



Ramón Plana - Dr. en Biología - Consultor en Tratamientos Biológicos de Residuos Orgánicos

Informe sobre la evolución de pilas de compostaje para el tratamiento de lana de oveja

Preparado para: Sra. Marian Orell Regis - Camp Mallorca

Preparado por: Ramón Plana González-Sierra y Joseba Sánchez Arizmendiarieta

24 de enero de 2024

Número de informe: 23 - 011A



Ramón Plana - Dr. en Biología - Consultor en Tratamientos Biológicos de Residuos Orgánicos

Índice

Índice de Tablas	3
Índice de Figuras	4
Introducción	6
1.- La lana de oveja como residuo	6
1.1.- Producción de lana	6
1.2.- La lana como residuo	6
1.3.- Los problemas de gestión de la lana como residuo	7
1.4.- La propuesta	8
1.5.- Antecedentes en el compostaje de lana	8
2.- Marco normativo	10
2.1.- Normativa SANDACH - Real Decreto 1528/2012, de 8 de noviembre	10
2.2.- Real Decreto 865/2010, de 2 de julio, sobre sustratos de cultivo	11
2.3.- Real Decreto 506/2013, de 28 de junio, sobre productos fertilizantes	14
Formación en compostaje de lana a pequeña escala	18
3.- Antecedentes	18
4.- Metodología empleada en la formación. Learning by doing	18
4.1. Módulo de conocimientos teóricos	19
4.2. Desarrollo teórico de los protocolos de actuación	20
4.3. Módulo de conocimientos prácticos	20
4.4. Conformación de la práctica en pilas de compostaje de gran tamaño	23
Pruebas de compostaje de lana en pilas	25
5.- Introducción	25
6.- Evolución de las pilas de compostaje	27
6.1.- Pila 1	28
6.2.- Pila 2	30
6.3.- Pila 3	32
6.4.- Pila 4	34
6.5.- Pila 5	36
6.6.- Pila 6	38
6.7.- Pila 7	40



Ramón Plana - Dr. en Biología - Consultor en Tratamientos Biológicos de Residuos Orgánicos

6.8.- Pila 8	42
6.9.- Pila 9	44
7.- Analíticas	46
7.1.- Interpretación normativa	47
7.2.- Interpretación analítica	49
7.3.- Influencia de las mezclas iniciales	50
7.4.- Calidad agronómica	51
8.- Conclusiones	54



Ramón Plana - Dr. en Biología - Consultor en Tratamientos Biológicos de Residuos Orgánicos

Índice de Tablas

Tabla 1.-	Clasificación de los diferentes tipos de compost en función de los materiales orgánicos iniciales según el RD 865/2010.	12
Tabla 2.-	Especificaciones y límites máximos que debe cumplir un compost según el RD 865/2010.	13
Tabla 3.-	Calidades legales del compost según su concentración en metales pesados por el RD 865/2010.	13
Tabla 4.-	Clasificación de los diferentes tipos de compost en función de los materiales orgánicos iniciales y las características que deben cumplir según el RD 506/2013.	15
Tabla 5.-	Calidades legales del compost según su concentración en metales pesados por el RD 506/2013 (n.d. = no detectable según el método oficial).	17
Tabla 6.-	Composición de las pilas de compostaje experimentales conformadas por cada grupo de personas asistentes a la formación técnica.	22
Tabla 7.-	Composición de las tres pilas de compostaje experimentales de mayor tamaño.	24
Tabla 8.-	Formulación de las diferentes pilas de compostaje constituidas durante el proyecto. Las unidades expresan partes en volumen de cada material aportadas a la mezcla inicial. Las pilas de mayor volumen son las 7, 8 y 9.	26
Tabla 9.-	Parámetros de monitorización del proceso de compostaje medidos en las pilas de la prueba piloto.	27
Tabla 10.-	Resultados de los parámetros analizados en los compost obtenidos (s.m.f. = sobre masa fresca; s.m.s. = sobre masa seca).	46
Tabla 11.-	Valores limitantes de los parámetros exigidos en el RD 865/2010 y el RD 506/2013 para el reconocimiento legal de un producto como "compost" y los resultados para estos en las muestras analizadas de las pilas (s.m.f. = sobre masa fresca; s.m.s. = sobre masa seca). Los valores que no cumplen alguno de los límites marcados se señalan con *	47



Ramón Plana - Dr. en Biología - Consultor en Tratamientos Biológicos de Residuos Orgánicos

Índice de Figuras

Figura 1.-	Evolución del proceso de compostaje de la Pila 1.	28
Figura 2.-	Evolución del proceso de compostaje de la Pila 1 según el diferencial de temperaturas entre la media de la pila y la ambiental.	29
Figura 3.-	Evolución del proceso de compostaje de la Pila 2.	30
Figura 4.-	Evolución del proceso de compostaje de la Pila 2 según el diferencial de temperaturas entre la media de la pila y la ambiental.	31
Figura 5.-	Evolución del proceso de compostaje de la Pila 3.	32
Figura 6.-	Evolución del proceso de compostaje de la Pila 3 según el diferencial de temperaturas entre la media de la pila y la ambiental.	33
Figura 7.-	Evolución del proceso de compostaje de la Pila 4.	34
Figura 8.-	Evolución del proceso de compostaje de la Pila 4 según el diferencial de temperaturas entre la media de la pila y la ambiental.	35
Figura 9.-	Evolución del proceso de compostaje de la Pila 5.	36
Figura 10.-	Evolución del proceso de compostaje de la Pila 5 según el diferencial de temperaturas entre la media de la pila y la ambiental.	37
Figura 11.-	Evolución del proceso de compostaje de la Pila 6.	38
Figura 12.-	Evolución del proceso de compostaje de la Pila 6 según el diferencial de temperaturas entre la media de la pila y la ambiental.	39
Figura 13.-	Evolución del proceso de compostaje de la Pila 7.	40
Figura 14.-	Evolución del proceso de compostaje de la Pila 7 según el diferencial de temperaturas entre la media de la pila y la ambiental.	41
Figura 15.-	Evolución del proceso de compostaje de la Pila 8.	42
Figura 16.-	Evolución del proceso de compostaje de la Pila 8 según el diferencial de temperaturas entre la media de la pila y la ambiental.	43
Figura 17.-	Evolución del proceso de compostaje de la Pila 9.	44
Figura 18.-	Evolución del proceso de compostaje de la Pila 9 según el diferencial de temperaturas entre la media de la pila y la ambiental.	45
Figura 19.-	Clasificación de los compost genéricos comercializados en España según su Índice de Fertilidad y su Índice de Limpieza y comparativa con las muestra de compost de lana analizadas (marcadas en rojo). Se indica el número de pila analizada. (Fuente: elaboración propia a partir de Puyuelo et al, 2019).	52



Ramón Plana - Dr. en Biología - Consultor en Tratamientos Biológicos de Residuos Orgánicos

Figura 20.- Clasificación de los compost de estiércol comercializados en España según su Índice de Fertilidad y su Índice de Limpieza y comparativa con las muestra de compost de lana analizadas (marcadas en rojo). Se indica el número de pila analizada. (Fuente: elaboración propia a partir de Puyuelo et al, 2019).

53



Ramón Plana - Dr. en Biología - Consultor en Tratamientos Biológicos de Residuos Orgánicos

Introducción

1.- La lana de oveja como residuo

El sector ganadero en España, particularmente el ovino, enfrenta en este siglo un importante reto relativo a la producción de la lana de oveja. Tradicionalmente, la lana ha sido considerada como un producto valioso y reconocido, una materia prima para múltiples aplicaciones industriales y artesanales. Sin embargo, desde hace algo más de una década, la demanda de lana ha disminuido drásticamente, lo que ha desembocado en que este material se haya convertido en un residuo más que en un producto. Esta situación plantea serios problemas de gestión para los ganaderos y las administraciones públicas relacionadas con el sector primario.

1.1.- Producción de lana

El tamaño de la cabaña ganadera ovina en España se estima en aproximadamente 14 millones de cabezas, según datos del Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación (MAPA, 2022). De estas, unas 8 millones son ovejas de raza merina, conocida por su lana de alta calidad, únicamente superada por el cachemir. Cada oveja puede producir entre 3 y 4 kg de lana por año, dependiendo de la raza y el número de esquilados que se le hagan, lo que significa que la producción anual de lana podría rondar las 42.000 toneladas.

En la Comunidad Autónoma de las Islas Baleares, la situación es similar aunque en menor escala. Se estima que la cabaña ovina asciende a unas 200.000 cabezas. Si se aplica una estimación conservadora de una generación de 3 kg de lana por oveja al año, anualmente se estarían obteniendo aproximadamente 600 toneladas de lana.

1.2.- La lana como residuo

Las razones que han llevado a que una materia prima de tan alta calidad como la lana sea ahora considerada un residuo atiende a diferentes causas que han coincidido temporalmente, pero quizás podemos considerar dos de ellas como las más importantes: la comercial y la normativa.



Ramón Plana - Dr. en Biología - Consultor en Tratamientos Biológicos de Residuos Orgánicos

Por un lado, en un mercado textil globalizado, la competencia de la lana con fibras sintéticas mucho más baratas (a pesar de su fuerte impacto ambiental y social) junto con la disminución de su uso en la industria textil han sido factores clave. Además, la globalización ha permitido la importación de lana de otros países a precios más competitivos, lo que ha afectado a los productores locales.

Por otra parte, desde 2011, la lana "sucia" (recién esquilada) ha pasado a considerarse como un residuo SANDACH (Subproductos Animales no Destinados al Consumo Humano), al mismo nivel que los residuos de los mataderos, a cause de la legislación específica sobre subproductos animales. Debido a las estrictas normas que se aplican sobre manipulación, almacenamiento, transporte y destrucción los ganaderos y las actividades artesanas de aprovechamiento de la lana han visto restringido su uso como materia prima.

Ante esta fuerte reducción en la demanda, la lana que se genera ya únicamente del cuidado y mantenimiento de los animales, se acumula sin tener una salida viable ni a nivel comercial ni administrativo. Los ganaderos enfrentan así el desafío de gestionar grandes cantidades de lana que, de otro modo, podrían tener un valor económico. En lugar de ser vendida o procesada, esta lana a menudo debe ser tratada como un residuo.

1.3.- Los problemas de gestión de la lana como residuo

El que la lana haya pasado a considerarse como un residuo lleva implícito una serie de problemas y retos que comienzan en el primer escalón de la cadena productiva.

En primer lugar están los **costes económicos** de su gestión como residuo, a los que tiene que hacer frente el ganadero dentro ya de una actividad con unos márgenes de beneficio estrechos. Pero además, las posibilidades de gestión están muy reducidas, ya que apenas hay instalaciones de tratamiento que puedan procesarla adecuadamente respetando la jerarquía de gestión de residuos, ofreciendo alternativas al vertido o su incineración. Además, la lana, debido a su baja densidad, ocupa mucho espacio, lo que complica y encarece su gestión.

Igualmente, su **gestión y tratamiento**, debe realizarse bajo unas condiciones intensas para minimizar problemas y maximizar su eficiencia. Esto redundaría en el problema comentado de falta de instalaciones específicamente acondicionadas o preparadas para recibir y tratar la lana como residuo.

La **falta de visión** o de alcance en la posibilidad de diferentes aprovechamientos de la lana, más allá del textil para elaborar prendas de calidad, en materiales naturales con menor impacto ambiental, de producción local y con un importante valor añadido. En este sentido la lana ofrece múltiples posibilidades para la fabricación o producción de: elementos aislantes en la construcción, filtros en la



Ramón Plana - Dr. en Biología - Consultor en Tratamientos Biológicos de Residuos Orgánicos

depuración de aguas, biocomposites, productos de cosmética, obtención de bioplásticos,..., hasta aplicaciones directas en tratamientos de biorremediación o, directamente, en el sector primario, como protección del suelo de cultivo por cubrición, en vez de los plásticos agrícolas, o directamente mediante su compostaje para obtención de una enmienda orgánica para el suelo de cultivo.

1.4.- La propuesta

Ante la situación creada en el sector es necesario desarrollar un modelo de gestión y tratamiento de la lana que permita aprovecharla o, por lo menos, evitar que se convierta en un residuo con todos los problemas económicos y ambientales que supone. La posibilidad de su tratamiento mediante compostaje local, aprovechando los recursos de espacio y maquinaria de las ganaderías, así como otros flujos residuales orgánicos para crear sinergias positivas que favorezcan el proceso de degradación y permitan obtener un producto final con una mayor calidad agronómica, es uno de los primeros caminos a recorrer para facilitar, en este escenario normativo y de mercado, la gestión de la lana al sector ganadero. Para ello no solo es necesario la investigación sobre el proceso a escala real y con los recursos disponibles en una granja, si no también la formación técnica específica, tanto teórica como práctica, a las personas implicadas. De esta forma se podrán evitar las malas prácticas y minimizar los riesgos de impactos negativos en el entorno, maximizando el aprovechamiento potencial de este producto.

1.5.- Antecedentes en el compostaje de lana

La oveja "Latxa", autóctona del País Vasco y Navarra, es una raza ovina reconocida por su larga lana gruesa y su producción lechera, utilizada en la elaboración de quesos de alta calidad como los de D.O. Idiazabal y Roncal. Antiguamente, la lana "Latxa" se empleaba en diversas industrias, pero con la aparición de fibras sintéticas y la falta de competitividad en el mercado global, la demanda de esta lana ha disminuido drásticamente.

1.5.1.- Problemática Actual

Según el Instituto Navarro de Tecnologías e Infraestructuras Agroalimentarias (INTIA), existen 355.169 ovejas "Latxa" que producen aproximadamente 675 toneladas de lana al año. Este volumen representa una carga significativa para los pastores, que enfrentan dificultades para gestionar este residuo. Las propuestas de incineración y envío a vertederos planteadas por la diputación Alavesa en 2018 presentan problemas ecológicos y sanitarios, y las empresas de recogida de lana no encuentran rentabilidad en recolectar pequeñas cantidades dispersas en múltiples explotaciones.



Ramón Plana - Dr. en Biología - Consultor en Tratamientos Biológicos de Residuos Orgánicos

1.5.2.- Iniciativas de Gestión y Compostaje

Las principales iniciativas que se han venido desarrollando en la gestión diferenciada de la lana de oveja como residuo son las siguientes:

- I. Ayuntamiento del Baztan (Navarra): Desde 2015. Se encarga de la recogida y transporte de lana de 134 pastores (49 toneladas) para su tratamiento y conversión a compost en la planta de Artajona.
- II. Federación de Asociaciones de Desarrollo Rural de Guipuzkoa (Landaola): Desde 2017. Con el apoyo de distintas mancomunidades, ha impulsado la recogida de lana, llegando a acumular más de 700 toneladas.
- III. Proyecto liderado por Latxa Esnea: En colaboración con Ekolber, Neiker, Arabalanda, Bizkaimendi y Landaola, busca proporcionar una salida estable para el volumen total de lana producida por los rebaños "Latxa". El objetivo es explorar la fabricación de cuerdas biodegradables y otros usos sostenibles.

Por otra parte, se han conocido iniciativas de la multinacional IKEA en la Comunidad Autónoma del País Vasco donde se ha recogido lana de oveja para evaluar su uso en la fabricación de productos.



Ramón Plana - Dr. en Biología - Consultor en Tratamientos Biológicos de Residuos Orgánicos

2.- Marco normativo

Para comprender correctamente las posibilidades y limitaciones que se presentan en la gestión y tratamiento de la lana mediante compostaje es necesario prestar atención al marco normativo en el que nos debemos mover. Este abarca desde la consideración de la lana como residuo y sus posibilidades de gestión, pero también las condiciones que debe cumplir el producto final para poder ser considerado técnica y legalmente como compost.

La lana de oveja se cataloga con el código LER (Lista Europea de Residuos) 02 02 02, que corresponde al capítulo *Residuos de la agricultura, horticultura, acuicultura, silvicultura, caza y pesca; residuos de la preparación y elaboración de alimentos* (02), subcapítulo de *Residuos de la preparación y elaboración de carne, pescado y otros alimentos de origen animal* (02) y código *Residuos de tejidos de animales* (02).

2.1.- Normativa SANDACH - Real Decreto 1528/2012, de 8 de noviembre

El RD 1528/2012, de 8 de noviembre, por el que se establecen las normas aplicables a los subproductos animales y los productos derivados no destinados al consumo humano, proporciona un marco regulatorio que guía la gestión de la lana como residuo SANDACH. Esta normativa clasifica la lana como un subproducto de origen animal, especificando los procedimientos y requisitos para su correcta eliminación o reutilización. Los objetivos principales de esta regulación son minimizar los riesgos sanitarios, asegurar un manejo adecuado de los residuos y promover la sostenibilidad ambiental.

Bajo esta normativa, la lana debe ser manejada y tratada de manera que se eviten riesgos de contaminación y propagación de enfermedades. Las opciones permitidas para la gestión de la lana incluyen su uso en procesos industriales seguros, la incineración, el compostaje controlado y otros métodos de tratamiento aprobados que garantizan la eliminación de riesgos sanitarios.

Esta normativa especifica que: *“...los explotadores recogerán, identificarán y transportarán los subproductos animales sin demoras indebidas en condiciones que eviten la aparición de riesgos para la salud pública y la salud animal...”*.

