ <https://www.mapa.gob.es/es/agricultura/temas/medios-de-produccion/productos-fertilizantes/registro-de-productos-fertilizantes/>

de proceso. A modo de ejemplo, en la Figura 21 se muestra una imagen del modelo de aplicación que utiliza el modelo de compostaje comunitario de Pontevedra (asociado al Plan Revitaliza) para tener en todo momento registrada la trazabilidad del compost.

Figura 21.- Imagen de la aplicación con la que se realiza el control y seguimiento del modelo de compostaje comunitario de la provincia de Pontevedra (Plan revitaliza); (Fuente: Plan Revitaliza; Deputación de Pontevedra, www.revitaliza.depo.gal).



En la figura anterior se muestra para un lote en concreto (imagen izquierda) los diferentes módulos de compostaje comunitario incluidos, así como los registros individuales de una de las zonas (imagen derecha). A partir de esta aplicación se garantizan los siguientes aspectos:

- El operario tiene una mayor facilidad de toma de datos y requiere un menor tiempo de trabajo que en el caso de realizar un registro manual en campo y posterior volcado de datos de manera digitalizada.
- La información queda almacenada directamente en la nube, eliminando el riesgo de pérdida de datos tomados en manual.
- Disposición a tiempo real de los datos por el personal otro personal técnico responsable diferente al operario.

5. CONTROL AMBIENTAL DE LAS TECNOLOGÍAS DE COMPOSTAJE: GASES Y LÍQUIDOS

Un parámetro clave en cualquier aplicación del compostaje es el control de las emisiones que se pueden generar durante el proceso, líquidas y gaseosas. En general responden a alguna deficiencia en el control o manejo del proceso que puede ser atribuida a muy diferentes causas: falta de recursos, limitación del sistema, tecnología no adecuada, carencias en el diseño/dimensionamiento, condiciones ambientales extremas... sin olvidar la del desconocimiento (fundamentalmente práctico) del proceso de compostaje a escala industrial. A escala industrial, la mayor capacidad de las instalaciones provoca un mayor riesgo de que cualquier problema o deficiencia, aunque sea temporal, pueda generar un impacto ambiental negativo y llegar a causar molestias o ser percibido por la población que reside en zonas cercanas a la instalación. Es por ello que en cualquier diseño de instalación y de su protocolo de trabajo se debe prestar especial atención al control ambiental de las posibles emisiones, identificando las zonas de la planta y los momentos o condiciones bajo los que se pueden producir e introduciendo medidas preventivas (las más importantes), correctoras y, cuando la capacidad de la planta lo permita técnica y económicamente, de tratamiento.

5.1 Emisión de gases/olores

La causa del olor está en la generación de ciertos compuestos químicos con características organolépticas que pueden llevar asociadas sensaciones agradables o desagradables para nuestro sentido del olfato. Hay que señalar que todos los borradores y propuestas de regulaciones y normativas sobre olores se refieren a mediciones de unidades de olor, sin distinguir si se trataban de “buenos o malos” olores.

En el caso de los asociados a residuos orgánicos, por lo general, los olores se limitan a una sensación desagradable sin peligrosidad para la salud, salvo en caso de acumulaciones incontroladas en el interior de espacios confinados.

El diseño y explotación de una instalación de compostaje, requieren el análisis y estudio de las condiciones que van a causar molestias ya sea para el propio personal de la planta como por parte de la población que habita en las áreas más cercanas. El control de los olores se erige como uno de los problemas de más difícil solución o más costosa, por lo que las estrategias de prevención deberían ser consideradas como prioritarias en cualquier instalación de compostaje. En esta, las principales fuentes de olores están asociadas a dos momentos y tres zonas de la planta:

- **Recepción y descarga:** en el momento en que los biorresiduos llegan a la instalación pueden llevar días habiendo sido almacenados en condiciones no controladas, con lo que fácilmente habrán llegado a condiciones anaerobias y estarán generando compuestos gaseosos causantes de malos olores. Cuando se descargan en planta esos gases se liberan y son una importante causa de malos olores.
- **Volteos/aireación forzada:** en el momento de liberar los gases contenidos en el interior del material en proceso (especialmente en la fase de fermentación), especialmente si se han dado fenómenos de anaerobiosis en su interior.
- **Lixiviados:** son la principal fuente de malos olores de una instalación de compostaje. La materia orgánica que arrastran y tienen disuelta es rápidamente degradada consumiéndose el oxígeno en el líquido y cayendo rápidamente en condiciones anaerobias que generan sustancias gaseosas causantes de malos olores. Su mala gestión en la planta: liberación incontrolada, deficiente captación, acumulación en balsas o depósitos no controlados... son la principal causa de problemas de malos olores.

5.1.1 Los compuestos causantes de malos olores y sus fuentes

En todo proceso se parte de conocer los substratos que puedan permanecer en el aire de transporte y que provocan la aparición de olores que pueden ser más o menos desagradables. El proceso de tratamiento de este aire conlleva la eliminación o transformación de esos substratos mediante diferentes vías como la solubilización en el agua de la operación de lavado de aire de los substratos que tengan esta característica, pero también es posible optimizar los resultados por vías metabólicas que a su vez provocarán la aparición de nuevas sustancias o compuestos intermedios que pueden perder sus características de emitir olores desagradables.

Las principales clases de sustancias orgánicas responsables de la aparición de olores en procesos de compostaje se recogen a continuación:

- **Ácidos grasos.** Los ácidos carboxílicos de cadena larga se metabolizan para dar ácidos de peso molecular más bajo y con más volatilidad lo que repercute en su aparición en las emisiones. Los más comunes son el acético, butírico y valérico.
- **Compuestos nitrogenados.** Dentro de este grupo se debe diferenciar los compuestos nitrogenados inorgánicos básicamente el amoníaco y los orgánicos como las aminas.
 - El amoníaco, NH_3 , aparece en la degradación aeróbica y anaeróbica de proteínas y aminoácidos. Cualquier substrato con relaciones C/N bajas puede dar lugar a una considerable formación de amoníaco. Sin embargo, y a pesar de las altas concentraciones de amoníaco que se pueden llegar a determinar en los gases de salida, el amoníaco no está considerado como uno de los compuestos más problemáticos puesto que tiene un umbral de olor elevado.
 - Las aminas son derivados alquílicos del amoníaco que se producen en la degradación anaerobia de proteínas y aminoácidos. Se encuentran especialmente en residuos industriales procedentes de la industria del pescado y de la caña de azúcar. Dentro de este tipo los más frecuentes son: metilamina, etilamina, dimetilamina, trietilamina, cadaverina.
- **Compuestos aromáticos.** Los compuestos aromáticos contienen todos ellos el anillo benceno, y generalmente son los responsables del olor de la madera. La degradación aeróbica de la lignina generalmente presente en abundancia en procesos de compostaje puede dar lugar a compuestos aromáticos. La descomposición anaeróbica de proteínas da lugar a la aparición de compuestos aromáticos como el indol y escatol de olor desagradable.
- **Compuestos sulfurosos.** Uno de los más reconocidos por su desagradable olor a huevo podrido, es el ácido sulfhídrico, H_2S , muy frecuente en plantas de tratamiento de lodos. Es un compuesto que tiene un umbral de olor muy bajo y que por tanto se detecta a concentraciones muy bajas. La aparición del H_2S puede darse en descomposiciones anaerobias de proteínas o con compuestos que contienen azufre, o en condiciones anóxicas de degradación de sustancias orgánicas en presencia de sulfatos. En cuanto a sulfuros orgánicos responsables de olores se pueden distinguir los mercaptanos que presentan una fórmula general R-SH y que muestran umbrales de olor muy bajos. Los mercaptanos pueden aparecer en degradaciones anaeróbicas o aeróbicas de aminoácidos que contienen sulfuros. Los mercaptanos pueden ser oxidados en presencia de oxígeno a dimetil sulfuros DMS, o dimetil disulfuros DMDS, compuestos que pueden ser identificados frecuentemente en los gases procedentes de procesos de compostaje.
- **Terpenos.** Son derivados de cicloalcanos y muchos de ellos son responsables de fragancias en plantas. Son compuestos comunes en los gases de salida de procesos de compostaje que utilizan serrín o virutas de madera. Las sustancias más descritas que suelen aparecer son el limoneno y el α -pineno.

- **Otros compuestos.** Existen un gran número de compuestos que también pueden causar olores y que pueden aparecer ya sea en el substrato inicial o como productos intermedios durante el proceso de degradación. Encontramos en este grupo aldehídos, cetonas, alquenos, ésteres, butiratos, alcoholes, todos ellos con menor o mayor índice de olor en la muestra final.

En la Tabla 20 se muestran los principales compuestos causantes de olor clasificados en diferentes grupos.

Tabla 20.- Grupos de compuestos olorosos más comunes en plantas de tratamientos de residuos. (Fuente: Haug, 1993).

