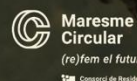




BIOFORIN



ASSOCIACIÓ DE PROPRIETARIS
DEL MONTNEGRE I CORREDOR



Acción C3: Viabilidad técnica para el uso de tecnologías para valorizar los recursos forestales

Tecnologías y procesos para la valorización de la biomasa forestal del ámbito geográfico del proyecto

31/12/2025

www.bioforin.com



VICEPRESIDENCIA
TERCERA DEL GOBIERNO
GOBIERNO DE ESPAÑA
MINISTERIO
PARA LA TRANSICIÓN ECOLÓGICA
Y EL RETO DEMOGRÁFICO



Plan de Recuperación,
Transformación
y Resiliencia



Financiado por
la Unión Europea
NextGenerationEU

Bioforin cuenta con el apoyo de 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.



BIOFORIN

GESTIÓN BIOREGIONAL
DE LOS RECURSOS FORESTALES
PARA LA NUEVA BIOECONOMÍA INDUSTRIAL



Contenido

1. Descripción y objetivos de la acción	3
2. ACCIÓN C3.1 - Combustión directa: rendimiento energético y análisis de los gases producidos por tipología de recursos forestales	4
2.1. Introducción.....	4
2.2. Propiedades de la biomasa que influyen en la combustión	4
2.3. Emisiones generadas en la combustión de biomasa.....	5
2.4. Normativa europea y estatal de emisiones generadas en la combustión de biomasa	5
2.5. Metodología para pruebas de combustión.....	7
Biomosas objeto de estudio.....	7
Caracterización inicial de la biomasa.....	7
Tratamiento de la biomasa.....	8
Descripción del sistema de pruebas.....	8
Descripción del equipamiento de medida de emisiones.....	9
Diseño de experimentos pruebas de combustión	10
Cálculo de consumo de biomasa de la caldera	11
2.6. Resultados pruebas de combustión	12
Caracterización de biomasa.....	12
Operación y rendimiento de la caldera	13
Consumo de biomasa de la caldera	14
Emisiones atmosféricas derivadas del proceso de combustión	15
2.7. Conclusiones.....	20
3. ACCIÓN C3.2 - Pretratamientos de biomasa forestal orientados a potenciar su valoración por digestión anaerobia	21
3.1. Material y métodos	21
Materiales.....	21
Procedimiento.....	23
3.2. Resultados	24
4. ACCIÓN C3.3 - Procesos termoquímicos para la valorización de recursos forestales.....	28



BIOFORIN

GESTIÓN BIOREGIONAL
DE LOS RECURSOS FORESTALES
PARA LA NUEVA BIOECONOMÍA INDUSTRIAL



Centre Bioenergy Catalunya



Centre Tecnològic de Catalunya



Bosch



ASSOCIACIÓ DE PROPETARIS
DEL MONTSENY I CORREDOR



Consorci
per a la
Gestió dels Residus
del Vallès
Oriental



reflexion el futur
Consorci de Residus
del Maresme

4.1.	Elección de la tecnología.....	28
4.2.	Diseño de las mezclas	30
4.3.	Ensayos experimentales	32
4.4.	Caracterización de los productos.....	33
	Biochar.....	33
	Gas de síntesis	40
4.5.	Ensayos a gran escala en la planta piloto del CENER.....	40
4.6.	Conclusiones.....	45

**BIOFORIN**GESTIÓN BIOREGIONAL
DE LOS RECURSOS FORESTALES
PARA LA NUEVA BIOECONOMÍA INDUSTRIAL

1. Descripción y objetivos de la acción

La valorización energética de la biomasa forestal ofrece la oportunidad de producir biocombustibles que pueden sustituir los combustibles fósiles, contribuyendo así a la descarbonización de la sociedad. Por un lado, la combustión directa en calderas, si bien es una tecnología ampliamente implementada, actualmente requiere flujos de biomasa de una calidad muy específica. En el proyecto, se pretende evaluar esta tecnología para flujos no aprovechados actualmente para este fin. Por otro lado, los procesos termoquímicos como la pirólisis y la gasificación aparecen como una buena alternativa ya que permiten obtener un gas de síntesis con un elevado poder calorífico que puede sustituir el gas natural, por lo que se contempla evaluar estos procesos en planta piloto. Finalmente, desde hace algunos años se ha considerado a los residuos forestales como sustratos adecuados para la producción de biogás. Sin embargo, es necesario aplicar pretratamientos a este tipo de biomasa de cara a facilitar la digestibilidad de las fracciones orgánicas capaces de ser metabolizadas en un proceso anaerobio. Por otro lado, la posibilidad de implementar procesos de co-digestión ha generado gran interés ya que se consiguen mezclas con un mejor potencial de producción de metano.

Esta acción tiene como objetivo evaluar la viabilidad técnica para el uso de biomasa forestal en diferentes tipos de procesos focalizados a la obtención de energía renovable. Concretamente se evaluarán las tecnologías de combustión directa, gasificación y producción de biogás de los bioproductos de biomasa no aprovechables de forma cruda o no procesados.

**BIOFORIN**GESTIÓN BIOREGIONAL
DE LOS RECURSOS FORESTALES
PARA LA NUEVA BIOECONOMÍA INDUSTRIAL

2. ACCIÓN C3.1 - Combustión directa: rendimiento energético y análisis de los gases producidos por tipología de recursos forestales

2.1. Introducción

España dispone de una elevada disponibilidad de recursos de biomasa, situándose entre los países europeos con mayor volumen de biomasa forestal. En Cataluña, aproximadamente el 65% del territorio es superficie forestal, aunque su aprovechamiento comercial continúa siendo reducido y representa únicamente el 1,3% del PIB del sector primario y menos del 0,1% del PIB global. La combustión constituye actualmente la tecnología más consolidada para la valorización energética de la biomasa; sin embargo, su uso genera impactos ambientales, especialmente en relación con las emisiones de partículas. Diferentes estudios han demostrado que, en el ámbito doméstico, el empleo de combustibles de baja calidad puede afectar negativamente a la calidad del aire, siendo determinantes factores como el tipo de biomasa utilizada y su pretratamiento.

Las características intrínsecas de la biomasa, composición elemental, contenido de humedad, granulometría, impurezas y variabilidad según el origen, influyen significativamente en su comportamiento durante la combustión y en la formación de contaminantes. Asimismo, etapas como la trituración, el tamizado o el secado tienen un papel relevante en la calidad final del biocombustible, afectando directamente al rendimiento energético y a las emisiones generadas. La normativa vigente, como las directivas de Ecodiseño (UE 2015/1185 y UE 2015/1189) y el Real Decreto 1042/2017, establece límites estrictos de emisión para garantizar la protección de la calidad del aire.

2.2. Propiedades de la biomasa que influyen en la combustión

La humedad es uno de los parámetros más determinantes en la combustión de biomasa. El valor óptimo se sitúa en torno al 30%, ya que humedades superiores al 35% o inferiores al 20% se asocian con incrementos significativos de emisiones y una reducción del poder calorífico. De hecho, la disminución del contenido de agua mejora de forma notable el rendimiento energético del combustible.

La granulometría también influye significativamente: en el caso de la astilla, el tamaño de partícula más eficiente se encuentra entre 1 y 3 cm. Tamaños mayores tienden a generar aumentos en las emisiones, especialmente cuando la combustión se realiza con leña, incluso si no existe variación en la composición del material.

La presencia de corteza afecta igualmente al proceso. La combustión de astilla sin corteza proporciona un mayor poder calorífico y un mejor control de la humedad en comparación con la astilla con corteza.

Los pretratamientos desempeñan un papel clave. Tanto la trituración y el tamizado como el lavado previo contribuyen a obtener un combustible más homogéneo y con menor presencia de impurezas. Un pretratamiento adecuado garantiza una granulometría correcta, reduce la cantidad de áridos y otros impropios y, en consecuencia, disminuye las emisiones generadas durante la combustión.

En conjunto, el contenido de humedad y el poder calorífico se consideran los indicadores más representativos de la calidad del biocombustible.

**BIOFORIN**GESTIÓN BIOREGIONAL
DE LOS RECURSOS FORESTALES
PARA LA NUEVA BIOECONOMÍA INDUSTRIAL

2.3. Emisiones generadas en la combustión de biomasa

La combustión de biomasa produce emisiones gaseosas, como CO, CO₂, NO_x y SO₂, así como partículas sólidas en suspensión. La concentración de estos contaminantes depende tanto de las características fisicoquímicas del combustible como del diseño y la operación de la caldera.