En cuanto al transporte de la lana: *“...los contenedores deberán ser estancos y mantenerse limpios, limpiándose y desinfectándose antes y después de cada carga...salvo cuando se dediquen al transporte de un determinado subproducto o producto derivado...”*



Ramón Plana - Dr. en Biología - Consultor en Tratamientos Biológicos de Residuos Orgánicos

2.2.- Real Decreto 865/2010, de 2 de julio, sobre sustratos de cultivo

Define y tipifica todos aquellos productos denominados sustratos, con el fin de poder garantizar que los que se ponen en el mercado sean agrónomicamente eficaces y que eviten sus posibles efectos nocivos en el agua, el suelo, la flora, la fauna y el ser humano.

En su artículo 3.1) se especifica que *“se considerarán sujetos a este Real Decreto aquellos sustratos de cultivo o componentes de los mismos (o productos fertilizantes en su caso), puestos en el mercado español para ser utilizados en agricultura, silvicultura, jardinería, paisajismo u otras actividades relacionadas”*. Por tanto, en el supuesto de que el destino del producto final no fuese su comercialización, no sería de aplicación este Real Decreto.

El compostaje según el RD 865/2010

El **proceso de compostaje** está definido en este documento como *“proceso controlado de transformación biológica aeróbica y termófila de materiales orgánicos biodegradables que da lugar a alguno de los tipos de productos orgánicos, cuyas características se detallan el grupo 1 del anexo I”*.

Por lo tanto se marcan claramente ciertas condiciones que debe cumplir el proceso biológico de la transformación de la materia orgánica para que el producto resultante pueda llegar a recibir la categoría de “compost”. El proceso ha de realizarse bajo condiciones controladas, que se garantice la disponibilidad de oxígeno en la masa para asegurar que los microorganismos que degradan la materia orgánica son aerobios y que la temperatura que alcanza la masa supera el rango de 55°C y lo mantiene durante un tiempo. Aunque este tiempo no se establece en este documento sí es un parámetro establecido a nivel técnico en otros documentos de referencia, como la **Propuesta de REGLAMENTO DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO (17 de marzo de 2016) por el que se establecen disposiciones relativas a la comercialización de los productos fertilizantes con el mercado CE y se modifican los Reglamentos (CE) n.º 1069/2009 y (CE) n.º 1107/2009**.

El compost según el RD 865/2010

En lo relativo al producto **compost** se establecen distintos tipos en función del origen de las materias primas a partir de las que puede ser producido tal y como se recoge en la Tabla 1.



Ramón Plana - Dr. en Biología - Consultor en Tratamientos Biológicos de Residuos Orgánicos

Tabla 1.- Clasificación de los diferentes tipos de compost en función de los materiales orgánicos iniciales según el RD 865/2010.

Tipo	Materiales orgánicos de origen
Compost	Materiales orgánicos biodegradables del Anexo V
Compost de estiércol	estiércol con o sin adición de materiales vegetales
Compost de restos de cultivo de hongos	restos del sustrato del cultivo de setas o champiñón
Compost vegetal	restos de poda, hojas, hierba cortada y restos vegetales (exclusivamente)

La definición de compost es la siguiente: “*Producto higienizado y estabilizado, obtenido mediante descomposición biológica aeróbica (incluyendo fase termofílica), bajo condiciones controladas.*” Además especifica que los materiales orgánicos a partir de los cuales se elabora el compost deben ser los recogidos en la Tabla 1. De esta forma esta definición establece que:

- Debe haber una ausencia de microorganismos patógenos en el producto, concretamente de *Salmonella*, *Listeria monocytogenes*, *Escherichia coli*, *Enterococcaceae* y *Clostridium perfringens*.
- La materia orgánica debe haber alcanzado un grado mínimo de estabilidad o madurez, aunque no determina cual, con lo que habría que referenciarse a otros documentos que pudieran ser vinculantes (Directivas europeas).
- No cualquier material de naturaleza orgánica puede servir para la producción de compost. Además este recibe una denominación específica según sea el origen de estos materiales (Tabla 1).
- Las condiciones del proceso de compostaje son especificadas nuevamente, tal y como se recogía en la definición de compostaje ya indicada.

Otras condiciones que debe cumplir el producto para poder ser clasificado como “compost” se refieren a ciertas especificaciones químicas y biológicas en sus características que deben ser determinadas en laboratorio y no pueden superar ciertos valores límite (Tabla 2).



Ramón Plana - Dr. en Biología - Consultor en Tratamientos Biológicos de Residuos Orgánicos

Tabla 2.- Especificaciones y límites máximos que debe cumplir un compost según el RD 865/2010.

Parámetro	Límites máximos
Materia orgánica sobre materia seca	> 20% (m/m)
<i>Salmonella</i>	Ausente en 25 g de producto elaborado
<i>Listeria monocytogene</i>	Ausente en 1 g de materia bruta (únicamente para cultivos cuya producción se consume en crudo)
<i>Escherichia coli</i>	< 1000 número más probable (NMP) por gramo de producto elaborado
<i>Enterococcaceae</i>	Entre 10 ⁴ y 10 ⁵ número más probable (NMP) por gramo de producto elaborado
<i>Clostridium perfringens</i>	Entre 10 ² y 10 ³ número más probable (NMP) por gramo de producto elaborado
Metales pesados	(ver Tabla 3 del presente documento)

El contenido en metales pesados del compost determina la calidad legal de este cuando es comercializado como sustrato, habiendo únicamente dos calidades: A y B (Tabla 3), que se obtienen cuando ninguno de sus metales pesados supera las concentraciones marcadas.

A su vez existen restricciones a su uso dependiendo de la calidad que se obtenga. Los sustratos de cultivo que obtengan Clase B no pueden ser aplicados en cultivos hortícolas comestibles. Esta limitación también afectará como es lógico a sus posibilidades de comercialización.

Tabla 3.- Calidades legales del compost según su concentración en metales pesados por el RD 865/2010.

Metales pesados (mg·kg ⁻¹ s.m.s.)	Clase A	Clase B
Cadmio (Cd)	0,7	2
Cobre (Cu)	70	300
Níquel (Ni)	25	90
Plomo (Pb)	45	150
Zinc (Zn)	200	500
Mercurio (Hg)	0,4	1,5
Cromo total (Cr)	70	250
Cromo VI	0,5	0,5



Ramón Plana - Dr. en Biología - Consultor en Tratamientos Biológicos de Residuos Orgánicos

2.3.- Real Decreto 506/2013, de 28 de junio, sobre productos fertilizantes

Deroga el anterior decreto sobre productos fertilizantes (RD 824/2005 de 8 de julio) e introduce la regulación de nuevos tipos de abonos y enmiendas así como establece la normativa básica en lo relativo a todos estos productos y las normas necesarias de coordinación con la comunidades autónomas.

Considera una especial atención a los fertilizantes elaborados a partir de materias primas de naturaleza orgánica, estableciendo la obligatoriedad de su inscripción en el Registro de Productos Fertilizantes y actualizando los requisitos de comunicación al mismo.

Así mismo define “producto fertilizante” como: *“producto utilizado en agricultura o jardinería que, por su contenido en nutrientes, facilita el crecimiento de las plantas, aumenta su rendimiento y mejora la calidad de las cosechas o que, por su acción específica, modifica, según convenga, la fertilidad del suelo o sus características físicas, químicas o biológicas, que cumpla con los requisitos establecidos en el artículo 4.2 y que deberá especificarse como tal en el anexo I de este real decreto. Se incluyen en esta definición los abonos, los productos especiales y las enmiendas.”*

El compostaje según el RD 506/2013

El **proceso de compostaje** está definido en el RD 506/2013 como *“proceso controlado de transformación biológica aeróbica y termófila de materiales orgánicos biodegradables que da lugar a los tipos de abonos o enmiendas orgánicos, cuyas características se detallan en los grupos 2 y 6 del anexo I”*. Esta definición coincide en su práctica totalidad con la que se ofrece para este proceso en el RD 865/2010, marcando también claramente las condiciones que este tratamiento debe cumplir para que el producto resultante pueda llegar a ser calificado legal y técnicamente como “compost”. Así se ha de cumplir la disponibilidad de oxígeno en todo el proceso y que la temperatura de la masa supera los 55 °C y se mantiene por encima de estos durante un tiempo (no determinado), aunque para cumplir la exigencia de higienización de patógenos en el producto final ya es necesario alcanzar una eficiencia y ciertas condiciones de temperatura y tiempo. En cualquier caso, esta relación de temperatura y tiempo mínimos se establece a nivel técnico en otros documentos de referencia, como la **Propuesta de REGLAMENTO DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO (17 de marzo de 2016) por el que se establecen disposiciones relativas a la comercialización de los**



Ramón Plana - Dr. en Biología - Consultor en Tratamientos Biológicos de Residuos Orgánicos

productos fertilizantes con el marcado CE y se modifican los Reglamentos (CE) n.º 1069/2009 y (CE) n.º 1107/2009.

El compost según el RD 506/2013

Este RD considera cuatro tipos de compost, todos englobados en el Grupo de 6 de la Relación de tipos de productos fertilizantes (anexo I del RD) que corresponde a las “Enmiendas orgánicas”. Así hay un tipo genérico de “compost” y tres más específicos (vegetal, de estiércol y de alperujos) en función del tipo de materia prima utilizada (Tabla 4) y que deben cumplir con varias características físico-químicas.

Tabla 4.- Clasificación de los diferentes tipos de compost en función de los materiales orgánicos iniciales y las características que deben cumplir según el RD 506/2013.

	Compost	Compost vegetal	Compost de estiércol	Compost de alperujo
Origen	Materiales orgánicos del Anexo IV recogidos separadamente	Hojas, hierba cortada, restos vegetales y/o poda	Exclusivamente de estiércol	Materia orgánica procedente del alperujo
MO total	35 %	40 %	40 %	45 %
Humedad máxima	40 %	40 %	30-40 %	40 %
Relación C/N	< 20	<1 5	< 15	20
Tamaño partícula	90 % < 25 mm	-	-	-
Otros	Sin impurezas ni inertes	Sin impurezas ni inertes	Sin impurezas ni inertes	Sin impurezas ni inertes
Polifenoles	-	-	-	< 0,8 %

La definición de compost es la siguiente: “*Producto higienizado y estabilizado, obtenido mediante descomposición biológica aeróbica (incluyendo fase termofílica), bajo condiciones controladas...*” de los diferentes materiales orgánicos indicados en la Tabla 4, según sea el tipo de compost que se esté produciendo.

De esta forma esta definición establece que:



Ramón Plana - Dr. en Biología - Consultor en Tratamientos Biológicos de Residuos Orgánicos

- Debe haber una ausencia de microorganismos patógenos en el producto, concretamente de *Salmonella* (ausente en 25 g de producto elaborado) y *Escherichia coli*. (< 1000 número más probable (NMP) por gramo de producto elaborado). En este aspecto no es tan exigente como el RD 865/2010.
- La materia orgánica debe haber alcanzado un grado mínimo de estabilidad o madurez, aunque no determina cual, con lo que habría que referenciarse a otros documentos que pudieran ser vinculantes (Directivas europeas).
- No pueden contener impurezas ni inertes de ningún tipo tales como piedras, gravas, metales, vidrios o plásticos. Esto influye notablemente en los sistemas de recogida de algunos residuos (como los biorresiduos de origen doméstico) y obliga en otros casos a eficientes sistemas de separación y cribado.
- El tamaño máximo de partícula ha de ser de 25 mm.
- No cualquier material de naturaleza orgánica puede servir para la producción de compost. Además este recibe una denominación específica según sea el origen de estos materiales (Tabla 4).
- Las condiciones del proceso de compostaje son especificadas nuevamente, tal y como se recogía en la definición de compostaje ya indicada.

Al igual que en RD 865/2010 hay otras condiciones que debe cumplir el producto para poder ser clasificado como "compost". Estas se refieren a ciertas especificaciones químicas y biológicas en sus características que deben ser determinadas en laboratorio y no pueden superar ciertos valores límite, como se recoge en la Tabla 4.

El contenido en **metales pesados** del compost determina la calidad legal de este cuando es comercializado como fertilizante, habiendo tres clases: A, B y C (Tabla 5), que se obtienen cuando ninguno de sus metales pesados supera las concentraciones marcadas.



Ramón Plana - Dr. en Biología - Consultor en Tratamientos Biológicos de Residuos Orgánicos

Tabla 5.- Calidades legales del compost según su concentración en metales pesados por el RD 506/2013 (*n.d.* = no detectable según el método oficial).

Metales pesados (mg·kg ⁻¹ s.m.s.)	Clase A	Clase B	Clase C
Cadmio (Cd)	0,7	2	3
Cobre (Cu)	70	300	400
Níquel (Ni)	25	90	100
Plomo (Pb)	45	150	200
Zinc (Zn)	200	500	1000
Mercurio (Hg)	0,4	1,5	2,5
Cromo total (Cr)	70	250	300
Cromo VI	n.d.	n.d.	n.d.

A su vez existen restricciones a su uso dependiendo de la calidad que se obtenga:

1. Sin perjuicio de las limitaciones establecidas en el capítulo IV, los productos fertilizantes elaborados con componentes de origen orgánico se aplicarán al suelo siguiendo los códigos de buenas prácticas agrarias. En las zonas designadas como vulnerables la aplicación de estos productos se ajustará al programa de actuación establecido en cada caso.
2. Los productos de la clase C no podrán aplicarse sobre suelos agrícolas en dosis superiores a cinco toneladas de materia seca por ha y año. En zonas de especial protección, las Comunidades Autónomas modificarán, en su caso, la cantidad anterior.

Los productos fertilizantes que superen el contenido para alguno de los metales marcados para la clase C no pueden ser considerados ni denominados como “compost” aunque cumplan con todas las demás características mencionadas. Su denominación y consideración legal para a ser la de “bioestabilizado” y cuyo uso no está permitido en suelos agrícolas.



Ramón Plana - Dr. en Biología - Consultor en Tratamientos Biológicos de Residuos Orgánicos

Formación en compostaje de lana a pequeña escala

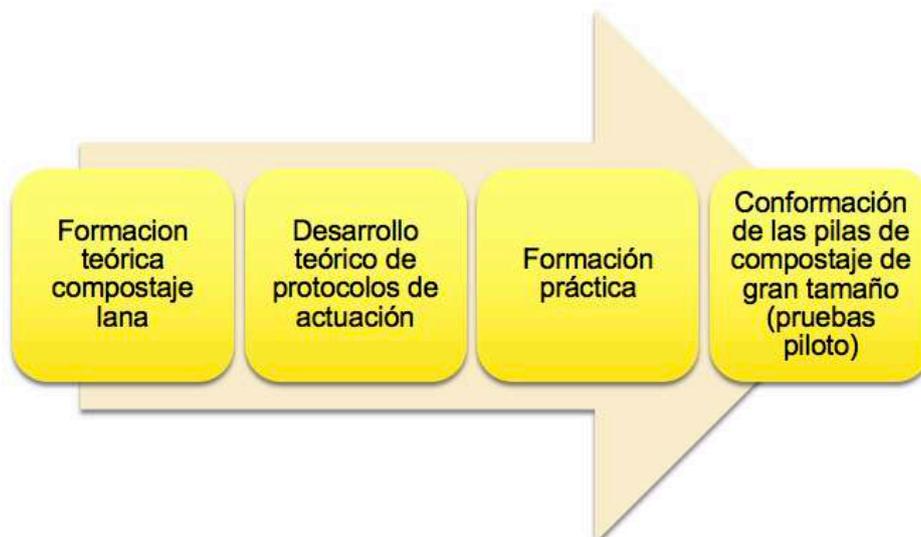
3.- Antecedentes

La formación de las personas que puedan estar al cargo del tratamiento de la lana por compostaje consistió en un curso teórico y práctico de 6 horas presenciales y asistencia técnica remota sobre el proceso de compostaje de la lana, dirigido tanto a los técnicos responsables de la recogida y tratamiento de la lana en este proyecto, como a aquellas personas particulares que realizarán la gestión de la lana en sus propias fincas. Esta jornada de formación se realizó el 3 de noviembre de 2023 en las instalaciones de las *Cooperativas Agro-alimentàries Illes Balears* y en la Finca Mainou, ambas ubicadas en el municipio de Santa María (Mallorca).

En total, hubo dieciséis personas inscritas y asistencia confirmada de doce a las clases impartidas.

4.- Metodología empleada en la formación. *Learning by doing*

La metodología seguida para la formación ha sido la denominada '*Learning by doing*', basada en la práctica. De este modo, se pretende que la formación sea más dinámica en la que los conceptos teóricos y prácticos se complementen en cada fase. El objetivo es crear en los alumnos el hábito al conocimiento práctico desde las primeras fases.





Ramón Plana - Dr. en Biología - Consultor en Tratamientos Biológicos de Residuos Orgánicos

De esta forma, el plan de trabajo a seguir se resume de manera esquemática en el siguiente listado:

1. Formación teórica de compostaje de lana a pequeña escala
2. Desarrollo teórico/práctico de protocolos de actuación
3. Formación práctica
4. Conformación de las pilas de compostaje para realizar las pruebas piloto.