Clase	Compuesto	Fórmula	Carácter
Sulfurosos	Sulfuro de hidrógeno	H ₂ S	Huevos podridos
	Dimetil sulfuro	(CH ₃) ₂ S	Ajo
	Dimetil disulfuro	(CH ₃) ₂ S ₂	Putrefacción
	Metil mercaptano	CH ₃ SH	Col podrida, ajo
	Etil mercaptano	C ₂ H ₅ SH	Col podrida
	Propil mercaptano	C ₃ H ₇ SH	Desagradable
	Butil mercaptano	C ₄ H ₉ SH	Desagradable
Nitrogenados	Amoníaco	NH ₃	Fuerte, picante
	Metilamina	CH ₃ NH ₂	Pescado
	Dimetilamina	(CH ₃) ₂ NH	Pescado
	Trimetilamina	(CH ₃) ₃ N	Pescado, amoniacal
	Etilamina	C ₂ H ₅ NH ₂	Amoniacal
	Dietilamina	(C ₂ H ₅) ₂ NH ₂	
	Diamina, p.e. cadaverina	NH ₂ (CH ₂) ₅ NH ₂	Carnes en descomposición
	Indol	C ₈ H ₆ NH	Fecal, nauseabundo
Escatol	C ₉ H ₈ NH	Fecal, nauseabundo	
Ácidos	Acético	CH ₃ COOH	Vinagre
	Butírico	C ₃ H ₇ COOH	Rancio
	Valérico	C ₄ H ₉ COOH	Sudoroso
Aldehidos y cetonas	Formaldehído	CCHO	Acre
	Acetaldehído	CH ₃ CHO	Fruta, manzana
	Butiraldehído	C ₃ H ₇ CHO	Rancio, sudoroso
	Acetona	CH ₃ COCH ₃	Fruta, dulce
Terpenos	Butanona	C ₂ H ₅ COCH ₃	Manzana verde
	Limoneno	-	-
	α-pineno	-	-

En una primera fase del programa de gestión de los olores se deben identificar los procesos en la línea de tratamiento, implicados en la emisión de olores y cuantificar cada uno de ellos. En este sentido se debe determinar primero la emisión, es decir, la forma en que se liberan los olores desde la fuente en cuestión.

La emisión es función de la naturaleza de la fuente la cual puede ser aireada, puntual o difusa. La emisión se mide generalmente en unidades de olor (**uo**) por unidad de tiempo: uo·s⁻¹.

Una vez cuantificadas las emisiones se debería conocer de qué manera afectan estas emisiones a los alrededores de la instalación, y de ahí que sea necesario conocer la **inmisión**. La inmisión se refiere a la recepción de los olores en el entorno y de ahí las posibles molestias derivadas. La inmisión depende de factores meteorológicos, como los vientos, o la lluvia, y de la orografía del terreno. Los resultados de la inmisión se expresan como concentración de olor que se alcanza en cada punto del entorno; y se expresan en las unidades: uo·m⁻³.

En la Tabla 21 se muestran clasificadas las principales clases químicas en función de su grado de olor.

Tabla 21.- Clasificación de clases químicas de acuerdo con su índice de olor. (Fuente: Haug, 1993).

Grupo	Clase química
Fuertemente olorosos (índice de olor >10 ⁶)	Mercaptanos
	Alquenos
	Sulfuros
	Compuestos de bajo peso molecular:
	Butiratos
	Acrilatos
	Aldehídos
	Éteres
Medianamente olorosos (10 ⁴ <índice de olor <10 ⁶)	Alquilaminas
	Di y trialquilaminas
	Ácidos carboxílicos
	Compuestos de peso molecular alto
	Aldehidos
Poco olorosos (índice de olor <10 ⁴)	Éteres
	Alcoholes
	Alcanos
	Acetatos
	Aromáticos fenólicos

5.1.2 Caracterización del olor

Una vez determinados los puntos de olor más problemáticos se debe proceder a la caracterización de los compuestos olorosos. Esta caracterización comprende el análisis cualitativo y cuantitativo de las sustancias. Las emisiones olorosas de plantas de tratamiento de residuos son generalmente mezclas complejas de numerosos compuestos, para las que en muchas ocasiones resulta difícil una cuantificación exacta de cada compuesto.

La cromatografía de gases generalmente se ha venido aplicando tanto para la identificación como la cuantificación de mezclas gaseosas, y frecuentemente se utiliza esta técnica seguida de la espectrometría de masas. Sin embargo, a pesar de que mediante un análisis químico se pueden identificar y cuantificar una parte importante de las sustancias olorosas, no se puede conocer el efecto sensorial que percibirá el entorno a dicha mezcla de gases. En muchas ocasiones el compuesto que se encuentra en menor composición puede ser el principal causante de olores molestos. Es por este motivo

que se debe diferenciar el análisis químico de una determinada mezcla que proporciona una información determinada, de un análisis sensorial u olfatométrico.

Se conoce bien que en mezclas gaseosas de diferentes compuestos se dan fenómenos de sinergismo o potenciación de los olores, o antagonismo como fenómenos de enmascaramiento. En ese sentido, la olfatometría resulta una técnica eficaz que utiliza el propio olfato humano como sistema de detección para la cuantificación de los olores.

Actualmente las técnicas olfatométricas son técnicas cada vez más empleadas. Sin embargo, en otros países europeos como Holanda y Alemania, donde se llevan años desarrollando estas técnicas, se han estandarizado métodos y se han considerado los mismos de cara a las regulaciones medioambientales.

5.1.3 Evaluación del impacto

Una vez determinadas las concentraciones de olor de las diferentes fuentes se debe proceder a calcular la emisión de olor de cada uno de los focos, es decir, en qué grado contribuye cada foco a la emisión total de la planta.

Por **emisión** se entiende el número de unidades olor por unidad de tiempo que la fuente emite. Para determinar la emisión se debe considerar la concentración de olor $\text{uo}\cdot\text{m}^{-3}$, el caudal de aire y la superficie implicada en la generación de dicho olor, y su determinación dependerá del tipo de fuente analizada: puntual, estática o dinámica.

A partir de las emisiones se puede realizar un estudio de los niveles de inmisión en el entorno de la planta de tratamiento.

Las concentraciones de **inmisión** producidas en el entorno se pueden determinar mediante el uso de modelos matemáticos de dispersión Gaussianos que tienen en cuenta condiciones atmosféricas y de orografía del terreno. Estos modelos permiten predecir de qué forma se propagan los olores en las tres direcciones del espacio a partir de las emisiones de un determinado punto o instalación, y por tanto prever el impacto que tendrá la inmisión sobre el entorno, así como las posibles molestias que se puedan generar.

Las concentraciones de inmisión en el entorno se expresan en $\text{uo}\cdot\text{m}^{-3}$ y los resultados permiten establecer mapas de olores a partir de la representación de líneas que unen puntos con la misma concentración de olor o líneas isodoras.

Existen estudios que relacionan las concentraciones de inmisión con las quejas de la población. De estos estudios se ha podido concluir que la población situada en el interior de una línea isodora de $10 \text{uo}\cdot\text{m}^{-3}$, se verá afectada por malos olores. Generalmente esta línea es la que se utiliza como referencia para planificar los objetivos de reducción de los olores generados en la planta de tratamiento. La utilización de los modelos de dispersión se ha mostrado como una herramienta práctica a la hora de asesorar un estudio de impacto del olor.

5.1.4 Reducción de los olores

En el momento en que se disponen los datos correspondientes a las fuentes de emisión y de cómo éstas afectan al entorno, a partir del estudio de los modelos de dispersión, es el momento de marcar unos objetivos de reducción de ese impacto.

Las técnicas para tratamiento de gases junto con sus características más destacables se recogen en la Tabla 22. Estas técnicas se basan principalmente en procesos de absorción, adsorción, oxidación térmica, oxidación química y oxidación biológica.

Tabla 22.- Tipos de técnicas de tratamiento de gases más frecuentes.

Técnicas de tratamiento de gases		Características
Absorción	Atomizadores	Rendimientos de eliminación de olor: 90-95 %
	Scrubbers multietapa	Ampliamente instaurados
	Columnas de relleno	Pueden presentar problemas con compuestos no polares
	Diseños híbridos	En columnas de relleno problemas de ensuciamiento
Adsorción	Lechos de carbón activo	Efectivo para adsorber un gran número de sustancias orgánicas e inorgánicas.
		Problemas con la adsorción de amoníaco. Poco práctico debido a la necesidad de regeneración del carbón activo.
Oxidación térmica	Hornos catalíticos	Muy aplicada en la destrucción de compuestos orgánicos volátiles (COVs). Rendimientos de destrucción de 99.99 %. Gran consumo energético
Oxidación química	Ozono	Tratamiento escasamente utilizado
Oxidación biológica	Lodos activos	Eliminación del olor con rendimientos del 90-95 %.
	Filtro percolador	Económico.
	Biofiltro	Sobre lechos orgánicos (triturados de madera) o minerales.

En los procesos con producción considerable de gases contaminados, lo cual no es (o no debería ser) el caso del compostaje, los tratamientos más aplicados han sido las columnas de absorción en las que normalmente se aplican dos o más etapas en las que mediante la adición de sustancias químicas se consigue una eliminación selectiva de los principales compuestos olorosos con rendimientos aceptables.

Una de las técnicas que se ha venido aplicando en numerosas plantas de compostaje en sistemas cerrados, sobretudo en Europa, es la utilización de biofiltros en los que se da una oxidación biológica de los gases. Esta es una de las técnicas que actualmente se presenta como la mejor alternativa puesto que con un buen control de operación de la misma se pueden conseguir rendimientos de eliminación de olores elevados con unos costes de instalación y de operación considerablemente menores respecto a los otros métodos de tratamiento alternativos.

5.2 Emisión de líquidos/lixiviados

En primer lugar, es importante destacar que el proceso de compostaje tiene un balance hídrico negativo, es decir, que se necesitaría incorporar agua desde fuentes externas para poder mantener las condiciones del material en cuanto a la humedad que le permitiera completar la degradación biológica y la estabilización de la materia orgánica. Sin embargo, uno de los problemas más frecuentes en las

instalaciones de compostaje se encuentra en la gestión de las aguas de proceso (lixiviados) que se puedan generar o liberar. La cuantía de esta generación está influida directamente por la naturaleza del residuo, el tipo de estructurante empleado, la proporción de mezcla y el sistema de compostaje empleado.

