PROYECTO
BIOCOMFOREST

Informe Experiencia piloto de compostaje

Diseño, puesta en marcha, seguimiento y análisis del piloto de compostaje de residuos forestales

GOBIERNO DE ESPAÑA
VICEPRESIDENCIA TERCERA DEL GOBIERNO
MINISTERIO PARA LA TRANSICIÓN ECOLÓGICA Y EL RETO DEMOGRÁFICO
Fundación Biodiversidad
Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia
Financiado por la Unión Europea NextGenerationEU
Universidad de Valladolid

Índice

1. Introducción 2
2. Diseño de la experiencia piloto 2
2.1. Composición y montaje de las pilas de compostaje 3
3. Acondicionamiento y seguimiento de la experiencia piloto de compostaje 4
3.1. Toma de muestras y mediciones 5
3.2. Análisis de la composición de las muestras 9
3.3. Reactivación de la experiencia piloto 11
3.3.1. Seguimiento tras la reactivación 12
3.4. Formación del personal 14
4. Parámetros esenciales del proceso de compostaje 14
4.1. Temperatura 15
4.2. Humedad 16
4.3. pH 17
4.4. Conductividad eléctrica (CE) 18
4.5. Carbono, Nitrógeno y relación C/N 19
4.6. Oxígeno 19
4.7. Materia orgánica 21
5. Compost final 22
5.1. Análisis finales 22
5.1.1. CE, pH y materia orgánica total (MOT) 22
5.1.2. C, N y relación C/N 23
5.1.3. Cationes (K, Ca y Na) y metales pesados (Cd, Cr, Cu, Fe, Ni, Pb y Zn) 23
5.1.4. Carbono extraíble 24
5.1.5. Ácidos fúlvicos y húmicos 24
5.1.6. Índice de humificación 25
5.1.7. Polifenoles totales 26
5.1.8. Índice de germinación (IG) 26
5.1.9. Ensayos de germinación en semillero 28
5.2. Resumen de resultados y legislación 33
6. Conclusiones del ensayo piloto 35
7. Recomendaciones para la planta de compostaje 35
Referencias 37
Anejo I: Datos climáticos 38

BIOCOMFOREST es un proyecto apoyado por la Fundación Biodiversidad del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO) en el marco del Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia (PRTR), financiado por la Unión Europea – NextGenerationEU.

1. Introducción

Este informe técnico recoge el desarrollo de una experiencia piloto de compostaje, diseñada con el objetivo de analizar el comportamiento del proceso de descomposición de los residuos vegetales generados en el municipio. La finalidad principal es obtener información práctica y contextualizada que permita orientar el diseño y funcionamiento futuro de la planta de compostaje local. A través de esta experiencia, se han evaluado las características de los residuos disponibles, las condiciones óptimas para su transformación en compost, y los parámetros clave para su seguimiento, así como la duración del proceso y la composición del producto final. El proyecto se enmarca en una estrategia de gestión sostenible de residuos, y busca sentar las bases para una implementación eficiente y adaptada a las necesidades reales del entorno.

2. Diseño de la experiencia piloto

Para el diseño de la experiencia piloto se ha tenido en cuenta toda la información recabada durante el desarrollo de la Acción 1. Identificación y valorización de los residuos orgánicos compostables, donde se llevó a cabo toda la caracterización de los restos vegetales potenciales para el proceso de compostaje y su acopio.

Con la colaboración del Ayuntamiento de El Royo (Soria) se realizó el acopio de restos vegetales procedentes del monte y de las zonas urbanas para poder montar la experiencia piloto. Este material se clasificó en tres categorías (Figura 1):

- Hojas de roble.
- Restos vegetales triturados de diversas especies de coníferas y frondosas representativas de la zona.
- Restos vegetales triturados de setos procedentes de las zonas ajardinadas del municipio y de los jardines privados de la población.



Figura 1. Clases de material vegetal usado en la experiencia piloto.

BIOCOMFOREST es un proyecto apoyado por la Fundación Biodiversidad del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO) en el marco del Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia (PRTR), financiado por la Unión Europea – NextGenerationEU.

2.1. Composición y montaje de las pilas de compostaje

A partir del material compostable recogido y su disponibilidad se consideró oportuno que el diseño de la primera experiencia piloto fueran tres pilas cónicas (Figura 2) con unas dimensiones aproximadas de 4x5x1,50 m. El montaje de las pilas se realizó disponiendo el material vegetal por capas, con un total de tres capas (un cazo del tractor por capa). Las dos primeras capas están, a su vez, formadas por otras tres capas intermedias, dos de la mezcla triturada de frondosas y coníferas, junto a una tercera de hojas de roble. Por último, la capa más externa de cada pila está compuesta por la mezcla triturada de setos de jardín.



Figura 2. Pilas de la experiencia piloto de compostaje montadas en enero de 2025.

Para las labores de transporte de los restos y la formación de las pilas se empleó un tractor con pala, de dimensiones 2,5x0,65x0,63 m3, a la que se le añadió un 10% de sobrecarga, por lo que la capacidad final de cada vaciado del cazo ascendió a 0,56 m^3 (Figura 3). Teniendo en cuenta estos datos la masa de material vegetal empleado en cada una de las pilas ha sido de 492,3 kg, para llegar a esta cifra se han utilizado los datos presentes en la Tabla 1.



Figura 3. Tractor realizando labores del montaje de la experiencia piloto de compostaje.

BIOCOMFOREST es un proyecto apoyado por la Fundación Biodiversidad del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO) en el marco del Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia (PRTR), financiado por la Unión Europea – NextGenerationEU.

Tabla 1. Composición de las tres pilas de la experiencia piloto de compostaje.

Muestra	Peso Húmedo (g)	Volumen (ml)	Densidad (kg/m3)	Peso x cazo (kg)	nº cazos x pila	P1 (kg)	P2 (kg)	P3 (kg)
Hojas roble	31,4	2000	15,7	8,8	3	26,5	26,5	26,5
Pino/roble/ olmo/acacia	112,7	1000	112,7	63,5	6	380,7	380,7	380,7
Setos	120,8	800	151	85,0	1	85,0	85,0	85,0
Total por pila						492,3	492,3	492,3
Total						1476,9		

Previo al montaje de las pilas se tomaron muestras de los tres tipos de material vegetal acopiado, seguido de la toma de muestra de tres puntos de cada una de las pilas tras el montaje para su posterior análisis y caracterización fisicoquímica en laboratorio.

3. Acondicionamiento y seguimiento de la experiencia piloto de compostaje

Tras de realizar el montaje de las pilas se tapó cada una de ellas con una lona (Figura 4) para facilitar el aumento de temperatura y evitar la pérdida de material por acción del viento. Además, se instalaron tres dispositivos datalogger para automatizar la monitorización de las temperaturas con 4 sondas por pila, a excepción de la Pila 2 que una de las sondas se ha dejado fuera de la mezcla para a medición de la temperatura ambiente. Considerando que el área de trabajo se sitúa en una zona que experimenta muy bajas temperaturas y diversas inclemencias del tiempo se optó por la protección de los dispositivos de medición con recubrimientos de poliespán para optimizar el gasto de batería (Figura 5).



Figura 4. Resultado final del montaje de la experiencia piloto de compostaje.

BIOCOMFOREST es un proyecto apoyado por la Fundación Biodiversidad del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO) en el marco del Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia (PRTR), financiado por la Unión Europea – NextGenerationEU.

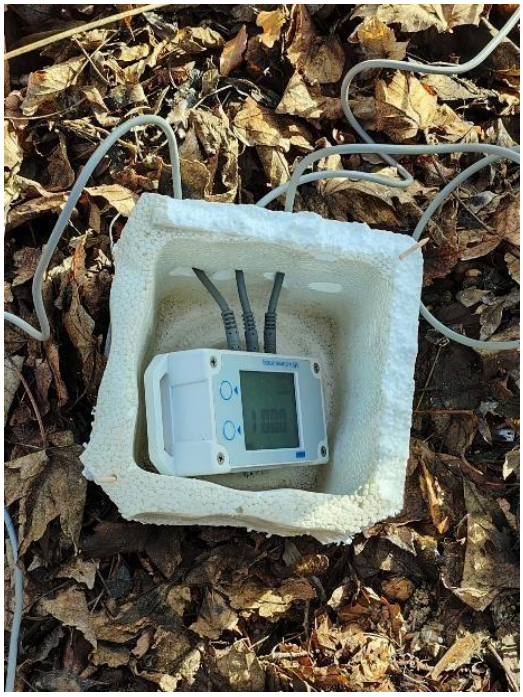


Figura 5. Dispositivo datalogger instalado en campo.

3.1. Toma de muestras y mediciones

La toma de muestras y seguimiento de todos los parámetros ha sido semanal, acudiendo a la zona una vez por semana para la medición de temperatura y humedad, y recogida de muestra (Figura 6).



Figura 6. Realización de mediciones y toma de muestras semanal.

Durante la experiencia piloto se han presentado diversas complicaciones, empezando por los retrasos en los permisos iniciales que ralentizaron la compra y obtención de la parcela. Además, las condiciones meteorológicas han sido muy desfavorables, dificultando la toma de muestras y las mediciones. Las extensas y copiosas lluvias han saturado el suelo de la parcela, imposibilitando la entrada de cualquier tipo de maquinaria y haciendo el acceso a pie muy complicado. Además de la lluvia, hubo problemas de encharcamiento por la falta de drenaje y canalización de las parcelas adyacentes.

BIOCOMFOREST es un proyecto apoyado por la Fundación Biodiversidad del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO) en el marco del Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia (PRTR), financiado por la Unión Europea – NextGenerationEU.

Estas condiciones meteorológicas no solo han afectado al acceso sino también a las propias pilas, ocasionando un descenso de la temperatura, retrasando el proceso de compostaje. Esta situación se prolongó desde el montaje de las pilas el 16 de enero de 2025 hasta finales el mes de mayo. La lluvia caída en el municipio de El Royo desde la instalación de la experiencia piloto hasta su reactivación ha sido de 277 mm, en períodos de tiempo reducidos, acompañados de temperaturas ambientales muy bajas, llegando a alcanzar los -11ºC, según los datos recogidos por el Sistema de Información Agroclimático para el Regadío del MITECO (Anejo I), como se observa en la Figura 7, en cuanto el tiempo lo permitió se procedió a la reactivación de las pilas.

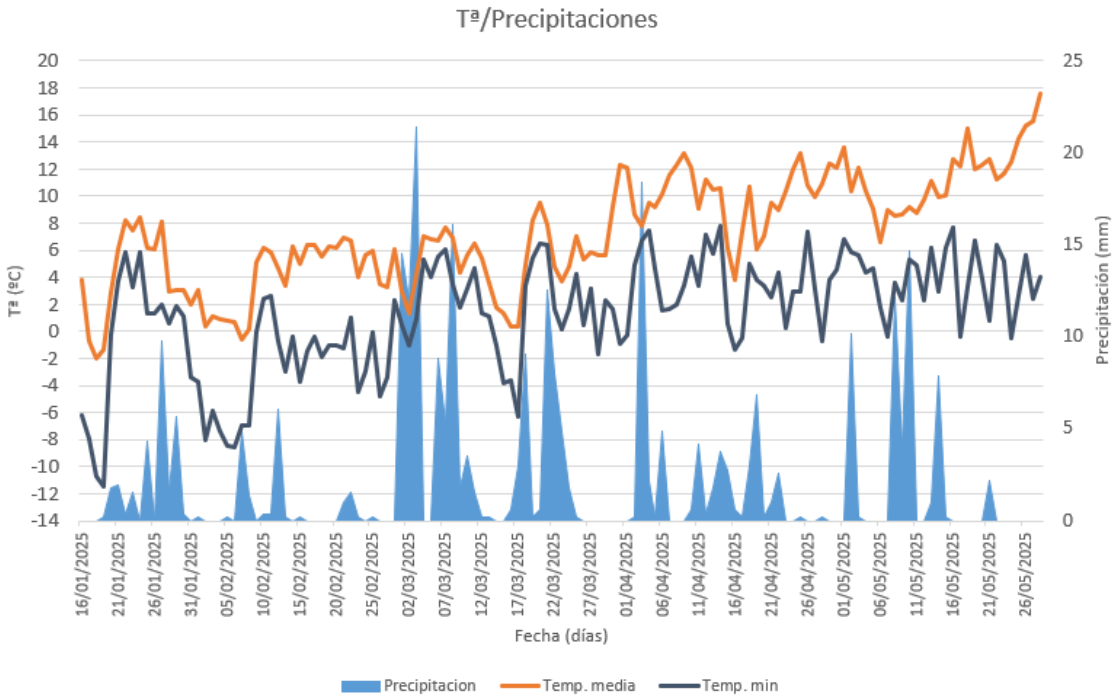


Figura 7. Evolución de las precipitaciones y las temperaturas mínimas desde la instalación de la experiencia piloto.

Se puede apreciar como desde la instalación de la experiencia piloto se produjo un incremento considerable de las precipitaciones, junto con variaciones muy amplias de la temperatura, con grandes diferencias entre el día y la noche.

La toma de muestras semanal se ha realizado siguiendo un protocolo que se ha desarrollado con la finalidad de facilitar y homogeneizar las medicines y la obtención de las muestras. Para cada pila se tomarán tres puntos diferentes dentro de la misma para realizar tres réplicas de todas las mediciones y muestras. Una vez establecidos los tres puntos se señalizan con las banderillas amarillas para siempre tomarlos como referencia. De forma diaria se mediarla temperatura manualmente en cada uno de los tres puntos de las tres pilas mediante una sonda de temperatura marca..., y se apuntará en el estadillo que se ha facilitado al personal del ayuntamiento (Figura 8).

BIOCOMFOREST es un proyecto apoyado por la Fundación Biodiversidad del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO) en el marco del Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia (PRTR), financiado por la Unión Europea – NextGenerationEU.

MONTAJE DE LAS PILAS

Día 16 de enero de 2025

	Hojas	Restos poda triturada	Setos	Proporción (cazos)
Pila 1	x	x	x	3//6//1
Pila 2	x	x	x	3//6//1
Pila 3	x	x	x	3//6//1

VOLTEOS Y RIEGOS

		PILA 1		PILA 2		PILA 3	
FECHA	HORA	VOLTEO	RIEGO	VOLTEO	RIEGO	VOLTEO	RIEGO

EVOLUCIÓN DE LA TEMPERATURA

FECHA	HORA	PILA 1	PILA 2	PILA 3

Figura 8. Estadillo proporcionado al Ayuntamiento de El Royo para facilitar la monitorización de la experiencia piloto.

Con una frecuencia semanal, en esos tres lugares señalizados, a la misma profundidad hacia el interior de la pila, se realiza la medición de la humedad y se toma una muestra representativa. En estos tres puntos también se colocan las sondas conectadas a los dispositivos datalogger para el seguimiento continuo de las temperaturas de cada pila en esos mismos tres puntos, lo que facilita la monitorización del proceso de compostaje que está estrechamente vinculado con la temperatura de cada pila. Posteriormente se realizará el análisis de las muestras en laboratorio.

Tras el montaje de la experiencia piloto de compostaje se han realizado dos metodologías diferentes de medición de parámetros. Por un lado, se llevan a cabo mediciones en campo en las propias pilas, mediciones puntuales de humedad y temperatura con termómetros manuales una vez a la semana, y automáticas con los dispositivos dataloggers con sondas de temperatura que realizan mediciones continuas cada hora (Figura 9 , 10 y 11).