Las fases y los procesos de la formación se describen a continuación:

4.1. Módulo de conocimientos teóricos

El programa de conocimientos teóricos que se ha impartido se compone de un temario general en el que se profundiza según se avanza en la práctica del manejo. Con esto, se busca que los conocimientos clave del proceso se conozcan, se analicen y se entiendan tanto a nivel teórico como aplicado. Los aspectos principales del temario teórico han sido:

- ⇒ Los residuos orgánicos y los tratamientos biológicos de residuos a pequeña escala.
- ⇒ El proceso de compostaje. Definición y análisis del mismo.
- ⇒ Los parámetros iniciales del proceso de compostaje.
 - La matriz porosa.
 - La humedad.
 - El tamaño de partícula.
 - El pH.
 - La relación C/N.
- ⇒ Los parámetros de control de proceso.
 - Temperatura.
 - Consumo de oxígeno.
 - Producción de CO₂.
 - Humedad.



Ramón Plana - Dr. en Biología - Consultor en Tratamientos Biológicos de Residuos Orgánicos

- pH.

⇒ El tratamiento de la lana. Adaptación del proceso de compostaje para la gestión de la lana a pequeñas escalas.

- Características de la lana
- Dificultades y retos para su gestión mediante compostaje.
- Necesidades
- Parámetros a tener en cuenta tanto al inicio del proceso como durante el mismo.

4.2. Desarrollo teórico de los protocolos de actuación

Una vez conocidas las necesidades, los conceptos y el desarrollo de los diferentes procesos, en la propia aula se comentaron los diferentes protocolos de la gestión de la lana mediante el compostaje que se pueden aplicar según la situación particular de cada caso: dependiendo de los materiales y recursos disponibles, la cantidad de lana a compostar, las condiciones de la ubicación, etc.

Estos protocolos se han revisado y corregido durante el módulo de conocimientos prácticos, adaptándolos a la situación real de los casos prácticos en la isla de Mallorca.

4.3. Módulo de conocimientos prácticos

Tras finalizar la sesión teórica, se realizó una formación práctica de 2,5 horas de duración. El objetivo de la formación práctica era que el alumnado pudiera interiorizar y aplicar los conceptos básicos expuestos en la formación teórica. Esta fase de la formación se realizó por grupos. De esta manera se promovía el desarrollo de una dinámica de puesta en común del conocimiento adquirido y, a la vez, se generaba una canalización y exposición de las dudas que habían ido surgiendo.

Con el mismo objetivo, el módulo de formación y conocimientos prácticos sirvió para constituir las diferentes pilas de compostaje que se emplearon en el desarrollo de las pruebas piloto, tal y como se explican en el apartado siguiente de este documento.

De esta forma, la conformación de pilas de compostaje llevaron asociadas las siguientes actividades desarrolladas por las personas asistentes:

- a) En primer lugar, se analizaron los materiales disponibles para compostar junto a la lana (estiércoles, biorresiduos, restos vegetales...).



Ramón Plana - Dr. en Biología - Consultor en Tratamientos Biológicos de Residuos Orgánicos



b) Una vez conocidos los materiales disponibles, se cubicaron para poder estimar su cantidad y se acondicionaron debidamente a las necesidades del proceso biológico de compostaje, eliminando impropios, humedeciendo en aquellos casos en los que se requería, etc.



c) A continuación, cada grupo tomó una cantidad determinada de lana y la humedeció hasta que adquirió las condiciones idóneas para incorporarla en el proceso.



d) Cuando ya estaban dispuestos y mezclados todos los materiales, cada grupo conformó dos pilas de un volumen de 3 m³ aproximadamente.



Ramón Plana - Dr. en Biología - Consultor en Tratamientos Biológicos de Residuos Orgánicos



El resumen de las pilas de compostaje conformadas se muestra en la Tabla 6:

Tabla 6.- Composición de las pilas de compostaje experimentales conformadas por cada grupo de personas asistentes a la formación técnica.

Grupo	Pila 1	Pila 2
1	Estiércol fresco : lana : biorresiduos Proporción 1:1:1 (en volumen) <div data-bbox="392 1406 775 1787" style="text-align: center;"> </div>	Estiércol fresco : lana : poda triturada Proporción 1:1:1 (en volumen) <div data-bbox="975 1406 1358 1787" style="text-align: center;"> </div>



Ramón Plana - Dr. en Biología - Consultor en Tratamientos Biológicos de Residuos Orgánicos

Grupo	Pila 1	Pila 2
2	<p>Estiércol fresco : lana Proporción 2:1 (en volumen)</p> 	<p>Estiércol viejo : lana Proporción 2:1 (en volumen)</p> 
3	<p>Poda triturada : lana Proporción 1:1 (en volumen)</p> 	<p>Biorresiduos : estiércol fresco : lana : poda triturada Proporción 0,5 : 0,5 : 1 : 1 (en volumen)</p> 

4.4. Conformación de la práctica en pilas de compostaje de gran tamaño

Tras finalizar la sesiones teórico-prácticas, se procedió a conformar dos pilas de gran tamaño para poder realizar la prueba piloto de compostaje de lana. En total se formaron tres grandes pilas: dos en la finca experimental y otra en una finca particular. No obstante, antes de formar las pilas, junto con los técnicos de *Camp Mallorca* y el encargado de la finca particular, se repasaron conceptos básicos de la formación técnica tales como: el uso de la maquinaria disponible, acciones de manejo y control de proceso (volteos, riegos, etc.), etc.

Las tres pilas de gran tamaño que se han formado han sido las que se detallan en la Tabla 7.



Ramón Plana - Dr. en Biología - Consultor en Tratamientos Biológicos de Residuos Orgánicos

Tabla 7.- Composición de las tres pilas de compostaje experimentales de mayor tamaño.

Lugar	Finca experimental	Finca particular
Número de pilas	2	1
Proporción de la mezcla	Lana / restos de cosecha / poda triturada / estiércol viejo / biorresiduos (proporción 2:0,5:2:1:0,5 en volumen)	Lana / estiércol / equino-ovino / poda triturada (proporción 1:2:1 en volumen)
Proceso		

El seguimiento de estas pilas y de las otras seis pilas formadas en la sesión práctica tenía como objetivo asegurar una formación y capacitación de larga duración, ya que las acciones a realizar en el día a día por un técnico de residuos, un ganadero y/o un técnico de planta se desarrollan en situaciones reales, tales como:

- Acondicionamiento de los materiales residuales a las necesidades del proceso biológico de compostaje.
- Realización de las mezclas de residuos a compostar y formación de pilas, etc.
- Acciones de seguimiento de la evolución del proceso
- Acciones de mantenimiento: volteos, riegos, aplicación de medidas correctoras, etc.
- Cribado y afino.
- Análisis del producto final.



Ramón Plana - Dr. en Biología - Consultor en Tratamientos Biológicos de Residuos Orgánicos

Pruebas de compostaje de lana en pilas

5.- Introducción

Como parte del proyecto de formación y capacitación en el tratamiento de la lana de oveja como residuo, así como para evaluar las posibles mezclas de diferentes tipos de residuos orgánicos y como evolucionaban las condiciones de proceso en diferentes casos, se planteó una segunda parte experimental en que se conformaron las diferentes pilas de compostaje que se emplearon en el desarrollo de las pruebas piloto.

Se constituyeron un total de nueve pilas de compostaje con diversas formulaciones para ensayar la influencia de los diferentes residuos orgánicos disponibles (Tabla 8). Estos debían proceder del entorno y de actividades económicas donde no se generaran residuos peligrosos o de características potencialmente contaminantes o limitadas para las prácticas agrícolas. Así, los materiales residuales empleados fueron:

- ✓ Biorresiduos, restos de comida recogidos selectivamente procedentes de establecimientos hoteleros de la zona.
- ✓ Estiércol fresco, de equino.
- ✓ Estiércol seco, de ovino y equino.
- ✓ Lana de oveja, el “residuo problema” sobre el que pivotaba todo el proyecto.
- ✓ Podá, restos vegetales leñosos triturados con un tamaño de partícula aproximado entre los 30 - 50 mm. Este material era un residuo al que se le había realizado una extracción química. En la Pila 8 el material con esta denominación ha sido una mezcla de virutas de madera y serrín.
- ✓ Restos de cosecha, restos vegetales de leguminosas (alcaparras) y de café.



Ramón Plana - Dr. en Biología - Consultor en Tratamientos Biológicos de Residuos Orgánicos

Además, con el objetivo de ensayar como el tamaño de pilas puede llegar a afectar a la evolución del proceso de compostaje se constituyeron pilas con dos volúmenes diferentes:

- ➔ de 3 m³ (pilas 1 a 6).
- ➔ de 6 m³ (pilas 7 a 9).

Tabla 8.- Formulación de las diferentes pilas de compostaje constituidas durante el proyecto. Las unidades expresan partes en volumen de cada material aportadas a la mezcla inicial. Las pilas de mayor volumen son las 7, 8 y 9.

	Biorresiduos	Estiércol fresco	Estiércol viejo	Lana	Poda	Restos cosecha	Volumen (m ³)
Pila 1	1	1		1			3
Pila 2		1		1	1		
Pila 3		2		1			
Pila 4			2	1			
Pila 5				1	1		
Pila 6	1	1		2	2		
Pila 7	1		2	4	4	1	6
Pila 8		2		1	1		
Pila 9		1	1	3	2	1	

* En esta pila estos restos corresponden a serrín y fragmentos de madera.



Ramón Plana - Dr. en Biología - Consultor en Tratamientos Biológicos de Residuos Orgánicos

6.- Evolución de las pilas de compostaje

La monitorización del proceso en todas las pilas del proyecto se realizó mediante una combinación de parámetros cuantitativos y cualitativos que fueron medidos en visitas técnicas realizadas dos veces por semana (Tabla 9), comenzando el 13 de noviembre de 2023, diez días después del montaje de las pilas.

Tabla 9.- Parámetros de monitorización del proceso de compostaje medidos en las pilas de la prueba piloto.

Parámetros cuantitativos	Parámetros cualitativos
Temperatura ambiente	Humedad del material*
Temperatura del material*	Olor del material*
Caudal de riego	Presencia de lixiviados
Tiempo de riego	Fenómenos meteorológicos (lluvia)
	Incidencias

* Parámetro medido en tres puntos diferentes de la pila

Las instrucciones de manejo que fueron dadas a las personas participantes en el curso fue que no realizaran ningún volteo ni manejo de la pila durante las primeras dos semanas, para forzar una hidrólisis de la materia orgánica que acidificara el medio y favoreciera el inicio de degradación de las sustancias grasas que protege la lana de su degradación natural.

A continuación, se ofrece un resumen de la evolución de cada una de las nueve pilas de la prueba piloto en función de los parámetros monitorizados.



Ramón Plana - Dr. en Biología - Consultor en Tratamientos Biológicos de Residuos Orgánicos

6.1.- Pila 1

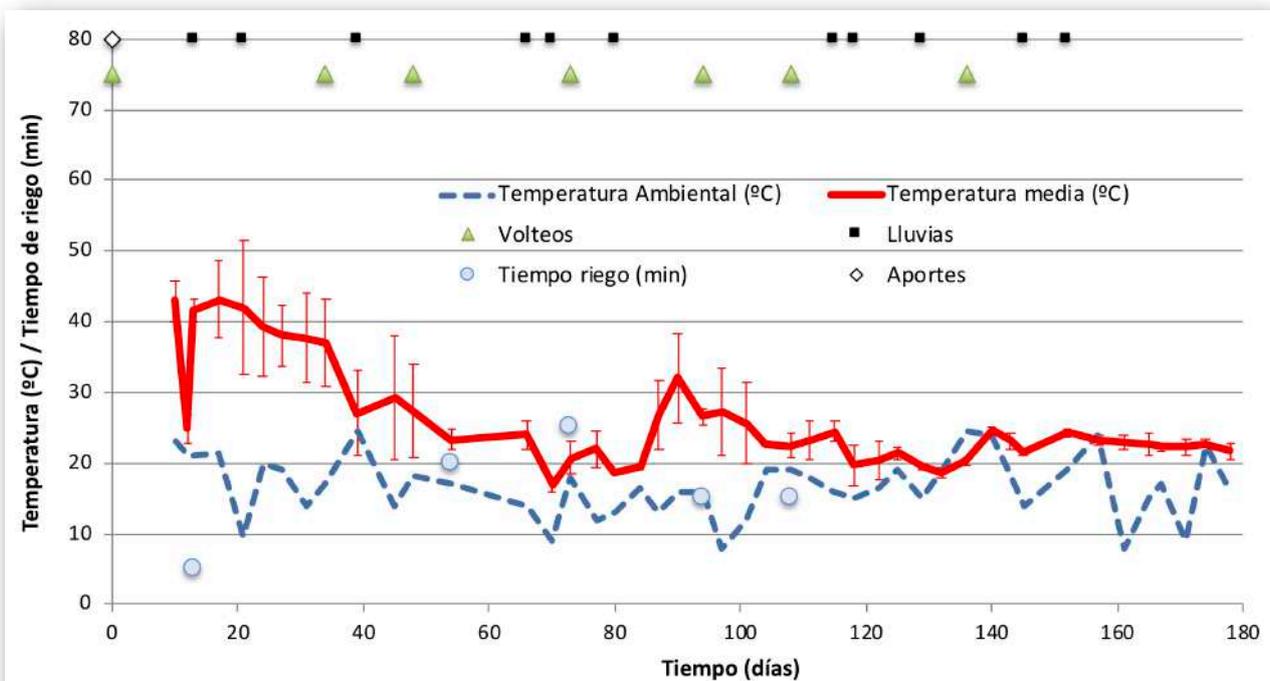


Formada por biorresiduos, estiércol fresco y lana en proporciones iguales.

No se tienen datos de los días inmediatamente posteriores al montaje de la pila, pero por la evolución se podría asumir que inicialmente alcanzó temperaturas medias claramente termófilas ($> 45\text{ }^{\circ}\text{C}$) para luego ir enfriándose paulatinamente, a causa principalmente de la pérdida de humedad del material.

La combinación de los riegos y los días de lluvia entre los días 60 y 80 de la prueba favorecieron una reactivación del proceso y un incremento puntual de la temperatura (Figura 1), señalando que el proceso no se había realizado hasta entonces en las condiciones óptimas.

Figura 1.- Evolución del proceso de compostaje de la Pila 1.

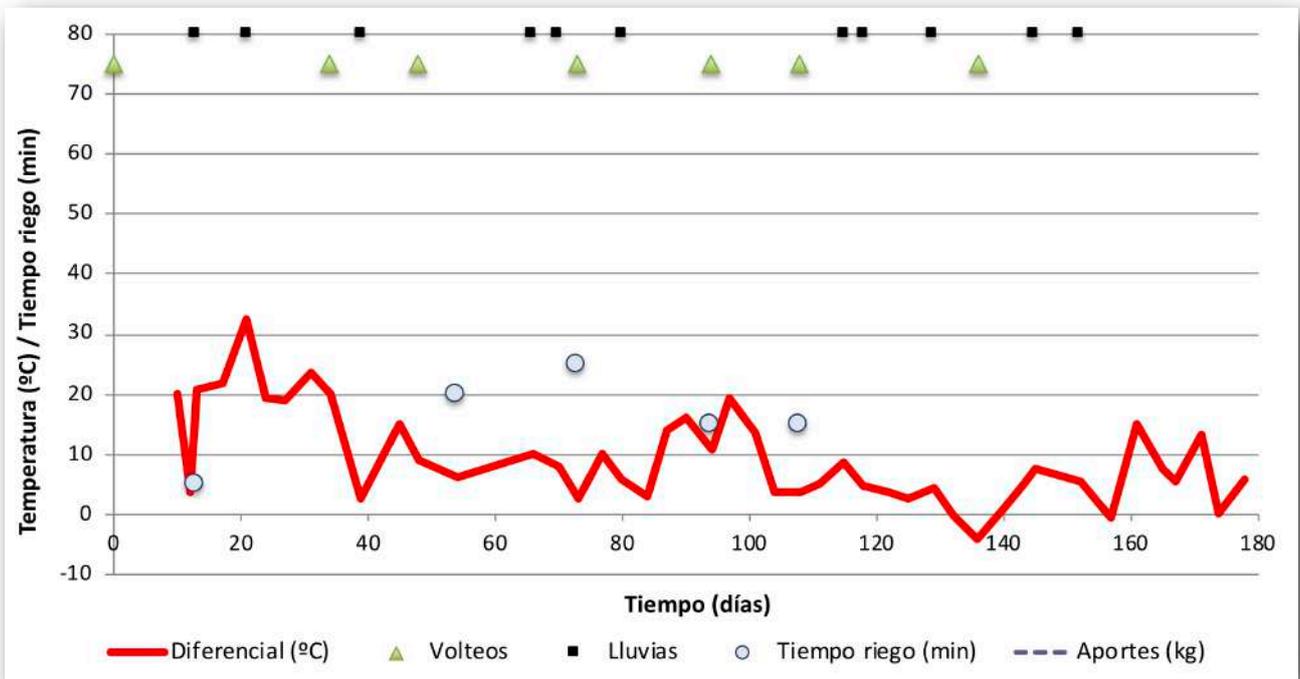




Ramón Plana - Dr. en Biología - Consultor en Tratamientos Biológicos de Residuos Orgánicos

Los siguientes riegos y volteos realizados no dieron aparentemente esa respuesta, pero en realidad coincidieron con un período de días donde la temperatura ambiental descendió por debajo de los 10 °C (Figura 1 y Figura 2), lo que afectó a la temperatura media de la pila. Tal y como se puede apreciar en la Figura 2, el diferencial de temperatura entre la media del material de la pila y la temperatura exterior sí muestra un incremento de hasta 20 °C el día 97 de prueba. A partir de ahí las acciones realizadas sobre la pila, volteos y/o riegos, ya prácticamente no provocan ninguna respuesta en el material. Los dos picos del diferencial de temperatura en los últimos 15 días de prueba (Figura 2) corresponden a variaciones fuertes de la temperatura ambiente medida en el momento del muestreo pero que no ha tenido efecto sobre la evolución de la temperatura media de la pila (Figura 1).