Las partículas en suspensión (PM), especialmente en las fracciones PM₁₀ y PM_{2.5}, constituyen uno de los principales contaminantes generados. Estas partículas pueden alcanzar valores de hasta 150 mg/Nm³ en combustiones de madera sin sistemas de depuración, y su formación se asocia principalmente a combustiones incompletas, reacciones con compuestos alcalinos o condiciones deficientes de oxigenación.

Las emisiones de óxidos de nitrógeno (NO_x), que incluyen NO, NO₂ y N₂O, se generan a través de mecanismos vinculados a la oxidación del propio combustible y del nitrógeno presente en el aire. La formación predominante dependerá de la temperatura, siendo especialmente significativa la contribución del NO_x térmico en condiciones superiores a 1300 °C.

En cuanto a los óxidos de carbono, la presencia de CO₂ indica una combustión completa, mientras que el CO aparece como resultado de combustiones incompletas. En instalaciones pequeñas y medianas (hasta 500 kW), es habitual encontrar valores de CO comprendidos entre 50 y 500 mg/Nm³, dependiendo del grado de optimización del proceso.

Las emisiones de dióxido de azufre (SO₂) suelen ser bajas en la combustión de madera, debido al reducido contenido de azufre en este tipo de biomasa.

2.4. Normativa europea y estatal de emisiones generadas en la combustión de biomasa

Las normativas europea y estatal establecen límites estrictos de emisión aplicables a instalaciones pequeñas y medianas, con el fin de reducir el impacto ambiental y proteger la salud pública. Las normas más relevantes se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 1 Normativa aplicable a la calidad de aire y combustión de calderas de biomasa en instalaciones pequeñas y medianas.

Contaminante	Norma	Descripción / Alcance	Valor (mg/Nm ³)	Condiciones
Monóxido de carbono (CO)	UNE-EN 303-5:2013	Calderas de combustibles sólidos hasta 500 kW (UE)	500	Potencia nominal entre 50 y 150 kW. Clase 5, rendimiento 89%, caldera de biomasa automática. T = 273,15 K; P = 101,3 kPa; 10 % O ₂ normalizado.
Dióxido de nitrógeno (NO₂)	Directiva 2008/50/EC	Directiva de calidad del aire para la protección de la salud humana y el medio ambiente (UE)	0,026	Valor límite anual para protección de la salud humana (NO ₂).
Óxidos de nitrógeno (NO_x)	Directiva 2010/75/UE	Directiva de emisiones industriales en calderas (UE)	250	T = 273,15 K; P = 101,3 kPa; 6 % O ₂ normalizado para combustibles sólidos.
	Real Decreto 1042/2017	Limitación de emisiones a la atmósfera de instalaciones de combustión medianas (ES)	500	VLE para nuevas instalaciones de combustión medianas entre 1 y 5 MW térmicos.



BIOFORIN

GESTIÓN BIOREGIONAL
DE LOS RECURSOS FORESTALES
PARA LA NUEVA BIOECONOMÍA INDUSTRIAL



Dióxido de azufre (SO₂)	Directiva 2010/75/UE	Directiva de emisiones industriales en calderas (UE)	200	T = 273,15 K; P = 101,3 kPa; 6 % O ₂ normalizado para combustibles sólidos.
	Real Decreto 1042/2017	Limitación de emisiones en instalaciones de combustión medianas (ES)	200	VLE para nuevas instalaciones entre 1 y 5 MW térmicos.
Partículas (PM)	Real Decreto 1042/2017	Limitación de emisiones en instalaciones de combustión medianas (ES)	50	VLE para nuevas instalaciones entre 1 y 5 MW térmicos.
	Reglamento 2015/1185	Requisitos de diseño ecológico para aparatos de calefacción local de combustible sólido (UE)	40 (frontal cerrado – no pellet) 20 (frontal cerrado – pellet)	T = 273,15 K; P = 101,3 kPa; 13 % O ₂ normalizado.

La Tabla 2 presenta los valores límite de emisión para diversos contaminantes (CO, NO_x, SO₂ y partículas) corregidos al 13% de oxígeno (O₂), de acuerdo con las normativas del Reglamento 2015/1185 y el Real Decreto 1042/2017. Estos valores han sido ajustados para condiciones estándar de temperatura (273,15 K) y presión (101,3 kPa), y se utilizarán como referencia para la comparación de todos los experimentos, garantizando que las mediciones de emisiones sean comparables bajo condiciones normalizadas.

Tabla 2 Valores límites de emisiones corregidas al 13% de oxígeno para la comparación experimental.

Contaminante	Norma	Concentración (mg/Nm ³) 13% O ₂
Monóxido de carbono (CO)	Reglamento 2015/1185	500
Óxidos de nitrógeno (NO_x)	Reglamento 2015/1185	300
Dióxido de azufre (SO₂)	Directiva 2010/75/UE	375
Partículas (PM)	Reglamento 2015/1185	40

A continuación, se muestra la ecuación para la corrección de oxígeno que se utiliza para ajustar la concentración de una contaminante medida en los gases de combustión, de manera que se exprese en términos de una concentración de oxígeno de referencia. Esto es importante porque la concentración de contaminantes depende de la cantidad de oxígeno presente en los gases. La ecuación general para la corrección de oxígeno es:

$$C_{\text{corr}} = C_{\text{med}} \cdot \frac{21 - O_{\text{ref}}}{21 - O_{\text{med}}} \quad (\text{Ec. 1})$$

Donde:

C_{corr} = Es la concentración corregida del contaminante.

C_{med} = Es la concentración medida del contaminante.

O_{ref} = Es el porcentaje de oxígeno de referencia, que depende de la normativa (p. ej., 3% o 6%).

O_{med} = Es el porcentaje de oxígeno medido en los gases de combustión. El 21% es el contenido de O₂ en aire seco.



BioForin cuenta con el apoyo de 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.

**BIOFORIN**GESTIÓN BIOREGIONAL
DE LOS RECURSOS FORESTALES
PARA LA NUEVA BIOECONOMÍA INDUSTRIAL

2.5. Metodología para pruebas de combustión

Biomásas objeto de estudio

En este estudio se seleccionaron cuatro biomásas representativas para evaluar su comportamiento en procesos de combustión en calderas de pequeña potencia. Tres de ellas corresponden a biomásas forestales locales, procedentes del macizo del Montnegre-Corredor, un espacio con actividad silvícola continua y grandes volúmenes de restos generados por trabajos de gestión forestal, prevención de incendios y clareos. Las especies escogidas: pino piñonero (*Pinus pinea*), platanero (*Platanus × hispanica*) y castaño (*Castanea sativa*), presentan un denominador común: carecen de un aprovechamiento comercial alternativo sólido, es decir, no tienen demanda estable como madera de calidad, biomasa industrial o subproducto para otras cadenas de valor. Debido a su heterogeneidad, tamaño irregular y elevado contenido de fracción fina, estos residuos generan dificultades logísticas y comerciales, por lo que su valorización más adecuada y sostenible es la combustión térmica, especialmente en sistemas locales donde se promueve el uso de recursos de proximidad (km-0).

Como referencia comparativa se incorporó un biocombustible estandarizado y ampliamente distribuido: los pellets comerciales NaturPellet®, adquiridos en Leroy Merlin en sacos de 15 kg. Este pellet dispone de certificación ENplus A1, que garantiza características homogéneas y estrictamente controladas en términos de humedad (<10%), contenido de cenizas (<0,7%), durabilidad mecánica, granulometría y poder calorífico. Su inclusión como benchmark permite contrastar el comportamiento de las biomásas forestales sin procesar frente a un combustible de calidad industrial, usado habitualmente en calderas domésticas y con un rendimiento muy estable. Esta comparación es esencial para contextualizar las posibilidades reales de aprovechamiento energético de las biomásas locales y valorar su conformidad con los requisitos normativos de emisiones y eficiencia.



Figura 1 Izquierda- Pino piñonero y pellets comerciales; Derecha - Almacenamiento de biomasa.

Caracterización inicial de la biomasa

A la llegada del biocombustible a las instalaciones de Eurecat, se realizó una caracterización inicial para determinar los principales parámetros que afectan a la combustión y a las emisiones generadas durante el proceso. Estos parámetros se describen a continuación:

- **Granulometría:** Mide la distribución de las partículas en función de su tamaño. Es relevante para evaluar la calidad del combustible y el mantenimiento de los equipos. Se expresa en porcentaje de cada fracción respecto al total (%).
- **Poder calorífico inferior (PCI):** Mide la energía disponible para la combustión sin considerar el calor de condensación del vapor de agua. Es interesante en aplicaciones donde no se recupera este calor. Se expresa en MJ/kg o kcal/kg. Norma UNE-EN ISO 18125 Biocombustibles sólidos. Determinación del poder calorífico.