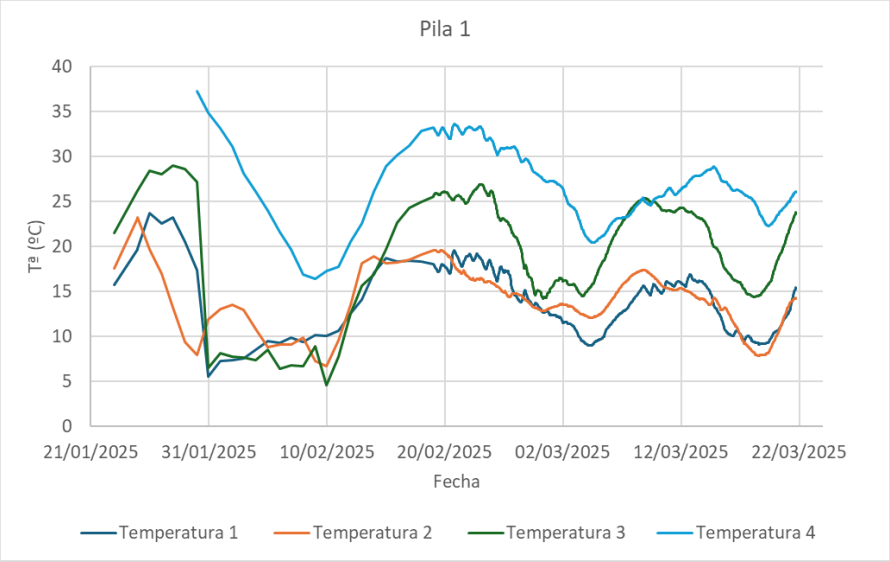


Figura 9. Evolución de la tª en la Pila 1 desde el montaje de la experiencia piloto.

BIOCOMFOREST es un proyecto apoyado por la Fundación Biodiversidad del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO) en el marco del Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia (PRTR), financiado por la Unión Europea – NextGenerationEU.

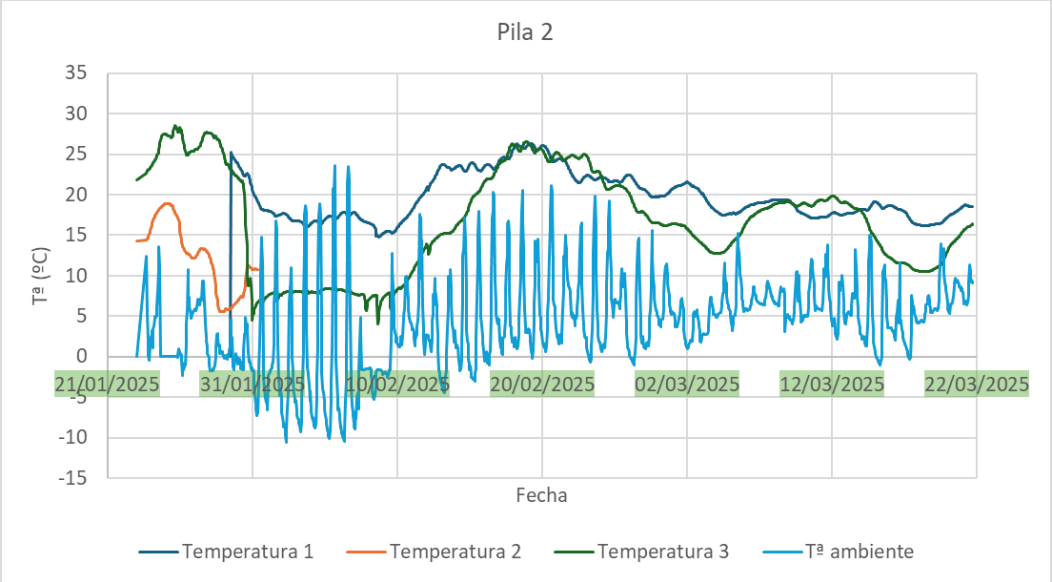


Figura 10. Evolución de la tª en la Pila 2 desde el montaje de la experiencia piloto.

En la gráfica correspondiente a la evolución de la temperatura de la Pila 2, la línea azul claro que experimenta variaciones muy grandes en el rango de la temperatura corresponde con la sonda del dispositivo datalogger que se dejó a la intemperie para la medición de la temperatura ambiente.

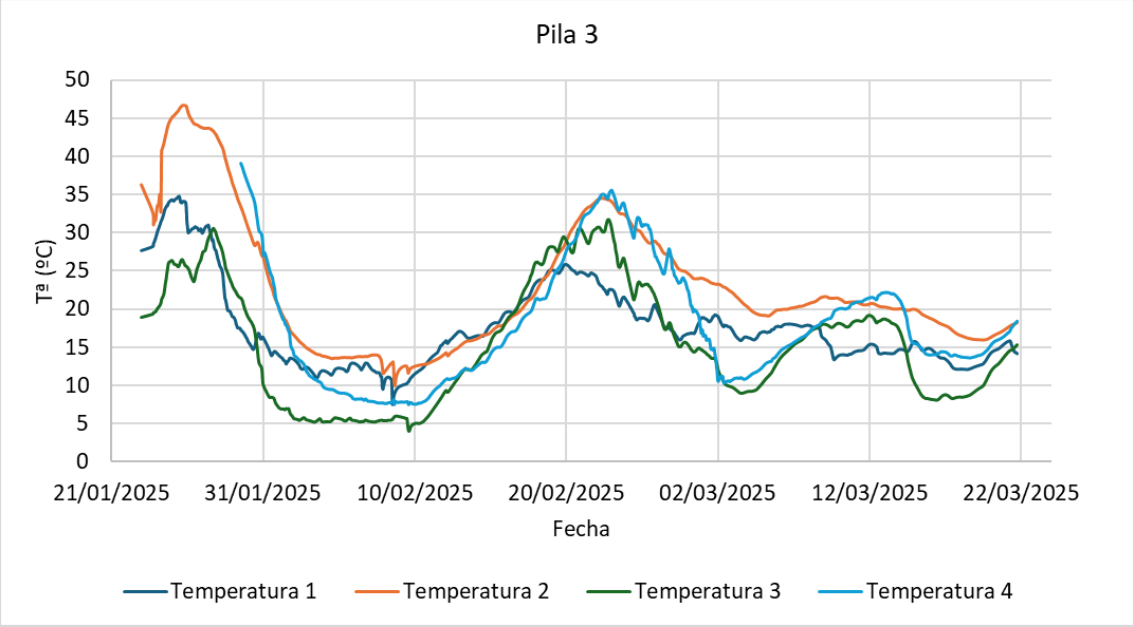


Figura 11. Evolución de la tª en la Pila 3 desde el montaje de la experiencia piloto.

En la gráfica anterior se puede observar como las condiciones meteorológicas afectan a las temperaturas de las pilas, ocasionando un descenso de la temperatura tras episodios muy fríos en la zona, que alcanzaron temperaturas inferiores a –10 ºC, como se muestra en la Figura 12 con la gráfica de temperaturas registradas en la zona durante la experiencia piloto.

BIOCOMFOREST es un proyecto apoyado por la Fundación Biodiversidad del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO) en el marco del Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia (PRTR), financiado por la Unión Europea – NextGenerationEU.

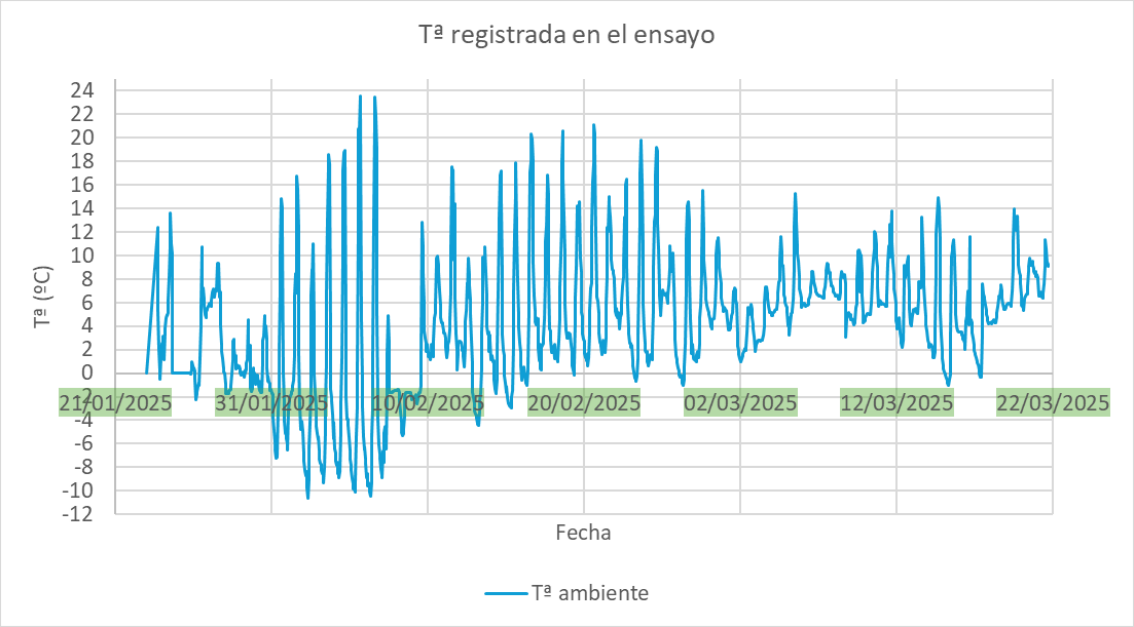


Figura 12. Temperaturas registradas por el dispositivo datalogger de la temperatura ambiente.

3.2. Análisis de la composición de las muestras

Esta caracterización inicial es de suma importancia puesto que orientará en la planta de compostaje sobre la proporción de los elementos en la mezcla a realizar. Las características del material orgánico sujeto a compostaje deben permitir tanto el buen desarrollo del proceso como la obtención de un producto final que cumpla una serie de requisitos mínimos de calidad (Torrentó y Paulet, 2001). Para ello, al inicio del proceso deben determinarse ciertos parámetros relativos a la mezcla de residuos, con el fin de ajustarlos a sus valores óptimos. Entre las variables más importantes a controlar se encuentran el tamaño de partícula, la relación C/N, la composición elemental, el contenido en materia orgánica y la conductividad eléctrica (Madejón et al., 2001; Körner et al., 2003)".

Para la caracterización de las muestras iniciales representativas del material inicial utilizado en la experiencia piloto, se ha utilizado la siguiente metodología (Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, 1994). Para medir el pH se preparó una suspensión 1:5 de compost en agua destilada, se agitó durante varios minutos, se dejó decantar y se determinó el pH del sobrenadante utilizando un pH-metro previamente calibrado, y la conductividad mediante un electrodo GLP22 (Crison Instruments S.A., Barcelona, España) previamente calibrado; la humedad se determina mediante secado de las muestras en estufa durante 24h a 60ºC, el contenido en materia orgánica por calcinación a 550ºC durante 4h en mufla y diferencia de masas, y el contenido de carbono y nitrógeno, y su relación C/N con un analizador elemental 630-500-700 (LECO Corporation, St Joseph, EEUU), el porcentaje de fósforo por el método colorimétrico amarillo de vanadato-molibdato, se preparó una alícuota de la muestra y se añadió reactivo vanadato-molibdato en medio ácido; tras el desarrollo del color amarillo característico, se midió la absorbancia en espectrofotómetro alrededor de 430–450 nm para cuantificar el fósforo en un espectrofotómetro (Thermo Scientific™ Espectrofotómetro UV-Vis GENESYS™ 180), y los cationes y metales pesados presentes por espectroscopía de absorción atómica. Los resultados de la caracterización se muestran en las tablas 1 y 2.

BIOCOMFOREST es un proyecto apoyado por la Fundación Biodiversidad del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO) en el marco del Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia (PRTR), financiado por la Unión Europea – NextGenerationEU.

Tabla 2. Caracterización físico-química del material vegetal utilizado en la experiencia piloto de compostaje (hojas de roble, mezcla triturada de pino, roble, olmo y acacia, y mezcla de setos triturada) y de las mezclas iniciales de las 3 pilas (P1, P2 y P3).

Muestra	Humedad (%)	pH	CE (mS/cm)	C (%)	N (%)	S (%)	Ratio C/N	MOt (%)	Fósforo (%)
Hojas roble	31,8	4,5	867	45,45	0,73	0,11	62,6	90,6	0,013
Pino/roble/ olmo/acacia	52,9	5,4	562	47,36	0,80	0,14	59,0	94,1	0,011
Setos	51,2	5,6	834	47,47	0,70	0,16	67,7	96,6	0,010
P1	44	5,3	682	46,23	0,82	0,13	56,1	96,8	0,009
P2	46	5,3	603	46,82	0,70	0,11	67,1	96,7	0,007
P3	44	6,1	840	46,23	0,71	0,14	65,0	96,7	0,007

Tabla 3. Cationes presentes en el material compostable inicial y en las tres mezclas iniciales.

Muestra	Ca (mg/l)	Cd (mg/l)	Cr (mg/l)	Cu (mg/l)	Fe (mg/l)	K (mg/l)	Na (mg/l)	Ni (mg/l)	Pb (mg/l)	Zn (mg/l)
Pino/roble/ olmo/acacia	55,3	<0,025	<0,025	0,03	0,53	33,3	0,39	<0,025	<0,025	0,31
Setos	113	<0,025	<0,025	<0,025	1,15	43,2	0,31	<0,025	0,03	0,12
Hojas roble	145	<0,025	<0,025	<0,025	1,97	36,4	0,44	0,03	<0,025	0,29
P1	92,5	<0,025	<0,025	0,04	1,15	44,4	2,20	<0,025	<0,025	0,25
P2	80,5	<0,025	0,03	<0,025	1,20	38,5	0,44	<0,025	<0,025	0,17
P3	104	<0,025	0,08	0,03	4,25	53,3	0,31	0,03	<0,025	0,27

Tanto el compost vegetal inicial presenta una humedad adecuada para el inicio del proceso, con valores que permiten una buena actividad microbiana sin riesgo de anaerobiosis. El pH ligeramente ácido es característico de materiales vegetales frescos y tenderá a aumentar durante la fase termófila. La conductividad eléctrica baja confirma que se trata de un material pobre en sales, adecuado para compostaje y para usos posteriores sin riesgo de fitotoxicidad.

El elevado contenido de materia orgánica y la alta relación C/N indican un material rico en carbono estructural y pobre en nitrógeno, lo que anticipa una degradación lenta. Sería recomendable, si se busca acelerar el proceso, mezclar con materiales más nitrogenados. Los niveles de macronutrientes son coherentes con un residuo vegetal, destacando el potasio como elemento predominante.

Dada la época en la que se ha montado la experiencia piloto (enero del 2025) no se disponía de suficiente material verde para equilibrar bien la relación C/N de la mezcla, puesto que su acopio (césped, hojas...) se realiza fundamentalmente en primavera-verano procedente de la poda de jardines. No obstante, cuando esto no es posible, el proceso de compostaje se va a desarrollar, aunque de manera más lenta y, probablemente no alcanzará temperaturas demasiado elevadas.

BIOCOMFOREST es un proyecto apoyado por la Fundación Biodiversidad del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO) en el marco del Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia (PRTR), financiado por la Unión Europea – NextGenerationEU.

3.3. Reactivación de la experiencia piloto

Una vez superada la época de mayores lluvias, a finales de mayo de 2025, se llevó a cabo la reactivación de la experiencia piloto de compostaje, que consistió en el volteo de las pilas con tractor, para mejora de la aireación y en el regado de las mismas para el fomento del crecimiento de la microbiología necesaria para el desarrollo del proceso de compostaje (Figura 13).



Figura 13. Reactivación de la experiencia piloto de compostaje el 28 de mayo en El Royo (Soria).

Además, se reinstalaron y programaron los dispositivos datalogger de seguimiento de la temperatura (Figura 14), y se realizó la toma de muestra de todas las pilas recogiendo material de cuatro zonas diferentes en cada una (Figura 15).



Figura 14. Instalación y configuración de los dispositivos con sondas de temperatura para el seguimiento.



Figura 15. Toma de muestras de las tres pilas.

BIOCOMFOREST es un proyecto apoyado por la Fundación Biodiversidad del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO) en el marco del Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia (PRTR), financiado por la Unión Europea – NextGenerationEU.

3.3.1. Seguimiento tras la reactivación

Tras la reactivación del piloto se ha llevado a cabo un seguimiento continuo de la temperatura gracias a las sondas de los dispositivos electrónicos como se puede apreciar en las Figuras 16, 17 y 18.