Figura 2.- Evolución del proceso de compostaje de la Pila 1 según el diferencial de temperaturas entre la media de la pila y la ambiental.





Ramón Plana - Dr. en Biología - Consultor en Tratamientos Biológicos de Residuos Orgánicos

6.2.- Pila 2

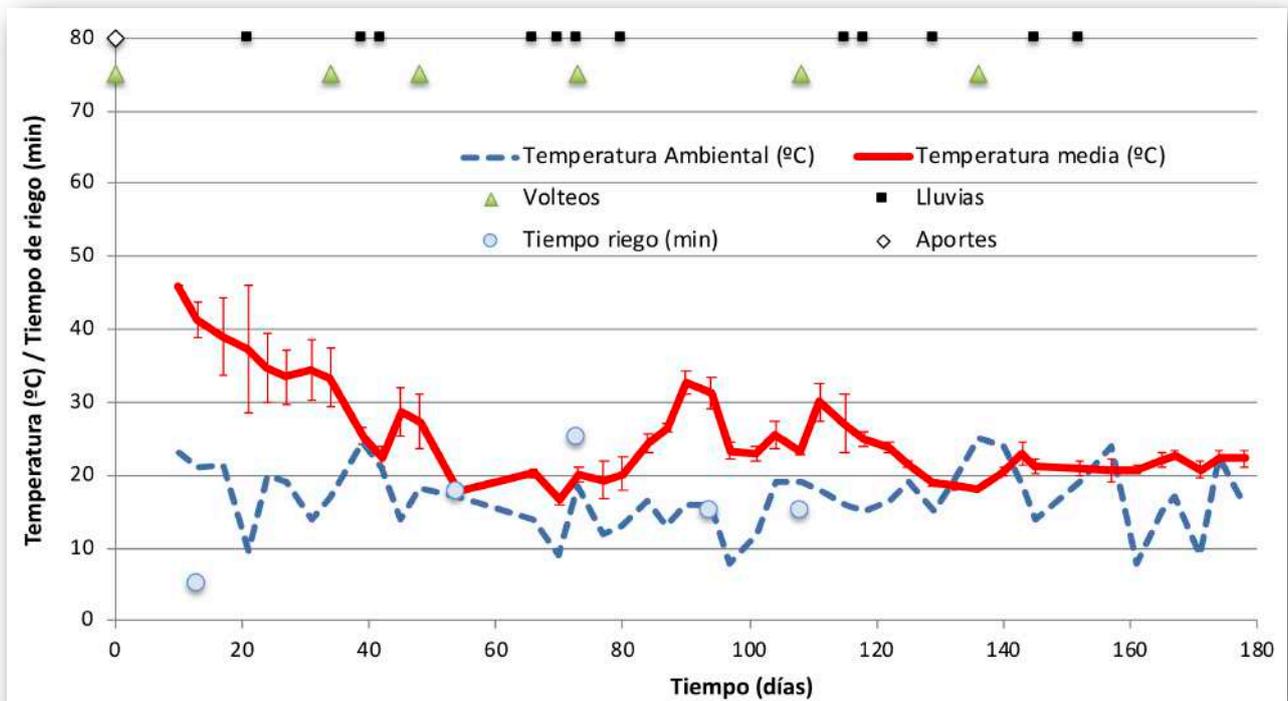


Compuesta por una mezcla a partes iguales de estiércol fresco, lana y restos de poda triturada.

Al igual que en la Pila 1 se observa que hubo un pico de temperatura en la primera semana seguido de un lento enfriamiento según se va perdiendo la humedad del material. Esto se percibe por la heterogeneidad de los valores de temperatura tras los primeros quince días de proceso y como estos se igualan aproximadamente a partir del día 50. Los riegos aportados no llegan a ser suficientes y es la combinación de estos con un período de lluvias entre los días 65 y 80 de la prueba, la que reactiva el proceso biológico que se refleja en la subida de temperatura en torno al día 90 (Figura 3). El riego posterior, en el día 108, vuelve a generar un repunte de la actividad, ligeramente lastrado por las lluvias de los días siguientes.

de lluvias entre los días 65 y 80 de la prueba, la que reactiva el proceso biológico que se refleja en la subida de temperatura en torno al día 90 (Figura 3). El riego posterior, en el día 108, vuelve a generar un repunte de la actividad, ligeramente lastrado por las lluvias de los días siguientes.

Figura 3.- Evolución del proceso de compostaje de la Pila 2.

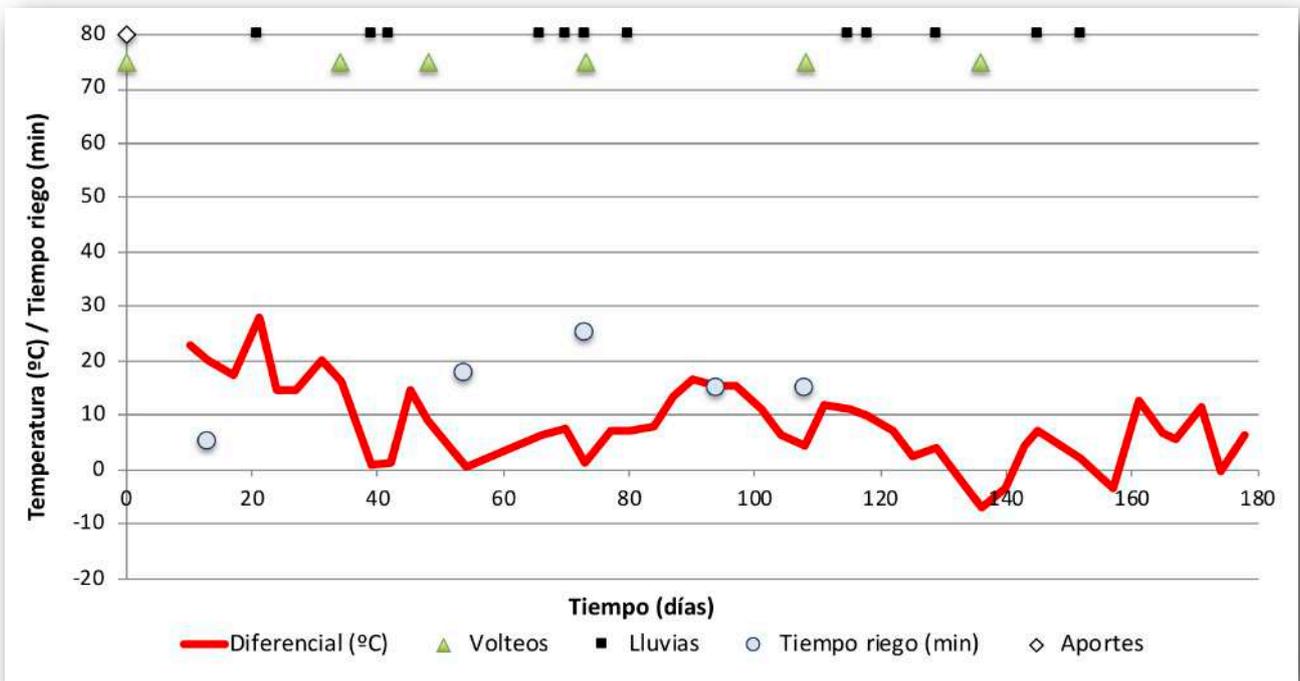




Ramón Plana - Dr. en Biología - Consultor en Tratamientos Biológicos de Residuos Orgánicos

En la Figura 4 se puede percibir como el último volteo en el día 136 de la prueba permite recuperar condiciones de proceso afectadas por la lluvia, ya que se monitoriza un incremento del diferencial de temperatura después de este. Los últimos dos días de lluvia (días 145 y 152) vuelven afectar a la temperatura de la pila (Figura 4), pero este aporte de humedad también permite recuperar la actividad biológica en las dos semanas finales.

Figura 4.- Evolución del proceso de compostaje de la Pila 2 según el diferencial de temperaturas entre la media de la pila y la ambiental.





Ramón Plana - Dr. en Biología - Consultor en Tratamientos Biológicos de Residuos Orgánicos

6.3.- Pila 3

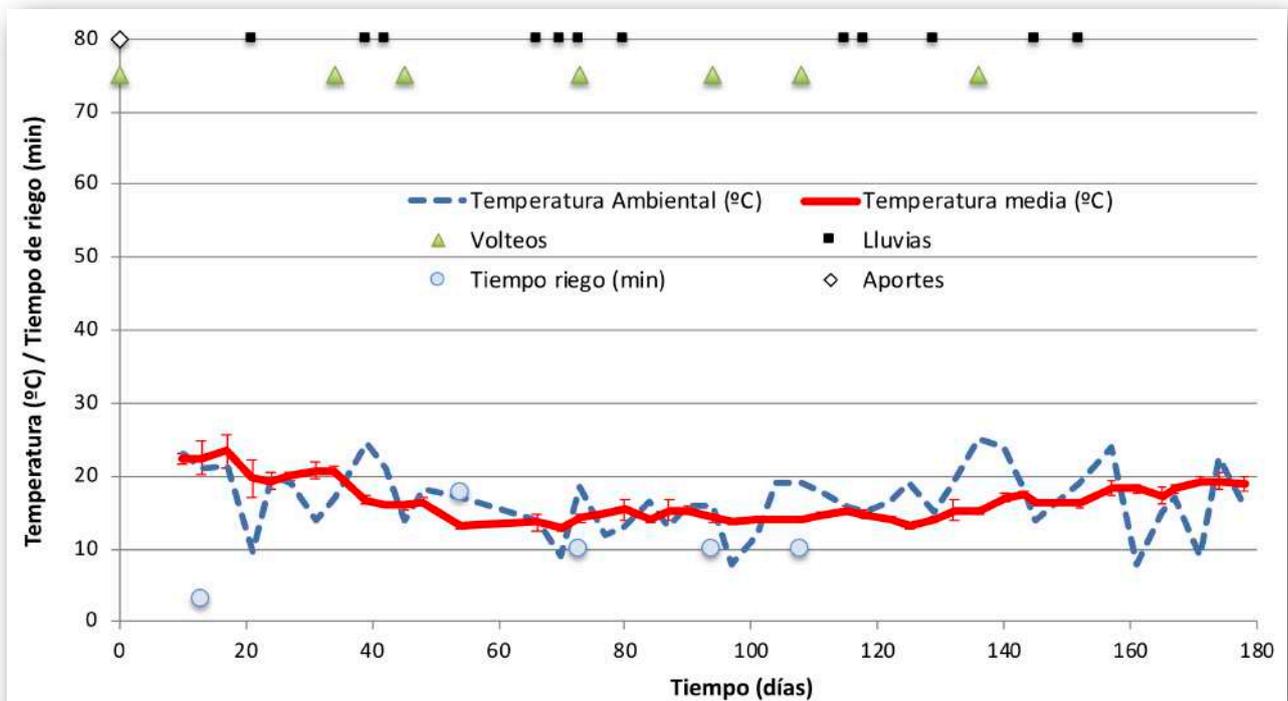


Formada por dos partes de estiércol fresco y una parte de lana de oveja.

La evolución de la temperatura en esta pila no ha reflejado en ningún momento la habitual fase termófila del proceso de compostaje (Figura 5). Los valores medidos en los tres puntos han sido muy similares a los de la temperatura ambiente y, en momentos, incluso inferior (Figura 6). Los riegos y volteos realizados no han provocado ninguna reacción en la actividad biológica del

material. La ausencia de un material estructurante en la pila ha sido determinante en la capacidad de mantener unas condiciones adecuadas para el compostaje en este caso.

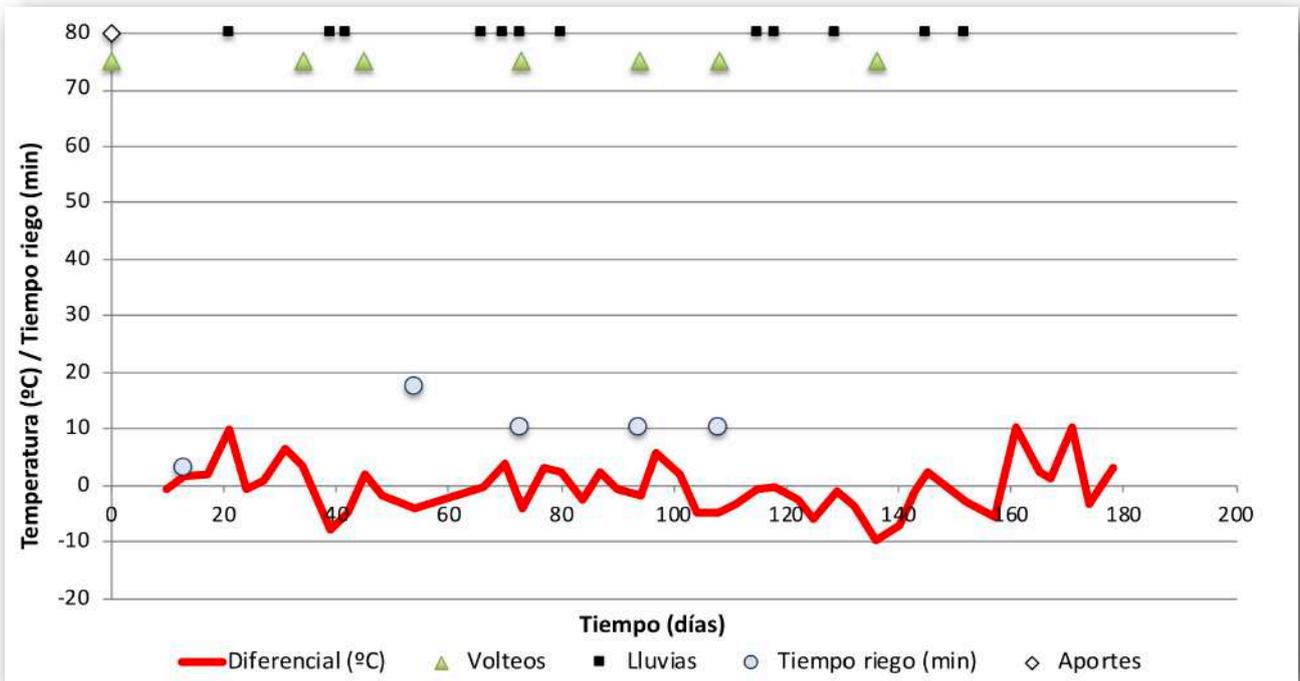
Figura 5.- Evolución del proceso de compostaje de la Pila 3.





Ramón Plana - Dr. en Biología - Consultor en Tratamientos Biológicos de Residuos Orgánicos

Figura 6.- Evolución del proceso de compostaje de la Pila 3 según el diferencial de temperaturas entre la media de la pila y la ambiental.





Ramón Plana - Dr. en Biología - Consultor en Tratamientos Biológicos de Residuos Orgánicos

6.4.- Pila 4

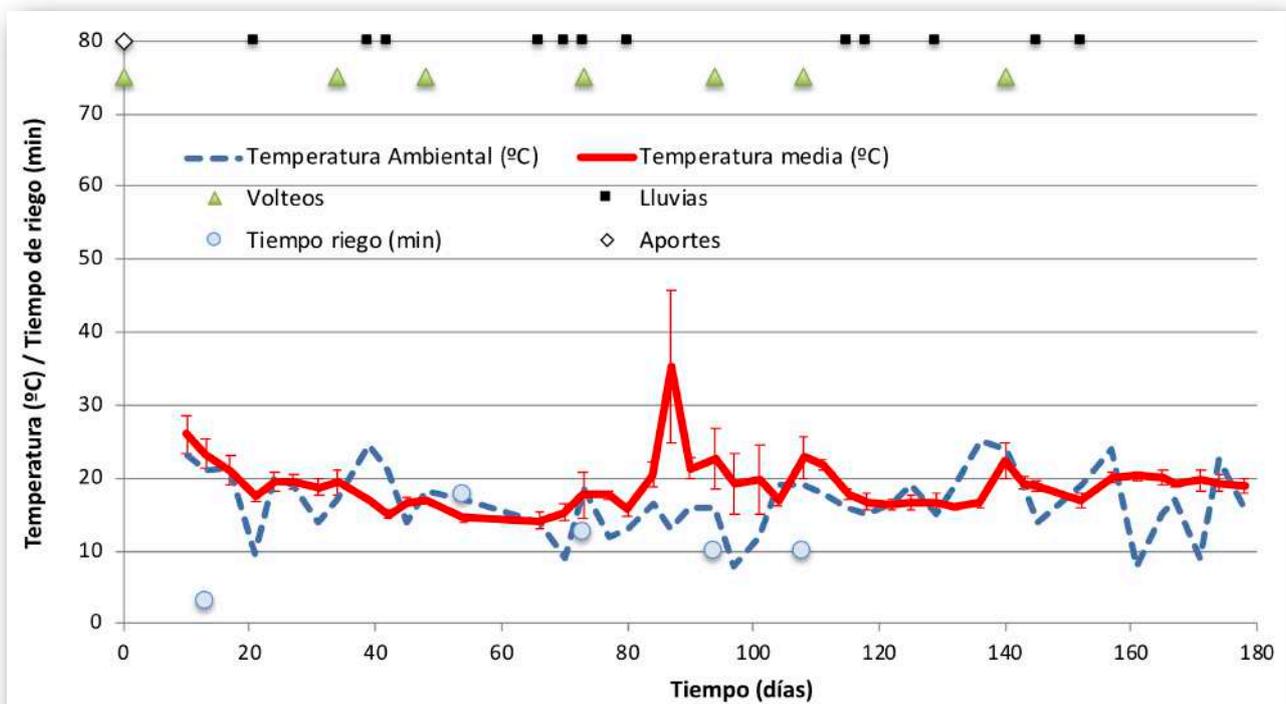


Formada también por estiércol, que en este caso había estado almacenado durante varios meses, y lana en una proporción volumétrica de dos partes de estiércol por cada parte de lana.