BIOFORIN

GESTIÓN BIOREGIONAL
DE LOS RECURSOS FORESTALES
PARA LA NUEVA BIOECONOMÍA INDUSTRIAL



- **Poder calorífico superior (PCS):** Mide la energía total disponible para la combustión, incluyendo el calor de condensación del vapor de agua. Es útil en sistemas que recuperan esta energía. Se expresa en MJ/kg o kcal/kg. Norma UNE-EN ISO 18125 Biocombustibles sólidos. Determinación del poder calorífico.
- **Humedad:** Mide el contenido de agua en un material. Es importante para la combustión y el almacenamiento de biomasa. Se expresa en porcentaje (%).
- **Loss on Ignition – sobre materia orgánica seca (LOI):** Representa la pérdida por ignición de una muestra expresada sobre materia orgánica seca. Es un parámetro que indica cuánta masa volátil y material combustible se pierde cuando la muestra se calienta a alta temperatura (normalmente entre 500–600 °C) en presencia de oxígeno suficiente.
- **Cenizas:** Mide el residuo incombustible tras la combustión (normalmente determinado a 900 °C). Es relevante para evaluar la calidad del combustible y el mantenimiento de los equipos. Se expresa en porcentaje (%).
- **Análisis elemental de carbono (C):** Mide el contenido de carbono en un material. Es importante para evaluar el poder calorífico. Se expresa en porcentaje (%).
- **Análisis elemental de nitrógeno (N):** Mide el contenido de nitrógeno en un material. Es relevante para evaluar las emisiones de NO_x. Se expresa en porcentaje (%).
- **Análisis elemental de azufre (S):** Mide el contenido de azufre en un material. Es importante para evaluar las emisiones de SO_x. Se expresa en porcentaje (%).
- **Análisis elemental de hidrógeno (H):** Mide el contenido de hidrógeno en un material. Es relevante para evaluar el poder calorífico. Se expresa en porcentaje (%).
- **Análisis elemental de oxígeno (O):** Mide el contenido de oxígeno en un material. Es importante para evaluar la combustibilidad. Se expresa en porcentaje (%).

Tratamiento de la biomasa

El ajuste de la humedad se realizó secando la madera hasta alcanzar el valor deseado, empleando dos métodos de medición: el ensayo de laboratorio según la metodología “2540B: Total Solids dried at 103–105 °C” de los *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA) y la medición directa con el higrómetro Testo Moisture Meter 606-1. Durante los procedimientos de secado controlados se midió la humedad inicial con el higrómetro, se colocó la biomasa en canastas dentro de una estufa a 60 °C y se efectuaron mediciones periódicas en distintos puntos hasta lograr el valor objetivo.

Descripción del sistema de pruebas

El banco de pruebas utilizado para la ejecución de esta tarea, ubicado dentro de un contenedor marítimo de 40 pies, contiene una caldera Herz Firematic 100 (TERMOSUN), una tolva de alimentación opcional, un sistema de disipación basado en un aerotermo (el calor generado no puede aprovecharse para dar servicio al edificio por tratarse de un banco experimental), una chimenea que cumple la diseñada acorde con la instrucción técnica IT-AT-02, que dispone de un punto de muestreo para la monitorización de emisiones gaseosas y de particulado, y una estructura portátil (andamio) para acceder al puerto de muestreo de la chimenea.



BioForin cuenta con el apoyo de 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.



BIOFORIN

GESTIÓN BIOREGIONAL
DE LOS RECURSOS FORESTALES
PARA LA NUEVA BIOECONOMÍA INDUSTRIAL

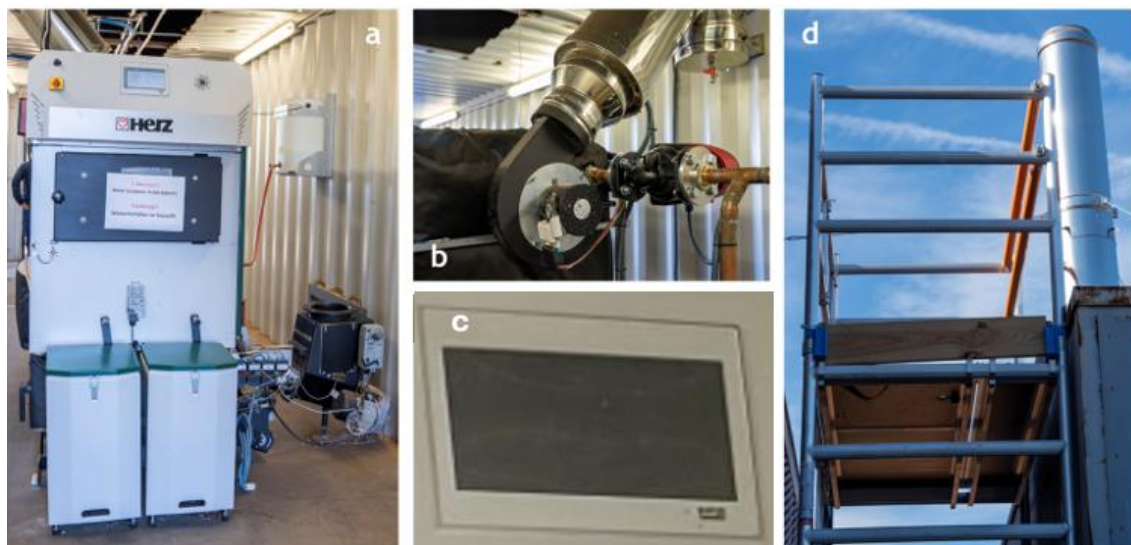


Figura 2 Fotografías de algunos elementos del banco de pruebas. a) Caldera Herz Firematic 100; b) Conexión de la caldera con la chimenea y con el circuito hidráulico; c) Pantalla de control táctil de la caldera; d) Andamio portátil y chimenea para el acceso al puerto de muestreo de gases y partículas.

El elemento central de este banco de pruebas es la caldera Herz Firematic 100. Este modelo, cuenta con conexión remota, una pantalla que permite a los investigadores interactuar con el equipo y monitorizar en tiempo real la evolución del proceso de combustión mediante varias pestañas y más de 50 parámetros medidos directa o indirectamente. También dispone de un introductor lateral y una parrilla móvil que admiten tanto pellets como astillas, con limpieza automática. Otros elementos clave son la cámara de combustión de dos zonas con aislamiento térmico de alta eficiencia, ventiladores de aspiración autorregulables y un sistema de extracción de cenizas hacia los cajones correspondientes. Asimismo, incorpora sondas Lambda para el seguimiento de gases de combustión (O_2 y CO_2) dentro de la cámara y un sistema de seguridad contra el retorno de llama hacia el pre-alimentador. Cabe destacar la robustez de esta caldera, que ha operado satisfactoriamente en condiciones para las que no fue diseñada (uno de los escenarios que se quería evaluar).

Una característica destacada de la caldera utilizada en nuestras instalaciones es la posibilidad de configurar programas de combustión para distintos tipos de biomasa, seleccionables antes de encender el equipo. Este proceso, denominado parametrización, consiste en ajustar la cantidad de biomasa introducida por unidad de tiempo y el volumen de aire en la cámara de combustión. Una correcta parametrización es esencial para lograr una combustión completa, optimizar la eficiencia energética y minimizar las emisiones.

Estos ajustes varían según el tipo y la humedad de la biomasa: materiales húmedos requieren menor alimentación y mayor aporte de aire para favorecer la evaporación del agua, mientras que biomásas más secas necesitan una alimentación más rápida y un flujo de aire controlado para evitar pérdidas de eficiencia. Por ello, se han definido parametrizaciones específicas para cada tipo de biomasa (pellets, pino blanco, platanero y castaño) y para los diferentes niveles de humedad evaluados en la planta piloto de Eurecat, garantizando que la caldera opere en condiciones óptimas durante las pruebas experimentales.

Descripción del equipamiento de medida de emisiones

De acuerdo con la memoria presentada, se seleccionó una combinación de dos equipos para evaluar la generación de partículas y gases de combustión en función del tipo y forma de biomasa utilizada:

- **Analizador compacto OPTIMA MRU:** Este analizador multicanal, que incorpora una sonda metálica de alta temperatura, permite monitorizar puntualmente diferentes gases de chimenea (CO_x , NO_x , SO_x , O_2) y la temperatura de los humos, así como otros



BIOFORIN

GESTIÓN BIOREGIONAL
DE LOS RECURSOS FORESTALES
PARA LA NUEVA BIOECONOMÍA INDUSTRIAL



parámetros indirectos derivados de ellos (por ejemplo, índice de Poisson, exceso de aire, etc.).