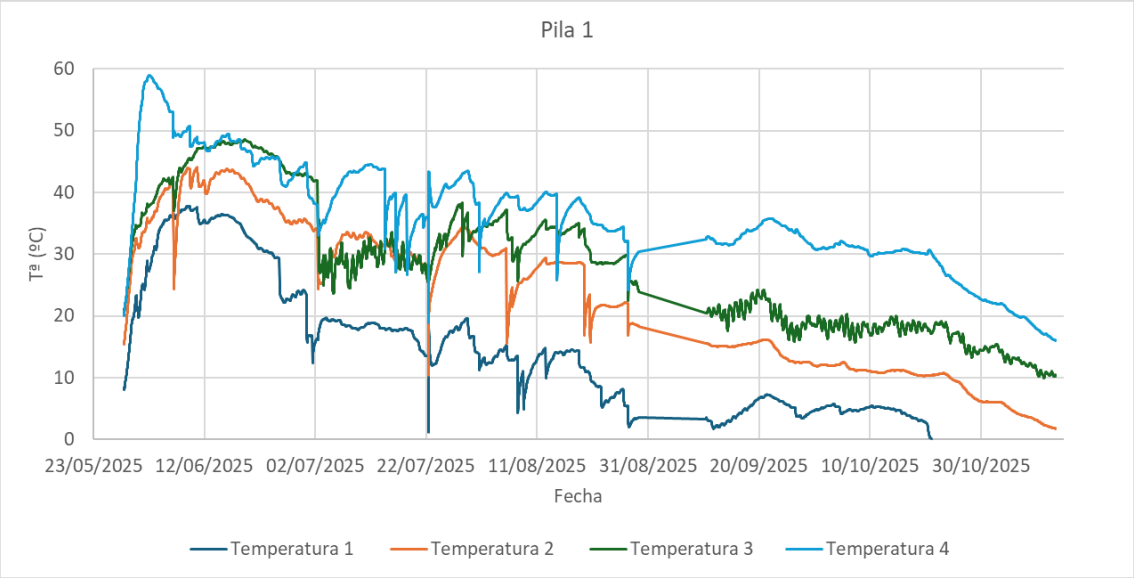


Figura 16. Evolución de la temperatura de la Pila 1.

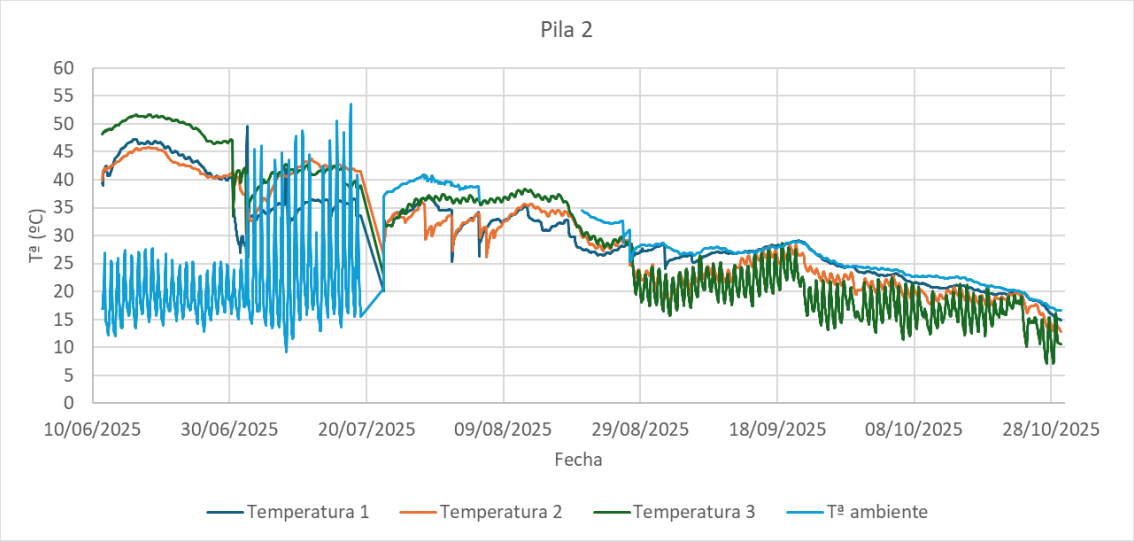


Figura 17. Evolución de la temperatura de la Pila 2.

BIOCOMFOREST es un proyecto apoyado por la Fundación Biodiversidad del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO) en el marco del Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia (PRTR), financiado por la Unión Europea – NextGenerationEU.

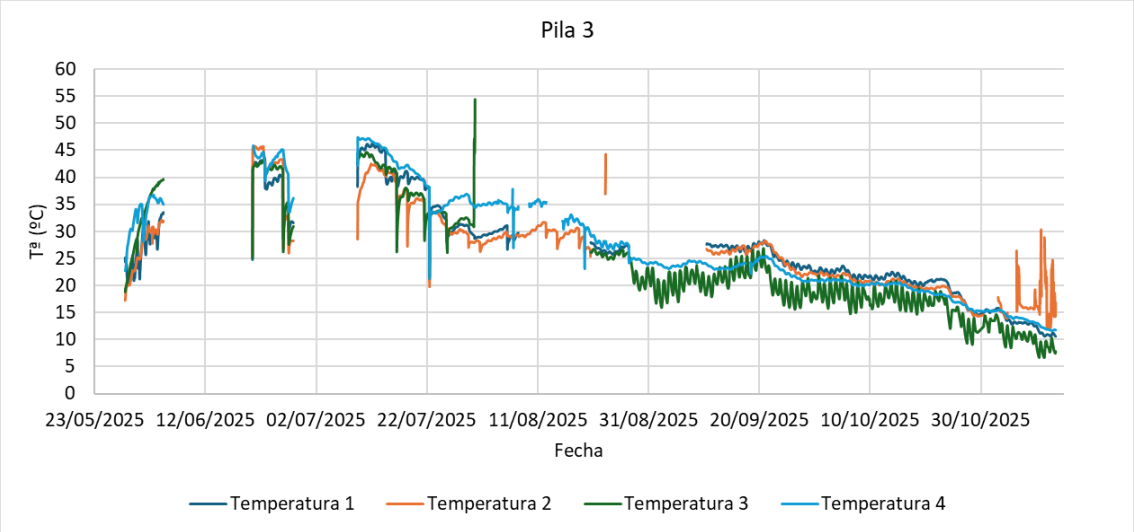


Figura 18. Evolución de la temperatura de la Pila 3.

Junto a este seguimiento se ha registrado también la humedad (Figura 19) y se han tomado muestras (Figura 20).



Figura 19. Seguimiento de la humedad de las pilas.



Figura 20. Muestras tomadas de forma semanal.

BIOCOMFOREST es un proyecto apoyado por la Fundación Biodiversidad del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO) en el marco del Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia (PRTR), financiado por la Unión Europea – NextGenerationEU.

3.4. Formación del personal

De forma complementaria a la reactivación se llevaron a cabo las primeras acciones formativas dirigidas al personal contratado para las labores de acopio de material, montaje y seguimiento en la planta de compostaje, dando a conocer los valores de temperatura y humedad óptimos, la metodología para la toma de muestras y para la configuración y puesta en marcha de los dispositivos de seguimiento. Además, durante las visitas que se realizaron a la experiencia piloto por parte del equipo de la universidad, el personal estuvo presente y participando de forma activa en todas las tareas realizadas como han sido tomas de muestras, riegos y volteos, descarga de datos de los dispositivos de medición de temperatura, realización de mediciones puntuales de temperatura y humedad, entre otras.

Toda la planificación correspondiente a la formación del personal de la planta aparece recogida en el "Programa de Formación Aplicada en Compostaje y Gestión de Residuos Vegetales", que se aporta como fuente de verificación de la Acción 1.



Figura 21. Primeras nociones sobres compostaje al personal de la planta.

Para facilitar y complementar la formación del personal se les facilitan una serie de documentación, formada por un manual práctico de compostaje con información relevante sobre este proceso y con todo lo necesario para poder solucionar cualquier problema que pueda llegar a surgir tanto durante el compostaje como con la programación y manipulación de los dispositivos de medición, y una Guía de Buenas Prácticas en materia de compostaje, ambos documentos se aportan como fuente de verificación ("Manual de Buenas Prácticas en Compostaje" y Compostaje Paso a Paso: Guía de Formación).

4. Parámetros esenciales del proceso de compostaje

Para garantizar un desarrollo adecuado del proceso de compostaje, es fundamental realizar un seguimiento continuo mediante la observación de ciertos parámetros técnicos clave. Entre los más relevantes se encuentran la temperatura, la humedad, el pH, la conductividad eléctrica, la relación carbono/nitrógeno y el grado de descomposición del material. Estos indicadores permiten evaluar la actividad microbiana, detectar posibles desequilibrios y ajustar las condiciones del sistema para optimizar la transformación de los residuos vegetales en compost. El control periódico de estos factores proporciona información valiosa sobre la evolución del proceso y contribuye a asegurar la calidad del producto final.

BIOCOMFOREST es un proyecto apoyado por la Fundación Biodiversidad del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO) en el marco del Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia (PRTR), financiado por la Unión Europea – NextGenerationEU.

4.1. Temperatura

Temperatura: el síntoma más claro de la actividad microbiana es el incremento de la temperatura de la masa que se está compostando, por lo que la temperatura ha sido considerada tradicionalmente como una variable fundamental en el control del compostaje (Liang et al., 2003; Miyatake y Iwabuchi, 2006). En este apartado se analiza la evolución térmica de las pilas a lo largo de la experiencia piloto (Figuras 22, 23 y 24), observando los cambios registrados en función del tipo de residuo vegetal, las condiciones ambientales y las prácticas de manejo aplicadas. El control de la temperatura resulta esencial para garantizar un proceso eficiente, evitar problemas como la fermentación anaerobia y asegurar la obtención de un compost de calidad.

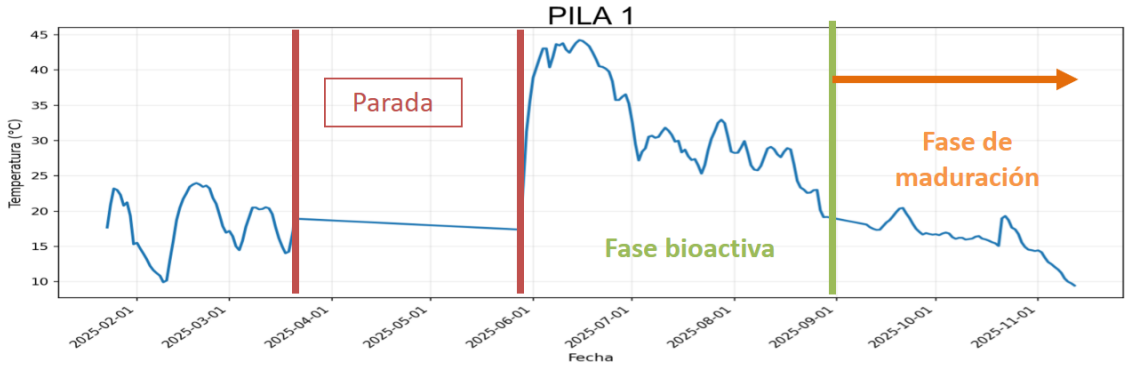


Figura 22. Evolución de la temperatura en la Pila 1.

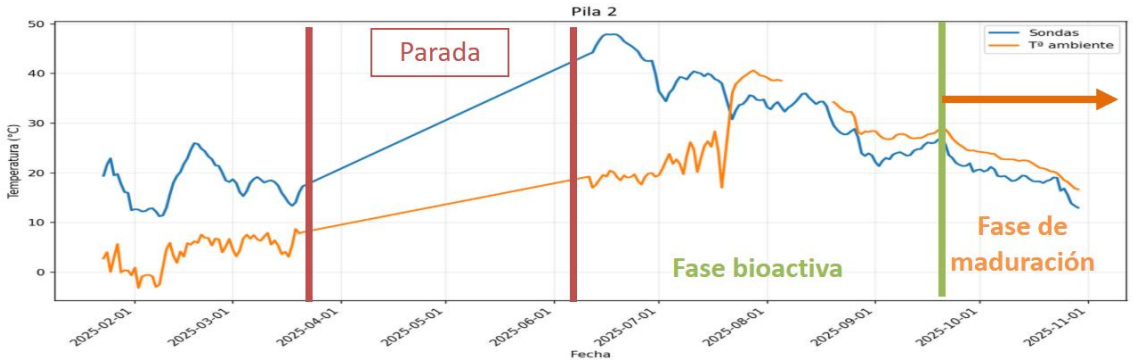


Figura 23. Evolución de la temperatura en la Pila 2.

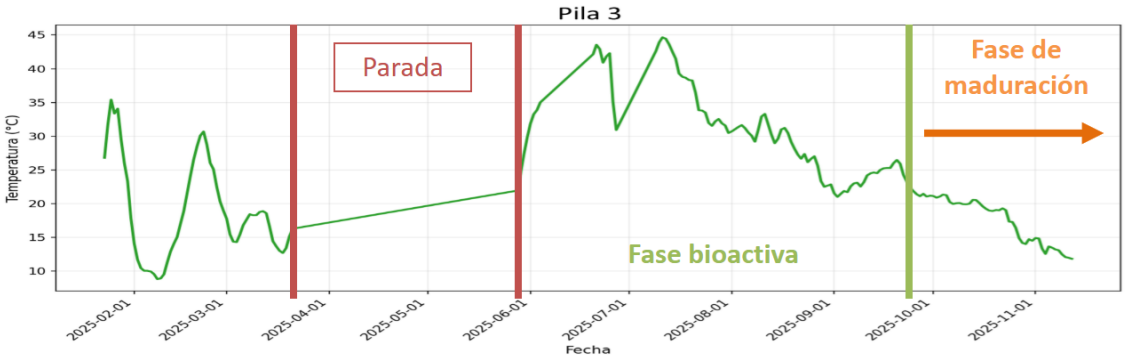


Figura 24. Evolución de la temperatura en la Pila 3.

El proceso de compostaje experimentó una primera fase complicada, los primeros meses después del montaje de las pilas, debido a las complicaciones climáticas las pilas no alcanzaron

BIOCOMFOREST es un proyecto apoyado por la Fundación Biodiversidad del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO) en el marco del Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia (PRTR), financiado por la Unión Europea – NextGenerationEU.

las temperaturas necesarias para comenzar el proceso. Considerando las altas precipitaciones que experimentó la zona de trabajo durante los primeros meses del año se optó por parar las mediciones y esperar a la mejora de la climatología para continuar. Esta fase es lo que en las gráficas se denomina como parada, que tuvo una duración aproximada de dos meses.

Tras la llegada del buen tiempo el 28 de mayo se reactiva el piloto realizando un volteo lo que facilita la entrada de oxígeno en la mezcla permitiendo la proliferación de los microorganismos encargados de la degradación del material vegetal durante la fase bioactiva, donde se han llegado a registrar temperaturas próximas a los 50ºC. Esta fase termófila ha durado aproximadamente 4 meses, donde gracias a las altas temperaturas el material se higieniza.

Por último, una vez que se ha degradado el material la temperatura desciende y los microrganismos disminuyen su actividad, el material entra en fase de maduración. La fermentación es más lenta y ocurre a temperatura ambiente, en esta fase de irán degradando los materiales más resistentes, dando lugar la estabilización de compost.

Observando todos los datos del seguimiento de la temperatura en las tres pilas, se sabe que se han obtenido 216 registros de temperatura, desde principios de enero de 2025 hasta noviembre de 2025. Cabe destacar que a pesar de haberse montado una experiencia piloto con una mezcla de residuos muy heterogénea el comportamiento de las tres pilas ha sido muy similar por lo que se puede considerar que se han realizado tres réplicas del proceso de compostaje.

En el caso de compostaje con residuos vegetales procedentes de jardines, podas o restos agrícolas, no es imprescindible alcanzar temperaturas tan elevadas como en procesos que incluyen residuos más complejos o con mayor carga patógena, como estiércoles o restos de alimentos cocinados. Los residuos vegetales suelen ser más limpios y homogéneos, lo que permite una descomposición eficiente a temperaturas moderadas. Esto reduce la necesidad de alcanzar fases termofílicas extremas, aunque sigue siendo importante mantener condiciones adecuadas para favorecer la actividad microbiana y evitar procesos anaerobios.

4.2. Humedad

La humedad es un parámetro esencial en el proceso de compostaje, ya que influye directamente en la actividad microbiana responsable de la descomposición de la materia orgánica.