Al igual que en la Pila 3, las temperaturas medidas en la pila se mantuvieron en valores muy próximos a la temperatura ambiente en casi todo momento. Únicamente en torno al día 90 de la prueba se experimentó un pico de temperatura probablemente debido a una rehumectación del material de la pila por los días de lluvia anteriores (Figura 7). En cualquier caso, se trató de un incremento de actividad puntual, donde rápidamente se volvió a temperaturas muy moderadas, en torno a 20 °C.

Como en la Pila 3, la ausencia de un material estructurante y complementario, parece afectar negativamente a las condiciones de proceso.

Figura 7.- Evolución del proceso de compostaje de la Pila 4.

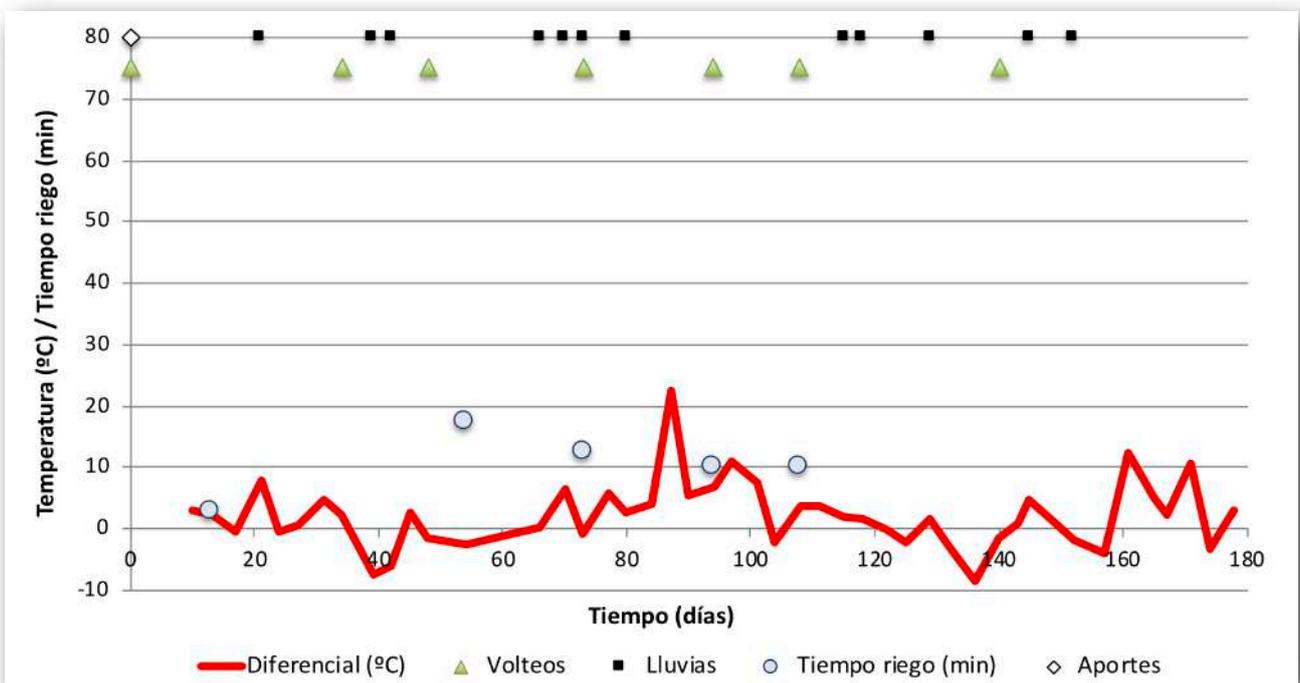




Ramón Plana - Dr. en Biología - Consultor en Tratamientos Biológicos de Residuos Orgánicos

Incluso los volteos y riegos posteriores (día 94 en adelante), no tienen un reflejo de actividad destacado (Figura 8). Tan solo las últimas lluvias y el volteo final parecen provocar una ligera respuesta en la actividad biológica en la pila, pero mínimas en cualquier caso. Es un comportamiento coincidente con la Pila 3, lo que apuntaría a una falta de capacidad de regulación de la humedad, al ser dependiente del agua aportada por la lluvia en las últimas semanas (Figuras 7 y 8). Esta sería una consecuencia más de la falta de material estructurante y complementario en la formación de la pila.

Figura 8.- Evolución del proceso de compostaje de la Pila 4 según el diferencial de temperaturas entre la media de la pila y la ambiental.





Ramón Plana - Dr. en Biología - Consultor en Tratamientos Biológicos de Residuos Orgánicos

6.5.- Pila 5

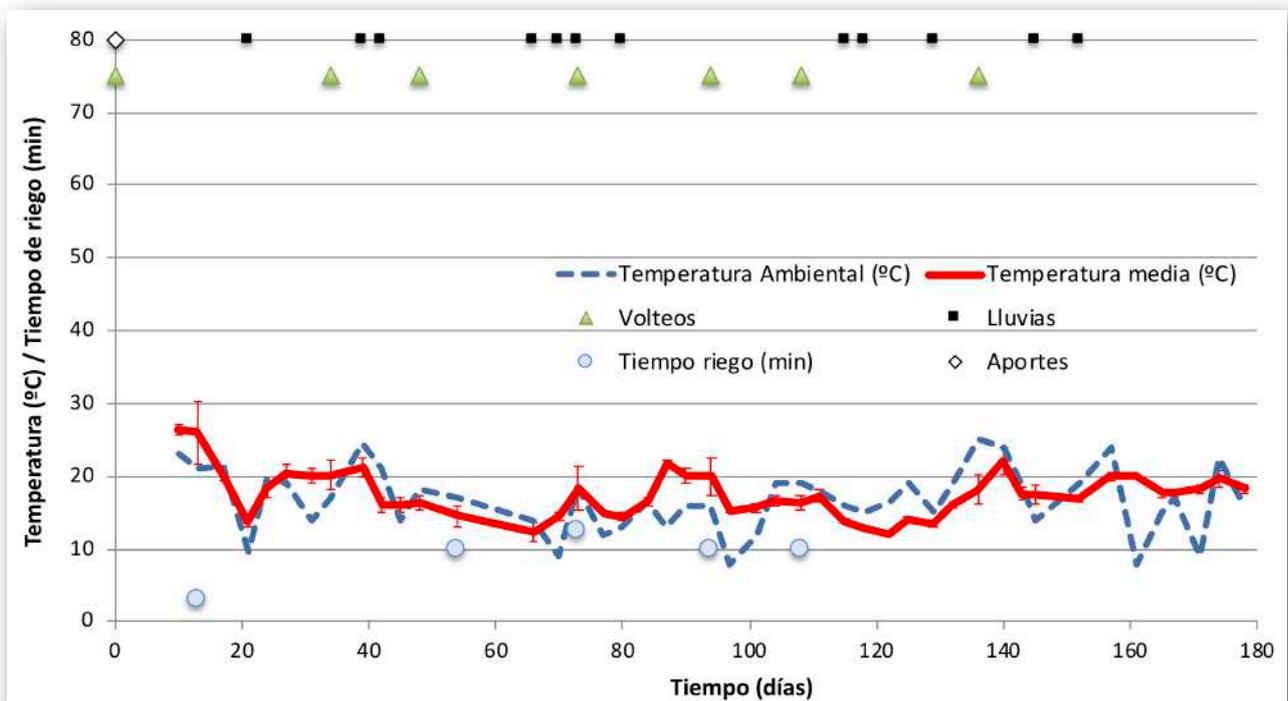


Esta podría considerarse como la “pila control”, ya que únicamente se formó con lana y restos de poda triturada (material estructurante).

Como se puede apreciar en la Figura 9, la evolución de la temperatura de la pila en los tres puntos medidos fue completamente pareja a la temperatura ambiente, sin que en ningún momento se evidenciara un incremento puntual de la actividad biológica en el

material. Este comportamiento evidencia la necesidad de aportar restos orgánicos de fácil degradación a las mezclas iniciales para conseguir una actividad biológica degradativa intensa que permita la descomposición de la lana.

Figura 9.- Evolución del proceso de compostaje de la Pila 5.

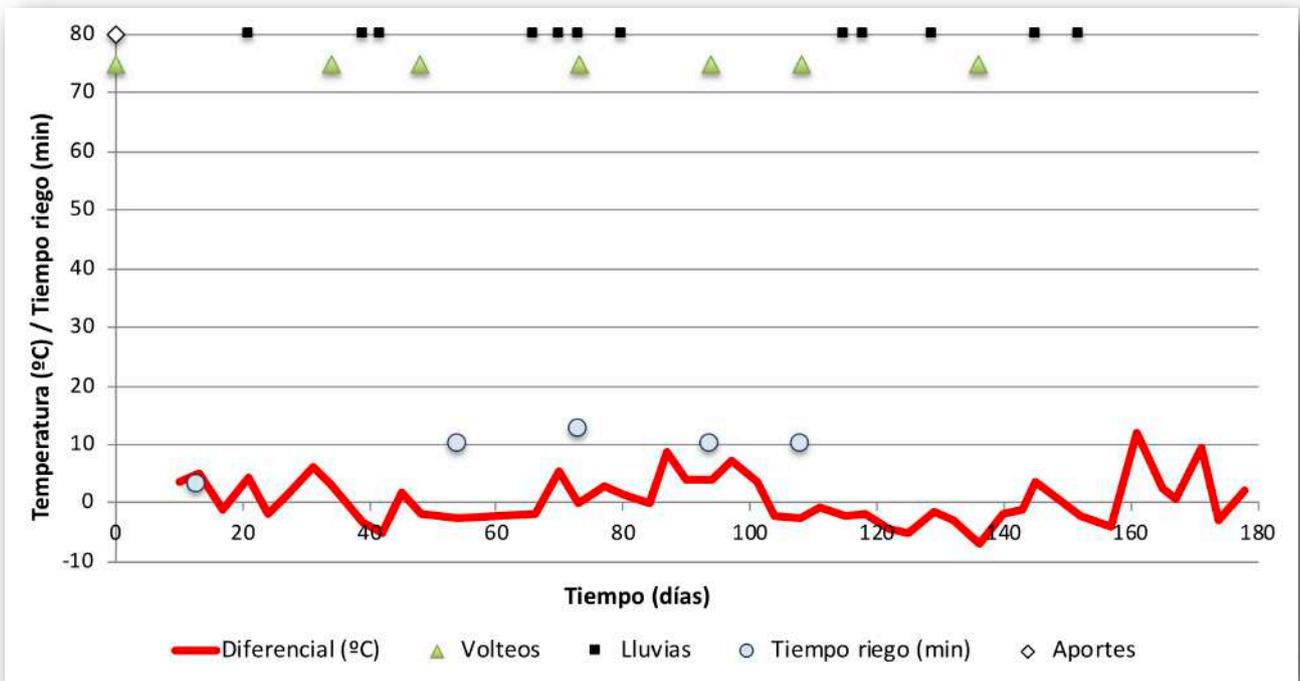




Ramón Plana - Dr. en Biología - Consultor en Tratamientos Biológicos de Residuos Orgánicos

Analizando la evolución del proceso desde el diferencial de temperaturas del material y la del ambiente presenta en casi todo momento un valor inferior a 10 °C. Los volteos y riegos prácticamente no parecen mostrar una respuesta de reactivación de la actividad biológica, lo que sería un indicador de una carencia en disponibilidad de materia orgánica fácilmente degradable para los microorganismos, ya provenga de los restos vegetales leñosos o de la lana de oveja.

Figura 10.- Evolución del proceso de compostaje de la Pila 5 según el diferencial de temperaturas entre la media de la pila y la ambiental.



En los días finales, nuevamente aparece a partir del día 156 un repunte de actividad, coincidente con el de las anteriores pilas. Al reproducirse este comportamiento en pilas con y sin estructurante, tendríamos una indicación sobre una falta de humedad común a todas ellas en estas semanas finales de la prueba. Ha sido el período de días con lluvia la causa de este incremento de la humedad a valores adecuados para reactivar los microorganismos presentes en esta y las demás pilas.



Ramón Plana - Dr. en Biología - Consultor en Tratamientos Biológicos de Residuos Orgánicos

6.6.- Pila 6

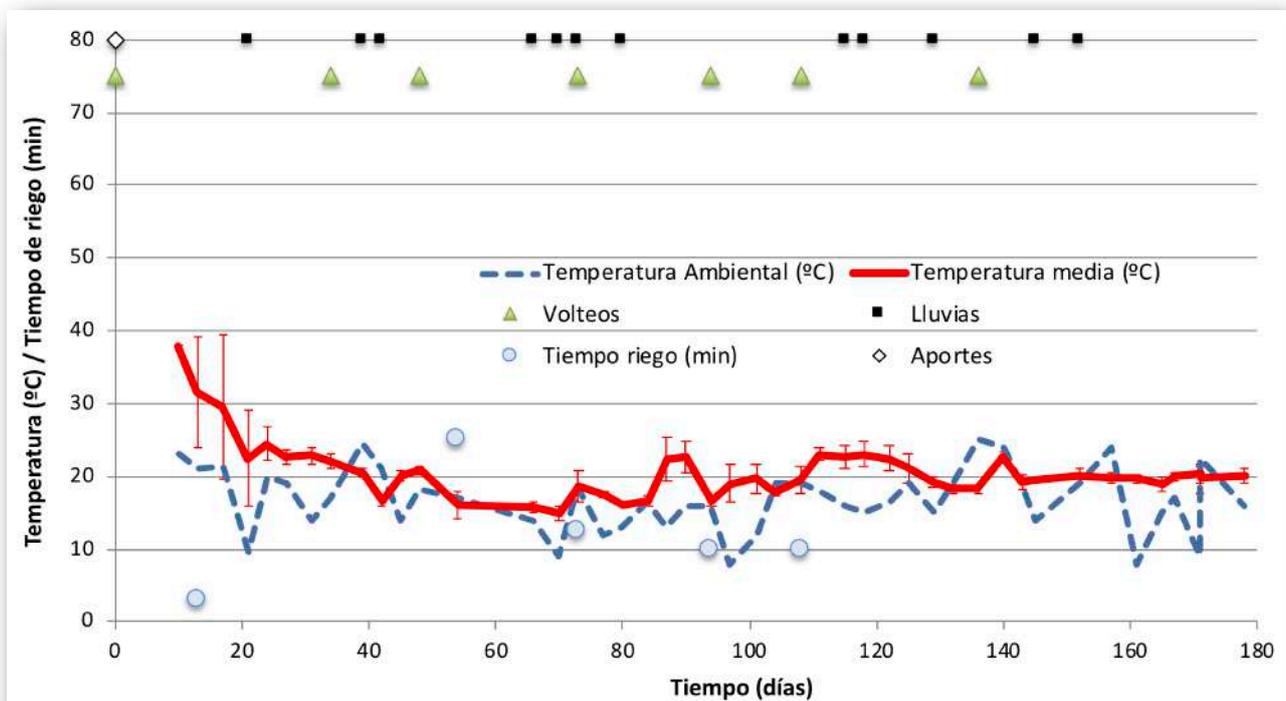


La mezcla inicial en esta pila estaba formada por lana (2 partes), poda triturada (2 partes), estiércol fresco (1 parte) y biorresiduos (1 parte).

Cuando se inicia la monitorización de la pila se observa que la temperatura del material está en descenso tras un pico inicial de temperatura que debió alcanzar valores termófilos (Figura 11). A partir del día 30 la temperatura media del material ya va pareja a la temperatura ambiente y, únicamente cuando se han dado varios días consecutivos de lluvia se ha producido suaves repuntes de la actividad biológica entre los días 85 y 90 (Figura 11).

Igualmente, en los últimos volteos con riego, se han medido repuntes de la temperatura y una mayor variabilidad de los valores medidos, especialmente entre los días 111 a 132 de la prueba (Figura 11).

Figura 11.- Evolución del proceso de compostaje de la Pila 6.