- **Tren de muestreo isocinético ST5 DADOLAB:** Este sistema permite determinar la concentración de material particulado sólido total en chimenea (según la norma UNE-EN 13284-1). Además de este parámetro clave, se obtienen otros como la temperatura de la chimenea, la velocidad, el caudal, el % de isocinetismo, la humedad, etc. El dispositivo incorpora una consola de última generación que asiste experimentalmente durante los muestreos ajustando el isocinetismo mediante una bomba adaptativa, lo que ayuda a obtener resultados con alta calidad analítica.



Figura 3 Equipamiento utilizado durante el proyecto para la medición de emisiones: Analizador compacto de gases (izquierda) y tren de muestreo isocinético para la determinación del material particulado (derecha).

Tabla 3 Parámetros de chimeneas para toma de muestras.

Banco prueba Eurecat Manresa	
Chimenea	Circular
Diámetro	0,250 m
Área	0,049 m ²
Punto de muestreo	1

Diseño de experimentos pruebas de combustión

El diseño de experimento (ver

Figura 4) consistió en evaluar cuatro tipos de biomasa —pino piñonero, platanero, castaño y pellets— sometidos a dos niveles de humedad representativos del uso real (10% y 25% de HR), con el fin de analizar cómo estas variaciones influyen en parámetros clave de la combustión. A partir de estas combinaciones, se estudiaron las emisiones generadas, el potencial calorífico, la eficiencia de la caldera, así como aspectos asociados al suministro y la aplicación de buenas prácticas, permitiendo comparar el comportamiento de cada biocombustible bajo diferentes condiciones de humedad.



**Pino
piñonero**



Platanero



Castaño



Pellets

↓
Humedades (10% - 25% HR)

↓
Emisiones, potencial calorífico, eficiencia de caldera, suministro y buenas prácticas



BIOFORIN

GESTIÓN BIOREGIONAL
DE LOS RECURSOS FORESTALES
PARA LA NUEVA BIOECONOMÍA INDUSTRIAL



Figura 4. Esquema de experimentación.

La Tabla 4 detalla los materiales ensayados, el contenido de humedad determinado en cada lote y las fechas en que se llevaron a cabo las réplicas experimentales, permitiendo visualizar la secuencia temporal y la distribución de las pruebas para cada tipo de biomasa.

Tabla 4 Experimentación de biomásas.

Biomasa	HR (%)	Fecha replicas
Pellets comerciales	5	1. 25/03/2025
		2. 25/03/2025
Pino piñonero	10	1. 12/03/2025
		2. 12/03/2025
	>25	1. 26/03/2025
		2. 26/03/2025
Platanero	10	1. 05/06/2025
		2. 25/06/2025
	>25	1. 26/06/2025
		2. 02/07/2025
	>25	1. 12/06/2025

Cálculo de consumo de biomasa de la caldera

En cada ensayo de combustión se determinaron las siguientes magnitudes a partir de los datos de operación de la caldera

Consumo total de biomasa de la prueba (kg): Corresponde a la masa total de combustible alimentada a la caldera durante la duración completa de cada ensayo. Esta magnitud se obtuvo a partir del registro de pesadas de cada prueba o del sistema de alimentación de biomasa.

Rendimiento promedio de la caldera (%): En este estudio, el rendimiento térmico no se calculó mediante un balance energético, sino que se utilizó directamente el rendimiento proporcionado por la propia caldera y haciendo un promedio, tal como aparece en su sistema de control. Este valor se obtiene a partir de los algoritmos internos del equipo, que integran la potencia útil entregada y la potencia nominal ajustada a la biomasa y a la humedad empleada en cada ensayo.

Consumo promedio de biomasa (Kg/h): El consumo medio de biomasa se calculó a partir del consumo total y de la duración de cada ensayo (ver Ec. 2).

$$m_{\text{biomasa}} \left(\frac{\text{Kg}}{\text{h}} \right) = \frac{m_{\text{total}}}{\text{Tiempo}}$$

Consumo específico de biomasa por energía útil (Kg·kW/h): El consumo específico indica la cantidad de biomasa necesaria para generar 1 kWh de energía útil en la caldera. Se obtuvo a partir del cociente entre el consumo promedio de biomasa y la potencia térmica útil de la caldera (ver Ec. 3):

$$C_e \left(\frac{\text{Kg} \cdot \text{kW}}{\text{h}} \right) = \frac{m_{\text{biomasa}}}{\text{Energía útil}}$$



2.6. Resultados pruebas de combustión

Caracterización de biomasa

Las cuatro biomásas analizadas muestran diferencias claras en su potencial energético, directamente relacionadas con su composición elemental, su humedad y su grado de procesado. Los pellets comerciales destacan como el biocombustible de mayor calidad, presentando el PCI más elevado (4667 kWh/t) gracias a su baja humedad, un contenido de carbono superior y, especialmente, a su proceso de compactación, que incrementa la densidad energética y mejora la estabilidad de la combustión. En contraste, las biomásas en forma de astilla, como el platanero, el pino o el castaño, presentan PCI menores debido a su mayor contenido de oxígeno y cenizas, así como a la ausencia de densificación, lo que reduce la energía disponible por unidad de masa y dificulta una combustión tan homogénea como la de los pellets (Gong et al., 2023). Aun así, biomásas como el pino y el castaño muestran valores intermedios, siendo este último ligeramente más favorable energéticamente por su mayor proporción de carbono y menor fracción mineral. Aunque es difícil que las astillas iguallen el rendimiento energético y operativo de los pellets, presentan la ventaja económica y logística de requerir un procesamiento mínimo, lo que reduce costes y puede favorecer su competitividad en mercados locales de bioenergía, especialmente cuando se prioriza el aprovechamiento de recursos de proximidad.

Desde el punto de vista de la combustión, la proporción de oxígeno por diferencia confirma la menor densidad energética de las biomásas forestales respecto a los pellets. El Platanero y el Pino blanco presentan los valores más altos de oxígeno, lo que reduce su poder calorífico y afecta la eficiencia del proceso de combustión. A su vez, la humedad inicial, especialmente elevada en el Pino blanco y el Castaño, implica un mayor consumo energético para evaporar el agua antes de la ignición completa.

Tabla 5 Resultados de la caracterización de las diferentes biomásas.

Propiedad	Unidad	Pellets comerciales	Pino Blanco	Platanero	Castaño
Poder Calorífico Inferior (PCI)	MJ/kg	16,80	13,37	12,55	12,97
Poder Calorífico Superior (PCS)	MJ/kg	18,40	15,36	14,10	14,83
Humedad	% base original	5,87	21,39	12,97	23,85
LOI (smo)	% smoi	90,17	77,88	98,29	97,04
Cenizas	%	0,37	0,46	2,07	1,07
Carbono	% base seca	49,34	43,15	38,18	44,57
Hidrógeno	% base seca	6,63	6,69	6,31	5,81
Nitrógeno	% base seca	<0,10	0,18	0,27	0,19
Azufre	% base seca	<0,10	<0,10	0,15	<0,10
Oxígeno	% base seca	43,6	49,5	52,0	48,3



BIOFORIN

GESTIÓN BIOREGIONAL
DE LOS RECURSOS FORESTALES
PARA LA NUEVA BIOECONOMÍA INDUSTRIAL



Operación y rendimiento de la caldera caldera

Los resultados de temperaturas y composición de gases muestran diferencias notables entre biomásas y contenidos de humedad, aunque todas las combinaciones lograron condiciones de combustión dentro del rango que opera una caldera de biomasa. En los pellets comerciales (HR 5%), las temperaturas de combustión fueron altas y estables (517–553 °C), con humos entre 129–134 °C y valores de O₂ del 10–11% junto a CO₂ del 9–11%, lo que refleja una combustión eficiente propia de un combustible densificado y homogéneo. El pino piñonero, tanto a 10% como a >25% de humedad, presentó temperaturas de combustión similares a las de los pellets (511–542 °C) y humos entre 132–136 °C, con un rango de O₂ entre 9% y 12%; estos valores sugieren que la caldera ajustó adecuadamente el aporte de aire, manteniendo un buen equilibrio entre oxidación y estabilidad térmica incluso con humedades elevadas. El platanero mostró un comportamiento más variable: a 10% HR las temperaturas de combustión fueron elevadas (539±7 °C), pero a humedades superiores al 25% descendieron hasta 457–463 °C, indicando una combustión más fría y menos eficiente, con humos en torno a 116–120 °C y un incremento del O₂ hasta valores de 13–14%, reflejo de exceso de aire y menor aprovechamiento energético.