Algunos autores (Haug, 1993; Jeris y Regan, 1973; Madejón et al., 2002) consideran que la humedad de los materiales es la variable más importante en el compostaje y ha sido calificada como un importante criterio para la optimización del compostaje. Si las condiciones iniciales de humedad son adecuadas, cabe esperar que la humedad disminuya a lo largo del proceso a causa del calor, siendo necesario añadir agua (Atchley y Clark, 1979).

Un nivel adecuado de humedad permite mantener el equilibrio entre aireación y descomposición, evitando tanto la sequedad excesiva como la saturación que podría generar condiciones anaerobias. En este apartado se analiza la evolución de la humedad en las pilas durante la experiencia piloto, así como las medidas adoptadas para su control, con el fin de garantizar un proceso eficiente y obtener un compost de calidad.

BIOCOMFOREST es un proyecto apoyado por la Fundación Biodiversidad del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO) en el marco del Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia (PRTR), financiado por la Unión Europea – NextGenerationEU.

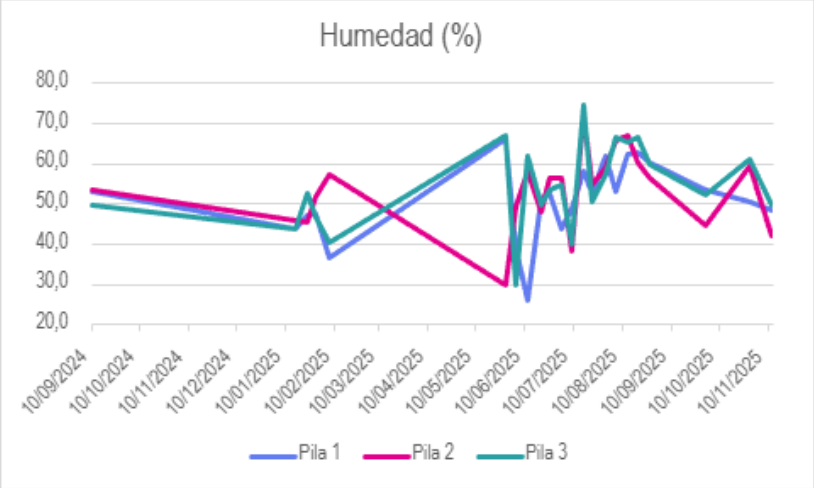


Figura 25. Evolución de la humedad de las muestras durante el compostaje.

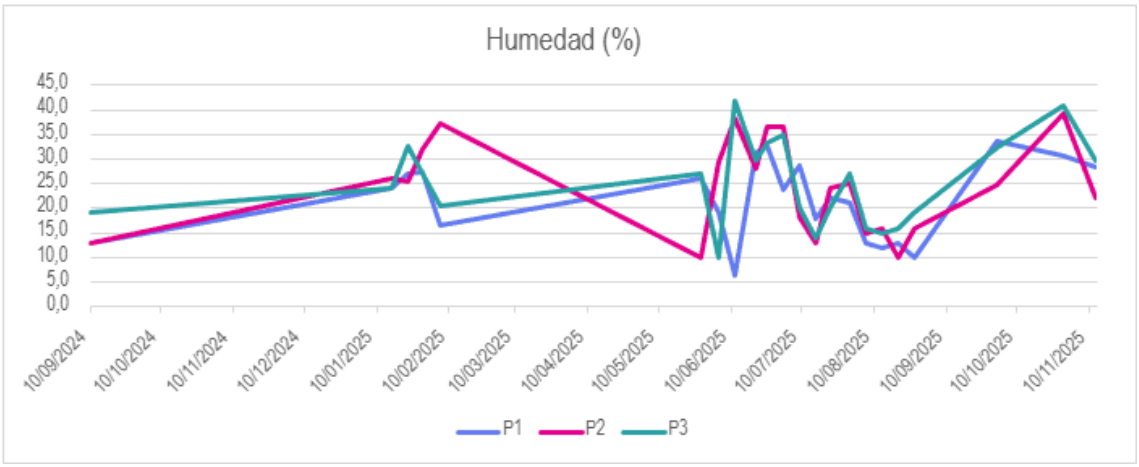


Figura 26. Evolución de la humedad de las pilas durante el compostaje.

Durante el proceso hemos contado con dos medidas de humedad diferentes, por un lado, la correspondiente a la humedad de las muestras tomadas en cada pila (Figura 245), donde se pueden apreciar variaciones entre 25 y 75% de humedad. Pero, por otro lado, está el registro de humedad de cada una de las pilas tomado en las visitas al piloto, esta medida se ha tomado con un higrómetro (HH2 Moisture Meter (Delta-T Devices Ltd., Reino Unido)) (Figura 26), en esta gráfica se puede apreciar como durante el trascurso de la experiencia piloto no se han alcanzado los valores óptimos de humedad de las mezclas (50-60%). Sin embargo, el proceso de compostaje, aunque más lento, sí que se ha desarrollado de forma exitosa consiguiendo un compost maduro.

4.3. pH

El pH es un parámetro importante en el seguimiento del compostaje, ya que influye en la actividad microbiana y en la estabilidad del proceso. Durante la descomposición de los residuos orgánicos, el pH puede variar en función de los materiales utilizados y del grado de transformación. Mantener un pH dentro de un rango adecuado, generalmente entre 6 y 8, favorece la acción de los microorganismos beneficiosos y evita condiciones que puedan ralentizar el proceso o generar compuestos indeseables. En este apartado se analiza la evolución

BIOCOMFOREST es un proyecto apoyado por la Fundación Biodiversidad del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO) en el marco del Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia (PRTR), financiado por la Unión Europea – NextGenerationEU.

del pH en las pilas durante la experiencia piloto (Figura 27), donde se puede apreciar como este parámetro ha ido aumentando hasta alcanzar los valores esperados para un compost maduro, partiendo de un pH en torno a 5,5 y llegando a registrarse valores próximos a 8 en la fase de maduración.

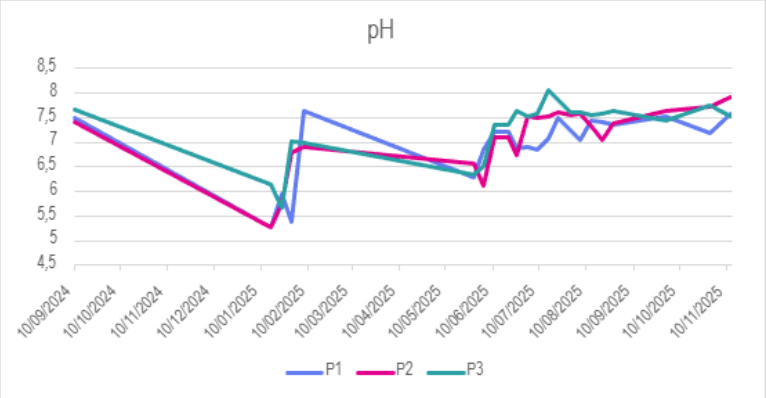


Figura 27. Evolución del pH de las pilas durante el compostaje.

4.4. Conductividad eléctrica (CE)

La conductividad eléctrica es un parámetro que permite evaluar la concentración de sales solubles presentes en el compost, lo cual está directamente relacionado con la calidad del producto final y su idoneidad para su uso en suelos agrícolas. Durante el proceso de compostaje, la conductividad puede variar en función de los materiales utilizados y del grado de descomposición. Un nivel excesivo puede indicar acumulación de sales que podrían afectar negativamente a las plantas, mientras que valores moderados reflejan una mineralización adecuada. En este apartado se analiza la evolución de la conductividad eléctrica en las pilas durante la experiencia piloto, como indicador complementario para valorar la madurez y estabilidad del compost obtenido.

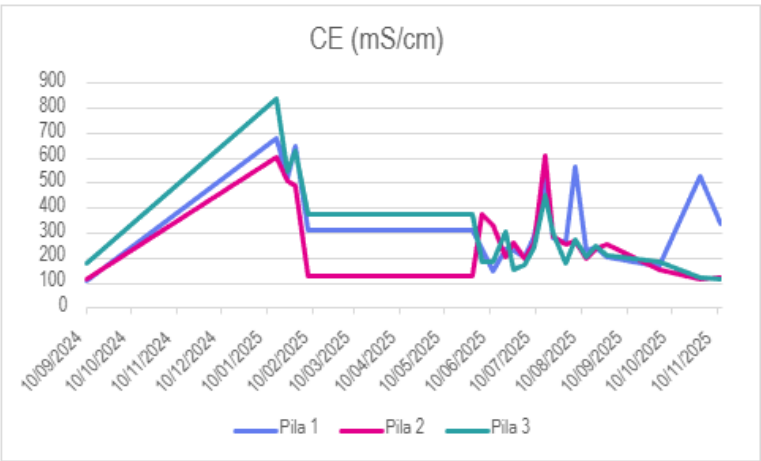


Figura 28. Evolución de la conductividad eléctrica de las pilas durante el compostaje.

Al tratarse de una mezcla muy heterogénea los valores de CE han fluctuado bastante, pero en los tres casos se han ido reduciendo con desarrollo del proceso de compostaje. Durante el proceso de compostaje, la conductividad eléctrica suele mostrar una evolución ligada a la descomposición de la materia orgánica. Al inicio, aumenta debido a la liberación de sales minerales y nutrientes solubles a medida que los microorganismos degradan los restos

BIOCOMFOREST es un proyecto apoyado por la Fundación Biodiversidad del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO) en el marco del Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia (PRTR), financiado por la Unión Europea – NextGenerationEU.

vegetales. Con el avance del proceso y la estabilización del material, la conductividad ha disminuido, reflejando una menor liberación de compuestos iónicos y una mayor madurez del compost.

4.5. Carbono, Nitrógeno y relación C/N

La relación entre carbono y nitrógeno (C/N) es un parámetro fundamental en el compostaje, ya que determina el equilibrio entre los materiales secos y estructurales, ricos en carbono, y los materiales húmedos y frescos, ricos en nitrógeno. Esta proporción influye directamente en la velocidad de descomposición y en la eficiencia del proceso. Un valor adecuado de C/N, generalmente entre 25:1 y 30:1, favorece la actividad microbiana y evita problemas como la generación de malos olores o la ralentización del compostaje. En este apartado se analiza la composición de los residuos vegetales utilizados en la experiencia piloto y cómo su relación C/N ha evolucionado a lo largo del proceso, permitiendo ajustar las prácticas de manejo para optimizar los resultados.

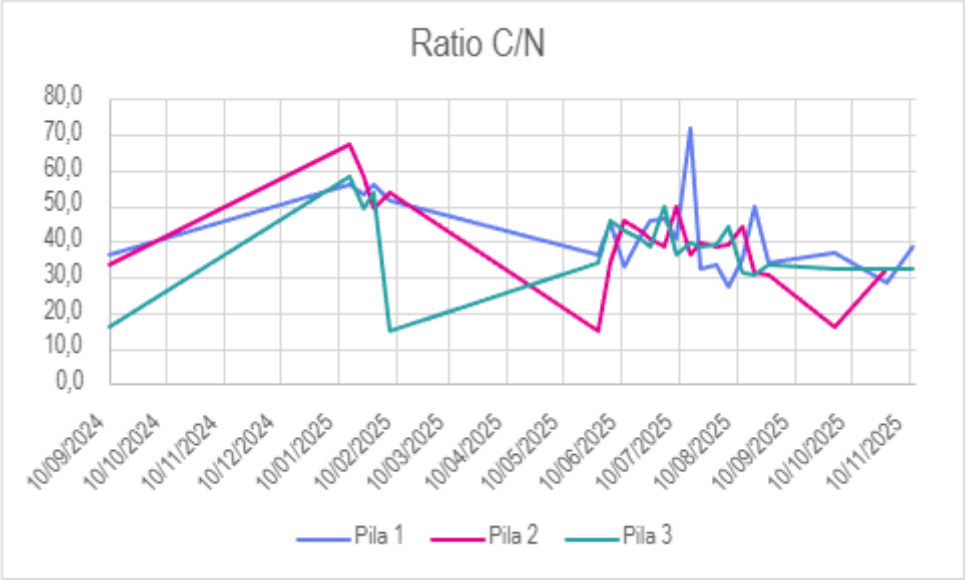


Figura 29. Evolución de la relación C/N de las pilas durante el compostaje.

Al comienzo, los restos vegetales presentan un contenido elevado de carbono estructural y un nitrógeno más limitado, pero a medida que avanza la descomposición, los microorganismos consumen el carbono como fuente de energía y parte de él se pierde en forma de CO_2. Esto provoca una disminución progresiva de la relación C/N, mientras que el nitrógeno tiende a concentrarse en el material estabilizado. Al final del proceso, esta relación se vuelve más baja y estable, lo que indica un compost maduro y apto para su uso.

4.6. Oxígeno

El oxígeno desempeña un papel fundamental en el proceso de compostaje, ya que permite el desarrollo de los microorganismos aerobios responsables de la degradación eficiente de la materia orgánica. Una adecuada aireación favorece la oxidación de compuestos orgánicos, genera calor y acelera la estabilización del material, evitando a su vez la aparición de condiciones anaerobias que producen olores indeseados y disminuyen la calidad del compost. Mantener concentraciones de oxígeno entre 10–18% en la pila garantiza un entorno óptimo para la actividad microbiana, mejora la eficiencia del proceso y contribuye a obtener un producto final

BIOCOMFOREST es un proyecto apoyado por la Fundación Biodiversidad del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO) en el marco del Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia (PRTR), financiado por la Unión Europea – NextGenerationEU.

más homogéneo y maduro, rápida descomposición, buena humificación y mínima emisión de olores; es el rango recomendado para fases termófilas y mesófilas.

Un contenido de oxígeno del 5–7% en una pila de compostaje indica una situación límite entre compostaje aeróbico aceptable y riesgo de condiciones anaerobias, y se relaciona estrechamente con humedad, temperatura, tamaño de partícula, C/N, emisiones de olores y velocidad de descomposición. Otros valores clave cuando se hace referencia al oxígeno en las pilas sería, por encima de 18% (seguro pero subóptimo, ya que indica sobre-aireación innecesaria que puede secar la pila o enfriarla), 5–10% (límite inferior; proceso aún aeróbico pero lento, con riesgo de bolsas anaerobias y olores incipientes), y por debajo de 5% (el proceso pasa a ser anaerobio, genera malos olores (H_2S, NH_3), patógenos y menor calidad final del compost).

La disponibilidad de oxígeno está estrechamente ligada a la humedad y la temperatura del material, ya que un exceso de agua reduce el espacio poroso y dificulta la difusión del oxígeno, mientras que una humedad insuficiente limita la actividad microbiana y ralentiza el proceso. Humedades altas, por encima de 60–70%, reducen drásticamente la aireación de los poros, de modo que el oxígeno en el interior baja hacia ese 5–7%, aunque el aire ambiente tenga 21%. La máxima actividad aeróbica suele darse con humedades intermedias (≈50%), donde el consumo de oxígeno es alto, pero sigue entrando aire; fuera de ese rango, la respiración se limita por falta de O_2 o de agua. Un oxígeno interno de 5–7% suele indicar una combinación de: exceso de humedad, estructura demasiado fina/compactada, o pilas demasiado grandes que dificultan la difusión de aire.

La temperatura también influye en el consumo de oxígeno, a medida que aumenta la actividad biológica durante la fase termófila, se incrementan tanto la generación de calor como la demanda de oxígeno, por lo que es fundamental mantener una aireación adecuada para evitar condiciones anaerobias. La descomposición es más rápida a temperaturas altas siempre que haya suficiente oxígeno; si la pila está caliente y el O_2 cae a 5–7%, la descomposición pasa a estar limitada por oxígeno. En esas condiciones, pequeñas variaciones en aireación (volteo, ventilación) pueden subir el O_2 y disparar la tasa de respiración, aumentando temperatura y velocidad de humificación. Si no se corrige, el déficit de oxígeno favorece zonas anaerobias, con menor maduración, menor humificación y mayores emisiones de NH_3 y H_2S.

Un equilibrio óptimo entre oxígeno, humedad (entre el 50 y el 60%) y temperaturas controladas permite mantener una actividad microbiana eficiente, mejorar la calidad del compost generado y asegurar un proceso estable y uniforme.