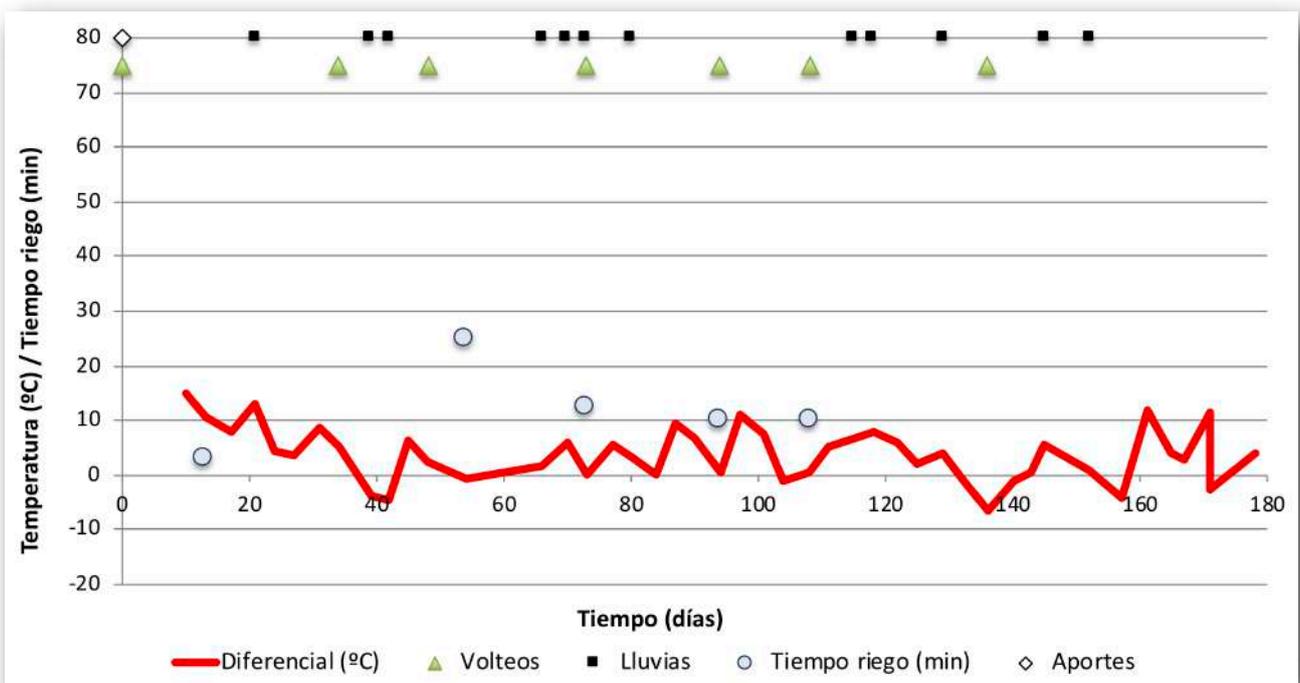




Ramón Plana - Dr. en Biología - Consultor en Tratamientos Biológicos de Residuos Orgánicos

Las lluvias de las últimas semanas parecen tener igualmente el mismo efecto en el repunte de la activación del material de la pila que el comentado para las anteriores pilas (Figura 12).

Figura 12.- Evolución del proceso de compostaje de la Pila 6 según el diferencial de temperaturas entre la media de la pila y la ambiental.





Ramón Plana - Dr. en Biología - Consultor en Tratamientos Biológicos de Residuos Orgánicos

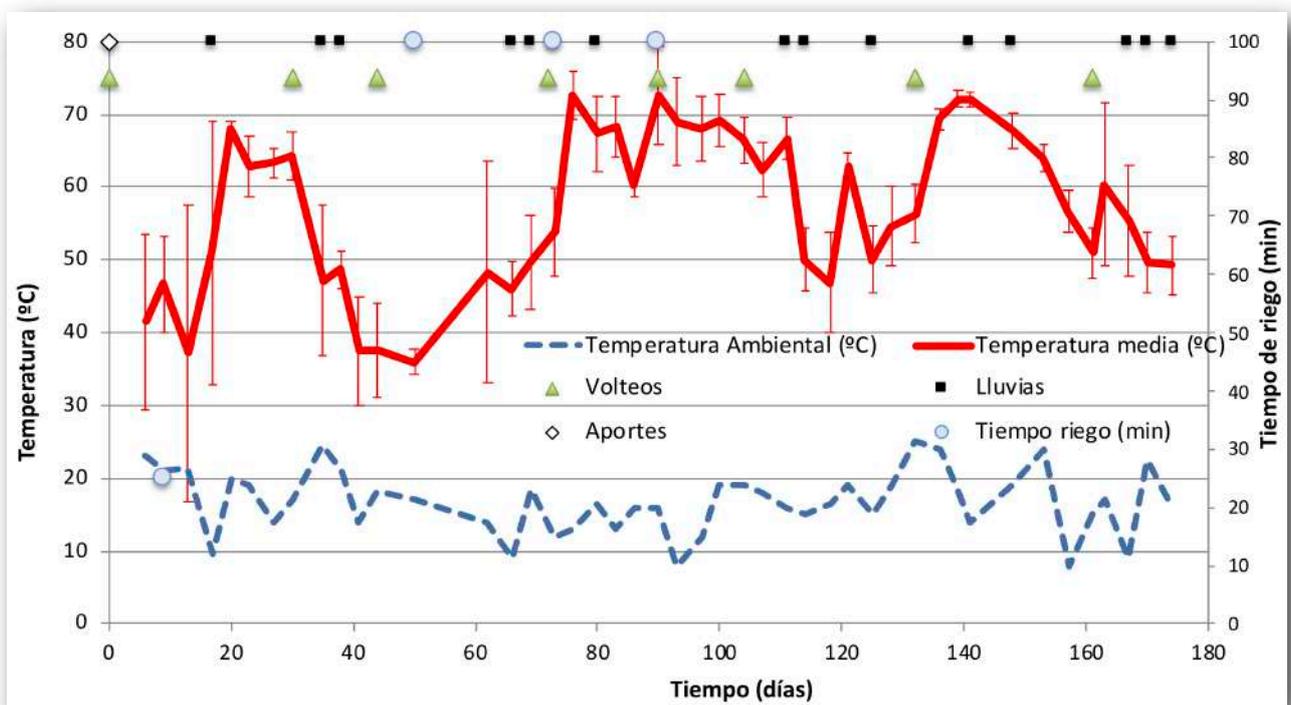
6.7.- Pila 7



A partir de aquí ya se trata de pilas de mayor tamaño cuya evolución se muestra claramente diferente a las anteriores, lo que demuestra la influencia del volumen y, especialmente, de la relación superficie/volumen de la pila en la evolución del proceso. Esta pila se formó con una mezcla de lana (4 partes), poda triturada (4 partes), estiércol viejo (2 partes), biorresiduos (1 parte) y restos de cosecha (1 parte).

Las temperaturas han sido claramente termófilas durante más de 75 días en tres periodos diferenciados (Figura 13). La pila se ha visto aparentemente afectada de forma negativa a alguno de los volteos (descenso de la temperatura del material), posiblemente porque no han ido acompañados de riegos simultáneos, lo que puede haber contribuido a una pérdida de humedad excesiva que ha limitado las condiciones de proceso. Cuando ha habido una combinación de riegos más intensos que en otras pilas, volteos y lluvias han mejorado la humedad del material (entre los días 60, 70 y 132), la actividad biológica ha vuelto a ser muy elevada alcanzando temperaturas medias en torno a los 70 °C.

Figura 13.- Evolución del proceso de compostaje de la Pila 7.

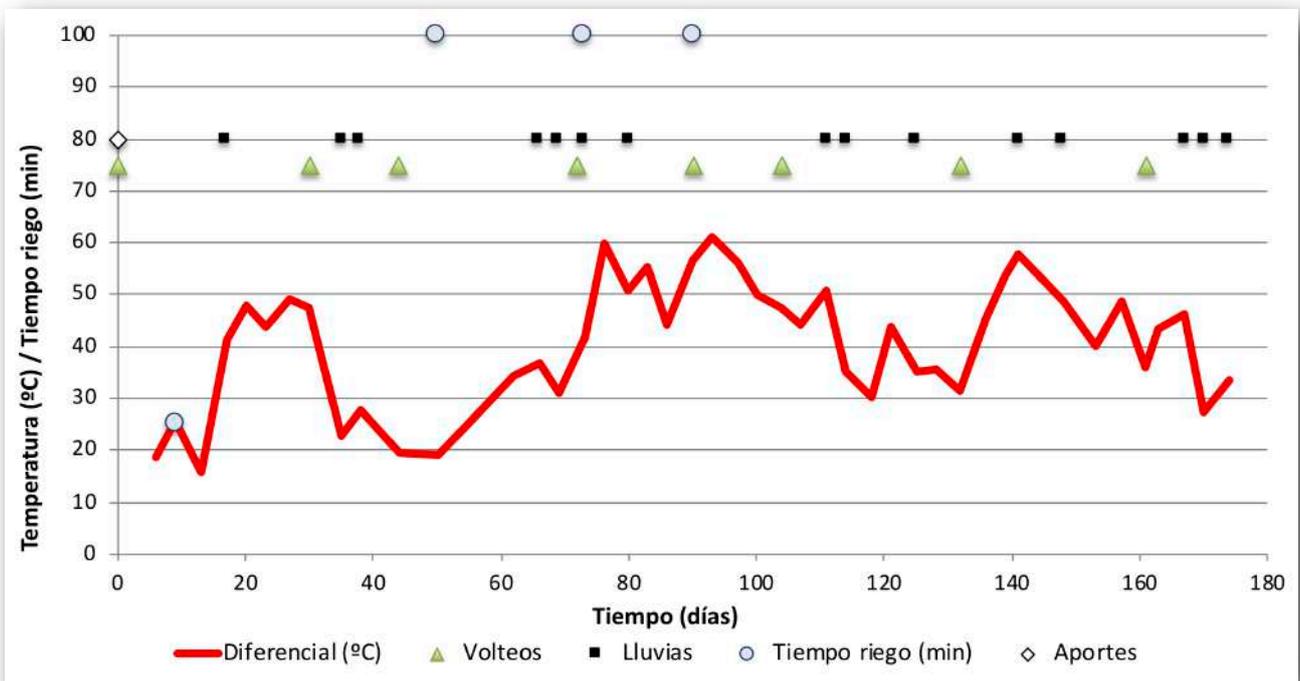




Ramón Plana - Dr. en Biología - Consultor en Tratamientos Biológicos de Residuos Orgánicos

Es especialmente significativo el incremento de temperatura que se registra a partir del día 132, cuando el volteo de la pila permite repartir de forma homogénea el exceso de humedad de las lluvias de las semanas anteriores, de tal forma que se mejoran las condiciones de proceso en toda la pila, permitiendo un rápido incremento de la actividad biológica que se mantiene durante unas dos semanas (Figuras 13 y 14). El último volteo provoca una respuesta mucho más leve, indicando que ya el proceso está entrando en una etapa que se puede considerar final, aunque la maduración pudiera extenderse por un período de tiempo más largo si se buscara una mayor madurez del compost.

Figura 14.- Evolución del proceso de compostaje de la Pila 7 según el diferencial de temperaturas entre la media de la pila y la ambiental.





Ramón Plana - Dr. en Biología - Consultor en Tratamientos Biológicos de Residuos Orgánicos

6.8.- Pila 8

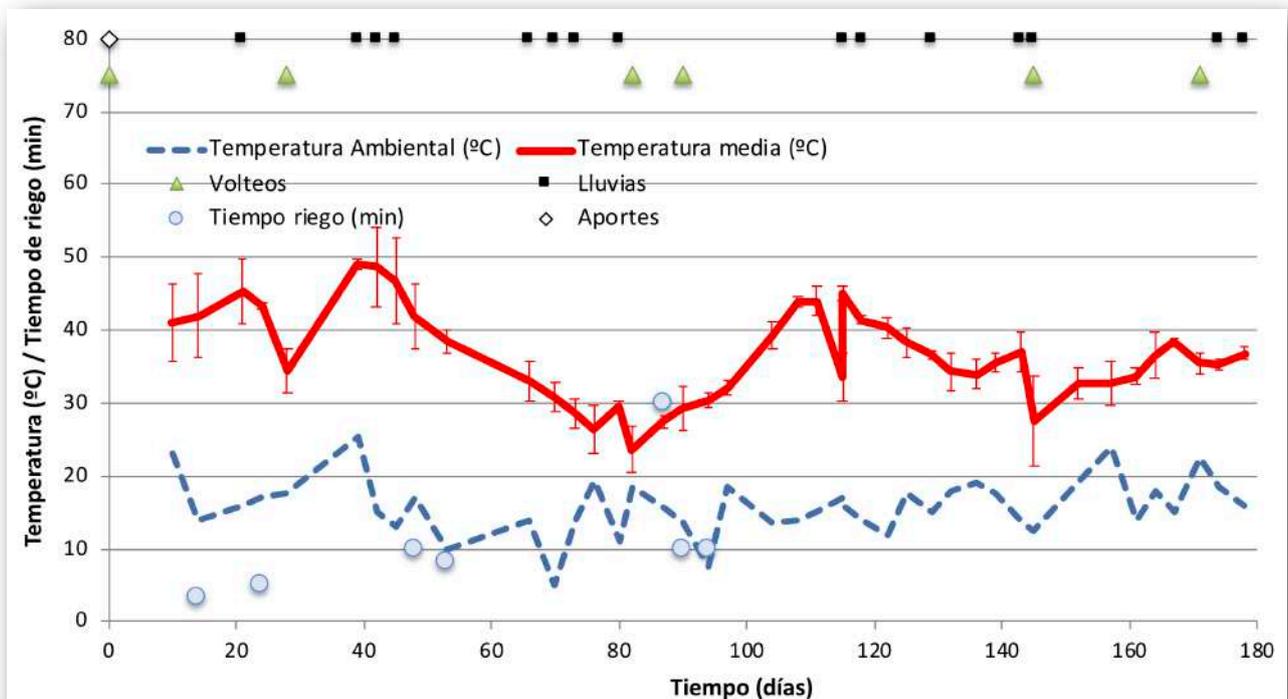


Pila de 6 m³ constituida por una mezcla de estiércol fresco con lana y un material complementario (virutas de madera y serrín) a partes iguales.

La evolución de la temperatura en este pila ha sido ligeramente intensa para su volumen, presentando una suave respuesta a los primeros volteos y riegos realizados. Los riegos sin volteos no han mostrado ningún efecto en el proceso y no ha sido hasta la combinación de días seguidos de lluvias, varios volteos y riegos la que ha relanzado la actividad biológica en el

material (Figura 15). El no mantener una forma adecuada de la pila en cuanto a una baja relación superficie/volumen ha afectado a la capacidad de conservar el calor generado en el proceso a partir del primer mes de ensayo. Hasta que no se voltea la pila en torno a los días 80-90 y se le da una altura correcta aportando además humedad, no se consigue reactivar el proceso biológico y obtener un incremento notable de la temperatura, indicando que hasta el momento la degradación biológica no había sido del todo eficiente. Los volteos posteriores ya no generan ninguna respuesta apreciable.

Figura 15.- Evolución del proceso de compostaje de la Pila 8.

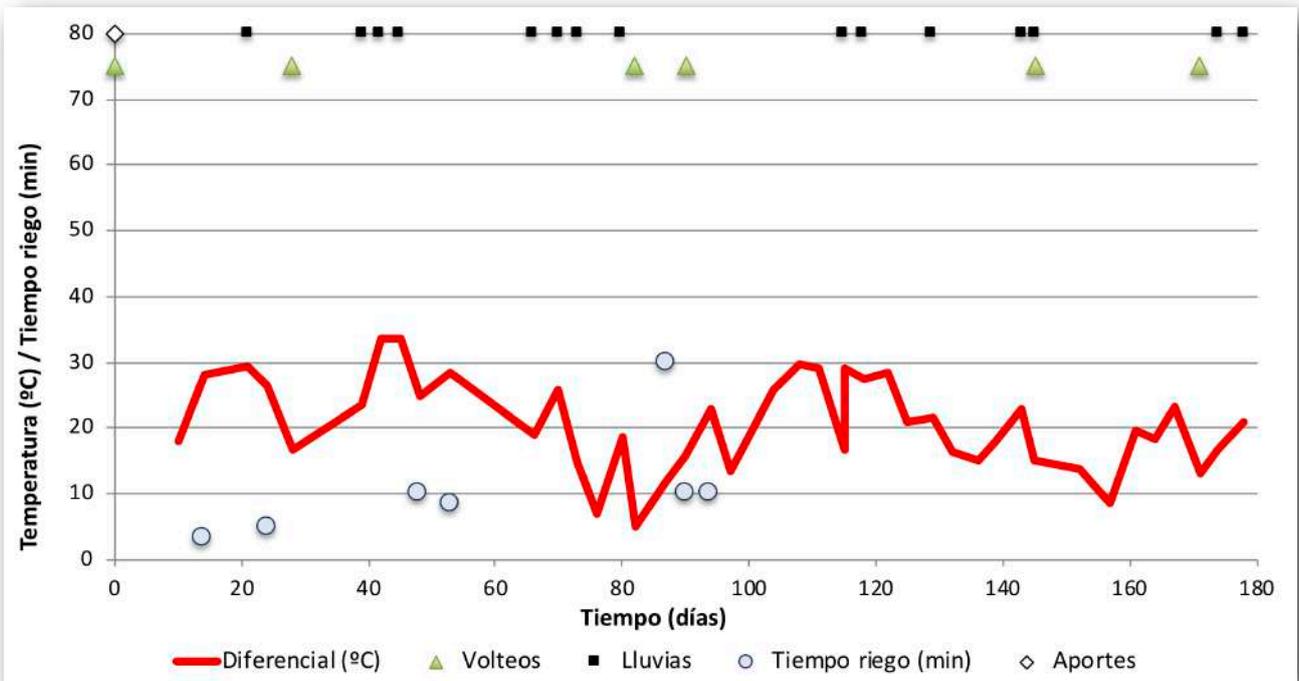




Ramón Plana - Dr. en Biología - Consultor en Tratamientos Biológicos de Residuos Orgánicos

Esta evolución también se refleja en el diferencial de temperatura con la ambiente (Figura 16), donde los volteos no parecen afectar especialmente a este parámetro más que para enfriamientos puntuales del material.