5.2.1 Generación de lixiviados

Paradójicamente una vez iniciado el proceso se pueden producir dos tipos/causas de liberación y pérdida de líquido por parte del material. La primera causa de la liberación o lixiviación del material será por los fenómenos de compactación y compresión de la pila de material. La presión que sufre el material en la base por la acumulación alcanzada en altura provoca este primer escenario de lixiviación, que puede darse tanto en la recepción (según el modelo de recogida selectiva de los residuos orgánicos, de la zona y del protocolo de descarga, del período de almacenamiento antes de entrada a proceso...) como en los primeros momentos tras la constitución de la mezcla con el estructurante y en los primeros momentos (incluso días) tras la conformación de la pila, montón, lote... La segunda causa se debe a la actividad biológica degradativa de los microorganismos, y suele coincidir con los momentos en que esta es máxima, cuando ya han transcurrido algunos días desde el inicio del proceso. La rotura de macromoléculas orgánicas en las reacciones metabólicas de descomposición provoca la liberación de moléculas de agua retenidas en la matriz orgánica y la formación de moléculas de agua como metabolitos de algunas reacciones bioquímicas de degradación. Este “agua metabólica”, dependiendo de la temperatura y humedad del material, será emitida a la atmósfera en forma de vapor o percolará a través de la matriz porosa de la pila, montón, meseta... provocando una lixiviación (Figura 22). A partir de aquí, el manejo adecuado del material en proceso (volteos, transferencias, frecuencia de ventilación...) reducirá las condiciones de generación de lixiviados y forzará su evaporación a la atmósfera. Además, los protocolos de trabajo de planta deben incluir tareas específicas de limpieza de superficies para evitar que puedan quedar charcos o regueros de lixiviados que serán vectores potenciales de malos olores y de atracción de insectos.

Figura 22.- Ejemplos de lixiviación en plantas de compostaje. Izquierda, liberación de agua metabólica durante la fase de fermentación. Derecha, lixiviados generados en una instalación de compostaje con una mezcla muy pobre en material estructurante y sin un sistema de captación de lixiviados adecuado ni un protocolo de trabajo correctamente concebido (Fuente: Ramón Plana).



Existe otro factor de generación de lixiviados debido a las precipitaciones recogidas en zonas no cubiertas donde se realice el proceso (fermentación, maduración y post-maduración), donde se reciba o gestione el residuo fresco y en los viales por donde circule la maquinaria que trabaja en la planta. En

la práctica, y siempre que la planta se gestione adecuadamente, supone un “agua sucia” por el efecto de la dilución del lixiviado que se pueda ver arrastrado frente al volumen agua caída en esas zonas, pero que técnicamente debe gestionarse como los demás lixiviados de planta. Es por tanto muy importante analizar en el diseño de la planta cual es la relación entre los costes de inversión en sistemas de cubrición de las zonas críticas de la instalación frente al coste que podría suponer gestionar los lixiviados que se pueden llegar a recoger en base a la precipitación anual en la ubicación prevista.

5.2.2 Captación y almacenamiento de lixiviados

Todo el líquido que se pueda haber liberado en las condiciones descritas debe ser captado y canalizado a los depósitos o balsas lo antes posible para prevenir problemas de malos olores como se ha comentado en el punto anterior. Para ello es fundamental que las zonas de la planta donde se prevean riesgos de lixiviación se diseñen con las pendientes y los sistemas de captación y canalización adecuados.

Otros factores a considerar es que antes de la llegada a la balsa o depósito, el líquido captado pase por algún elemento de decantación donde se separen la mayor parte de partículas sólidas (la mayoría formadas por materia orgánica) que puedan ser arrastradas por el caudal de lixiviados. De esta manera se previene que estas partículas lleguen al espacio de almacenamiento donde decantarían en el fondo y comenzarían a descomponerse en condiciones anaerobias incontroladas, generando gases causantes de malos olores.

Figura 23.- Ejemplos balsas de lixiviados en planta. Izquierda, balsa abierta con bajo mantenimiento y potencial causante de afecciones ambientales negativas en forma de malos olores. Derecha, balsa de compostaje cerrada o confinada donde se evita que los gases que se puedan generar en el tiempo de almacenamiento de los lixiviados se liberen a la atmósfera incontroladamente.



Los espacios de almacenamiento temporal de lixiviados pueden ser en balsas abiertas o cerradas (Figura 23) o en depósitos cerrados, que deben ser correctamente dimensionados en base a parámetros como: las cantidades y características de los residuos a compostar, las condiciones de proceso, el tiempo de residencia en cada fase, las superficies no cubiertas susceptibles de generar lixiviados, las precipitaciones anuales en la zona (incluyendo las precipitaciones máximas en 24 y 48 horas)...

5.2.3 Gestión de lixiviados

El concepto de la balsa o depósito de lixiviados como lugar de almacenamiento puede conducir a un error en el diseño del protocolo de planta. Los tiempos de almacenamiento de lixiviado deben minimizarse, especialmente si es una balsa abierta, ya que no hay capacidad de control de las condiciones de la balsa, lo que llevaría a que se diera un ambiente anóxico que acabaría generando un problema de olores en la planta. Por ello, la balsa de compostaje debe ser gestionada adecuadamente en todo momento, bien por riego y/o por depuración.

La forma de recuperar y mantener los niveles de humedad del material adecuados para el proceso es realizando riegos periódicos, bien con los lixiviados que pudieran haber sido generados en las primeras fases, o bien con agua limpia. La principal precaución que hay que mantener es relativa a la higienización, pues con el riego con lixiviados se estarían reintroduciendo patógenos al material en proceso. Aunque es un método válido de gestión de los lixiviados debe utilizarse sólo para regar material que esté en la fase mesófila inicial o en la termófila, ya que la combinación de las altas temperaturas de la masa, y el tiempo que se mantiene en estas condiciones, permitirá la destrucción de los microorganismos patógenos que haya aportado el lixiviado (Hassen *et al*, 2001). Para poder realizar este modelo de gestión adecuadamente, la planta debe considerar en su diseño todos los elementos que constituyen el sistema de riego: bombas, sistema de filtrado, conducciones y elementos de riego, que pueden ir ligados a la volteamora en los sistemas dinámicos (donde el riego es más eficiente) o a sistemas de aspersión.

Otro modelo de gestión de lixiviados, compatible con el riego, sería mediante la instalación de sistemas de depuración en la propia planta. En modelos de plantas pequeñas, donde los caudales a depurar no son demasiado elevados, se puede considerar la construcción de humedales. Los humedales construidos son sistemas de depuración natural constituidos por lagunas o canales poco profundos (inferior a 1 m) plantados con especies vegetales propias de las zonas húmedas y en los que los procesos de descontaminación del efluente tienen lugar mediante la circulación del agua y sus interacciones con el sustrato sólido, los microorganismos, la vegetación e incluso la fauna. Además, la presencia de vegetación incrementa las tasas de evapotranspiración, consiguiendo no sólo una depuración del efluente, sino también su reducción. Son sistemas que se integran perfectamente en el paisaje, pasando desapercibidos y huyendo de la típica imagen que se tiene de una depuradora de agua.

La inversión inicial que necesita este tratamiento por humedales puede llegar a ser inferior al 50% en comparación con otros tratamientos de depuración y la necesidad de mantenimiento es mínima, reduciéndose a comprobaciones periódicas de las tuberías y arquetas. Puede existir un bombeo de agua a cabecera de planta y otro para la recirculación del agua, que sería el único gasto energético que requeriría la instalación. En algunos casos, se puede aprovechar la fuerza de gravedad y evitar la colocación de alguna de las bombas. Las partes finales, con agua ya depurada, pueden tener agua en superficie, para mejora paisajística y ecológica. Además, la lámina de agua está sumergida, con lo que se evita la generación de olores y la proliferación de insectos. El sistema es totalmente natural y no necesita adición de productos químicos de manera habitual, generando muy pocos lodos, lo que abarata la gestión ya que todos estos materiales orgánicos que se generan en este tipo de depuradoras pueden ser tratados en la planta de compostaje.

El modelo de humedal que ocupa menos superficie es el vertical. En este tipo de humedales el agua entra por la parte superior a pulsos y circula en sentido vertical descendente, atravesando el medio filtrante con las raíces de las plantas y la biopelícula bacteriana adherida. Llevan acoplados unos tubos de aireación favoreciendo la entrada de oxígeno al medio filtrante y mejorando la degradación de los contaminantes. Requieren menor superficie para su instalación, son más eficaces y consiguen eliminar el amoníaco en el lixiviado por nitrificación.

6. ESTRATEGIAS DE GESTIÓN DE RESTOS VEGETALES COMO MATERIAL ESTRUCTURANTE

Como ya se ha expuesto en este informe, la disponibilidad de material estructurante y/o complementario es fundamental para garantizar la eficiencia del proceso de compostaje, la ausencia o minimización de afecciones ambientales negativas y la calidad agronómica del producto final. Aunque haya sistemas o tecnologías de compostaje que permiten reducir la proporción de material estructurante en la mezcla, siempre habrá un mínimo necesario, la calidad (y por tanto posterior uso o aplicación) del compost producido se resiente y se trata de las tecnologías más sofisticadas y más costosas en el mercado. Por tanto, cualquier planificación para introducir el tratamiento por compostaje de residuos orgánicos generados en un territorio, sea en modelos centralizados y/o descentralizados, deberá ir acompañado de una estrategia de gestión y distribución del material estructurante.

En el caso del compostaje de los biorresiduos las proporciones de mezcla con el material estructurante mínimas, a partir de las cuales existe la posibilidad de mantener el proceso bajo condiciones adecuadas, es la de partes iguales (en volumen). La proporción de estructurante se puede (o se debe) incrementar en función de diferentes criterios, tanto ambientales (pluviosidad, humedad del residuo, distancia a población...), como técnicos (sistemas de compostaje estáticos, acceso a equipos de volteo adecuados, características del material estructurante disponible...), siendo la proporción más alta que se suele aplicar la de dos partes volumétricas de estructurante por cada parte de biorresiduo. Aunque históricamente se han venido empleando proporciones de mezcla mucho menores en instalaciones industriales, de tres partes de biorresiduo por cada parte de estructurante, se ha demostrado que son la causa de muchas dificultades en la gestión de la instalación: mayor generación de lixiviados, mayor posibilidad de fenómenos de anaerobiosis, baja calidad agronómica del compost producido... Por eso actualmente se considera preferible y una inversión en mejoras de la explotación de la planta (sea de la escala que sea) alcanzar proporciones de mezcla en partes iguales.