El castaño, por su parte, se situó en un rango intermedio: a HR 10% alcanzó temperaturas de combustión de 517±14 °C, mientras que a HR >25% redujo su temperatura hasta valores próximos a 459 °C, acompañado de humos más fríos (118–125 °C) y concentraciones de O₂ entre 11% y 13%, coherentes con una combustión menos intensa por la humedad. En conjunto, los resultados confirman que la estrategia de parametrizar la caldera según humedad y tipo de biomasa permitió mantener una combustión controlada en todos los casos, incluso en aquellas biomásas más irregulares o con humedades elevadas, garantizando así la validez comparativa de los datos obtenidos.

Tabla 6 Rendimientos calderas de acuerdo del tipo de biomasa.

Biomasa	HR (%)	Temperaturas medias caldera (°C)				Gases caldera	
		Agua caliente	Agua fría	Combustión	Humos	% O ₂ (vol)	% CO ₂ (vol)
Pellets comerciales	5	69±5	62±4	517±44	129±5	10±1	11±1
		75±4	66±3	553±17	134±4	11±1	9±1
Pino piñonero	10	80±0	71±0	542±13	132±4	10±1	10±1
		79±4	71±3	511±9	134±7	9±1	11±1
	>25	76±4	69±5	527±7	136±3	11±1	9±1
		73±2	65±2	512±7	135±3	12±1	9±1
Platanero	10	73±19	67±14	526±39	120±19	10±0	10±0
		83±3	76±2	539±7	126±3	10±1	10±1
	>25	75±4	70±3	463±5	120±4	13±0	8±0
		65±3	59±3	457±28	116±10	14±1	7±1
Castaño	10	83±4	76±17	517±14	125±3	11±1	10±1
	>25	72±3	66±3	459±21	118±5	13±1	8±1

En términos de eficiencia (ver **Tabla 7**), el pino piñonero muestra el mejor desempeño, alcanzando valores de hasta 0,88 incluso con humedades elevadas, lo que indica una combustión robusta y adaptable. El castaño mantiene también una eficiencia elevada a 10% HR, aunque se ve penalizado a mayores humedades, mientras que el platanero muestra el comportamiento más variable: a pesar de alcanzar eficiencias de caldera muy altas a >25% HR, la eficiencia del proceso evidencia pérdidas significativas, reflejando una conversión real más limitada. En conjunto, la humedad reduce el aprovechamiento energético y amplía la brecha entre la eficiencia de caldera y la del sistema completo.



BioForin cuenta con el apoyo de 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.



BIOFORIN

GESTIÓN BIOREGIONAL
DE LOS RECURSOS FORESTALES
PARA LA NUEVA BIOECONOMÍA INDUSTRIAL



La parametrización de la caldera resulta decisiva para explicar estas tendencias. Ajustes de aire, alimentación y temperatura permitieron adaptar el funcionamiento a cada biomasa, mejorando la estabilidad de combustión en materiales más heterogéneos o húmedos. El pino responde de manera especialmente favorable a estos ajustes, mientras que el platanero requiere una modulación más precisa y aun así presenta pérdidas energéticas relevantes. Este comportamiento confirma que el rendimiento final no depende solo del PCI, sino de la capacidad del sistema para adaptarse a las características físicas y térmicas de cada biomasa.

Tabla 7 Eficiencia energética de los combustibles y caldera

Biomasa	HR (%)	PCI (MJ/Kg)	Energía del combustible (kJ/s)	Eficiencia térmica caldera	Eficiencia térmica proceso
Pellets comerciales	5	17,37	71,2	0,59	0,56
			69,7	0,77	0,73
Pino piñonero	10	13,63	61,0	0,88	0,78
			61,0	0,88	0,63
	>25	11,05	47,4	0,88	0,63
			47,1	1,00	0,73
Platanero	10	12,52	56,3	0,64	0,56
			56,3	0,74	0,66
	>25	10,81	30,45	0,98	0,70
			30,45	0,98	0,85
Castaño	10	13,16	48,27	0,86	0,77
	>25	10,66	66±3	0,70	0,50

Consumo de biomasa de la caldera

Los resultados de la Tabla 8 evidencian que el consumo de biomasa estuvo fuertemente condicionado por el tipo de combustible y, especialmente, por su contenido de humedad y características energéticas. Los pellets comerciales, con el PCI más alto y la humedad más baja, mostraron consumos estables entre 14,5 y 15,0 kg/h, alcanzando rendimientos elevados cercanos al 69%, coherentes con su mayor densidad energética. En contraste, biomásas menos densas y con mayor contenido de oxígeno, como el pino piñonero y el platanero, presentaron una variabilidad mucho mayor en los consumos. El pino osciló entre 8,4 y 23,7 kg/h, mientras que el platanero mostró el rango más amplio, entre 7,2 y 32,7 kg/h, reflejando una combustión más heterogénea y sensible a la humedad, especialmente en la réplica al 10% HR donde el rendimiento disminuyó hasta 18,8%. El castaño, con propiedades intermedias y un PCI moderado, presentó consumos más controlados, entre 13,2 y 17,3 kg/h, con rendimientos comprendidos entre 33,7% y 52,0%.

Durante varios ensayos se observó un incremento puntual del consumo en la fase inicial de funcionamiento de la caldera, fenómeno asociado al aporte energético necesario para alcanzar la temperatura óptima de combustión. Este comportamiento fue especialmente pronunciado en biomásas con menor poder calorífico o mayores variaciones de humedad. En el pino piñonero al 10% HR el consumo llegó a 23,7 kg/h durante el encendido, mientras que el platanero alcanzó valores de hasta 32,7 kg/h en el arranque antes de estabilizarse. Una vez superada esta etapa transitoria, los consumos tendieron a normalizarse, permitiendo comparar de forma más fiable la eficiencia y estabilidad de combustión de cada biomasa en función de sus propiedades energéticas.

Tabla 8 Consumos de la caldera por biomasa.

Biomasa	Consumo biomasa
---------	-----------------



BioForin cuenta con el apoyo de 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.



BIOFORIN

GESTIÓN BIOREGIONAL
DE LOS RECURSOS FORESTALES
PARA LA NUEVA BIOECONOMÍA INDUSTRIAL



	HR (%)	Total consumo prueba (Kg)	Redimiento promedio caldera (%)	Consumo promedio (Kg/h)	Consumo promedio (Kg-KWh/h)
Pellets comerciales	5	15	69,5	14,5	10,1
		15	69,3	15,0	10,4
Pino piñonero	10	9,8	53,0	8,4	5,6
		23,7	59,0	23,7	16,6
	>25	12,4	71,0	15,4	11,5
		21,1	70,0	15,3	9,9
Platanero	10	16,9	18,8	32,7	5,1
		16,5	32,4	16,2	6,6
	>25	7,8	42,0	7,2	3,6
		14,2	43,0	14,4	7,2
Castaño	10	8,2	33,7	13,2	4,5
	>25	21,5	52,0	17,3	8,1

Emisiones atmosféricas derivadas del proceso de combustión

Gases de combustión

El comportamiento de las emisiones gaseosas muestra diferencias muy marcadas entre los distintos tipos de biomasa evaluados (Tabla 9), particularmente en la evolución del CO, los NO_x y la concentración de O₂ residual. Los pellets comerciales, utilizados como referencia, mantienen temperaturas de combustión elevadas (517–553 °C) y valores de O₂ en el rango del 10–11%, lo que indica un proceso bien aireado y estable. Las emisiones de CO son relativamente bajas (251–302 mg/Nm³ a 13% O₂), con NO_x alrededor de 265 mg/Nm³, valores consistentes con una combustión eficiente y homogénea propia de un biocombustible densificado. Las temperaturas de humos (121–123 °C) y del aire de entrada (15–26 °C) confirman la estabilidad térmica del sistema durante el régimen sostenido.

Tabla 9 Resumen de resultados de emisiones promedios para las diferentes biomásas.