Figura 16.- Evolución del proceso de compostaje de la Pila 8 según el diferencial de temperaturas entre la media de la pila y la ambiental.





Ramón Plana - Dr. en Biología - Consultor en Tratamientos Biológicos de Residuos Orgánicos

6.9.- Pila 9

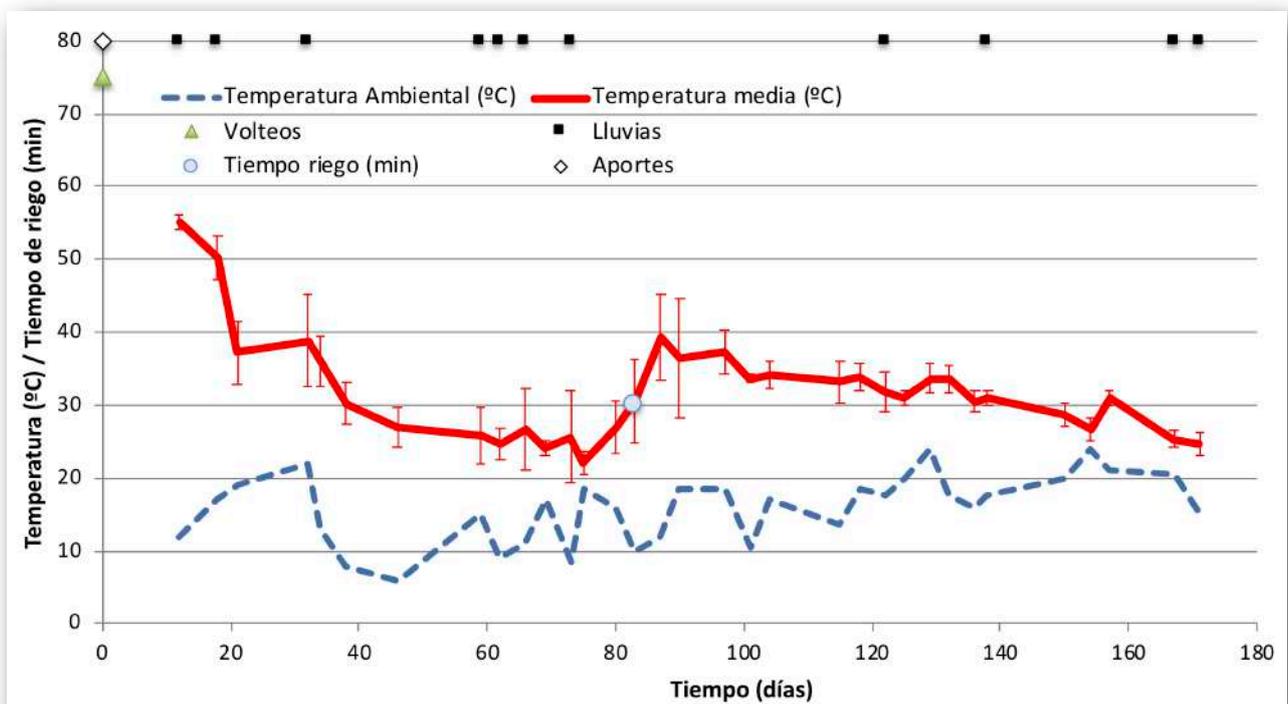


Pila formada con una mezcla de estiércoles, lana, poda y restos de paja que, en este caso, la hizo directamente el agricultor.

En la Figura 17 se puede apreciar claramente como cuando se inicia la monitorización el material había pasado por una fuerte subida de temperatura a valores termófilos y se encontraba ya enfriándose. No se realizaron volteos, por lo que no fue posible reactivar nuevamente el proceso. Únicamente el período de lluvias y el riego posterior realizado en el día 83, consiguieron un ligero incremento de la

temperatura media de la pila. A partir de ahí, y por la falta de acciones sobre el material, su temperatura fue descendiendo lentamente hasta alcanzar valores cercanos a los ambientales (Figuras 17 y 18)

Figura 17.- Evolución del proceso de compostaje de la Pila 9.

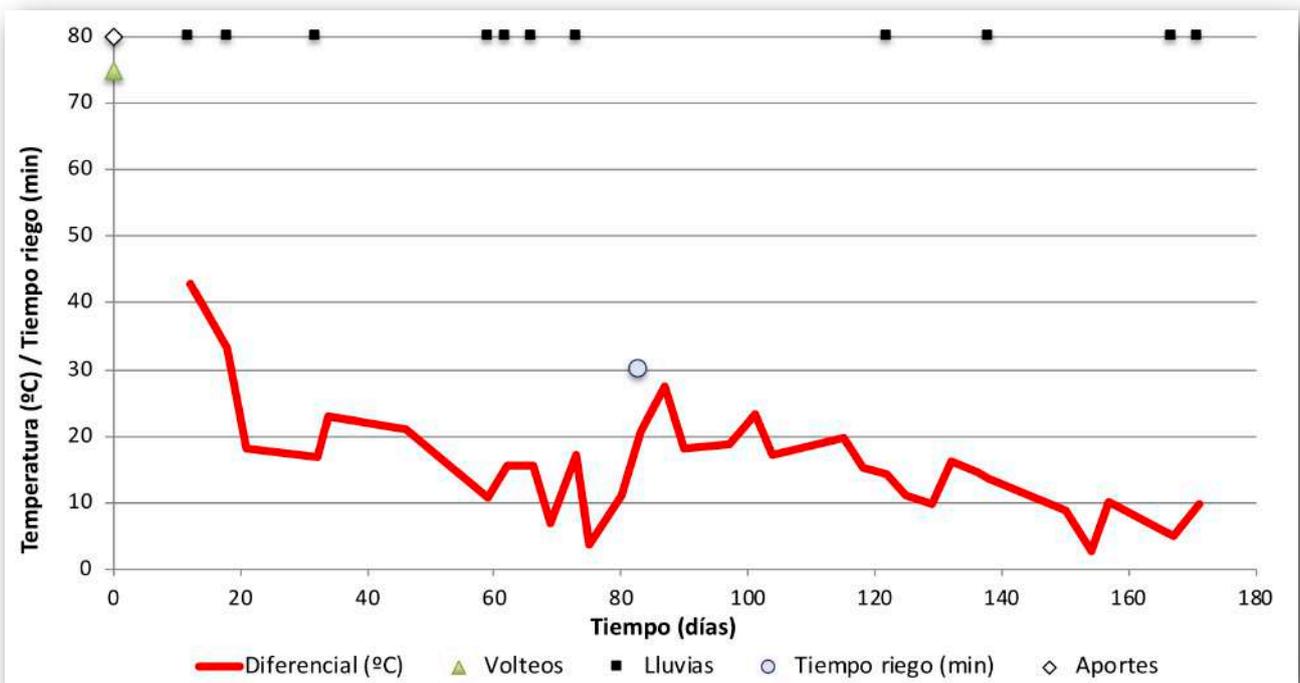




Ramón Plana - Dr. en Biología - Consultor en Tratamientos Biológicos de Residuos Orgánicos

Dado que esta pila no fue manejada correctamente, atendiendo a las recomendaciones del personal técnico responsable del seguimiento y monitorización de las pilas, no se tomó muestra del producto final para su análisis.

Figura 18.- Evolución del proceso de compostaje de la Pila 9 según el diferencial de temperaturas entre la media de la pila y la ambiental.





Ramón Plana - Dr. en Biología - Consultor en Tratamientos Biológicos de Residuos Orgánicos

7.- Analíticas

Al finalizar el tiempo de experimentación de cada pila, excepto de la Pila 9, se tomaron muestras representativas del compost resultante para su análisis en laboratorio. Todas las muestras fueron enviadas al laboratorio *Eurofins* (Lleida) donde fueron analizadas para una serie de parámetros físico-químicos que permitieran obtener una información real sobre las características de cada compost. En la Tabla 10 se muestran los resultados de estos análisis.

Tabla 10.- Resultados de los parámetros analizados en los compost obtenidos (s.m.f. = sobre masa fresca; s.m.s. = sobre masa seca).

Parámetros	Pila 1	Pila 2	Pila 3	Pila 4	Pila 5	Pila 6	Pila 7	Pila 8	Unidades
Materia orgánica (MO)	24,0	25,0	34,1	38,1	38,6	22,1	43,9	37	% (s.m.s.)
Humedad	45,2	38,1	40,1	42,4	46,0	44,1	18,3	40,3	% (s.m.f.)
pH	7,8	7,5	7,3	7,1	7,7	7,8	8	7,5	Uds. pH
Conductividad Eléctrica	1,48	2,01	2,23	5,43	3,76	1,58	5,22	1,51	dS·m ⁻¹
Macronutrientes									
Nitrógeno Total (N)	1,0	0,75	1,18	1,53	1,8	0,8	1,88	0,92	% (s.m.s.)
N. amoniacal	0,07	0,06	0,09	0,16	0,1	0,1	0,3	0,08	% (s.m.s.)
N orgánico	0,93	0,69	1,09	1,38	1,7	0,7	1,59	0,84	% (s.m.s.)
Relación C/N	12,87	18,17	15,64	13,83	11,73	14,85	13,82	21,9	-
Potasio Total (K)	1,03	0,93	1,0	1,55	2,0	1,1	2,32	1,17	% (s.m.s.)
Fósforo Total (P)	0,19	0,16	0,3	0,2	0,2	0,2	0,31	0,29	% (s.m.s.)
Carbono total	13,9	14,5	19,8	22,1	22,4	12,8	25,5	21,3	% (s.m.s.)
Micronutrientes									
Calcio (Ca)	8,93	10,1	8,15	7,47	4,0	9,5	8,99	10,7	% (s.m.s.)
Magnesio (Mg)	0,89	0,97	0,86	0,84	0,5	1,0	0,76	1,54	% (s.m.s.)
Hierro (Fe)	1,14	1,24	1,13	1,01	1,1	1,7	1,13	1,46	% (s.m.s.)
Metales pesados									
Cadmio (Cd)	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	mg·kg ⁻¹ (s.m.s)
Cobre (Cu)	21,6	21,4	26,5	<20	27,1	25	31	32,1	mg·kg ⁻¹ (s.m.s)
Cromo (Cr)	18,6	18,2	17,9	16,1	20,6	26,6	17,1	27,2	mg·kg ⁻¹ (s.m.s)
Mercurio (Hg)	<0,4	<0,4	<0,4	<0,4	<0,4	<0,4	<0,4	<0,4	mg·kg ⁻¹ (s.m.s)
Níquel (Ni)	11,3	11,8	12,4	10,1	10,8	15,4	10,4	14,6	mg·kg ⁻¹ (s.m.s)
Plomo (Pb)	9,62	10,7	10,6	9,03	7,91	17,4	8,4	16,5	mg·kg ⁻¹ (s.m.s)
Zinc (Zn)	73	64	95	59	74	76	130	99	mg·kg ⁻¹ (s.m.s)



Ramón Plana - Dr. en Biología - Consultor en Tratamientos Biológicos de Residuos Orgánicos

7.1.- Interpretación normativa

A la hora de interpretar estos resultados, el primer paso consistió en determinar cuales de estas ocho muestras cumplían con la normativa específica que regula el compost como producto fertilizante (RD 506/2013) o como sustrato (RD 865/2010). Se ha de considerar que por la limitación del presupuesto no se analizaron ciertos parámetros como el contenido en patógenos, que, tal y como se ha explicado en el apartado correspondiente al marco normativo, son limitantes en ambos Decretos. Para los parámetros limitantes, desde el punto de vista legal, que sí fueron analizados (humedad, materia orgánica y relación C/N) se presentan en la Tabla 11, donde se indican aquellas muestras que no cumplirían alguno de los límites.

Tabla 11.- Valores limitantes de los parámetros exigidos en el RD 865/2010 y el RD 506/2013 para el reconocimiento legal de un producto como “compost” y los resultados para estos en las muestras analizadas de las pilas (s.m.f. = sobre masa fresca; s.m.s. = sobre masa seca). Los valores que no cumplen alguno de los límites marcados se señalan con *.

	Materia orgánica (% s.m.s.)	Humedad (% s.m.f.)	Relación C/N	Categoría legal
RD 865/2010	> 20	-	-	
RD 506/2013	> 35	< 40	< 20	
Pila 1	24*	45,2*	12,87	Sustrato
Pila 2	25*	38,1	18,17	Sustrato
Pila 3	34,1*	40,1*	15,64	Sustrato
Pila 4	38,1	42,4*	13,83	Fertilizante
Pila 5	38,6	46*	11,73	Fertilizante
Pila 6	22,1*	44,1*	14,85	Sustrato
Pila 7	43,9	18,3	13,82	Fertilizante
Pila 8	37	40,3*	21,9*	Sustrato
No cumplen	4	6	1	

* = valores que no cumplen los límites legales de uno de los RD.

En una primera revisión de los resultados mostrados en la Tabla 11, encontraríamos que únicamente la muestra de la Pila 7 cumple con los requisitos normativos para poder ser considerada legalmente como “compost” tanto bajo la normativa de sustratos como para la de productos fertilizantes. Sin embargo, hay seis muestras que no cumplen el RD 506/2013 por presentar valores de **humedad** superiores al 40 %. Este es el parámetro más sencillo de corregir dejando simplemente secar el material. Por tanto, se debe centrar la revisión en los otros dos parámetros:



Ramón Plana - Dr. en Biología - Consultor en Tratamientos Biológicos de Residuos Orgánicos

- **Materia orgánica:** Hay cuatro muestras que no alcanzan el valor mínimo de 35 % (s.m.s.) que marca el RD 506/2013 para considerar el compost como producto fertilizante. Sin embargo, todas las muestras cumplen para el RD 865/2010 de sustratos (valor mínimo de 20 % s.m.s.). Este parámetro es una indicación de la eficiencia del proceso, pero también del manejo de las pilas cuando se realizan los volteos y/o traslados. En el contexto en que se constituyeron y manejaron estas pilas, en terreno de las granjas y directamente sobre el suelo, es extremadamente habitual que en cada volteo o traslado se acabe mezclando el material de la pila con tierra, ya que el personal que maneja la pala o tractor tiene que ser especialmente hábil para evitar coger parte del suelo cuando carga el cazo de la pala. En la evaluación de los resultados de estas pruebas para este parámetro hemos de asumir que los bajos contenidos en materia orgánica vienen tanto por la evolución del proceso como por la aportación de tierra (y por tanto aporte de materia mineral) en los manejos de las pilas.
- **Relación C/N:** Solo una de las muestras tiene una relación C/N superior a 20, el límite que marca el RD 506/2013, pero no es un parámetro limitante para el RD 865/2010. En su evaluación hemos de considerar que tanto los aportes de residuos nitrogenados no han sido extremos y que, en las proporciones de mezcla con otros materiales, no solo la poda contribuía a equilibrar el contenido en carbono disponible para los microorganismos, si no los restos de cosecha y la propia lana también resultan fuentes de carbono que contribuyen a reducir las pérdidas de Nitrógeno por volatilización.

Por tanto, si se descarta la humedad por ser un parámetro que se puede corregir fácilmente, todas las muestras cumplirían al menos para ser consideradas como un sustrato por RD 865/2010 y tres de ellas (Pilas 4, 5 y 7) podrían considerarse también dentro de la denominación de “fertilizante” por el RD 506/2013. Como ya se ha comentado, al no haberse realizado ningún análisis de **patógenos**, quedaría por conocer si estas muestras cumplen con los diferentes requerimientos de ambas normativas para estos parámetros para poder tener la certeza de que legalmente se podrían considerar “compost”.

En cuanto al contenido en **metales pesados**, todas las muestras presentan concentraciones para todos ellos por debajo de los límites legales de la Clase A. Esta máxima clase legal, que solo atiende a la concentración en metales pesados, los haría aptos, inicialmente, para cualquier uso agrícola, incluso en agricultura ecológica. Esto también es un indicador de que los residuos orgánicos empleados en la prueba tienen unas concentraciones en metales pesados muy bajas, lo que los hace especialmente aptos en la elaboración de compost enfocados a su uso en cultivos ecológicos.