6.1 Fuentes de material estructurante o complementario

Aunque se pueden emplear materiales residuales no orgánicos como material estructurante, como pueden ser los residuos plásticos (Plana et al, 2006), como mínimo la calidad del compost generado se resiente, por lo que no se deberían considerar como una opción para el compostaje de un material orgánico tan “noble” como los biorresiduos, a partir de los cuales se puede llegar a alcanzar un compost de la máxima calidad legal e incluso certificado como ecológico.

Considerando por tanto que se debe buscar materiales de origen vegetal, las pautas o criterios principales para su selección serían los siguientes:

- Se debe priorizar que sean restos vegetales leñosos, aunque en modelos de pequeña escala y/o dinámicos se podrían considerar excepciones como el uso de restos vegetales arbustivos o incluso restos de cosecha de cereal (paja de trigo), aunque asumiendo que nunca tendrán el mismo rendimiento que los restos vegetales leñosos.
- Se debe considerar que sean materiales residuales, no productos adquiridos específicamente para realizar esta función. Aunque sea únicamente por una cuestión de coherencia argumental.
- Residuos de madera procesada pueden servir también como fuente de material estructurante, como ejemplo pueden ser restos de pallets de madera, bobinas de cable, tablones... En cualquier caso, no deben contener barnices, colas ni pintura, ya que pueden contener elementos contaminantes y/o inhibidores de la actividad biológica de los microorganismos. En este sentido, conglomerados, plafones de madera,... no son adecuados.
- Residuos herbáceos, de plantas carnosas, hojas,... no son material estructurante ya que no tienen la capacidad de mantener su estructura física durante el proceso. Algunos de ellos pueden llegar

a considerarse como material complementario en casos de compostaje a pequeña escala, pero siempre obligarán a una mayor frecuencia de volteos/traslados en la gestión de la instalación.

Por tanto, se deberían buscar restos leñosos de poda como materia prima para obtener este material estructurante. Desde las podas urbanas de parques y jardines, hasta desbroces de montes (en especial monte bajo que suele ser abundante en especies leguminosas, ricas en nitrógeno), podas agrícolas de frutales y silvicultura, gestión forestal, limpieza de caminos y carreteras,... son acciones generadoras de restos vegetales leñosos como residuos, que pueden ser potenciales materias primas de material estructurante.

6.2 Tareas y logística de la gestión del material estructurante

Una vez identificadas las fuentes de material estructurante se debe diseñar una logística de gestión que optimice los recursos y tiempo dedicados para su transformación y distribución. Las principales tareas para que estos restos de poda pasen a ser estructurante son las siguientes:

- Trituración: el material estructurante debe conferir porosidad a la mezcla con los biorresiduos, para lo que debe tener un tamaño de partícula homogéneo y adaptado a la escala de proceso en el que vaya a ser empleado. Obviamente no se necesita un mismo tamaño de partícula del material estructurante para una zona de compostaje comunitario que para una planta de compostaje de 10.000 t anuales de capacidad, con lo que, dependiendo de los casos puede ser necesaria una segunda etapa. En el caso de emplear residuos como pallets y similares, la máquina trituradora debería contar con un electroimán para extraer todo tipo de elementos metálicos (clavos, tornillos, alambres...) que pudieran tener originalmente.
- Cribado: en el caso de utilizar ciertos tipos de maquinaria como las astilladoras o algunos modelos de trituradoras, el material obtenido tiene una granulometría muy diferente, por lo que debe ser cribado para diferenciar lotes según tamaños de partícula. Hay modelos de trituradora que incorporan una criba para garantizar que el material estructurante tiene un tamaño de partícula máximo.
- Ensacado/acumulación: dependiendo del destino y la logística de transporte el material triturado se puede colocar en *big-bags*, remolques, contenedores o directamente en la caja de camiones para su reparto hasta los centros de uso.

En función de estas tareas se debe diseñar la logística de la gestión, en la cual las siguientes premisas deberían ser priorizadas:

- A. Las trituradoras que se encuentran en el mercado ofrecen una gama de modelos muy amplia en cuanto a su tamaño y capacidad de trituración, lo que se refleja en una gran variedad de precios. Esto lleva a que los gestores suelen priorizar trituradoras de un precio reducido para ahorrar costes, sin asumir que las trituradoras de precios bajos llevan asociado una mayor necesidad de mano de obra para alimentarlas manualmente, lo que incrementa además los costes relativos de combustible por tonelada de madera triturada.
- B. Los restos de poda deberían ser triturados en el mismo punto donde se generan. Es más eficiente plantear trituradoras industriales de mayor potencia que sean móviles y puedan ser trasladadas a los puntos donde se hagan las podas (o se acumulen) para trabajar allí directamente.
- C. El transporte de ramas hasta la planta de compostaje o un punto de acopio siempre resulta menos eficiente que el transporte de material triturado por su baja densidad.

- D. Crear zonas de almacenamiento/acopio de restos de poda, tanto de generación por actividades públicas de poda/limpieza, como por empresas de jardinería privada como por particulares, puede resultar una ventaja en el modelo de gestión. Existiendo una red de puntos de almacenamiento temporal, la máquina trituradora se puede trasladar hasta ellas cuando tengan acumulada una cantidad de restos de rama que permita que la máquina pueda estar operando durante un mínimo de tiempo que compense el transporte. Este material triturado sería luego repartido entre los puntos y/o actividades de compostaje en la zona.
- E. Que la planta de compostaje tenga su propia trituradora para gestionar los restos de poda y otros residuos de madera que se transporten hasta allí supone una limitación desde el punto de vista de la operativa de la planta, ya que el personal y la maquinaria (pala frontal) tienen que dedicar parte de su tiempo a realizar la trituración y traslado del material a las zonas de acopio. Es más eficiente que la trituradora opere en la zona de influencia de la instalación de compostaje y que a esta llegue directamente el material estructurante triturado.
- F. El mantenimiento de los equipos de trituración tiene una relevancia más allá del buen funcionamiento de estos. Se ha comprobado que hay casos de transferencia de ciertos metales pesados (Cr, Zn, Hg) al material triturado provenientes del desgaste de los martillos o cuchillas metálicas y de fugas aceites lubricantes o de líquidos hidráulicos. Si este material triturado se emplea en compostaje puede implicar incrementos de metales pesados relevantes en el compost producido (Puyuelo *et al*, 2019).
- G. Los vehículos que transporten material estructurante a las plantas pueden ser luego cargados con compost para su traslado o distribución, optimizando la logística del movimiento de materiales en la instalación.

7. MODELOS DE RECOGIDA DE FRACCIÓN ORGÁNICA

A parte del modelo de compostaje doméstico y/o comunitario, los otros sistemas de compostaje requieren de la implementación de un modelo de recogida. Actualmente existen diferentes modelos de aportación de la fracción orgánica de los residuos (contenedor abierto, puerta a puerta, contenedor cerrado, entre otros). Cada uno de ellos, en función, principalmente, de la individualización que conllevan, muestra diferentes rangos de calidad de la materia orgánica recogida. A su vez, una recogida de calidad supone unos menores costes de inversión y operación en planta por los menores requerimientos de pretratamiento que supone para la instalación.

Los modelos de recogida de las fracciones principales de residuos municipales se basan en la separación de los mismos para facilitar su posterior reciclaje. En general, a nivel doméstico los modelos más avanzados segregan los residuos en 5 fracciones (5F) pero existen otros modelos que tienen una mayor segregación (principalmente se aplican cuando en los modelos de recogida puerta por puerta) e incluso tampoco hay que perder de vista algunos modelos de segregación como el mutiproducto o el de fracción húmedo/seco. Específicamente, el modelo de recogida de multiproducto (4F; donde las fracciones papel-cartón y envases ligeros se recogen conjuntamente) se obtienen excelentes resultados de recogida selectiva. A pesar de ello, su implementación en el territorio no se ha generalizado debido, principalmente, a la falta de capacidad de las infraestructuras de clasificación de envases para poder tratar todo el flujo conjuntamente. En la Tabla 23 se resumen los modelos de segregación actuales descartando los modelos sin recogida diferenciada de orgánica por quedar prácticamente obsoletos con la Directiva 851/2018 donde se obliga a partir de 2025 a su segregación en origen.

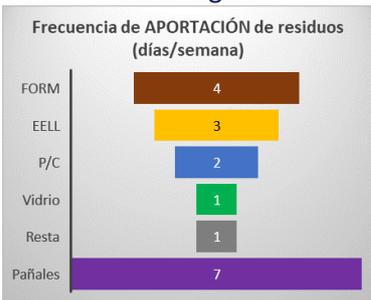
Tabla 23.- Modelos de segregación en origen de residuo domésticos (Fuente: elaboración propia).

Modelo de segregación	Segregación de fracciones						Comentarios
Recogida diferenciada de 6 fracciones (6F)	FO	V	P-C	EELL	Resto	Pañales	Modelo generalizado cuando hay un sistema de recogida Puerta a Puerta de la fracción resto. En este caso se separa el resto de la fracción pañales.
Recogida diferenciada de 5 fracciones (5F)	FO	V	P-C	EELL	Resto + Pañales		Modelo más extendido en el territorio.
Recogida multiproducto	FO	V	P-C + EELL		Resto + Pañales		Modelo que se basa en la recogida conjunta de la fracción papel-cartón y envases ligeros. Las otras fracciones: orgánica, vidrio y resto tienen su recogida diferenciada.
Residuo mínimo (o recogida húmedo/seco)	FO	V	P-C	EELL - resto (pañales)			En este modelo, las fracciones envases ligeros y resto se unifican en un único contenedor. Las fracciones restantes (orgánica, vidrio y papel-cartón) tienen su propia recogida.