Otro parámetro que está directamente relacionado con el oxígeno, la madurez del compost y las emisiones es la relación C/N. Expresa en buena medida la demanda de oxígeno del material: mezclas con C/N bajo (muy nitrogenadas) consumen oxígeno rápidamente y pueden llevar el O_2 interno hacia el 5–7% si la aireación no es suficiente. Un control adecuado de O_2 (mantenerlo claramente por encima de 5–7%) se asocia con mayor reducción de C/N (>35%), mejor humificación e índices de germinación más altos al final del compostaje. En términos prácticos, encontrar de forma estable 5–7% de O_2 en una pila sugiere necesidad de aumentar aireación (volteo, pilas más pequeñas o material estructurante seco) para mejorar madurez y reducir olores y pérdidas de nitrógeno.

Existen dos tipos de métodos para la medición del contenido de oxígeno en una pila de compostaje:

BIOCOMFOREST es un proyecto apoyado por la Fundación Biodiversidad del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO) en el marco del Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia (PRTR), financiado por la Unión Europea – NextGenerationEU.

Directos: Para medir el oxígeno en una pila de compostaje se usan sondas específicas que toman aire del interior de la pila y miden el porcentaje de O_2 en tiempo real.

- **Sonda de oxígeno:** son tubos largos con un sensor en la punta (Clark, zirconia, etc.) que se insertan en la pila y muestran directamente el % de O_2 (0–25%).
- **Sonda con bomba manual (tipo OxyTemp / OT Probe):** la punta de la lanza toma una muestra de aire al accionar un émbolo o bomba; el gas pasa por el sensor externo y se lee el % de oxígeno.

Indirectos: se llevan a cabo en laboratorio una vez se ha recogido la muestra en campo.

Respirometría en laboratorio: se toma una muestra de compost, se coloca en un reactor cerrado y se mide el consumo de O_2 o la producción de CO_2 como medida indirecta.Se recomienda repetir en varios puntos y alturas de la pila para obtener un valor representativo del estado de aireación.

Los factores a tener en cuenta cuando se realizan mediciones de oxígeno para obtener un valor óptimo son:

- **Profundidad:** En la periferia de la pila suele ser 18-20%, pero cae hacia el centro; mide siempre en el interior (0,5-1 m de profundidad).
- **Humedad y estructura:** Humedad óptima (50-60%) y partículas gruesas mantienen poros aireados; exceso de agua desplaza el O_2 hacia valores bajos.
- **Fase del proceso:** Mayor demanda en termofílica (45-55 °C), donde el óptimo es más crítico para evitar limitación por O_2.

Por tanto, si el oxígeno baja por debajo del 5% en la pila de compostaje, indica anaerobiosis, con riesgo de malos olores, patógenos y detención del proceso; actúa inmediatamente volteando y estructurando para restaurar la aireación.

Acciones inmediatas prioritarias

- **Voltear la pila:** Remover todo el material para romper compactaciones, distribuir humedad y reincorporar oxígeno.
- **Añadir material estructurante:** Incorporar ramitas, paja, virutas de madera, cáscaras de coco o hojas secas (10-20% del volumen) para crear poros y mejorar la permeabilidad al aire.
- **Corregir la humedad:** Si está >70% (apelmazada), esparcir para secar naturalmente o añadir material seco hasta una humedad del 50-60%.

Sin embargo, como ya se ha explicado, no será necesario cuantificar la concentración de oxígeno, ni de forma directa o indirecta, cuando el resto de variables medidas (temperatura, humedad y relación C/N) presentan niveles adecuados, que indican valores siempre superiores al valor límite inferior del 5-7% para producirse condiciones aerobias.

4.7. Materia orgánica

La materia orgánica es el componente principal de los residuos utilizados en el compostaje y su transformación es el objetivo fundamental del proceso. Su contenido inicial y su evolución a lo largo del compostaje permiten evaluar el grado de descomposición y la madurez del compost final. Un descenso progresivo en el porcentaje de materia orgánica indica una correcta actividad microbiana y una estabilización del material. En este apartado se analiza la evolución de la materia orgánica durante la experiencia piloto, como indicador clave para valorar la eficiencia del proceso y la calidad del producto obtenido.

BIOCOMFOREST es un proyecto apoyado por la Fundación Biodiversidad del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO) en el marco del Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia (PRTR), financiado por la Unión Europea – NextGenerationEU.

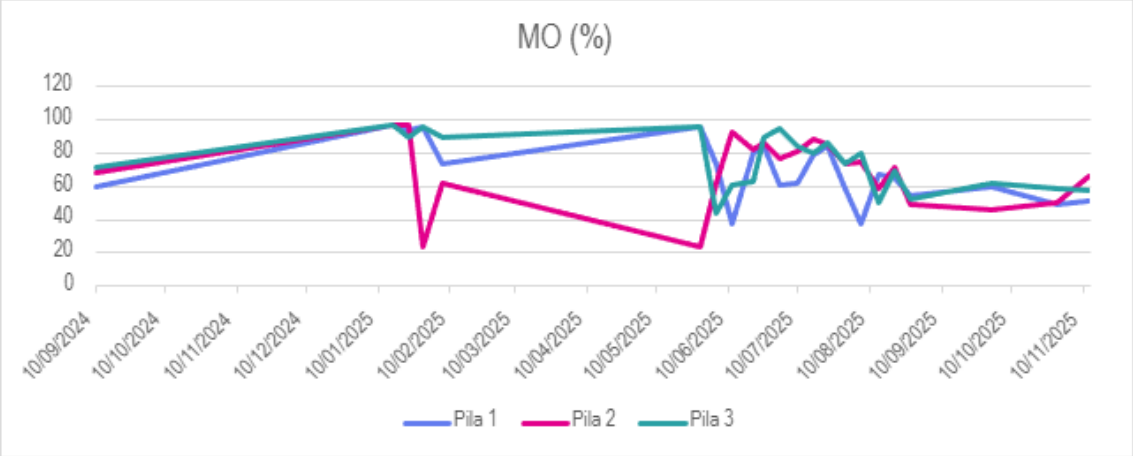


Figura 30. Evolución de la materia orgánica de las pilas durante el compostaje.

La materia orgánica total ha ido disminuyendo de forma progresiva a lo largo del compostaje. Esto ocurre porque los microorganismos utilizan los compuestos orgánicos como fuente de energía y carbono, transformándolos y liberando parte de ese carbono en forma de CO_2. A medida que avanza la degradación, la fracción más fácilmente biodegradable se reduce y el material se vuelve más estable, por lo que la pérdida de materia orgánica se ralentiza. Al final del proceso, esta disminución es un buen indicador de que el compost ha madurado y que gran parte de la materia orgánica inicial ha sido transformada.

5. Compost final

Una vez completado el proceso de compostaje, se procede a la evaluación del compost final obtenido. Este apartado tiene como objetivo analizar las características del producto resultante, tanto desde el punto de vista físico como funcional, para determinar su calidad y su posible aplicación en suelos agrícolas, jardines o espacios verdes.

5.1. Análisis finales

El análisis del compost maduro constituye la fase final del proceso de compostaje y permite evaluar la calidad del producto obtenido tras la descomposición de los residuos vegetales. Este apartado tiene como objetivo examinar las propiedades físicas, químicas y organolépticas del compost, tales como su textura, color, olor, estabilidad y grado de descomposición. Estos indicadores permiten determinar si el compost está listo para su uso y si cumple con los criterios necesarios para su aplicación en suelos agrícolas, jardines o espacios verdes. La evaluación del compost maduro es clave para validar la eficacia del proceso piloto y orientar futuras decisiones en el diseño y operación de la planta de compostaje municipal.

5.1.1. CE, pH y materia orgánica total (MO_T)

En esta sección se presentan los resultados finales del análisis del compost maduro obtenido durante la experiencia piloto. Se han evaluado parámetros clave como la conductividad eléctrica, el pH y el contenido de materia orgánica total, con el objetivo de determinar la calidad del producto y su idoneidad para su uso en suelos. Para compost elaborado exclusivamente con residuos vegetales, se considera adecuado un pH neutro o ligeramente alcalino (entre 6,5 y 8) (Bernal et al., 2009), en este caso las tres pilas entran dentro del rango adecuado. Una conductividad eléctrica inferior a 1500 mS/cm (Amery et al., 2020) para evitar problemas de salinidad, aunque el resultado fuera superior se podría utilizar el compost mezclado con otro

BIOCOMFOREST es un proyecto apoyado por la Fundación Biodiversidad del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO) en el marco del Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia (PRTR), financiado por la Unión Europea – NextGenerationEU.

tipo de sustratos como turba o fibra de coco, y un contenido de materia orgánica entre el 40% y el 60% (Bernal et al., 2009), lo que indica una buena capacidad de mejora del suelo. Estos valores permiten valorar la madurez del compost y su potencial como enmienda orgánica.

Tabla 4. Valores finales de CE, pH y MO de las tres pilas.

	pH	CE (mS/cm)	MO (%)
P1	7,6	338	51
P2	7,9	123	50,1
P3	7,5	117	57,7

Tanto los valores de pH como de materia orgánica total se encuentran dentro del rango esperado para un compost vegetal final. Sin embargo, la conductividad eléctrica presenta valores más elevados de lo esperado, debido probablemente a un déficit de riego durante el transcurso de la fase termófila del proceso de compostaje. Para asegurar que este compost no presentará problemas de fitotoxicidad se realizan ensayos de fitotoxicidad o test de Zucconi y de germinación en semillero, para comprobar posibles limitaciones.

5.1.2. C, N y relación C/N

En este apartado se presentan los resultados finales del análisis de carbono total (C), nitrógeno total (N) y la relación C/N del compost maduro obtenido durante la experiencia piloto. Estos parámetros son fundamentales para evaluar la estabilidad y madurez del compost, así como su capacidad para mejorar la fertilidad del suelo. En compost elaborado exclusivamente con residuos vegetales, se considera óptima una relación C/N inferior a 20, lo que indica que el material está suficientemente maduro y no generará desequilibrios nutricionales en su aplicación, porcentajes de C total entre 25 y 40%, y N total entre 1 y 3% (Bernal et al., 2009). Valores de carbono y nitrógeno dentro de rangos adecuados reflejan una correcta mineralización y una buena calidad del producto final.

Tabla 5. Valores de C, N y relación C/N en el compost maduro.

	C (%)	N (%)	C/N
P1	18,10%	0,47%	38,5
P2	21,23%	0,66%	32,1
P3	21,24%	0,81%	32,1

El valor de la relación C/N es superior al óptimo esperado en un compost maduro, sin embargo, esto se debe a la naturaleza de los residuos vegetales utilizados. Ya en origen presentaban valores de carbono muy altos, además en su mayoría los restos estaban muy lignificados, lo que dificulta y limita su degradación. Cuando se utilice en la planta de compostaje se necesitará realizar mayor acopio de material verde para optimizar las mezclas con lo que la relación C/N disminuirá hasta valores óptimos.

5.1.3. Cationes (K, Ca y Na) y metales pesados (Cd, Cr, Cu, Fe, Ni, Pb y Zn)

En el compost maduro analizado, los niveles de cationes esenciales como calcio (Ca), magnesio (Mg), potasio (K) y sodio (Na) se encuentran dentro de los rangos típicos para composts de origen vegetal con los materiales utilizados esta experiencia piloto. Respecto a los metales pesados, los valores obtenidos se sitúan por debajo de los límites establecidos por la normativa española

BIOCOMFOREST es un proyecto apoyado por la Fundación Biodiversidad del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO) en el marco del Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia (PRTR), financiado por la Unión Europea – NextGenerationEU.

(R.D. 506/2013), que fijan, por ejemplo, máximos de Cd ≤ 3 mg/L, Pb ≤ 200 mg/L, Cr ≤ 300 mg/L, Ni ≤ 100 mg/L y Hg ≤ 2,5 mg/L. Estos resultados confirman la calidad del compost y su idoneidad para aplicaciones agrícolas sin riesgo de contaminación del suelo.

Tabla 6. Valores finales de cationes en el compost maduro en mg/L.

	Ca	K	Mg	Na	P	S	Si
P1	46,47	59,28	12,88	1,61	8,75	4,34	2,06
P2	66,78	44,81	11,75	1,41	9,63	4,98	2,37
P3	72,04	64,23	16,79	1,99	10,45	5,75	1,69

Tabla 7. Valores finales de metales pesados en el compost maduro en mg/L.

	Cd	Cr	Cu	Fe	Ni	Pb	Zn
P1	<0,025	0,47	0,07	83,45	0,15	10	0,31
P2	<0,025	0,34	0,06	64,05	0,10	12	0,28
P3	<0,025	0,46	0,07	99,19	0,13	10	0,38

5.1.4. Carbono extraíble

El carbono extraíble (CExt) es un indicador de la fracción soluble y fácilmente disponible del carbono orgánico presente en el compost. Este parámetro se relaciona directamente con la actividad microbiana y la estabilidad del material. En compost maduro, valores moderados de CExt reflejan una adecuada humificación y baja presencia de compuestos lábiles, lo que reduce riesgos de fitotoxicidad. Sin embargo, niveles elevados pueden indicar una descomposición incompleta o exceso de compuestos solubles, lo que podría favorecer procesos de mineralización rápida y pérdida de nutrientes tras la aplicación al suelo. La determinación se realizó mediante extracción con hidróxido sódico y determinación del carbono extraíble con un analizador elemental. Los valores óptimos para CExt en compost maduro deben de ser inferiores al 1% del peso seco (Chefetz et al., 1996).

Tabla 8. Valores de carbono extraíble en el compost final de las tres pilas.

	C extraíble (%)
P1	0,13
P2	0,14
P3	0,15

El valor obtenido de CExt en las tres pilas es óptimo para un compost vegetal maduro.

5.1.5. Ácidos fúlvicos y húmicos

Durante la descomposición de la materia orgánica, especialmente en compost vegetal bien estabilizado, se forman sustancias húmicas, un conjunto de compuestos orgánicos complejos entre los que destacan los ácidos húmicos y ácidos fúlvicos. Estas sustancias aparecen de manera natural conforme avanza la humificación y son indicadores de madurez y estabilidad del compost, ya que derivan de la transformación progresiva de restos vegetales hacia formas más estables de carbono.

Los ácidos húmicos son moléculas de mayor peso molecular, de color oscuro y menos solubles; contribuyen a mejorar la estructura del suelo, aumentar la capacidad de retención de agua y nutrientes y favorecer la agregación del suelo. Los ácidos fúlvicos, más ligeros y completamente

BIOCOMFOREST es un proyecto apoyado por la Fundación Biodiversidad del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO) en el marco del Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia (PRTR), financiado por la Unión Europea – NextGenerationEU.

solubles, facilitan la movilización y absorción de nutrientes por las raíces y estimulan la actividad microbiana.

En conjunto, ambos tipos de sustancias húmicas aportan beneficios agronómicos clave: mejoran la fertilidad física, química y biológica del suelo, aumentan la disponibilidad de nutrientes y potencian el desarrollo radicular y la salud general de las plantas. En un compost vegetal maduro, su presencia indica un proceso de humificación avanzado y un material apto para su uso como enmienda o componente de sustratos.

En el compost maduro analizado, el contenido de ácidos fúlvicos se encuentra dentro del rango esperado para materiales de origen vegetal bien estabilizados, con valores típicos entre 300 y 1.000 mg/L (US Composting Council, 2002). Aunque no existe un límite normativo específico para los ácidos fúlvicos en la legislación europea o española, su presencia en niveles adecuados es considerada un signo positivo de calidad y estabilidad del compost. Esto supone que el compost generado es óptimo para ser utilizado como fertilizante.

Tabla 9. Valores de ácidos fúlvicos y húmicos en el compost final de las tres pilas.

	Ac. fúlvicos		**Ac. húmicos**	
	(%)	**mg/L**	**(%)**	**mg/L**
P1	0,063	630	0,07	700
P2	0,084	840	0,05	500
P3	0,097	970	0,05	500

En el compost maduro de origen vegetal, los ácidos húmicos representan una fracción importante de la materia orgánica estabilizada, con valores típicos que oscilan entre 200 y 800 mg/L (US Composting Council, 2002), dependiendo del tipo de materia prima y del grado de madurez alcanzado. Estos compuestos de alto peso molecular contribuyen significativamente a la mejora de la estructura del suelo, la capacidad de intercambio catiónico y la retención de agua, además de facilitar la disponibilidad de nutrientes para las plantas. Sin embargo, este compost al haber sido formado a partir de restos vegetales muy lignificados no presenta grandes cantidades de estos ácidos más complejos, predominando los ácidos fúlvicos, lo que supone una menor eficacia como estructurantes del suelo, pero sí que suponen un aporte de nutrientes solubles.