Ramón Plana - Dr. en Biología - Consultor en Tratamientos Biológicos de Residuos Orgánicos

7.2.- Interpretación analítica

Por los resultados de los parámetros de las ocho analíticas realizadas podemos alcanzar algunas consideraciones o conclusiones preliminares de estos resultados.

Ante todo, se debe considerar que el proceso de compostaje se ha realizado mediante el sistema de tratamiento más simple: pilas volteadas con pala. Esto afecta directamente a las condiciones de proceso, donde la capacidad de control de ciertos parámetros es muy limitada, por lo que, esa menor eficiencia en el proceso degradativo se compensa con un tiempo de tratamiento más prolongado. Pero aún así, estas condiciones se reflejan en alguno de los parámetros analíticos del compost final. Este es el caso del pH y del contenido en materia orgánica.

Los valores de **pH**, ligeramente alcalinos, indican que el proceso se ha ralentizado y todavía necesitaría completar algunas semanas más para alcanzar una maduración más completa de la materia orgánica. Por otra parte, el contenido en **materia orgánica**, es relativamente bajo en casi todas las pilas (excepto la Pila 7), estando en algunos casos por debajo del límite legal para un compost como fertilizante, como ya se explicó en el anterior apartado. Las causas de esta evolución estarían más ligadas a la aportación de tierra en los volteos y traslados que en una mayor eficiencia degradativa. El referente sería la Pila 7, que podríamos considerar la que presentó una mejor evolución en todos los parámetros de proceso medidos, y que es la que presenta unos valores más altos en materia orgánica (y pH).

La **conductividad eléctrica** se presenta en valores generalmente moderados, lo que es una ventaja a la hora de evitar limitaciones de los usos potenciales del compost. Los valores más elevados (entre 5 y 6 $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$) parecen estar relacionados con la presencia de estiércol viejo y/o biorresiduos en las mezclas. Las frecuentes lluvias en las etapas finales de la prueba pudieran haber sido también uno de los motivos de reducción de este parámetro debido al lavado de las sales presentes en las pilas.

En cuanto al contenido en **macronutrientes**, estos están principalmente ligados a las características de los residuos empleados en las mezclas, pero también a las condiciones de proceso. Una correcta relación C/N, pero también una evolución adecuada de la degradación biológica en cuanto a temperatura y condiciones aerobias, mejora notablemente la capacidad de retener estos macronutrientes en el compost final. Nuevamente, el mejor ejemplo es la Pila 7, donde los contenidos en macronutrientes (NPK) son los más altos en comparación con el resto de compost analizados.

Sobre los **metales pesados**, como ya se comenta en el apartado anterior, se ha obtenido en todas las muestras valores de concentración por debajo de la limitación legal más exigente (Clase A), lo que les confiere una calidad máxima únicamente desde el punto de vista normativo (ver apartado siguiente).



Ramón Plana - Dr. en Biología - Consultor en Tratamientos Biológicos de Residuos Orgánicos

Faltaría realizar análisis de la **estabilidad de la materia orgánica** de estos compost, así como de presencia de **microorganismos patógenos** (fundamentalmente *Escherichia coli* y *Salmonella spp*) para poder tener plenas garantías de cumplimientos de los requisitos legales, así como para poder dar una adecuada recomendación de uso o aplicación de estos compost.

7.3.- Influencia de las mezclas iniciales

Para intentar determinar si existía alguna relación entre las diferentes mezclas de materiales y las características de los compost obtenidos, se siguió una metodología rigurosa para identificar las correlaciones entre ambos grupos de parámetros. El primer paso consistió en limpiar los datos, eliminando valores atípicos y gestionando los datos faltantes. Luego, se estandarizaron los datos para asegurar su comparabilidad.

Se realizó un primer análisis descriptivo de los datos mostró las características y distribuciones de cada parámetro, utilizando histogramas para visualizarlos. Posteriormente, se aplicó la correlación de Pearson para evaluar las relaciones lineales entre los parámetros cuantitativos. Además, se realizó un Análisis de Componentes Principales (PCA) para reducir la dimensionalidad de los datos y observar patrones entre las mezclas de materiales.

Inicialmente, se identificaron correlaciones significativas entre ciertos parámetros. Por ejemplo, se observó una correlación positiva entre la materia orgánica y el contenido de estiércol viejo o de lana, así como una correlación negativa entre el contenido en nitrógeno y el estiércol fresco. Sin embargo, al profundizar en el análisis, se descubrió que muchas de estas correlaciones perdían su significancia cuando se consideraban en el análisis otras variables no cuantificables como el manejo y las condiciones del proceso de compostaje.

Esta circunstancia reafirmó que las propiedades analíticas de estos compost no solo dependen de las mezclas de materiales, sino también de factores operativos y ambientales. Variables como la temperatura, la humedad del entorno, la aireación y prácticas específicas de manejo mostraron tener un impacto significativo en los resultados analíticos. La variabilidad introducida por estos factores no controlados pudo haber enmascarado las verdaderas relaciones entre las mezclas de materiales y las propiedades del compost.

De este modo, las conclusiones iniciales sobre la optimización de mezclas de materiales, aunque indicativas, debieron ser reconsideradas debido a estas influencias externas. La correlación entre parámetros específicos y mezclas de materiales resultó ser menos robusta cuando se tuvieron en cuenta las variables de proceso no medidas.



Ramón Plana - Dr. en Biología - Consultor en Tratamientos Biológicos de Residuos Orgánicos

Para obtener conclusiones más precisas, es necesario o aumentar notablemente el número de réplicas (pilas) analizadas y/o tener una monitorización continua y con detalle de las variables de proceso clave junto con los parámetros analíticos típicos del compost.

En cualquier caso, **en ninguna de las pilas ensayadas, la presencia de la lana se evidenció como un elemento negativo o limitante para el proceso ni para la calidad del producto final.**

7.4.- Calidad agronómica

Para dar un paso más en la interpretación analíticas de las muestras, se han comparado estos compost con los 137 compost genéricos registrados en el listado de productos fertilizantes del MAGRAMA (mayo 2024), aplicando el modelo de clasificación de calidad agronómica real de composts propuesta por Puyuelo *et al* (2019)¹ a partir del cual se elaboran dos índices: el de Fertilidad (FI) y el de Limpieza (CI):

- El Índice de Fertilidad (*Fertility Indicator* - FI) se calcula en función del contenido en Carbono orgánico total (COT), los macronutrientes (N, P, K) y la relación C/N, obteniéndose un valor del índice entre 0 y 5, siendo 5 la calidad más alta en cuanto a la capacidad fertilizante del producto.
- El Índice de Limpieza (*Clean Indicator* - CI) se calcula en base a las concentraciones de los siete metales pesados en el producto. Cuanto más alto es el valor de CI menor es el contenido en metales pesados que tiene el compost.

En la Figura 19 se muestran los resultados para los Índices de Fertilidad y de Limpieza de los compost genéricos registrados en el Ministerio y, a modo comparativo, se incluye el resultado obtenido a partir de los valores analíticos de las ocho muestras de compost de lana analizadas para los mismos índices (marcadas en rojo).

Como se puede apreciar, el Índice de Limpieza en las ocho muestras estaría en niveles altos (entre 4,45 y 4,50), debido al bajo contenido en los metales pesados, especialmente aquellos con un mayor efecto potencial contaminante (Cd, Hg, Cr y Pb). Sin embargo, el Índice de Fertilidad estaría en valores bajos para este tipo de compost, con un rango entre 2,00 y 3,20. La razón de esto está relacionada principalmente por las concentraciones moderadas de Nitrógeno y Fósforo, así como

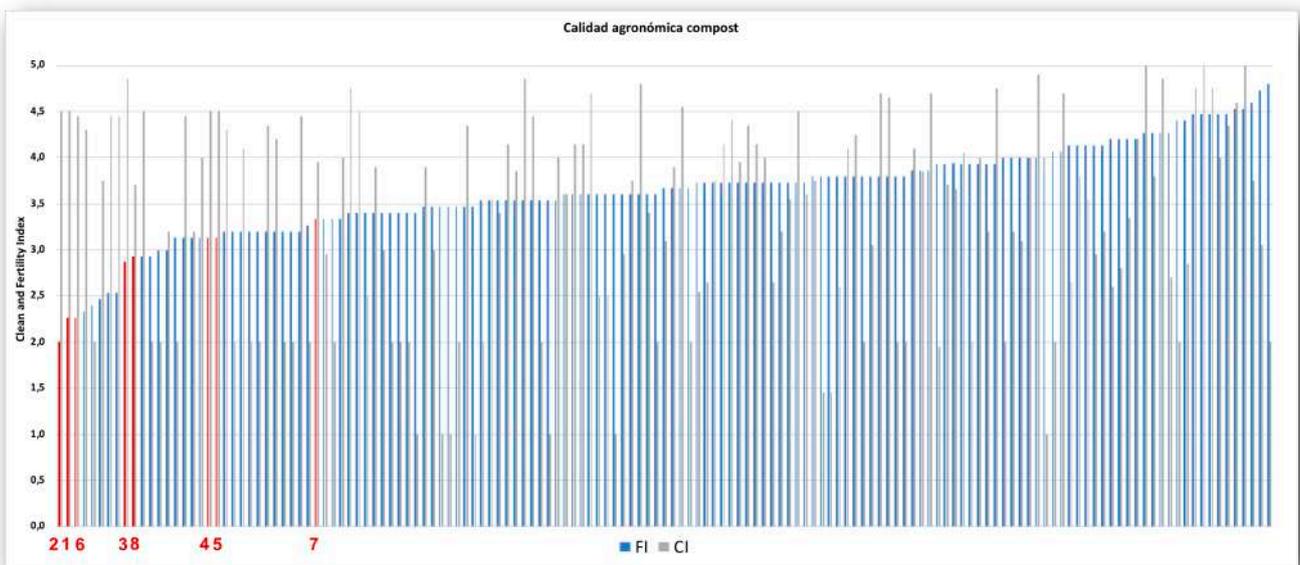
¹ Puyuelo, B.; Arizmendiarieta, J.S.; Irigoyen, I. & Plana, R. (2019). "Quality assessment of composts officially registered as organic fertilisers in Spain". Spanish Journal of Agricultural Research 17 (1), e1101, 13 pp.



Ramón Plana - Dr. en Biología - Consultor en Tratamientos Biológicos de Residuos Orgánicos

unos porcentajes de materia orgánica y Carbono orgánico reducidos que presentan todas las muestras.

Figura 19.- Clasificación de los compost genéricos comercializados en España según su Índice de Fertilidad y su Índice de Limpieza y comparativa con las muestra de compost de lana analizadas (marcadas en rojo). Se indica el número de pila analizada. (Fuente: elaboración propia a partir de Puyuelo et al, 2019).

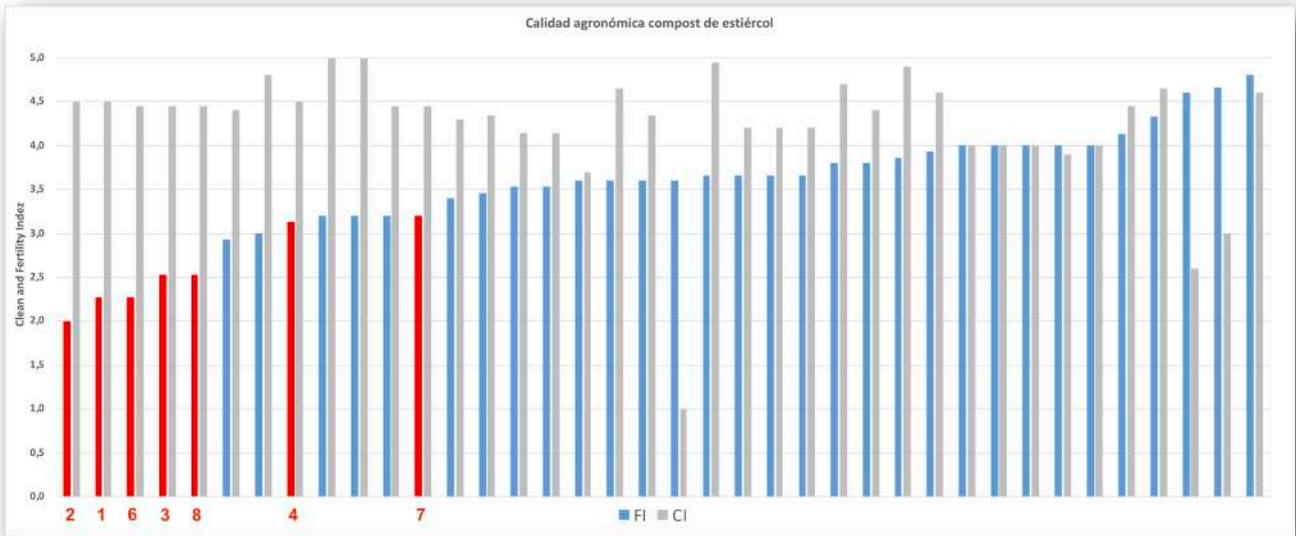


Se ha hecho el mismo análisis para las siete muestras de compost que tienen estiércol joven y/o envejecido en su composición (todas, excepto la Pila 5, comparándolas con los FI y CI de los productos que figuran como “compost de estiércol” en el Registro de Fertilizantes del MAPAMA, un total de 31 productos (Figura 20). Como se puede observar en la Figura 20, este tipo de producto suele tener una FI proporcionalmente elevada, debido a sus mayores contenidos en Nitrógeno y materia orgánica. En el caso de los compost de la prueba piloto, las muestras que presentarían un FI en el mismo rango que los compost de estiércol serían las muestras de la Pila 4 (solo estiércol viejo con lana) y la Pila 7 (lana con estiércol viejo, biorresiduos, poda y restos de cosecha).



Ramón Plana - Dr. en Biología - Consultor en Tratamientos Biológicos de Residuos Orgánicos

Figura 20.- Clasificación de los compost de estiércol comercializados en España según su Índice de Fertilidad y su Índice de Limpieza y comparativa con las muestra de compost de lana analizadas (marcadas en rojo). Se indica el número de pila analizada. (Fuente: elaboración propia a partir de Puyuelo et al, 2019).



En base a estos resultados, se podría considerar que los compost resultantes de todas las pilas, aunque tienen una alta calidad legal y técnica por su bajo contenido en metales pesados, su capacidad fertilizante está limitada como ya se ha comentado. Eso no quiere decir que los compost obtenidos sean de baja calidad, si no que **su aplicación, en este caso, debería estar enfocada a su uso como sustratos y/o acondicionadores de suelo más que como fertilizantes.**



Ramón Plana - Dr. en Biología - Consultor en Tratamientos Biológicos de Residuos Orgánicos

8.- Conclusiones

- A) La lana no presenta ninguna afección negativa ni es un limitante para el compostaje de otros residuos orgánicos en procesos de co-compostaje.
- B) Para que el compostaje de la lana sea eficiente es conveniente aportar a las mezclas iniciales materiales orgánicos altamente fermentables: estiércoles frescos, biorresiduos, restos de cosecha... y una proporción adecuada de poda triturada, como material estructurante/complementario.
- C) El compostaje de lana se puede completar en sistemas de compostaje simples, como las pilas volteadas, aunque es necesario plantear tiempos de proceso largos, limitar la exposición de las pilas a las condiciones climatológicas adversas (fuertes lluvias, elevado número de horas de insolación...) y plantear un régimen de volteos y riegos más intensos que los empleados en estas pruebas. Al menos 1 volteo semanal el primer mes, pasando a 1 o 2 volteos mensuales en adelante, considerando las necesidades de riego del material antes de realizar cualquier volteo.
- D) Esto se debe a que hay una pérdida de humedad muy marcada en las pilas que condiciona la posibilidad de mantener una actividad biológica adecuada de manera constante o, que al menos se pueda considerar eficiente. Es necesario combinar diseños y protocolos de trabajo que minimicen las pérdidas de humedad por evaporación y que permitan aportar agua cuando sea necesario.
- E) Otro factor crítico en la correcta evolución del proceso de compostaje con lana es el tamaño de las pilas. Es necesario un volumen mínimo de 5 a 7 m³ en el montaje de pila, así como mantener unas proporciones adecuadas (conservar el ratio de superficie/volumen) tras los volteos. Esto permite conservar el calor generado y reducir las pérdidas de humedad.
- F) Si el volteo/manejo de las pilas se realiza con pala cargadora, se debe prestar especial atención a las maniobras para evitar o, al menos, minimizar el aporte de tierra al material en proceso, ya que causa un efecto de dilución de la concentración de materia orgánica en el compost final. Esto limita las posibilidades de poder cumplir con la normativa vigente para que el producto sea considerado legalmente como "compost".
- G) Es recomendable que el manejo de estas pilas se realice sobre una superficie impermeable, o al menos, hormigonada. Para facilitar tanto las operaciones de mezclado,



Ramón Plana - Dr. en Biología - Consultor en Tratamientos Biológicos de Residuos Orgánicos

traslado y volteo, como para evitar mermas en la calidad del producto y potenciales afecciones ambientales negativas.

- H) Los compost obtenidos, presentan mayoritariamente un uso potencial más adecuado como sustratos o enmiendas de suelo, aunque algunos de ellos, los que usaron mayor proporción de residuos orgánicos fácilmente degradables en su mezcla inicial, sí que podrían plantearse para su uso como fertilizantes.