Además de los modelos de segregación por fracciones de residuos domésticos, existen también una gran variedad de modelos de recogida. En la Tabla 24 se definen a modo de resumen los diferentes modelos

de recogida de la fracción orgánica municipal. En esta misma tabla se relacionan los modelos de recogida con índice de recogida selectiva de residuos municipales asociado en base a experiencias previas de Cataluña, Navarra, País Vasco e Italia.

Tabla 24.- Modelos de recogida de fracción orgánica de residuos municipales y contenido en impropios que suelen alcanzar (Fuente: adaptado de Nohales, G. (2018); Giró, F. (2019)).

Modelo	Descripción	Especificaciones	RS (%)
Puerta a Puerta	<p>Modelo de recogida individualizada en que cada día de la semana se recogen diferentes fracciones en la puerta de los hogares. En estos modelos el operario de recogida asume las labores de inspector. En el caso de que el usuario no aporte correctamente, el residuo no es recogido. Para zonas de elevada densidad de población se está extendiendo el modelo de puerta a puerta comunitario. En función del municipio existen diferentes calendarios. El calendario de recogida puerta por puerta más extendido es el siguiente:</p>  <p>En estos modelos, cuando la recogida de fracción resto se realiza 1 vez por semana (la frecuencia más recomendada para reducir su generación), la fracción de pañales se convierte en una fracción de recogida diferenciada de la fracción resto. Por lo tanto, se habla en general de 6 fracciones de recogida (6F).</p>	<p>Combinado con modelo de pago por generación (fiscalidad)</p>	77-90 %
		<p>Sin modelo de pago por generación asociado</p>	55-77%
Sistema de contenedores inteligentes (5F)	<p>Modelo de recogida en contenedores de calle con identificación y, en ocasiones, restricciones de acceso donde la recogida se desagrega en las cuatro fracciones reciclables (orgánica, papel/cartón, envases ligeros y vidrio) y en la fracción que incluye los materiales no reciclables (fracción resto).</p>	-	60-80%
Sistema mixto: puerta a puerta combinado con contenedores	<p>Modelos que combinan la recogida en contenedor y puerta a puerta según la fracción de recogida. Existen múltiples combinaciones y se suele aplicar a zonas</p>	<p>Contenedores inteligentes y sin modelo de pago por generación</p>	50-55%

Modelo	Descripción	Especificaciones	RS (%)
	de mayor densidad de población. A pesar de existir múltiples combinaciones, los más usuales son: 1. Recogida puerta a puerta de fracción orgánica (4 d/s), resto (1 d/s), envases ligeros (3 d/s) y pañales (7 d/s); combinado con recogida en contenedor de papel-cartón y vidrio. 2. Recogida puerta a puerta de las fracciones inorgánicas: resto (1d/s), envases ligeros (3 d/s), papel-cartón (2d/s) y pañales (5 d/semana); combinado con la recogida en contenedor de fracción orgánica y vidrio. Este modelo se implementa en zonas de elevada densidad de viviendas por portal (+30) y es requerimiento que el contenedor de orgánica sea un contenedor inteligente con identificación de usuario y restricciones de uso con el fin de evitar un alto un alto contenido en impropios de la fracción.	Contenedores abiertos y sin modelo de pago por generación	45-50%
Sistema de contenedores abiertos (5F)	Modelo de recogida en contenedores de calle sin restricciones de acceso donde la recogida se desagrega en las cuatro fracciones reciclables (orgánica, papel/cartón, envases ligeros y vidrio) y en la fracción que incluye los materiales no reciclables (fracción resto).	-	25-40%
Sistema de contenedores abiertos (4F)	Modelo de recogida en contenedores de calle sin restricciones de acceso donde los restos orgánicos se incluyen en la fracción resto (no reciclable).	-	0-20%

Nota:

RS: Índice de recogida selectiva de residuos municipales esperado.

5F: fracción orgánica, papel/cartón, envases ligeros, vidrio y resto.

4F: papel/cartón, envases ligeros, vidrio y resto.

6F: pañales, fracción orgánica, papel/cartón, envases ligeros, vidrio y resto

La implementación de un modelo específico para la materia orgánica afecta directamente sobre la calidad de la recogida, es decir, se reduce el contenido en materiales impropios. Las experiencias previas demuestran que la calidad también va sujeta al modelo de recogida diferenciada. Por ejemplo, en un modelo de recogida de fracción orgánica puerta a puerta el contenido en impropios suele estar por debajo del 5% (incluso llegando a valores cercanos al 0%); en cambio, en un modelo de recogida diferenciada de fracción orgánica en contenedor abierto el contenido en impropios es muy superior (10-30%) llegando incluso en ocasiones a un 40%. Además, es importante señalar que **la recogida diferenciada de materia orgánica debe ir sujeta a un modelo de obligatoria aportación a través de bolsas compostables certificadas (UNE-EN 13432 o UNE-EN-14995)**. En la Figura 24 se muestra de manera gráfica como cambia la calidad de la recogida cuanto más específico es el modelo.

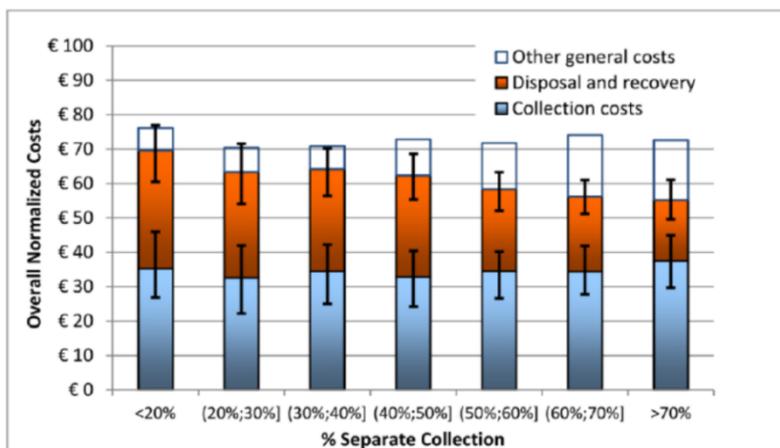
Figura 24.- Imagen de la materia orgánica captada en función del modelo de recogida de residuos (Fuente: Ramón Plana).



La imagen anterior muestra como en un modelo ya descartado de recogida conjunta de resto y materia orgánica, la calidad del residuo orgánico recogido es mínima. A medida que el modelo de recogida va evolucionando hacia una mayor individualización (recogida en contenedor específico, comunitario o puerta a puerta) la calidad va incrementando significativamente y con ello reduciendo los costes de tratamiento y obteniendo a su vez un producto final (compost) de mayor calidad agronómica.

En la Figura 25 se muestra el detalle de como los costes del tratamiento biológico se reducen al incrementar la calidad de la recogida selectiva.

Figura 25.- Coste económico comparativo de la recogida de la materia orgánica y de los costes de tratamiento biológico en función del contenido en inpropios; datos de Italia (Fuente: Giavini, M. 2012).



Tomando como referencia los datos de la figura anterior, se deduce que el coste total normalizado ($\text{€}\cdot\text{hab}^{-1}\text{equivalente}\cdot\text{año}^{-1}$) de la gestión de la fracción orgánica es inferior en el caso de un modelo puerta a puerta que en el caso de contenedor abierto:

- Puerta a puerta: $74,55 \text{ €}\cdot\text{hab}^{-1}\text{equivalente}\cdot\text{año}^{-1}$
- Contenedor abierto: $77,36 \text{ €}\cdot\text{hab}^{-1}\text{equivalente}\cdot\text{año}^{-1}$

8. INSTALACIONES REFERENTES EN DIFERENTES SISTEMAS Y MODELOS DE COMPOSTAJE

TECNOLOGÍA	<i>Compostaje comunitario</i>	
NOMBRE PLANTA	<i>Proyecto Revitaliza</i>	
LOCALIZACIÓN	<i>Provincia de Pontevedra</i>	
GESTOR	<i>Deputación de Pontevedra</i>	
RESIDUOS ADMITIDOS	<i>Biorresiduos</i>	
CAPACIDAD	<i>6 a 50 t·año⁻¹según tipo de zona</i>	
DESCRIPCIÓN DE LA INSTALACIÓN		
<p><i>El proyecto de compostaje descentralizado y local de la Deputación de Pontevedra se basa en un único modelo de instalación de compostaje comunitario basado en compostadores modulares, que pueden combinarse en diferente número (3, 6 y 10 unidades) dependiendo de la capacidad de tratamiento que se necesite. Se establece un único módulo de aporte de los biorresiduos frescos y el personal técnico especializado al cargo (maestros/as compostadores) gestionan la monitorización del proceso y realizan los volteos, riegos y trasvases del material en proceso a los módulos siguientes para completar la fermentación y la maduración dentro de la misma zona de compostaje.</i></p> <p><i>Todas las zonas cuentan con un espacio de almacenamiento de material estructurante (procedentes de podas urbanas y forestales) y una toma de agua y todas están controladas por el equipo técnico formado por la Deputación.</i></p>		
PUNTOS CRÍTICOS		
<p><i>La extrema cercanía a las viviendas es un arma de doble filo, ya que permite garantizar la participación y eficiencia del modelo, pero obliga a que el control del proceso sea muy intenso, para garantizar que no se producirán ningún tipo de afecciones ambientales negativas que puedan llegar a ser molestas para la ciudadanía.</i></p> <p><i>La clave del modelo reside en dos factores: garantizar la disponibilidad de un material estructurante adecuado y en cantidades suficientes durante todo el año y en contar con un personal técnico formado a nivel teórico y práctico.</i></p>		
OTRAS INSTALACIONES CON LA MISMA TECNOLOGÍA		
<p><i>El modelo de compostaje comunitario está muy extendido por Euskadi (más de 400 zonas activas), Navarra (más de 100 zonas activas) y Comunidad Valenciana, aunque también se encuentran ejemplos de éxito en otras comunidades, pero de forma más puntual. En cada caso el tipo de zona de compostaje comunitario y el modelo de gestión difieren, ya que se adaptan a las características y necesidades del territorio.</i></p>		
TERRITORIO RECOMENDADO PARA SU IMPLEMENTACIÓN		
<p><i>En la mayoría de núcleos urbanos con una población por debajo de 1.000 habitantes, y como una opción que debería marcarse como prioritaria a considerar en los núcleos de mayor población, pudiendo ser complementaria de otro modelo con recogida.</i></p>		