5.1.6. Índice de humificación

El **índice de humificación (IH)** es un parámetro clave para evaluar el grado de transformación de la materia orgánica durante el proceso de compostaje. Este índice se calcula mediante la siguiente fórmula (Bernal et al., 2009):

IH = (Ac. Fúlvicos (%) + Ac. Húmicos (%))/ C Ext. (%)

Tabla 10. Valores del índice de humificación en el compost final de las tres pilas.

	Índice de humificación
P1	1
P2	1
P3	1

BIOCOMFOREST es un proyecto apoyado por la Fundación Biodiversidad del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO) en el marco del Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia (PRTR), financiado por la Unión Europea – NextGenerationEU.

Valores de **IH superiores a 0,5** indican un compost bien humificado, mientras que valores inferiores pueden reflejar un proceso de maduración incompleto o una materia prima poco lignificada. Este índice es útil para confirmar la madurez del compost y su potencial para mejorar las propiedades físico-químicas del suelo.

5.1.7. Polifenoles totales

Los polifenoles hidrosolubles son compuestos orgánicos de bajo peso molecular presentes en el compost, especialmente en las fases iniciales del proceso de maduración. Su presencia en el compost maduro debe ser limitada, ya que en concentraciones elevadas pueden tener efectos fitotóxicos.

Tabla 11. Valores de polifenoles totales en el compost final de las tres pilas.

	Polifenoles totales (%)
P1	0,07
P2	0,06
P3	0,06

En composts maduros de calidad, este porcentaje suele ser inferior al 10 %, lo que indica una baja fitotoxicidad y un adecuado grado de estabilización de la materia orgánica. Por lo que el compost maduro analizado presenta valores adecuados de polifenoles.

5.1.8. Índice de germinación (IG)

El índice de germinación es un parámetro biológico que permite evaluar la fitotoxicidad del compost y su aptitud para ser utilizado como sustrato o enmienda en cultivos. Se basa en la capacidad de las semillas para germinar en presencia del compost, comparada con un control, y refleja la presencia o ausencia de compuestos inhibidores derivados de una descomposición incompleta. En compost vegetal maduro, se considera que un índice de germinación superior al 80% indica un producto estable y no tóxico para las plantas. En este apartado se presentan los resultados obtenidos durante la experiencia piloto, como indicador final de la calidad y madurez del compost producido.

Con el fin de evaluar la posible fitotoxicidad del material y determinar su grado de madurez, se llevó a cabo un ensayo de germinación en placa (Figura 29) siguiendo el procedimiento del Test de Zucconi (Zucconi and de Bertoldi, 1987; Varnero et al., 2007). Para ello, se preparó un extracto acuoso del compost en proporción definida (3:50, 1:1 y 1:3) y se dispuso sobre papel de germinación en condiciones controladas de humedad, temperatura y oscuridad.

BIOCOMFOREST es un proyecto apoyado por la Fundación Biodiversidad del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO) en el marco del Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia (PRTR), financiado por la Unión Europea – NextGenerationEU.



Figura 31. Ensayos de germinación en placa (Test de Zucconi).

Se utilizaron semillas de una especie indicadora (*Nasturtium officinale)* y, tras el periodo de incubación establecido, se registraron el porcentaje de germinación y la longitud media de las radículas. A partir de estos parámetros se calculó el Índice de Germinación (IG), comparándolo con el control (Tabla 8).

Tabla 12. Evaluación del índice de germinación en bioensayos de fitotoxicidad del compost

Muestra		Germinadas	Sin Germinar	Raíz (cm)	L media	% G	% L	IG %	IG medio	S
Cont.	1	53	37	0,3	0,40	58,9	100	58,9	55,0	4,6
	2	90	70	0,4	0,40	56,3	100	56,3		
	3	24	24	0,5	0,40	50,0	100	50,0		
P1	3:50	76	62	0,7	0,73	55,1	183,3	101,0	119,4	17,0
	1:1	91	33	0,7	0,73	73,4	183,3	134,5		
	1:3	69	34	0,8	0,73	67,0	183,3	122,8		
P2	3:50	64	24	0,8	0,87	72,7	216,7	157,6	151,1	17,3
	1:1	51	33	0,9	0,87	60,7	216,7	131,5		
	1:3	69	22	0,9	0,87	75,8	216,7	164,3		
P3	3:50	97	40	0,6	0,73	70,8	183,3	129,8	124,0	13,0
	1:1	69	26	0,8	0,73	72,6	183,3	133,2		
	1:3	50	34	0,8	0,73	59,5	183,3	109,1		

Los resultados obtenidos en el ensayo de germinación se expresaron mediante el porcentaje de germinación (G), la longitud media de radícula (L) y el Índice de Germinación (IG). En la Tabla 8 se recogen los valores medios obtenidos para el extracto de compost y para el control, junto con su desviación estándar. El IG calculado para el compost fue de 119% para la Pila 1, 151% para la Pila 2 y 124% para la Pila 3, valores muy superiores al obtenido en el control (55%), valores que se encuentran por encima del umbral generalmente aceptado para materiales no fitotóxicos. Estos resultados indican que el compost no presentó efectos inhibitorios sobre la germinación ni el desarrollo radicular de la especie ensayada, lo que confirma un grado de madurez adecuado. Al haber obtenido tan buenos resultados en estos ensayos se opta por realizar de forma complementaria ensayos en semilleros utilizando el propio compost maduro como sustrato.

BIOCOMFOREST es un proyecto apoyado por la Fundación Biodiversidad del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO) en el marco del Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia (PRTR), financiado por la Unión Europea – NextGenerationEU.

5.1.9. Ensayos de germinación en semillero

Con el propósito de evaluar la posible fitotoxicidad del compost en condiciones más próximas al uso real del sustrato, se llevó a cabo un ensayo de germinación en maceta siguiendo criterios estandarizados para la valoración agronómica de enmiendas orgánicas. El material se mezcló con un sustrato inerte (turba) en diferentes proporciones (25%, 50%, 60%, 75% y 100%) y se dispuso en semilleros bajo condiciones controladas de humedad, temperatura y fotoperiodo. Se sembraron semillas de una especie indicadora (*Raphanus sativus*). Se opta por bandejas de 6 alveolos, sembrando 2 semillas en cada uno y se riega con agua destilada para evitar aportes externos de minerales.



Figura 32. Ensayo de germinación en semillero.

Transcurrido el periodo de crecimiento definido (6 días), se registraron el porcentaje de emergencia, el número de plántulas viables y la biomasa aérea y radicular. Además, se realizan registros en los días 4 y 5 tras observar el inicio de la germinación de algunas semillas. Sin embargo, el ensayo duró un total de 12 días para poder analizar de forma correcta las posibles diferencias entre el desarrollo de las plantas y la biomasa aérea y radicular.

Los valores obtenidos se compararon con los del tratamiento control, lo que permite determinar la existencia de efectos inhibitorios o estimulantes asociados al compost y, en consecuencia, su grado de madurez y aptitud para su aplicación como sustrato o enmienda. Los resultados del ensayo de germinación en maceta se expresan mediante el porcentaje de emergencia, el número de plántulas viables y la biomasa fresca y seca obtenida al final del periodo de crecimiento.

Los datos registrados (porcentaje de emergencia, número de plántulas viables y biomasa aérea y radicular) se organizaron en una matriz de resultados por réplica y tratamiento. En primer lugar, se verificó la consistencia de las mediciones y se eliminaron valores anómalos únicamente cuando existía justificación técnica. Posteriormente, se calcularon los valores medios y la desviación estándar para cada parámetro y tratamiento. Para evaluar diferencias significativas entre el compost y el control, se aplicó un análisis estadístico adecuado al diseño experimental (ANOVA de un factor), previa comprobación de los supuestos de normalidad y homogeneidad de varianzas.

BIOCOMFOREST es un proyecto apoyado por la Fundación Biodiversidad del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO) en el marco del Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia (PRTR), financiado por la Unión Europea – NextGenerationEU.

Las variables analizadas en el análisis estadístico han sido porcentaje de emergencia (a partir del número de semillas germinadas por día y tratamiento), crecimiento del tallo (cm) medido el día 12 del ensayo, biomasa aérea seca y fresca (g), biomasa radicular seca y fresca (g), tratamientos: Control, 0.25, 0.5, 0.6, 0.75 y 1 (porcentaje de compost en la mezcla) y tres pilas de compost (Pila 1, Pila 2 y Pila 3) (Tabla 13,14,15).

Tabla 13. Crecimiento del tallo (cm) medido el día 12 del ensayo, media y desviación estándar.

		Crecimiento del tallo en cm												Media	S
Control		9	10,5	7,9	11	10,5	7,5	7,2	8,5	10	9,8	10	11,2	9,4	1,4
Pila 1	**25%**	11,5	7,5	11	7,5	7	8	6,5	7,5	8,5	8	11	9	8,6	1,7
	50%	7,5	11	5	9	7	8,5	7,5	9	8	10	9,5	11	8,6	1,7
	60%	12	10,5	8,5	7,5	8,5	6,5	9	5,5	8,5	10,5	9	10	8,8	1,8
	75%	9	10	10	9,5	8,5	9	8,5	9,5	12	7	13	9	9,6	1,6
	100%	11	8	9	8	8	13,5	10	8	11	8,5	7	13,5	9,6	2,2
Pila 2	**25%**	11	10,4	6	10,5	7,6	9,5	8,8	8	10,5	8,5	7,5	9,5	9,0	1,5
	50%	9,4	9,1	9	10	10,5	8,5	8,5	8	4	8	9	10	8,7	1,7
	60%	9	10,5	8,6	9,5	11,5	10	11	9	9,5	2,5	7,5	9,5	9,0	2,3
	75%	11	9,5	8	9,5	11,5	10	9,8	11,5	9	9,5	8,5	8,5	9,7	1,2
	100%	8,5	8,5	11,5	8	5,5	7	11	6,5	6,5	7,5	10		8,2	1,9
Pila 3	**25%**	11	9,5	10	9,5	7	8	8	10,5	8,5	9	9,5		9,1	1,2
	50%	8,5	10,5	9	10	8	7	8	6	8,5	8	7,5	1,5	7,7	2,3
	60%	11,5	12	10	10	10	7	10,5	9	7	10	3	11	9,3	2,5
	75%	10	9,5	10	10	9	9	9	11,5	13	8,5	7,5		9,7	1,5
	100%	10	8	8	9,5	8	7,5	10	9	3	13,5	8	9,5	8,7	2,4

BIOCOMFOREST es un proyecto apoyado por la Fundación Biodiversidad del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO) en el marco del Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia (PRTR), financiado por la Unión Europea – NextGenerationEU.

Tabla 14. Biomasa del tallo en función de la pila y la proporción de sustrato sustituido por compost en el ensayo de germinación.

		Recipiente	Peso húmedo + recipiente	Peso seco + recipiente	Peso seco
Control		2,035	2,552	2,115	0,08
Pila 1	**25%**	1,486	1,408	2,023	0,537
	50%	1,83	1,78	1,917	0,087
	60%	1,854	1,59	1,924	0,07
	75%	2,033	1,328	2,112	0,079
	100%	1,867	1,017	1,934	0,067
Pila 2	**25%**	2,003	2,525	2,073	0,07
	50%	1,915	2,281	1,987	0,072
	60%	1,908	1,887	1,961	0,053
	75%	2,045	2,656	2,13	0,085
	100%	1,973	1,54	2,029	0,056
Pila 3	**25%**	1,953	1,691	2,04	0,087
	50%	2,026	1,754	2,108	0,082
	60%	1,925	1,888	2,014	0,089
	75%	1,943	1,468	2,021	0,078
	100%	1,844	1,35	1,928	0,084

BIOCOMFOREST es un proyecto apoyado por la Fundación Biodiversidad del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO) en el marco del Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia (PRTR), financiado por la Unión Europea – NextGenerationEU.

Tabla 15. Biomasa radicular en función de la pila y la proporción de sustrato sustituido por compost en el ensayo de germinación.

		Recipiente	Peso húmedo + recipiente	Peso seco + recipiente	Peso seco
		1,19	0,347	1,2223	0,0323
Pila 1	**25%**	1,19	0,415	1,206	0,016
	50%	1,205	0,443	1,206	0,001
	60%	1,193	0,398	1,197	0,004
	75%	1,186	0,359	1,199	0,013
	100%	1,189	0,334	1,194	0,005
Pila 2	**25%**	1,176	0,316	1,195	0,019
	50%	1,177	0,358	1,192	0,015
	60%	1,187	0,103	1,195	0,008
	75%	1,186	0,454	1,208	0,022
	100%	1,173	0,366	1,195	0,022
Pila 3	**25%**	1,178	0,049	1,19	0,012
	50%	1,191	0,087	1,207	0,016
	60%	1,19	0,042	1,204	0,014
	75%	1,182	0,022	1,197	0,015
	100%	1,18	0,033	1,199	0,019

En el procesamiento de los datos se calcula el porcentaje de emergencias para cada tratamiento. Los datos muestran que el control alcanzó una emergencia del 100% el quinto día, y las pilas alcanzaron el 100% de emergencia para todas las proporciones entre los días 5, 6 y 11 de ensayo. La conclusión estadística es que no existe variación entre tratamientos, por lo que no procede

BIOCOMFOREST es un proyecto apoyado por la Fundación Biodiversidad del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO) en el marco del Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia (PRTR), financiado por la Unión Europea – NextGenerationEU.

realizar ANOVA (no hay varianza). Todos los tratamientos presentan emergencia máxima, indicando ausencia de fitotoxicidad en la germinación y primeros estadíos de las plántulas.

Los datos de crecimiento del tallo sí presentan variabilidad entre tratamientos, por lo que se realizó el cálculo de la media y la desviación estándar por tratamiento y su comparación mediante ANOVA de un factor. El análisis muestra que no se detectan diferencias significativas entre tratamientos ($p>0,05$), y la variabilidad dentro de cada tratamiento es mayor que la variabilidad entre tratamientos. El control presenta valores medios en torno a 9-10 cm y las mezclas con compost muestran valores similares, sin tendencias claras de inhibición. No se observa un patrón de reducción del crecimiento asociado al aumento del porcentaje de compost. El compost, en ninguno de los porcentajes evaluados, afecta negativamente al crecimiento inicial del tallo.

La biomasa aérea seca se evaluó mediante el cálculo de medias por tratamiento a partir de los valores individuales, observándose en los resultados descriptivos que el control presentó valores cercanos a 2,11 g, mientras que las pilas y los distintos porcentajes de compost mostraron valores comprendidos entre 1,9 y 2,1 g, muy próximos al control y sin evidenciar una tendencia decreciente asociada al incremento del porcentaje de compost. El análisis ANOVA confirmó que no existen diferencias significativas entre tratamientos ($p > 0,05$), lo que indica que la aplicación de compost no afecta negativamente la biomasa aérea y que los valores obtenidos son equivalentes a los del control. Para la biomasa aérea húmeda ocurre lo mismo.

La biomasa radicular seca se determinó a partir de las medias obtenidas por tratamiento, observándose en los resultados descriptivos que el control presentó valores cercanos a 1,22 g, mientras que los tratamientos con compost mostraron valores muy similares, entre 1,19 y 1,21 g, sin evidenciar variaciones relevantes entre ellos. El análisis ANOVA confirmó la ausencia de diferencias significativas entre tratamientos ($p > 0,05$), lo que indica que la presencia de compost no afecta la biomasa radicular, incluso en las mezclas con un 100 % de compost.