Biomasa	HR (%)	Mediciones estabilizados gases de combustión									
		T (°C) Comb	% O ₂ (vol)	% CO ₂ (vol)	CO (mg/Nm ³) [13%O ₂]	NO (mg/Nm ³) [13%O ₂]	NO ₂ (mg/Nm ³) [13%O ₂]	NO _x (mg/Nm ³) [13%O ₂]	SO ₂ (mg/Nm ³) [13%O ₂]	T _{gas} (°C)	T _{aire} (°C)
Pellets comerciales	5	517±44	10±1	--	302±83	175±5	<0,1	265±3	<0,1	123±1	26±1
		553±17	11±2	--	251±118	4	<0,1	265±9	<0,1	121±4	15±1
Pino piñonero	10	542±13	10±1	--	666±163	173±6	<0,1	303±6	<0,1	120±2	23±0
		511±9	9±1	12±1	205±27	83±2	<0,1	128±3	<0,1	126±7	29±3
	>25	527±7	12±1	9±1	1091±386	85±3	<0,1	131±2	<0,1	124±4	19±1
		512±7	12±1	9±1	1184±363	87±3	<0,1	131±5	<0,1	123±2	17±1
Platanero	10	526±39	9±1	12±1	188±91	86±4	<0,1	133±6	<0,1	101±17	36±2
		539±7	10±2	11±1	170±125	117±7	<0,1	179±11	<0,1	110±10	40±3
	>25	463±5	12±2	9±2	2541±436	122±8	<0,1	188±12	<0,1	107±8	37±1
		457±28	13±1	8±1	1596±318	117±1	<0,1	181±17	<0,1	107±11	24±1
Castaño	10	517±14	9±0	12±0	316±28	113±3	<0,1	174±4	<0,1	114±2	38±1



BioForin cuenta con el apoyo de 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.



BIOFORIN

GESTIÓN BIOREGIONAL
DE LOS RECURSOS FORESTALES
PARA LA NUEVA BIOECONOMÍA INDUSTRIAL



	>25	459±21	10±7	7±3	2108±508	131±4	0,9±2	200±7	<0,1	102±16	33±1
--	-----	--------	------	-----	----------	-------	-------	-------	------	--------	------

Concentraciones máximas de emisiones CO: 500 mg/Nm³ 13%O₂; NOx: 300 mg/Nm³ 13%O₂; SO₂: 375 mg/Nm³ 13%O₂.

En el caso del pino piñonero, la humedad juega un papel crítico. A 10% HR, las temperaturas de combustión se sitúan entre 511 y 542 °C y las emisiones de CO varían drásticamente según la réplica: desde valores bajos (205 mg/Nm³) hasta emisiones sustanciales (666 mg/Nm³), reflejando una mayor sensibilidad del combustible a ligeras variaciones de operación. Para humedades superiores al 25%, la combustión mantiene temperaturas adecuadas (512–527 °C), pero el CO aumenta notablemente, alcanzando 1091–1184 mg/Nm³, lo que evidencia combustión incompleta. A pesar de ello, el NOx permanece en rangos moderados (128–131 mg/Nm³), coherente con temperaturas relativamente estables y alta presencia de O₂ (12%).

El platanero, por su parte, presenta el comportamiento más inestable de todas las biomásas evaluadas. A humedades moderadas (10% HR), mantiene temperaturas elevadas (539 °C) y emisiones relativamente bajas de CO (170 mg/Nm³), pero a humedades superiores al 25% la combustión se ve fuertemente afectada: la temperatura desciende a 457–463 °C y las emisiones de CO se disparan hasta 1596–2541 mg/Nm³, con el mayor nivel registrado en todas las mediciones. Los valores de O₂ alcanzan el 12–13%, señal de exceso de aire y mezcla subóptima, mientras que el NOx se mantiene en torno a 180–188 mg/Nm³. La caída de temperatura y el aumento masivo de CO confirman que el platanero húmedo es particularmente problemático en combustión, probablemente debido a su estructura menos densa y mayor heterogeneidad.

Finalmente, el castaño muestra un comportamiento más regular. A 10% HR, las temperaturas de combustión rondan los 517 °C y las emisiones de CO son moderadas (316 mg/Nm³), con caudales de humos de 114 °C y NOx de 174 mg/Nm³. Sin embargo, con humedades superiores al 25% la temperatura cae de forma significativa a valores próximos a 459 °C, mientras que el CO aumenta drásticamente hasta 2108 mg/Nm³. Este patrón es similar al del platanero, aunque menos extremo, y se explica por el aumento de humedad y la consecuente reducción de la eficiencia en la oxidación del carbono. Aun así, el NOx permanece relativamente bajo (200 mg/Nm³), lo que coincide con temperaturas más frías y menor formación térmica de NO.

Emisiones de material particulado (PM)

Los valores de material particulado (PM) muestran un comportamiento muy dependiente del tipo de biomasa y, especialmente, de su contenido en humedad (ver Tabla 10), en línea con la tendencia observada en los gases de combustión. Los pellets comerciales, con HR del 5 %, presentan las menores concentraciones de partícula de todo el conjunto, con valores entre 4 y 6 mg/Nm³, reflejando una combustión muy estable, homogénea y con bajo arrastre de cenizas volantes. En el caso del pino piñonero a 10% HR, las concentraciones se mantienen en niveles moderados (5–14 mg/Nm³), aunque con variabilidad asociada a cambios en el caudal seco y diferencias en el sólido captado. Cuando la humedad aumenta a valores superiores al 25%, las emisiones de PM se incrementan drásticamente, alcanzando 49 y 58 mg/Nm³, lo que indica una mayor producción de partículas finas por combustión incompleta, mayor fraccionamiento térmico de la estructura lignocelulósica y un arrastre más significativo de material no completamente oxidado.

En el caso del platanero, la tendencia es aún más marcada: a 10% HR se registran valores entre 12 y 49 mg/Nm³, dependiendo del punto de medición, mientras que a humedades superiores al 25% las concentraciones siguen siendo elevadas (18–26 mg/Nm³), lo que sugiere un comportamiento menos predecible y más sensible a las condiciones de operación. El castaño, por su parte, exhibe niveles intermedios (19 mg/Nm³ a HR 10% y 22 mg/Nm³ a HR >25%), mostrando un comportamiento más estable que el platanero, pero igualmente influenciado por el contenido de humedad. La calidad del muestreo es adecuada en todos los casos, ya que los valores de isocineticismo se sitúan entre el 97,2% y el 100%, dentro del intervalo aceptado para muestreo isocinético (aprox. 90–110%), lo que garantiza que los resultados obtenidos son analíticamente válidos y no están condicionados por desviaciones en la velocidad de toma de muestra. En conjunto, el PM confirma que las biomásas húmedas y no pelletizadas generan niveles de partículas significativamente superiores, mientras que los pellets muestran el mejor desempeño ambiental.

Tabla 10 Resumen de pruebas para determinación de material particulado para las diferentes tipologías de biomasa. Concentración máxima de emisión PM: 40 mg/Nm³.



BioForin cuenta con el apoyo de 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.



BIOFORIN

GESTIÓN BIOREGIONAL
DE LOS RECURSOS FORESTALES
PARA LA NUEVA BIOECONOMÍA INDUSTRIAL



Biomasa	HR (%)	Humedad [r _w]	Caudal húmedo [Nm ³ /h]	Caudal seco [Nm ³ /h]	Isocinetismo [%]	Volumen captado [Nm ³]	Sólido captado [mg]	Conc. PM [mg/Nm ³]
Pellet comercial		0,03	279	271	99,9	0,765	2,9	4 (6)
		0,03	197	191	99,6	0,588	3,8	6 (8)
Pino piñonero	10	0,09	327	242	99,8	0,579	8,1	14 (19)
		0,09	318	286	99,7	0,722	3,9	5 (8)
	>25	0,12	279	245	99,7	0,651	31,9	49 (55)
		0,12	297	261	99,7	0,613	35,5	58 (65)
Platanero	10	0,05	651	614	99,9	0,599	7,0	12 (18)
		0,05	--	--	97,5	0,721	35,6	49 (67)
	>25	0,06	--	--	99,4	0,767	20,2	26 (29)
		0,06	1537	1445	99,8	0,791	14,6	18 (18)
Castaño	10	0,05	266	251	100,0	0,707	13,8	19 (29)
	>25	0,05	--	--	97,2	0,523	11,7	22 (30)

Cumplimiento normativo de emisiones de gases de combustión para las diferentes biomásas

Las emisiones de CO muestran una sensibilidad mucho mayor al tipo de biomasa y, especialmente, a su contenido de humedad (ver Figura 5), evidenciando su papel como indicador directo de la eficiencia de oxidación durante la combustión. Los pellets presentan valores bajos y estables ($\approx 250\text{--}300\text{ mg/Nm}^3$), coherentes con una combustión homogénea y una buena mezcla aire-combustible favorecido por su baja humedad y alta densidad energética. En el pino piñonero, sin embargo, el comportamiento es más variable: a 10% HR se observan valores extremadamente diferenciados ($200\text{--}660\text{ mg/Nm}^3$), lo que refleja oscilaciones en la estabilización de llama y en la disponibilidad de oxígeno durante la fase de combustión de volátiles. A humedades $>25\%$, el CO aumenta significativamente ($\approx 1100\text{--}1200\text{ mg/Nm}^3$), confirmando que el exceso de humedad enfría la zona de reacción y dificulta por completo la oxidación del carbono.