TECNOLOGÍA	<i>Pilas volteadas</i>	
NOMBRE PLANTA	<i>Josena BIO, SL</i>	
LOCALIZACIÓN	<i>Lumbier, Navarra</i>	
GESTOR	<i>Empresa de inserción socio-laboral</i>	
RESIDUOS ADMITIDOS	<i>Biorresiduos recogidos selectivamente (2 % impropios)</i>	
CAPACIDAD	<i>300 t·año⁻¹</i>	
DESCRIPCIÓN DE LA INSTALACIÓN		
<p><i>Se trata de una planta muy sencilla provista de una solera hormigonada en la que se identifican la zona de recepción, de fermentación, de maduración y de postmaduración. Además, cuenta con una balsa de lixiviados donde se realiza una depuración del agua mediante humedal.</i></p> <p><i>La fase de fermentación (4 semanas) se realiza en pilas volteadas, mientras que la maduración se realiza en mesetas (8 semanas). Transcurrido ese tiempo el material que ha completado el proceso se almacena si va a ser cribado o se traslada a los campos donde va a ser aplicado.</i></p> <p><i>Josenea BIO, S.L. produce plantas aromáticas y medicinales en ecológico y como empresa de inserción social, sus trabajadores son personas en riesgo de exclusión social. La misma empresa realiza la recogida selectiva de los biorresiduos y el tratamiento. Además, la planta también es un centro de formación técnica en gestión de instalaciones de compostaje y con el apoyo de la Universidad Pública de Navarra en desarrollo de diferentes productos fertilizantes orgánicos.</i></p>		
PUNTOS CRÍTICOS		
<p><i>Al tratarse de pilas de pequeñas dimensiones están influenciadas por las condiciones ambientales extremas (lluvias y bajas temperaturas) y necesitan volteos extra para poder recuperar los niveles adecuados de los parámetros de proceso. Para minimizar esta limitación se están empleando cubiertas autoportantes y transportables para cubrir las pilas de fermentación.</i></p> <p><i>Igualmente, al no tener cubiertas, todas las aguas pluviales se convierten a nivel normativo en lixiviados, por lo que el volumen anual de estos a gestionar es relativamente elevado.</i></p>		
OTRAS INSTALACIONES CON LA MISMA TECNOLOGÍA		
<p><i>Planta de Jorba (Barcelona). Capacidad para 20.000 t·año⁻¹. Compostaje de FORM y lodos de depuradoras industriales.</i></p> <p><i>Ecocelta (Pontevedra). Capacidad para 5.000 t·año⁻¹. Compostaje de FORM y lodos de depuradoras industriales.</i></p>		
TERRITORIO RECOMENDADO PARA SU IMPLEMENTACIÓN		
<p><i>Es un sistema muy flexible y eficiente, muy adecuado para entornos rurales. Actualmente, la posibilidad de encontrar en el mercado equipos de volteo de fabricación local o, al menos nacional, a buen precio, lo convierte en un modelo económicamente más atractivo. Además, no limita la ampliación o incluso, la modificación del sistema, a corto y medio plazo.</i></p> <p><i>Todas las zonas rurales serían aptas para este sistema, siendo el principal limitante la pluviosidad de la zona, por el factor de cantidad de lixiviados a generar si no se incluye algún tipo de cubierta en el diseño.</i></p>		

TECNOLOGÍA	<i>Pilas cubiertas con lonas semipermeables - Modelo Gore Cover</i>	
NOMBRE PLANTA	<i>Kirchbichl</i>	
LOCALIZACIÓN	<i>Kirchbichl, Austria</i>	
GESTOR	<i>Empresa pública</i>	
RESIDUOS ADMITIDOS	<i>Digesto de Biorresiduos y residuos vegetales</i>	
CAPACIDAD	<i>7.500 t·año⁻¹</i>	
DESCRIPCIÓN DE LA INSTALACIÓN		
<p><i>Planta que da servicio a 13 municipios del Tirol austríaco.</i></p> <p><i>Constituida por un sistema de compostaje en 6 unidades o pilas cubiertas con lona semipermeable y con ventilación forzada para la fase de fermentación. Ubicadas bajo nave cubierta y abierta en los laterales. Fase de fermentación de 3 + 3 semanas, seguida de una maduración de 6 a 8 semanas (en pilas volteadas).</i></p> <p><i>Opera con una proporción de mezcla de biorresiduos y estructurante de 1:2 (en volumen).</i></p>		
PUNTOS CRÍTICOS		
<p><i>Necesita una fase de mezclado inicial muy eficiente para garantizar que el proceso se pueda completar en las condiciones adecuadas.</i></p> <p><i>Las condiciones de trabajo en la fase de fermentación provocan que la temperatura del material se eleve hasta más de 75 °C, lo que resulta contraproducente para la eficiencia del proceso y la calidad agronómica del producto final.</i></p> <p><i>Al tratarse de un sistema estático necesitan incluir volteos/traslados durante la fase de fermentación (tras 3 semanas de proceso) para recuperar la homogeneidad y porosidad del material.</i></p> <p><i>La maduración se realiza en pilas volteadas para maximizar la eficiencia degradativa de los microorganismos y conseguir completar el proceso y alcanzar el grado de madurez deseado.</i></p>		
OTRAS INSTALACIONES CON LA MISMA TECNOLOGÍA		
<p><i>Clariana de Cardener (Barcelona). Compostaje de FORM y estabilización de fracción resto de vertedero.</i></p> <p><i>Tudela (Navarra). Compostaje de FORM y estabilización de digesto de FORM. 6 silos de fermentación y 6 silos de maduración.</i></p>		
TERRITORIO RECOMENDADO PARA SU IMPLEMENTACIÓN		
<p><i>Se trata de un sistema fácilmente escalable a la mayoría de las escalas, con lo que podría ser adecuado en la mayoría de las zonas del estudio. Son adecuados para:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> - <i>ubicaciones relativamente cerca de población,</i> - <i>instalaciones donde se plantee no construir ninguna nave o cubierta, al menos en la inversión inicial.</i> <p><i>Al ser un sistema estático se debe plantear la madurez exigible al compost y la superficie disponible.</i></p>		

TECNOLOGÍA	Túneles cerrados	
NOMBRE PLANTA	Epele	
LOCALIZACIÓN	Bergara, Gipuzkoa	
GESTOR	Empresa pública	
RESIDUOS ADMITIDOS	Biorresiduos recogidos selectivamente (5 % impropios)	
CAPACIDAD	10.500 t·año ⁻¹	
DESCRIPCIÓN DE LA INSTALACIÓN		
<p><i>La instalación distingue cuatro zonas operativas: mezclado, fermentación, maduración y postmaduración.</i></p> <p><i>La fase de fermentación se realiza en 8 túneles cerrados con ventilación forzada y control de parámetros de proceso, evitando temperaturas superiores a 70 °C. Esta fase del proceso se realiza en 2+2 semanas, con un traslado del material entre túneles tras las 2 primeras semanas de proceso, para recuperar su porosidad y homogeneidad.</i></p> <p><i>La maduración (6 semanas) es en pilas volteadas, para optimizar las condiciones de proceso.</i></p>		
PUNTOS CRÍTICOS		
<p><i>Necesita una fase de mezclado inicial muy eficiente para garantizar que el proceso se pueda completar en las condiciones adecuadas.</i></p> <p><i>La superficie disponible y la forma de la parcela condicionaron el diseño de la instalación y la capacidad de tratamiento, por lo que tienen que optimizarse las condiciones de proceso para garantizar que se puede mantener la capacidad nominal de la instalación durante todo el año. Es por eso que, además del trasvase en la fase de fermentación se ha incluido una fase de maduración en pilas volteadas para maximizar la eficiencia degradativa de los microorganismos y conseguir completar el proceso y alcanzar el grado de madurez deseado.</i></p>		
OTRAS INSTALACIONES CON LA MISMA TECNOLOGÍA		
<ul style="list-style-type: none"> - San Cugat (Barcelona). Capacidad de 7.000 t·año⁻¹ para biorresiduos. Planta de compostaje en túneles y maduración en pilas volteadas. - St. Pere de Ribes (Barcelona). Capacidad de 13.700 t·año⁻¹ para biorresiduos. Planta de compostaje en túneles y maduración en pilas volteadas. 		
TERRITORIO RECOMENDADO PARA SU IMPLEMENTACIÓN		
<p><i>En su aplicación en el compostaje de biorresiduos se precisa de instalaciones de gran capacidad (para equilibrar la inversión frente a la capacidad de tratamiento). La planta de túneles más pequeña en Cataluña es de 5.000 t anuales de capacidad. Para las cantidades que se estaría hablando no se considera un sistema de compostaje apropiado para el planteamiento que se está haciendo en la Comunidad Autónoma de Aragón, salvo para el entorno de Zaragoza.</i></p>		