El análisis global del ensayo muestra que la emergencia fue del 100 % en todos los tratamientos, sin indicios de fitotoxicidad, y que tanto el crecimiento del tallo como la biomasa aérea y radicular no presentaron diferencias significativas respecto al control, manteniéndose en valores equivalentes incluso en las mezclas con un 100 % de compost, sin evidenciarse inhibición en ninguno de los parámetros evaluados. En conjunto, estos resultados indican que el compost ensayado presenta una alta estabilidad y ausencia de efectos fitotóxicos, siendo apto para su uso como enmienda o como componente de sustratos en proporciones elevadas, ya que su comportamiento en condiciones próximas a la aplicación real resultó comparable, e incluso en algunos casos superior, al observado en el control.

BIOCOMFOREST es un proyecto apoyado por la Fundación Biodiversidad del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO) en el marco del Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia (PRTR), financiado por la Unión Europea – NextGenerationEU.

5.2. Resumen de resultados y legislación

La legislación correspondiente a la regulación de fertilizantes y la utilizada para obtener los valores orientativos es la siguiente:

- Orden AAA/2564/2015, de 27 de noviembre, por la que se modifican los anexos I, II, III, IV y VI del Real Decreto 506/2013, de 28 de junio, sobre productos fertilizantes.
  Tabla 13. Texto correspondiente al compost vegetal en la Orden AAA/2564/2015.

Nº	Denominación del Tipo.	Informaciones sobre la forma de obtención y los componentes esenciales.	Contenido mínimo y máximo (porcentaje en masa). Otros requisitos.	Otras informaciones sobre la denominación del tipo o del etiquetado.	Contenido que debe declararse y garantizarse. Formas y solubilidad de los nutrientes. Otros criterios.
1	2	3	4	5	6
03	Enmienda orgánica Compost vegetal.	Producto higienizado y estabilizado, obtenido mediante descomposición biológica aeróbica (incluyendo fase termofílica), exclusivamente de hojas, hierba cortada y restos vegetales o de poda, bajo condiciones controladas.	– Materia orgánica total: 40%. – Humedad máxima: 40%. – C/N < 15. – No podrá contener impurezas ni inertes de ningún tipo tales como piedras, gravas, metales, vidrios o plásticos.	– pH. – Conductividad eléctrica. – Relación C/N. – Humedad mínima y máxima. – Tratamiento o proceso de elaboración, según la descripción indicada en la columna 3.	– Materia orgánica total. – C orgánico. – N total (si supera el 1%). – N orgánico (si supera el 1%). – N amoniacal (si supera el 1%). – P_2O_5 total (si supera el 1%). – K_2O total (si supera el 1%). – Ácidos húmicos. – Granulometría.

- Real Decreto 824/ 2005, de 8 de julio (anexo V), sobre productos fertilizantes que establece el contenido máximo de metales pesados (mg/kg de materia seca) según sea su clase A, B o C, según la siguiente tabla:
  Tabla 14. Valores límite para clasificación de compost en función de la proporción de metales pesados.

METALES PESADOS	LÍMITES DE CONCENTRACIÓN		
	mg/kg de materia seca		
	Clase A	Clase B	Clase C
Cadmio	0,7	2	3
Cobre	70	300	400
Níquel	25	90	100
Plomo	45	150	200
Zinc	200	500	1000
Mercurio	0,4	1,5	2,5
Cromo (total)	70	250	300
Cromo (VI)	0	0	0

BIOCOMFOREST es un proyecto apoyado por la Fundación Biodiversidad del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO) en el marco del Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia (PRTR), financiado por la Unión Europea – NextGenerationEU.

Tabla 16. Resumen de resultados de los análisis y ensayos realizados con el compost final.

	pH	CE (mS/cm)	Humedad(%)	MO (%)	C (%)	N (%)	C/N	IG (%)	Fitotoxicidad	C_{Ext} (%)	AF (mg/L)	AH (mg/L)	IH	RP	Polifenoles totales (%)
P1	7,6	338	48	51	18	0,47	38	119	No	0,13	630	77	1	1,06	0,07
P2	7,9	123	42	50	21	0,66	32	151	No	0,14	840	500	1	0,63	0,06
P3	7,5	117	49	57	21	0,81	32	124	No	0,15	970	500	1	0,54	0,06
Normativa			40	40			< 15	>80							

Tabla 17. Valores de metales pesados en compost final y valores de referencia en el Real Decreto 824/ 2005, de 8 de julio (anexo V).

		Cd	Cu	Ni	Pb	Zi	Hg	Cr	Cr VI
		mg/kg de materia seca							
P1		<0,025	0,07	0,15	10	0,31	0,00023	62,2	-
P2		<0,025	0,06	0,1	12	0,28	0,00002	58,2	-
P3		<0,025	0,07	0,13	10	0,38	0,00015	52,2	-
Normativa	**Clase A**	0,7	70	25	45	200	0,4	70	0
	Clase B	2	300	90	150	500	1,5	250	0
	Clase C	3	400	100	200	1000	2,5	300	0

BIOCOMFOREST es un proyecto apoyado por la Fundación Biodiversidad del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO) en el marco del Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia (PRTR), financiado por la Unión Europea – NextGenerationEU.

6. Conclusiones del ensayo piloto

En base a los resultados obtenidos en los análisis finales se puede concluir que la calidad del compost final es de Clase A según lo establecido en el Anexo VI del Real Decreto 824/2005, del 8 de julio.

La experiencia piloto de compostaje ha demostrado ser una estrategia eficaz para la valorización de residuos orgánicos de origen vegetal, generando un compost maduro de alta calidad, estable y seguro para su aplicación agrícola. Los análisis físico-químicos y biológicos realizados confirman un adecuado grado de humificación, con niveles óptimos de ácidos húmicos y fúlvicos, baja presencia de polifenoles hidrosolubles y concentraciones de metales pesados muy por debajo de los límites normativos. Estos resultados evidencian la viabilidad técnica del proceso implementado, así como su potencial para ser replicado a mayor escala como parte de una gestión sostenible de residuos vegetales.

7. Recomendaciones para la planta de compostaje

En base a los datos recopilados gracias a la experiencia piloto se proporcionan las siguientes indicaciones y recomendaciones a tener en cuenta para el buen funcionamiento de la planta de compostaje:

- **Relación C/N**

En la experiencia piloto se contó mayoritariamente con restos vegetales leñosos, la fracción verde fue bastante limitada dada la época del año, pero el proceso de compostaje se llevó a cabo a la perfección, obteniendo buenos resultados. Si los restos son muy leñosos o secos se recomienda añadir materiales verdes (césped fresco, restos de poda verde, restos de hortaliza). Si los restos son muy húmedos o verdes, añadir estructurante (ramas trituradas, poda seca). El triturado fino de restos vegetales ayuda a homogenizar el material y acelerar el proceso.

En futuros compostajes es recomendable ampliar el acopio de restos verdes (césped, hojas, enredaderas…) para optimizar la relación carbono nitrógeno, ya que la disponibilidad de restos lignificados no es limitante. De esta forma el proceso de compostaje se realizará más rápido, ya que una buena relación carbono-nitrógeno favorece el incremento de la temperatura y el inicio de la fase bioactiva.

- **Tamaño de partícula**

Es recomendable que todo el material que se vaya a utilizar en las pilas de compostaje esté triturado o astillado. El tamaño de partícula idea estaría entre los 2-3 cm, no es aconsejable utilizar partículas demasiado pequeñas ya que esto favorecería la compactación del material en algunas zonas, dando lugar a procesos anaerobios no deseados. Las ramas o fragmentos leñosos grandes necesitan varios ciclos de compostaje para poder degradarse de forma correcta.

- **Humedad**

La humedad es esencial para el buen desarrollo del proceso de compostaje. El rango óptimo estaría entre el 60-70 % de humedad. Para realizar la comprobación rápida en campo sin necesidad de medidores específicos sería si al apretar un puñado gotea, está demasiado húmedo; si no mantiene forma, demasiado seco. En caso de exceso de humedad las posibles soluciones son agregar materiales estructurantes, como poda triturada, o realizar volteos. Para la falta de humedad se añade agua en forma de riego fino mientras se voltea y mezcla el material.

BIOCOMFOREST es un proyecto apoyado por la Fundación Biodiversidad del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO) en el marco del Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia (PRTR), financiado por la Unión Europea – NextGenerationEU.

Hay que tener especial cuidado con determinados materiales, como es el caso de las hojas secas, ya que a la hora de realizar riegos crean una capa impermeable que no permite que el agua penetre en la pila, resbalando hacia el suelo sin impregnar el compost. Dentro de las soluciones para este problema está triturar las hojas o realizar agujeros en las pilas en los que introducir las mangueras para facilitar que agua llegue a las capas más profundas.

- **Aireación y estructura**

El compostaje es un proceso aerobio, por lo que la presencia de oxígeno es esencial para la maduración del compost. Para mejorar la aireación de la mezcla se deben realizar volteos. En la fase termófila suele ser cada 7 o 10 días, dejando que las pilas adquieran temperatura para favorecer la actividad microbiológica. Una vez el compost empiece la fase de maduración estos volteos se distanciarán en el tiempo, siendo cada 20 – 30 días. La finalidad de los volteos es evitar compactaciones, especialmente si hay muchos restos de césped o poda fresca.

- **Temperatura**

La temperatura debe de seguir una curva:

Fase	Temperatura	Objetivo
Mesófila	20–40°C	Activación microbiana inicial
Termófila	50–70°C	Sanitización y degradación rápida
Enfriamiento	<45°C	Estabilización
Maduración	Ambiente	Humificación

En la fase termófila el compost debe de permanecer un tiempo mínimo de tres días para asegurar la higienización del material. En caso de que no se produzca la subida de temperatura se pueden dar 3 escenarios: falta de nitrógeno, falta de humedad o mala aireación.

- **Control de olores**

En este caso al tratarse únicamente de restos vegetales los olores deberían ser mínimos o inexistentes. En caso de aparición de olores a podredumbre podría ser por exceso de humedad, falta de aireación o problemas de compactación dando lugar a procesos anaerobios, o demasiado material verde sin estructura. La solución sería realizar volteos.

BIOCOMFOREST es un proyecto apoyado por la Fundación Biodiversidad del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO) en el marco del Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia (PRTR), financiado por la Unión Europea – NextGenerationEU.

Referencias

Amery, F., Vandaele, E., Körner, I., Loades, K., Viaene, J., Vandecasteele, B., & Willekens, K. (2020). *Compost Quality Indicators*.

Atchley, J. A., & Clark, T. A. (1979). Kinetics of aerobic stabilization of organic wastes. Compost Science, 20(1), 24–30.

Bernal, M. P., Alburquerque, J. A., & Moral, R. (2009). Composting of animal manures and chemical criteria for compost maturity assessment. A review. Bioresource Technology, 100(22), 5444–5453.

Chefetz, B., Hatcher, P. G., Hadar, Y., & Chen, Y. (1996). Chemical and biological characterization of organic matter during composting of municipal solid waste. Journal of Environmental Quality, 25(4), 776–785.

Haug, R. T. (1993). The practical handbook of compost engineering. Lewis Publishers.

Jeris, J. S., & Regan, R. W. (1973). Controlling environmental parameters for optimum composting. Compost Science, 14(1), 10–15.

Körner, I.; Braulmeier, J.; Herrenklage, J.; Leikam, K.; Ritzkowski, M.; Schlegelmilch, M. and Stegman, R. (2003). Nitrogen transformation during organic waste composting by the Rutgers system and its effects on pH, EC and madurity of the composting mixtures. Bioresource Technology, 78(3), 301-308.

Liang, C., Das, K. C., & McClendon, R. W. (2003). The influence of temperature and moisture content on microbial activity during composting. Bioresource Technology, 86(2), 131–137.

Madejón, E.; López, R.; Cabrera, F. y Díaz, M. J. (2001). Factores que afectan al proceso de compostaje. En Moreno, J. y Moral, R. (eds.). Compostaje. Mundi prensa, pp. 43-65.

Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. (1994). Métodos oficiales de análisis. Tomo III. Secretaría General de Alimentación, Dirección General de Política Alimentaria.

Miyatake, F., & Iwabuchi, K. (2006). Effect of compost temperature on oxygen uptake rate, specific growth rate and enzymatic activity of microorganisms in dairy cattle manure. Bioresource Technology, 97, 961–965.

Montserrat Soliva Torrentó, S. Paulet, 2001. Compostaje de residuos orgánicos y aplicación agrícola. ISBN 84-8409-093-0, págs. 63-78.

US Composting Council. (2002). Test Methods for the Examination of Composting and Compost (TMECC), Method 05.07: Humic Acids and Fulvic Acids. USCC.

Varnero, M. T., Rojas, C., & Orellana, R. (2007). Índices de fitotoxicidad en residuos orgánicos durante el compostaje. Revista de la ciencia del suelo y nutrición vegetal, 7(1), 28-37, ISSN: 0718-2791, Publisher: SciELO Chile.

Zucconi, F. D. (1987). Compost specifications for the production and characterization of compost from municipal solid waste. Compost: production, quality and use, 30-50.

BIOCOMFOREST es un proyecto apoyado por la Fundación Biodiversidad del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO) en el marco del Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia (PRTR), financiado por la Unión Europea – NextGenerationEU.

Anejo I: Datos climáticos

Fecha	Temp. media	Temp. máx	Temp. mín	Precipitación
16/01/2025	3.77	9.09	-6.23	0
17/01/2025	-0.75	8.11	-7.94	0
18/01/2025	-1.99	10.79	-10.7	0
19/01/2025	-1.31	9.02	-11.43	0.2
20/01/2025	2.79	5.29	-0.3	1.76
21/01/2025	6.05	8.58	3.71	1.96
22/01/2025	8.24	10.93	5.88	0.39
23/01/2025	7.51	12.84	3.25	1.57
24/01/2025	8.38	11.8	5.88	0
25/01/2025	6.15	9.5	1.34	4.31
26/01/2025	6.02	9.31	1.28	0
27/01/2025	8.13	11.27	2	9.8
28/01/2025	2.99	5.29	0.55	1.57
29/01/2025	3.1	5.02	1.87	5.68
30/01/2025	3.05	6.53	1.15	0.39
31/01/2025	2.01	7.18	-3.4	0
01/02/2025	3.01	9.3	-3.73	0.2
02/02/2025	0.33	9.35	-8	0
03/02/2025	1.07	10.99	-5.83	0
04/02/2025	0.87	12.96	-7.41	0
05/02/2025	0.75	14.01	-8.46	0.2
06/02/2025	0.67	13.49	-8.6	0
07/02/2025	-0.6	3.97	-6.95	4.9
08/02/2025	0.16	5.6	-6.95	1.37
09/02/2025	5.06	11.13	-0.1	0
10/02/2025	6.13	10.22	2.4	0.39
11/02/2025	5.82	11.54	2.66	0.39
12/02/2025	4.65	7.46	-0.76	6.08
13/02/2025	3.41	11.46	-3	0.2
14/02/2025	6.24	16.13	-0.43	0
15/02/2025	4.95	15.73	-3.72	0.2
16/02/2025	6.42	17.11	-1.49	0
17/02/2025	6.38	14.36	-0.44	0
18/02/2025	5.54	16.32	-1.95	0
19/02/2025	6.26	15.61	-1.09	0
20/02/2025	6.12	15.53	-1.03	0
21/02/2025	6.87	14.3	-1.22	0.98
22/02/2025	6.74	11.53	1.02	1.57
23/02/2025	4.06	14.67	-4.51	0.2

BIOCOMFOREST es un proyecto apoyado por la Fundación Biodiversidad del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO) en el marco del Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia (PRTR), financiado por la Unión Europea – NextGenerationEU.