El platanero es la biomasa con peor desempeño: incluso a 10% HR los valores son moderadamente altos ($\approx 170\text{--}190\text{ mg/Nm}^3$), pero a $>25\%$ se disparan a niveles muy elevados ($\approx 1600\text{--}2500\text{ mg/Nm}^3$), lo que indica combustión inestable, pobre desvolatilización y una marcada limitación en la oxidación final. Por su parte, el castaño muestra un patrón intermedio; a 10% HR los valores son relativamente bajos ($\approx 316\text{ mg/Nm}^3$), pero, al igual que en el pino, la humedad elevada incrementa notablemente las emisiones ($>2000\text{ mg/Nm}^3$).



BIOFORIN

GESTIÓN BIOREGIONAL
DE LOS RECURSOS FORESTALES
PARA LA NUEVA BIOECONOMÍA INDUSTRIAL

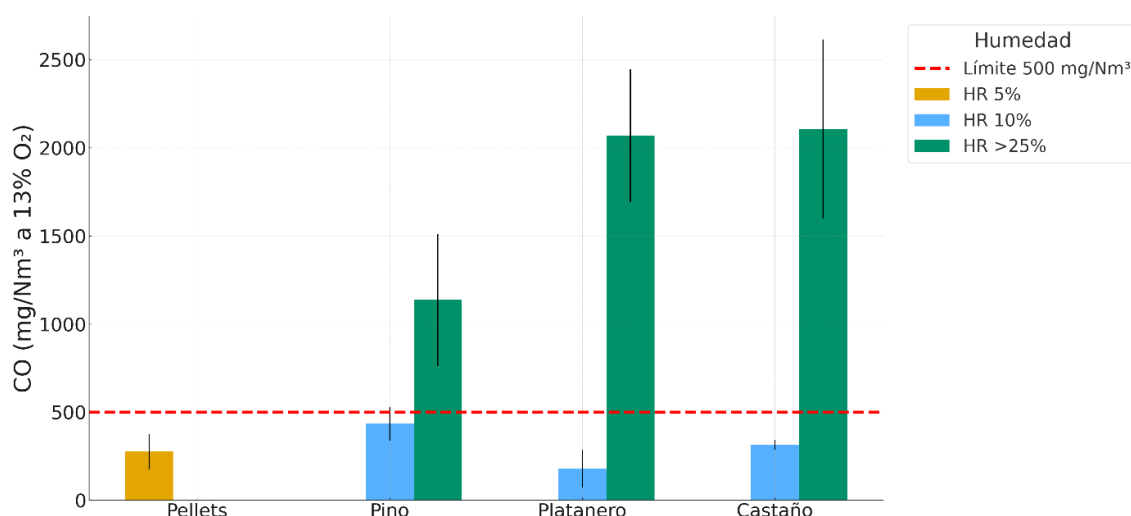


Figura 5 Promedio de emisiones de CO para las diferentes biomásas.

Las emisiones de NO_x muestran una clara dependencia del tipo de biomasa y de la humedad, pero en todos los casos permanecen muy por debajo del límite de 300 mg/Nm³ (ver Figura 6). Los pellets presentan valores estables (~265 mg/Nm³), coherentes con una combustión más uniforme y temperaturas controladas que favorecen una formación moderada de NO_x. En pino piñonero, los NO_x disminuyen al aumentar la humedad (de ~190 a ~130 mg/Nm³), lo que confirma el efecto inhibitor de la humedad sobre la formación térmica de NO_x debido a la reducción de la temperatura llama. En contraste, el platanero tiende a incrementar ligeramente sus emisiones con mayor humedad, alcanzando 180–188 mg/Nm³; este comportamiento indica que la biomasa más heterogénea requiere mayores aportes de aire en condiciones húmedas, lo cual favorece una fracción mayor de NO_x por exceso de aire. El castaño se mantiene en un rango estable (174–200 mg/Nm³), reflejando una cinética de combustión menos sensible.

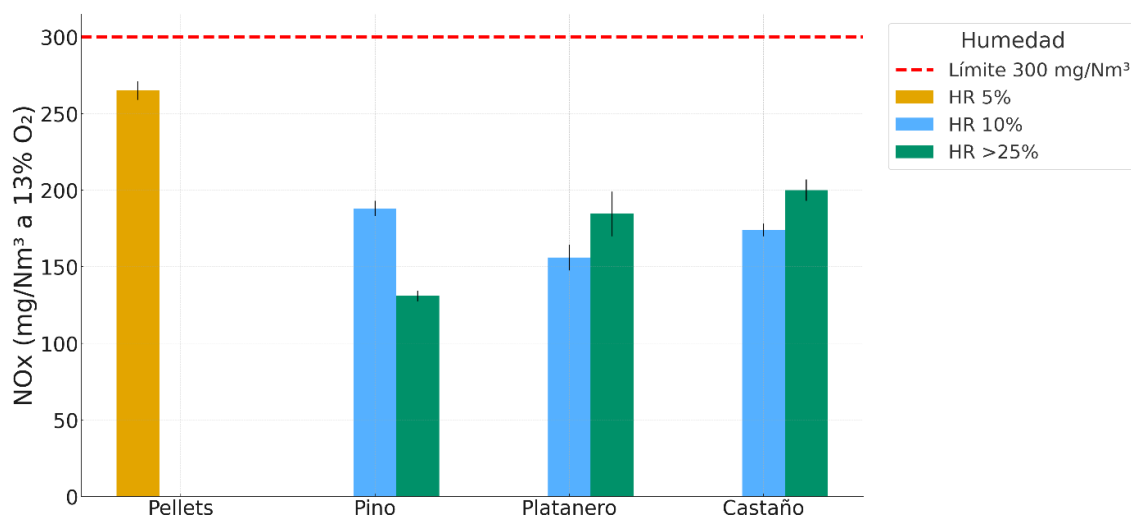


Figura 6 Promedio de emisiones de NO_x para diferentes biomásas.

El análisis del CO₂ en combustión estabilizada muestra una tendencia clara ligada tanto al tipo de biomasa como a su contenido de humedad (ver Figura 7). En todos los casos, las biomásas con 10% HR presentan los valores más altos de CO₂, reflejo de una combustión más completa y de una mayor fracción de carbono oxidado. El pino piñonero destaca con valores en torno al 12% vol, lo que indica un régimen de combustión eficiente y bien aireado. El platanero sigue un comportamiento similar, aunque con mayor variabilidad entre réplicas debido a su heterogeneidad estructural; aun así, mantiene concentraciones medias cercanas a las del pino. Por su parte, el castaño alcanza también valores elevados en HR 10% (~12% vol), confirmando una buena conversión del carbono cuando la humedad es moderada. Sin embargo, al



augmentar la humedat por encima del 25%, todas las biomásas experimentan una reducción notable del CO₂, situándose entre 7% y 9% vol. Esta disminución refleja un mayor exceso de aire y una combustión menos eficiente, ya que parte del carbono no llega a oxidarse completamente debido al incremento de humedad, que enfría la zona de combustión y dificulta la liberación y oxidación de los volátiles. En conjunto, los resultados confirman que el contenido de humedad es un factor crítico para la eficiencia de combustión, afectando directamente a la producción de CO₂ y, por tanto, al grado de oxidación del combustible.

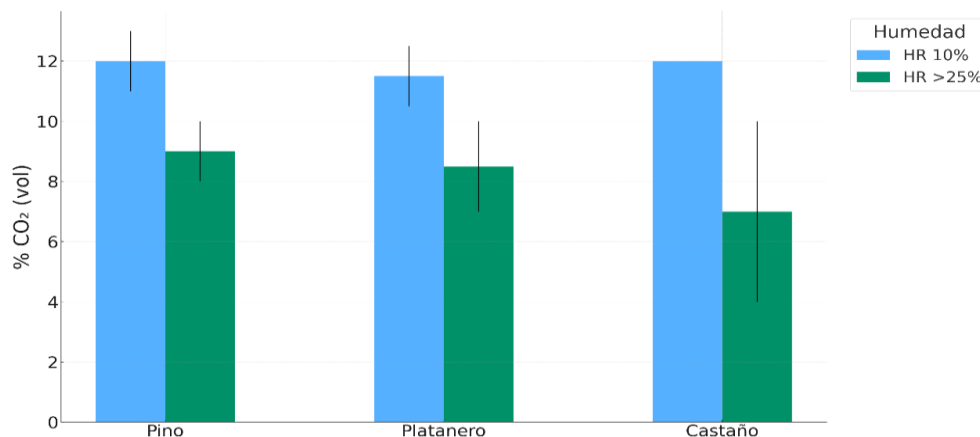


Figura 7 Emisiones promedio de CO₂ para los diferentes tipos de biomasa.