TECNOLOGÍA	Silos con ventilación forzada	
NOMBRE PLANTA	Sort	
LOCALIZACIÓN	Sort, Lleida	
GESTOR	Consell Comarcal	
RESIDUOS ADMITIDOS	Biorresiduos recogidos selectivamente (2 % impropios)	
CAPACIDAD	750 t·año ⁻¹	
DESCRIPCIÓN DE LA INSTALACIÓN		
<p>Es una planta de compostaje integrada en el punto limpio (deixelleria) y planta de transferencia del Consell Comarcal del Pallars Sobirà, en Sort. Debido a eso el espacio donde debía ubicarse la planta estaba limitado y se recurrió a un sistema primordialmente estático.</p> <p>Tras un mezclado del biorresiduo con estructurante a una proporción de 1:2 (volumen) en un uni-feed adaptado, el material se dispone en un silo de fermentación con ventilación forzada durante 3+3 semanas. En ese período se hace un trasiego del material entre espacios libres dentro del mismo silo, para recuperar porosidad, homogeneidad y corregir humedad.</p> <p>Transcurrida la fase de fermentación el material se vuelve a pasar por el mezclador, para asegurar que se homogeniza completamente todo el material para iniciar la fase de maduración. Esta fase se realiza en un segundo silo ventilado contiguo durante 6 - 8 semanas, tras la cual se pasa por una criba vibrante para obtener un compost fresco que todavía necesitaría continuar su maduración, en un espacio de almacenamiento propio ya fuera de la planta, durante 3 a 6 meses.</p>		
PUNTOS CRÍTICOS		
<p>Un sistema fundamentalmente estático provoca una baja eficiencia del proceso degradativo, con lo que se necesita prolongar el proceso durante largos períodos de tiempo para asegurar que se alcanza una madurez del compost aceptable.</p> <p>Desde su inicio se ha mantenido sin cubiertas, pero se ha visto que, al no haber acción mecánica directa sobre el material, este se ve muy influenciado por las condiciones climáticas extremas (lluvias, nevadas...). Actualmente se está construyendo una cubierta para proteger los silos.</p>		
OTRAS INSTALACIONES CON LA MISMA TECNOLOGÍA		
<p>Planta de compostaje de Bufalvent (Manresa, Barcelona)</p> <p>Planta de compostaje de Boadella i les Escaules (Girona)</p> <p>Planta de compostaje de la Mancomunitat de la Plana (Barcelona)</p>		
TERRITORIO RECOMENDADO PARA SU IMPLEMENTACIÓN		
<p>Se trata de un sistema relativamente simple y de bajo coste de explotación, aunque obliga a largos períodos de tratamiento, con lo que hay que asegurar que la planta cuenta con el espacio necesario para una larga fase de postmaduración o, que la fase de maduración se realiza en un sistema dinámico.</p> <p>Adecuada para zonas rurales y zonas relativamente cercanas a núcleos de población. Necesario contar con, al menos, con el suficiente material estructurante para una proporción volumétrica de mezcla de 1 a 1 con el biorresiduo.</p>		

TECNOLOGÍA	<i>Pilas con ventilación forzada</i>	
NOMBRE PLANTA	<i>Seiringer</i>	
LOCALIZACIÓN	<i>Wieselburg, Austria</i>	
GESTOR	<i>Agricultor local - Seiringer Umweltservice GmbH</i>	
RESIDUOS ADMITIDOS	<i>Biorresiduos recogidos selectivamente (2-5 % impropios)</i>	
CAPACIDAD	<i>7.000 t·año⁻¹</i>	
DESCRIPCIÓN DE LA INSTALACIÓN		
<p><i>Es una de las plantas de compostaje referentes del modelo de compostaje agrícola en Austria, donde agricultores o cooperativas de agricultores locales realizan la recogida y/o el compostaje de biorresiduos en núcleos urbanos fundamentalmente rurales.</i></p> <p><i>El mezclado de los biorresiduos con el estructurante se realiza mediante un mezclador unifeed, tras el cual el material se dispone en pilas sobre un circuito de ventilación embebido en el suelo. Los ventiladores centrífugos (uno por cada pila) funcionan en aspiración mediante un ciclo temporizado de encendido y apagado, haciendo pasar el aire a través de las pilas e insuflándolo a un biofiltro. La humedad de las pilas se mantiene mediante un arco de riego que se desplaza sobre toda la zona de fermentación, humedeciendo las pilas por aspersión.</i></p> <p><i>Tras 4 semanas de fermentación el material se traslada a la zona de maduración, que se realiza en pilas volteadas cubiertas con lonas semipermeables (8 semanas).</i></p>		
PUNTOS CRÍTICOS		
<p><i>La combinación de carecer de cubierta junto con un sistema estático obliga a contar con una maduración en un sistema dinámico que permita recuperar las condiciones del material en proceso durante la última fase, para así poder completar la maduración del material en el tiempo establecido. Es por eso mismo que en esa segunda fase mantienen las pilas bajo lonas semipermeables, para contar con una protección del material.</i></p> <p><i>La simplicidad del modelo se basa en la calidad del biorresiduo que se recibe y en la disponibilidad del material estructurante necesario.</i></p>		
OTRAS INSTALACIONES CON LA MISMA TECNOLOGÍA		
<p><i>Tàrrega (Lleida). Capacidad de 10.700 t·año⁻¹ para biorresiduos.</i></p> <p><i>Tiquipaya (Bolivia). Capacidad de 780 t·año⁻¹ para biorresiduos.</i></p>		
TERRITORIO RECOMENDADO PARA SU IMPLEMENTACIÓN		
<p><i>Es un sistema muy flexible, que bien manejado garantiza condiciones óptimas de oxigenación del material y se convierte en muy eficiente si se combina con volteos periódicos. Sería muy adecuado para toda las zonas rurales donde haya un relativa cercanía a zonas pobladas.</i></p>		

TECNOLOGÍA	<i>Mesetas con ventilación forzada</i>	
NOMBRE PLANTA	<i>Migas Calientes</i>	
LOCALIZACIÓN	<i>Madrid</i>	
GESTOR	<i>Urbaser</i>	
RESIDUOS ADMITIDOS	<i>Residuos vegetales</i>	
CAPACIDAD	<i>14.000 t·año⁻¹ nominal</i> <i>Operativa: 3.500 t·año⁻¹</i>	
DESCRIPCIÓN DE LA INSTALACIÓN		
<p><i>Se trata de una planta de compostaje sencilla adaptada a las necesidades del residuo a tratar, restos vegetales, cuya velocidad de degradación es lenta. Los restos vegetales son triturados y dispuestos en una meseta de 2.400 m³ sin cubierta bajo la que hay un circuito de ventilación embebido en el hormigón. Los ventiladores funcionan mediante temporizadores para garantizar las condiciones aerobias dentro del material. La zona de fermentación cuenta con aspersores para mantener la humedad de la meseta. El tiempo de proceso en esta fase es de 4 semanas.</i></p> <p><i>La maduración se realiza en mesetas que son volteadas periódicamente con una volteadora de tipo lateral. Esta fase del proceso tiene establecido un tiempo de residencia de 5 a 6 meses.</i></p>		
PUNTOS CRÍTICOS		
<p><i>El control de la humedad del material es el parámetro crítico del proceso en todo momento, ya que sólo se pretende controlar en la fase de fermentación, y con un sistema ineficiente como es el riego por aspersión, mientras que en la maduración ya no se aplica ningún riego al material, estando sometido a como la humedad se vea afectada por las condiciones climáticas.</i></p>		
OTRAS INSTALACIONES CON LA MISMA TECNOLOGÍA		
<p><i>No es un sistema que se aplique al tratamiento de biorresiduos por su baja eficiencia y que la mayoría de las condiciones de proceso serían negativas para los biorresiduos.</i></p> <p><i>Es un sistema apto para residuos vegetales, especialmente leñosos.</i></p> <p><i>Solingen, Düsseldorf (Alemania). Capacidad de 10.000 t·año⁻¹ para restos vegetales.</i></p> <p><i>Mollerussa (Lleida). Capacidad de 20.000 t·año⁻¹ para lodos de depuradora y deyecciones ganaderas.</i></p>		
TERRITORIO RECOMENDADO PARA SU IMPLEMENTACIÓN		
<p><i>No se recomienda este sistema para el tratamiento de biorresiduos. Únicamente para la fase de maduración en instalaciones donde la fase de fermentación se realiza en un sistema eficiente o tiene un tiempo de residencia prolongado.</i></p>		

TECNOLOGÍA	Contenedores	
NOMBRE PLANTA	Pollboy	
LOCALIZACIÓN	Pollboy, Irlanda	
GESTOR	Galway County Council	
RESIDUOS ADMITIDOS	Biorresiduos	
CAPACIDAD	600 t·año ⁻¹	

DESCRIPCIÓN DE LA INSTALACIÓN

Los residuos que llegan a la instalación son pasados por una mezcladora para acondicionarlos con el material estructurante. Inmediatamente se introducen en uno de los contenedores, tardando una semana en ser llenado. El tiempo de permanencia es de 2 semanas, con lo que únicamente emplean dos contenedores para la fase de fermentación. Durante esta fase se controla la temperatura y la oxigenación del material, para garantizar condiciones óptimas de proceso.

La maduración se realiza en silos aireados durante 10 semanas que funcionan en aspiración.

PUNTOS CRÍTICOS

El dimensionamiento del tiempo de fermentación no se ajusta completamente a las unidades de proceso disponibles, por lo que habrá material del mismo lote que únicamente estará en la fermentación durante poco más de una semana, mientras que otra parte cumplirá las dos semanas. Esto provoca que la maduración se tenga que prolongar más de lo habitual.

Ambas fases se realizan en sistemas estáticos, con lo que el compost resultante deberá prolongar el tiempo de proceso en una postmaduración si se pretende alcanzar un elevado grado de madurez.