24/02/2025	5.65	14.09	-2.93	0
25/02/2025	6	8.98	-0.03	0.2
26/02/2025	3.53	12.31	-4.78	0
27/02/2025	3.29	10.07	-3.39	0
28/02/2025	6.08	10.48	2.33	0
01/03/2025	2.9	5.35	0.42	14.5
02/03/2025	1.29	3.19	-1.03	11.96
03/03/2025	4.28	6.54	0.89	21.36
04/03/2025	7.08	9.3	5.29	0
05/03/2025	6.81	9.23	4.04	0
06/03/2025	6.76	8.12	5.55	8.82
07/03/2025	7.68	9.5	6.01	5.29
08/03/2025	6.87	9.77	3.45	16.07
09/03/2025	4.34	8.18	1.8	1.76
10/03/2025	5.63	9.56	3.19	3.53
11/03/2025	6.44	10.29	4.7	1.57
12/03/2025	5.39	8.9	1.35	0.2
13/03/2025	3.63	4.97	1.14	0.2
14/03/2025	1.75	5.21	-1.02	0
15/03/2025	1.3	5.68	-3.85	0
16/03/2025	0.36	3.24	-3.59	0.59
17/03/2025	0.34	4.23	-6.3	2.94
18/03/2025	4.89	6.87	3.32	9.02
19/03/2025	8.26	12.52	5.42	0.2
20/03/2025	9.52	13.05	6.54	0.59
21/03/2025	7.92	10.35	6.34	12.54
22/03/2025	4.77	9.17	1.6	8.04
23/03/2025	3.73	7.45	0.16	4.9
24/03/2025	4.79	8.97	1.61	1.76
25/03/2025	7.04	11.2	4.18	0.2
26/03/2025	5.33	8.83	0.49	0
27/03/2025	5.85	9.94	3.12	0
28/03/2025	5.66	10.34	-1.69	0
29/03/2025	5.63	8.76	2.33	0
30/03/2025	9.16	15.67	1.68	0
31/03/2025	12.26	23.49	-0.96	0
01/04/2025	12.04	23.49	-0.23	0
02/04/2025	8.66	14.3	4.9	0.2
03/04/2025	7.75	9.37	6.74	18.42
04/04/2025	9.52	14.49	7.47	2.16
05/04/2025	9.23	13.5	4.64	0.2

BIOCOMFOREST es un proyecto apoyado por la Fundación Biodiversidad del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO) en el marco del Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia (PRTR), financiado por la Unión Europea – NextGenerationEU.

06/04/2025	10.13	17.69	1.55	4.9
07/04/2025	11.53	20.33	1.68	0
08/04/2025	12.25	21.45	1.94	0
09/04/2025	13.16	21.97	3.39	0
10/04/2025	12.08	19.34	5.56	0.59
11/04/2025	9.09	12.98	3.39	4.12
12/04/2025	11.2	16.06	7.14	0.39
13/04/2025	10.42	16.07	5.69	1.76
14/04/2025	10.54	15.08	7.73	3.72
15/04/2025	6.19	10.29	0.56	2.74
16/04/2025	3.77	8.7	-1.35	0.59
17/04/2025	7.38	14.56	-0.5	0.2
18/04/2025	10.68	17.12	5.03	2.94
19/04/2025	6.08	9.04	3.78	6.86
20/04/2025	7.02	11.92	3.32	0.2
21/04/2025	9.52	15.4	2.53	0.98
22/04/2025	8.99	13.37	4.31	2.55
23/04/2025	10.34	20.52	0.23	0
24/04/2025	12.02	21.91	2.99	0
25/04/2025	13.19	24.41	2.99	0.2
26/04/2025	10.75	15.21	7.33	0
27/04/2025	9.94	15.2	3.19	0
28/04/2025	10.86	19.49	-0.76	0.2
29/04/2025	12.43	19.16	3.85	0
30/04/2025	12.11	18.3	4.58	0
01/05/2025	13.59	19.75	6.81	0
02/05/2025	10.39	16.06	5.82	10.19
03/05/2025	12.11	18.43	5.62	0.2
04/05/2025	10.33	16.13	4.38	0
05/05/2025	9.09	14.03	4.7	0
06/05/2025	6.56	11.06	1.74	0
07/05/2025	9	16.19	-0.36	0
08/05/2025	8.55	14.74	3.59	12.15
09/05/2025	8.63	15.35	2.27	3.92
10/05/2025	9.16	14.23	5.3	14.7
11/05/2025	8.8	12.65	4.83	0
12/05/2025	9.72	15.8	2.27	0
13/05/2025	11.08	16.65	6.15	0.98
14/05/2025	9.95	17.18	2.99	7.84
15/05/2025	10.05	12.59	6.15	0.2
16/05/2025	12.74	17.91	7.66	0

BIOCOMFOREST es un proyecto apoyado por la Fundación Biodiversidad del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO) en el marco del Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia (PRTR), financiado por la Unión Europea – NextGenerationEU.

17/05/2025	12.16	22.37	-0.36	0
18/05/2025	14.98	24.68	3.26	0
19/05/2025	12	16.41	6.74	0
20/05/2025	12.34	18.24	3.92	0
21/05/2025	12.71	23.1	0.76	2.16
22/05/2025	11.2	15.66	6.41	0
23/05/2025	11.7	17.77	5.24	0
24/05/2025	12.49	22.83	-0.5	0
25/05/2025	14.19	25.67	2.6	0
26/05/2025	15.22	25.4	5.63	0
27/05/2025	15.57	28.09	2.36	0
28/05/2025	17.53	27.43	4.05	0
29/05/2025	18.87	30.46	4.31	0
30/05/2025	19.12	31.12	8.52	0
31/05/2025	19.9	31.51	8.19	0
01/06/2025	18.59	29.14	12.27	1.19
02/06/2025	15.44	20.74	11.61	7.92
03/06/2025	14.49	22.37	9.51	0.59
04/06/2025	15.07	21.07	8.72	0
05/06/2025	15.48	24.02	5.89	0
06/06/2025	17.44	27.12	7.33	0
07/06/2025	17.83	26.66	6.81	0
08/06/2025	18.17	28.68	9.5	0
09/06/2025	20.06	32.76	7.27	1.19
10/06/2025	20.92	32.63	11.87	2.18
11/06/2025	18.03	26.46	12.2	16.04
12/06/2025	17.97	26.13	10.88	0.79
13/06/2025	19.09	28.62	8.92	0
14/06/2025	20.25	30.52	10.49	0
15/06/2025	18.76	24.68	13.72	0
16/06/2025	21.22	31.71	11.67	0
17/06/2025	23.05	32.37	12.8	0
18/06/2025	22.62	33.03	10.69	0
19/06/2025	20.61	33.22	12.47	7.33
20/06/2025	21.6	31.58	10.5	0
21/06/2025	23.51	33.42	14.83	1.98
22/06/2025	23.22	31.91	15.29	0.4
23/06/2025	23.07	32.83	13.32	0.2
24/06/2025	22.17	32.1	14.44	0
25/06/2025	20.35	28.03	11.15	0
26/06/2025	19.34	28.55	8.79	0

BIOCOMFOREST es un proyecto apoyado por la Fundación Biodiversidad del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO) en el marco del Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia (PRTR), financiado por la Unión Europea – NextGenerationEU.

27/06/2025	22.19	32.17	10.83	0
28/06/2025	23.57	34.15	11.48	0
29/06/2025	24.44	33.95	12.66	0
30/06/2025	22.75	33.16	13.12	10.49
01/07/2025	22.96	31.97	12.8	0
02/07/2025	20.67	30.72	15.68	3.96
03/07/2025	21.69	30.72	14.64	10.89
04/07/2025	21.84	30.19	16.08	14.45
05/07/2025	20.79	28.55	13.78	4.95
06/07/2025	20.08	28.55	12.07	0.2
07/07/2025	18.03	24.48	12.27	0
08/07/2025	17.5	25.2	8.45	0
09/07/2025	19.74	30.59	8.98	0.99
10/07/2025	21.99	32.24	11.81	0.2
11/07/2025	21.99	30.32	12.93	1.78
12/07/2025	17.15	23.95	11.34	0
13/07/2025	19.18	27.49	9.11	0.2
14/07/2025	21.23	31.05	10.03	0
15/07/2025	21.27	29.86	12.27	0
16/07/2025	21.59	33.55	8.52	0
17/07/2025	23.75	34.81	10.56	0
18/07/2025	22.18	32.04	10.96	0
19/07/2025	19.08	26.12	10.3	0
20/07/2025	18.85	25.4	13.32	0
21/07/2025	17.22	25.99	7.2	0
22/07/2025	19.1	29.67	6.62	0
23/07/2025	17.94	25.4	12.27	0
24/07/2025	15.03	20.59	11.02	0
25/07/2025	16.48	22.24	10.63	0
26/07/2025	17.88	26.04	8.45	0
27/07/2025	18.4	29.01	5.56	0
28/07/2025	16.57	20.86	12.73	0
29/07/2025	16.1	21.18	12.47	0
30/07/2025	18.1	25.18	9.44	0
31/07/2025	18.19	29.73	5.69	0
01/08/2025	18.06	27.95	7.33	0
02/08/2025	19.04	28.68	8.51	0
03/08/2025	19.48	29.67	7.27	0
04/08/2025	20.36	33.47	5.89	0
05/08/2025	21.2	30.92	9.44	0
06/08/2025	22.33	33.8	10.56	0

BIOCOMFOREST es un proyecto apoyado por la Fundación Biodiversidad del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO) en el marco del Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia (PRTR), financiado por la Unión Europea – NextGenerationEU.

07/08/2025	23.4	35.31	11.08	0
08/08/2025	24.16	36.43	10.76	0
09/08/2025	23.02	35.05	12.47	3.56
10/08/2025	23.57	34.85	11.54	0
11/08/2025	24.13	35.57	12.2	1.39
12/08/2025	23.03	34.91	15.36	15.05
13/08/2025	21.5	28.61	15.03	0
14/08/2025	21.37	32.41	11.61	0
15/08/2025	23.06	34.91	12	0
16/08/2025	22.55	34.2	13.19	0
17/08/2025	23.1	35.51	10.43	0
18/08/2025	21.96	33.48	12.93	0
19/08/2025	17.88	25.46	12.4	0
20/08/2025	16.34	22.37	10.75	0
21/08/2025	14.78	20.99	7.33	0
22/08/2025	16.35	25.12	7	0
23/08/2025	17.5	30.32	4.38	0
24/08/2025	18.79	29.53	8.45	0
25/08/2025	21.67	31.31	11.67	0
26/08/2025	18.7	31.7	10.69	11.29
27/08/2025	19.22	27.62	13.78	2.38
28/08/2025	15.99	22.62	7.79	0
29/08/2025	14.7	20.99	7.2	0
30/08/2025	16.52	26.7	7.07	0
31/08/2025	16.15	25.99	6.48	0
01/09/2025	13.44	21.18	6.35	0
02/09/2025	12.63	21.38	3.26	0
03/09/2025	17.35	28.94	4.37	0
04/09/2025	16.07	24.8	7.53	0
05/09/2025	17.17	27.16	6.28	0
06/09/2025	18.8	31.11	7.73	0
07/09/2025	18.08	25.67	11.28	0
08/09/2025	15.82	23.35	10.88	1.58
09/09/2025	14.33	23.74	5.56	0
10/09/2025	12.52	19.54	2.99	0.2
11/09/2025	16.67	25	6.14	0
12/09/2025	17.62	25.46	10.1	0
13/09/2025	16.47	25.19	7	0
14/09/2025	16.31	29.07	4.25	0.4
15/09/2025	18.03	30.12	5.69	0
16/09/2025	18.44	31.3	7.6	0

BIOCOMFOREST es un proyecto apoyado por la Fundación Biodiversidad del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO) en el marco del Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia (PRTR), financiado por la Unión Europea – NextGenerationEU.

17/09/2025	18.36	32.94	5.23	0
18/09/2025	20.54	33.73	6.75	0
19/09/2025	19.87	31.63	8.45	1.78
20/09/2025	18.81	28.61	13.38	3.56
21/09/2025	12.58	16.66	4.43	0.79
22/09/2025	8.56	17.04	0.36	0
23/09/2025	9.84	15.27	4.9	0
24/09/2025	10.08	17.03	3.19	0
25/09/2025	9.02	20.19	-1.74	0
26/09/2025	9.54	23.55	-3.59	0
27/09/2025	13.32	25.45	-1.08	0
28/09/2025	14.14	21.51	6.93	5.94
29/09/2025	13.16	16.46	10.49	0
30/09/2025	14.23	22.29	7	0
01/10/2025	13.88	24.99	2.53	0
02/10/2025	13.13	26.3	0.23	0
03/10/2025	13.31	24.67	2.73	0
04/10/2025	15.43	26.57	4.17	0
05/10/2025	11.21	16.26	5.22	0
06/10/2025	9.44	24.72	-3.07	0
07/10/2025	11.19	27.03	-1.22	0
08/10/2025	13.1	24.26	0.89	0
09/10/2025	14.1	19.07	9.37	0
10/10/2025	12.19	20.71	4.11	0
11/10/2025	9.73	19.74	-0.04	0
12/10/2025	13.07	19.87	3.52	0
13/10/2025	13.69	20.58	7.06	0
14/10/2025	11.93	21.64	4.11	0.99
15/10/2025	10.36	22.75	-0.7	0
16/10/2025	9.15	22.76	-0.76	2.38
17/10/2025	10.78	21.9	2.2	0.79
18/10/2025	10.64	23.01	0.94	0.2
19/10/2025	10.79	19.69	2.01	3.76
20/10/2025	12.76	15.27	11.14	0.4
21/10/2025	14.21	19.28	10.62	1.39
22/10/2025	14.96	17.39	12.99	2.97
23/10/2025	12.52	15.68	7.26	0.79
24/10/2025	9.68	13.31	3.91	1.58
25/10/2025	11.74	14.1	8.25	2.18
26/10/2025	7.39	11.92	-1.49	0
27/10/2025	5.48	18.81	-4.58	0

BIOCOMFOREST es un proyecto apoyado por la Fundación Biodiversidad del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO) en el marco del Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia (PRTR), financiado por la Unión Europea – NextGenerationEU.

28/10/2025	6.73	20.33	-4.12	0.2
29/10/2025	9.28	13.38	5.69	11.88
30/10/2025	10.98	16.26	7.13	0
31/10/2025	10.95	15.74	4.64	0
01/11/2025	11.78	13.32	10.22	1.19
02/11/2025	7.87	12.38	0.62	0
03/11/2025	6.05	17.82	-2.27	0.2
04/11/2025	6.71	18.48	-2.87	0
05/11/2025	8.54	12.27	3.12	14.45
06/11/2025	7.41	9.23	5.82	1.98
07/11/2025	8.32	11.4	5.62	3.17
08/11/2025	7.16	11.14	3.52	1.78
09/11/2025	5.28	14.28	-1.88	0.2
10/11/2025	5.11	11.67	-0.83	0
11/11/2025	6.33	13.31	1.41	0
12/11/2025	9.35	20.66	-0.76	0.2
13/11/2025	13.78	17.71	10.89	0
14/11/2025	11.01	13.83	8.51	0.79
15/11/2025	8.64	12.53	5.62	15.05
16/11/2025	7.71	10.95	4.96	2.38
17/11/2025	7.21	11.99	2.86	0.2
18/11/2025	4.52	11.51	-2.41	0
19/11/2025	1.52	7.45	-3.73	0.2
20/11/2025	2.69	5.81	0.42	0.2
21/11/2025	0.57	3.44	-1.56	0.99
22/11/2025	2.2	7.77	-1.74	0
23/11/2025	5.43	7.92	2.4	0.59
24/11/2025	7.4	10.43	2.98	5.94
25/11/2025	3.99	8.05	1.61	0.2
26/11/2025	3.32	5.48	0.36	0
27/11/2025	4.51	9.75	0.17	0
28/11/2025	3	12.57	-3.66	0
29/11/2025	1.64	9.03	-3.66	0.2
30/11/2025	3.81	6.47	-3.26	3.37
01/12/2025	0.77	9.55	-7.21	0
02/12/2025	1.55	5.68	-2.67	0.59
03/12/2025	2.35	7.25	-1.68	0
04/12/2025	3.81	6.34	1.74	7.33
05/12/2025	5.98	10.5	2.79	0
06/12/2025	10.42	12.07	9.23	0.4
07/12/2025	7.77	10.75	-1.35	0

BIOCOMFOREST es un proyecto apoyado por la Fundación Biodiversidad del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO) en el marco del Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia (PRTR), financiado por la Unión Europea – NextGenerationEU.

08/12/2025	2.07	11.25	-2.54	0.2
09/12/2025	4.61	12.06	-2.08	0.79
10/12/2025	6.64	8.05	4.96	10.1
11/12/2025	5.17	10.34	0.09	0

BIOCOMFOREST es un proyecto apoyado por la Fundación Biodiversidad del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO) en el marco del Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia (PRTR), financiado por la Unión Europea – NextGenerationEU.