OTRAS INSTALACIONES CON LA MISMA TECNOLOGÍA

No se conocen otras instalaciones con datos contrastables.

TERRITORIO RECOMENDADO PARA SU IMPLEMENTACIÓN

Se recomienda principalmente para grandes generadores o empresas agroalimentarias que pretendan hacer un tratamiento únicamente de fermentación. La fase de maduración se podría hacer en la misma planta (con otra tecnología simple) o en otra instalación para llevar a cabo la maduración del material.

Otra opción sería su implementación como planta de sistema modular (en capacidad y movilidad) sin grandes requerimientos de obra civil.

TECNOLOGÍA	Trincheras		
NOMBRE PLANTA	Ecoparque de la Rioja		
LOCALIZACIÓN	La Rad de Laguen,		
GESTOR	Consortio de Aguas y Residuos de la Rioja		
RESIDUOS ADMITIDOS	<p>FORSU. No es un sistema que se suele utilizar para el compostaje de los biorresiduos, si no más bien para estiércoles y lodos de depuradora.</p>		
CAPACIDAD	130.000 t·año ⁻¹		
DESCRIPCIÓN DE LA INSTALACIÓN			
<p>Se trata de una instalación de Tratamiento Mecánico Biológico donde los residuos orgánicos presentes en la fracción resto son separados y sometidos a un proceso de bioestabilización por digestión anaerobia y compostaje en silos aireados. Los restos orgánicos presentes en el rechazo también pasan por un proceso de estabilización en tambor DANO (3 días) seguido de trincheras (2 semanas).</p> <p>No se aporta ningún material estructurante y se realizan volteos periódicos del material en las trincheras para completar el avance del material en las trincheras.</p>			
PUNTOS CRÍTICOS			
<p>Al tener un contenido en elementos impropios muy elevado, la fresa de la volteadora sufre un enorme desgaste en cada volteo. Además, debido a la falta de estructurante, no se puede considerar un sistema de ventilación forzada para garantizar las condiciones aerobias del proceso.</p> <p>La instalación es completamente dependiente del funcionamiento de la volteadora, no pudiendo continuar operando si esta sufre alguna avería.</p>			
OTRAS INSTALACIONES CON LA MISMA TECNOLOGÍA			
<p>Ratingen (Alemania). Capacidad de 50.000 t·año⁻¹ para biorresiduos.</p> <p>Sologas (As Somozas, A Coruña). Capacidad de 60.000 t·año⁻¹ para lodos de depuradora urbana e industriales.</p>			
TERRITORIO RECOMENDADO PARA SU IMPLEMENTACIÓN			
<p>En su aplicación en el compostaje de biorresiduos se precisa de instalaciones de gran capacidad (para equilibrar la inversión frente a la capacidad de tratamiento) y donde se garantice que se cuenta con el suficiente material estructurante para controlar la lixiviación. Para las cantidades que se estaría hablando no se considera un sistema de compostaje apropiado para el planteamiento que se está haciendo en la Comunidad Autónoma de Aragón.</p> <p>Si podría ser adecuada para la gestión y tratamiento de residuos orgánicos de alta densidad, como estiércoles o lodos de depuradora. Para estos materiales puede resultar un sistema de compostaje altamente eficiente.</p>			

9. REFERENCIAS

- American Public Wastes Association (1966). "Municipal Refuses Disposal", 2nd ed. Chicago.
- Benazon, N.D.; Belanger, W.; Scheurlen, D.B. & Lesky, M.J. (1995). "Bioremediation of ethylbenzene and styrene-contaminated soil using biopiles". *Biological Unit Processes for Hazardous Waste Treatment*. Hinchee, Skeen, Sayles ed., Battelle Press, Columbus, Ohio, USA.
- Bidlingmaier, W. (2006). "Organic Waste - A resource or a fat". *ORBIT 06 Biological Waste Management - From global to local*. Weimar, Alemania. Septiembre 2006.
- Cookson, J.T. (1995). "Bioremediation Engineering Design and Application". McGraw-Hill, New York, USA.
- de Bertoldi, M. & Civilini, M. (2006). "High-rate composting with innovative process control". *Compost Science and Utilization* 14 (4), 290-295.
- del Val, Alfonso (1998). "El libro del reciclaje". 3ª Edición. Integral, RBA Eds. 271 pp.
- Diaz, L.F.; de Bertoldi, M. (2007). Chapter 2 : History of composting. Waste Management Series, Elsevier 8, 7-24.
- Fermor, T.R.; Wood, D.A. & Lynch, J.M. (1989). "Microbiological processes in compost". *International Symposium of Compost Production and Use*. San Michele All'Adige, Italia, pp 282-300.
- Finstein, M.S.; Miller, F.C. & Strom, P.F. (1986). "Waste treatment composting as a controlled system". *Biotechnology*. Vol. 8. H.J. Rehm & G. Reed (eds.). VCH Publishers Inc., Weinheim. U.S.A., 363-398.
- Golueke, C.G. (1985). "Cycles of community waste composting". *Biocycle*, 26 (4): 32-35.
- Hassen, A.; Belguith, K.; Jedidi, N.; Cherif, A.; Cherif, M. & Boudabous, A. (2001). "Microbial characterization during composting of municipal solid waste". *Bioresource Technology* 80, 215-225.
- Haug, R.T. (1986). "Composting process design criteria. Part III - Aeration". *Biocycle* 10, 53-57.
- Heckman, J. (2006). "A history of organic farming: Transitions from Sir Albert Howard's War in the Soil to USDA National Organic Program". *Renewable Agriculture and Food Systems*, Volume 21, Number 3, Sept, pp.143-150(8). Cambridge University Press.
- Illmer, P. & Schinner, F. (1997). "Compost turning - A central factor for a rapid and high-quality degradation in household composting" *Bioresource Technology* 59, 157-162.
- Kiehl, B. (2007). "Komposztálás Németországban". *Biohulladék Magazine* 1 (2), 32-37.
- Larsen, I. (1993). "Organic wastes. A resource or an environmental problem? A view at the European scene". Agency of Environmental Protection. Copenhagen. 4th edition. 18 pp.
- López-Real, J. (1990). "Agro-industrial waste composting and its agricultural significance". Proceedings N° 293. Wye College, University of London Wye, Ashford, Kent.
- Manzano, S.; Pérez, C. & Soliva, M. (1998). "Compostaje conjunto de la fracción orgánica de residuos municipales (FORM) y residuos vegetales triturados: influencia sobre la temperatura y los niveles de oxígeno". *Revista Residuos*, 41: 60-67.
- Mato, S. (2005). "Compostaje de Residuos Orgánicos". *Galicia. Ecología. Tomo XLVIII: Ciencia y Tecnología Ambientales II*. Rodríguez Iglesias (Ed.). Hércules de Ediciones (A Coruña). pp: 21-43.
- Mato, S.; Polo, E.; Pérez, D. & Cereijo, D. (2006). "Integrating composting into the forestry techniques: the experience at the Mos council (Pontevedra, Spain)". *ORBIT 06 Biological Waste Management - From global to local*. Weimar, Alemania. Septiembre 2006, pp: 563-570.

Nell, J.H. & Wiechers, S.G. (1978). "High temperature composting". *Water Science Afr.* 4, 203-212.

Pérez Losada, C. (2000). "El compostaje. De técnica tradicional a tecnología moderna". *Jornadas sobre Tratamientos Biológicos de Residuos Orgánicos*. Albeida de Iregua (La Rioja). Octubre.

Plana, R. 2008. El compostaje de residuos orgánicos: Investigación del proceso a escala industrial y desarrollo de equipos experimentales para la determinación del sistema de tratamiento y protocolo de trabajo precisos para un desarrollo específico del proceso biológico. Tesis Doctoral. Universidad de Vigo, Dpto. de Ecología y Biología Animal. 373 pp.

Plana, R.; Arizmendiarieta, J.S.; Puyuelo, B.; Irigoien, I. & Nohales, G. 2019. Guía práctica para la implementación del compostaje comunitario como alternativa para la gestión local de los biorresiduos. Asociación Profesional "Fertile Auro". 74 pp. www.fearesiduos.com

Plana, R.; García, V.; Ferro, J; Barrena, R. & Pérez, C. 2006. "The effect of use residual plastics like bulking material in composting (II)". *ORBIT 06 Biological Waste Management - From global to local*. Weimar, Alemania. Septiembre 2006, pp: 171-180.

Puyuelo, B; Arizmendiarieta, J.S.; Irigoyen, I. & Plana, R. 2019. Quality assessment of composts officially registered as organic fertilisers in Spain. *Spanish Journal of Agricultural Research*, Volume 17, Issue 1, e1101. <https://doi.org/10.5424/sjar/2019171-13853>

Sesay, A.A.; Lasaridi, K.E. & Stentiford, E.I. (1998). "Aerated static pile composting of municipal solid waste (MSW): a comparison of positive pressure aeration with hybrid positive and negative aeration". *Waste Management and Research* 16 (3), 264-272.

Strom, P.F. (1985). "Effect of temperature on bacterial species diversity in thermophilic solid-waste composting". *Applied and Environmental Microbiology*, vol. 50, nº 4, 899-905.

A1 ANEXO 1. BASE DE DATOS CON LAS FICHAS DESCRIPTIVAS DE CADA SISTEMA O TECNOLOGÍA DE COMPOSTAJE

Anexo digital en formato Microsoft Excel (BBDD_Sistemas de compostaje.xlsx).

A2 ANEXO 2. BASE DE DATOS DE COSTES DE TECNOLOGÍAS

Anexo digital en formato Microsoft Excel (BBDD_Costes sistemas de compostaje.xlsx).

T +34 938 515 055
info@lavola.com
www.lavola.com
www.anthesisgroup.com