Los resultados de material particulado muestran que solo los pellets comerciales cumplen de forma holgada el valor límite de emisión (VLE) de 40 mg/Nm³ (ver Figura 8), con concentraciones muy bajas (4–6 mg/Nm³) y una variabilidad mínima. En contraste, el pino piñonero supera claramente el límite cuando la humedad es superior al 25% (49–58 mg/Nm³), situándose por encima del VLE en todas las réplicas. El platanero, aun sin exceder siempre el límite, presenta valores muy próximos o superiores en HR 10% (hasta 49 mg/Nm³) y mantiene emisiones elevadas en HR >25% (18–26 mg/Nm³), lo que indica un riesgo significativo de incumplimiento debido a su elevada inestabilidad. El castaño, con emisiones entre 19 y 22 mg/Nm³, se mantiene por debajo del límite en todos los casos, mostrando un comportamiento más estable que pino y platanero. En síntesis, el cumplimiento normativo en PM solo está claramente garantizado con pellets y castaño, mientras que pino y platanero presentan incumplimientos o riesgos de incumplimiento, especialmente a humedades elevadas, evidenciando la necesidad de un control estricto del contenido de humedad para asegurar la conformidad ambiental.

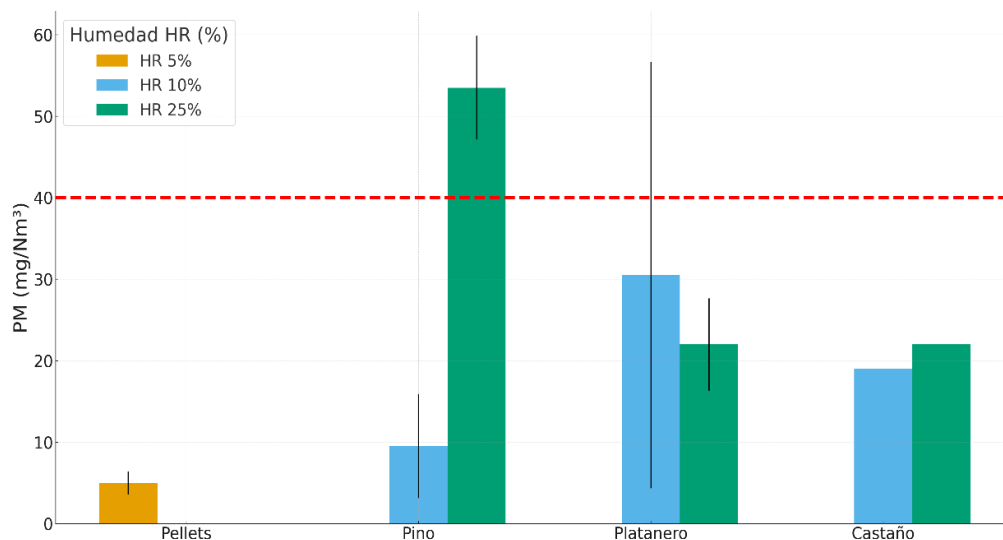


Figura 8 Emisiones promedio de PM para los diferentes tipos de biomasa.



BIOFORIN

GESTIÓN BIOREGIONAL
DE LOS RECURSOS FORESTALES
PARA LA NUEVA BIOECONOMÍA INDUSTRIAL



2.7. Conclusiones

La humedad es el factor más determinante en el rendimiento energético y ambiental de las biomásas. A medida que aumenta el contenido de humedad, disminuyen el PCI y la energía útil disponible, aumenta el consumo de combustible y se reducen tanto la eficiencia térmica como la estabilidad de la combustión. Aunque biomásas como el pino toleran mejores humedades elevadas, el deterioro del comportamiento energético es evidente en todas las especies.

Las emisiones gaseosas muestran respuestas distintas según el tipo de biomasa y la humedad. El CO es el contaminante más sensible, incrementándose de forma pronunciada cuando la combustión es incompleta debido a humedades elevadas, especialmente en platanero y castaño. Por el contrario, los NOx se mantienen siempre por debajo del límite normativo y muestran menor variabilidad, reflejando que su formación depende más de la temperatura de combustión y del exceso de aire que del tipo de biomasa y humedad.

La eficiencia térmica de la caldera y del proceso depende tanto de la biomasa como de su acondicionamiento previo. Los pellets presentan el comportamiento más estable debido a su baja humedad y homogeneidad. El pino alcanza las eficiencias más altas incluso con humedades superiores, mientras que platanero y castaño muestran pérdidas de rendimiento más acusadas. La brecha entre eficiencia de caldera y eficiencia de proceso confirma la existencia de pérdidas térmicas adicionales en el sistema, especialmente con combustibles húmedos.

La parametrización de la caldera es clave para optimizar la combustión, pero no sustituye la necesidad de biomásas adecuadamente secas. Los ajustes de aire, alimentación y temperaturas permiten mejorar la estabilidad de llama y mitigar algunos efectos negativos de la humedad; sin embargo, no compensan completamente la penalización energética ni las mayores emisiones de CO asociadas a combustibles húmedos. Por tanto, se recomienda reducir la humedad de las biomásas antes de su uso para maximizar la eficiencia del sistema, mejorar la calidad de combustión y minimizar las emisiones.

**BIOFORIN**GESTIÓN BIOREGIONAL
DE LOS RECURSOS FORESTALES
PARA LA NUEVA BIOECONOMÍA INDUSTRIAL

3. ACCIÓN C3.2 - Pretratamientos de biomasa forestal orientados a potenciar su valoración por digestión anaerobia

La digestión anaerobia de biomasa lignocelulósica supone un desafío debido a la naturaleza poco biodegradable de la celulosa en medios líquidos, así como al carácter inhibitorio de los compuestos polifenólicos que constituyen la lignina, muchos de los cuales interactúan directamente con las enzimas encargadas de la hidrólisis de celulosa y hemicelulosa. Además, algunos de estos compuestos actúan como inhibidores directos del crecimiento microbiano, afectando a la velocidad del proceso o incluso deteniéndolo por completo a altas concentraciones.

Por ello, el objetivo del pretratamiento de la biomasa lignocelulósica dirigido a facilitar un proceso microbiológico debe ir enfocado a la máxima eliminación posible de la lignina, que logrará reducir la inhibición de enzimas y microorganismos, pero también aumentará la porosidad del material y su carácter hidrofílico, facilitando la accesibilidad de las enzimas a la estructura fibrosa de polisacáridos.

Esto se logrará mediante un proceso de extracción organosolv, en el que se emplea un disolvente orgánico mezclado con agua para extraer la lignina, acompañada de la hemicelulosa, dejando relativamente intacta la celulosa de la biomasa. Este enfoque permite trabajar con materiales menos resistentes a la corrosión, favorece la recuperación de una lignina de mayor valor y no hidroliza la celulosa de la biomasa, además de posibilitar la recuperación del reactivo empleado mediante destilación, en comparación a métodos tradicionales como los tratamientos con ácidos y bases.

3.1. Material y métodos

Materiales

La biomasa lignocelulósica empleada para estos experimentos, hoja de roble, se escogió con el objetivo de aprovechar una de las fracciones que no tienen aplicación para otras actividades de aprovechamiento de biomasa, como podría ser la producción de pellets como vía de valorización energética. Esta biomasa se trituró empleando un molino de corte, pero se excluyó la posibilidad de tamizar porque produciría un fraccionamiento, pues la molienda generó una mezcla de fibras y partículas finas que, aunque tendrían un diámetro similar, no pasarían en la misma proporción a través del tamiz, provocando una composición diferente en la biomasa que sería sometida a los pretratamientos deseados. Previamente a su uso se secó a 60°C mediante una estufa con ventilación forzada y se guardó en un recipiente cerrado.

El disolvente orgánico empleado en la extracción organosolv, γ -valerolactona (gamma-valerolactona o GVL), obtenido de Sigma Aldrich (ref. 918660) con una pureza igual o mayor al 99%, es un disolvente verde, pues puede obtenerse mediante síntesis química relativamente sencilla a partir de fuentes renovables como la propia biomasa lignocelulósica. No es inflamable y su alto punto de ebullición, de 206°C, permite realizar procesos a altas temperaturas sin el consiguiente aumento de presión. Este alto punto de ebullición hace posible también la separación por destilación de otros disolventes como el agua, con la que no forma azeótropos. Se empleó en mezcla 80:20 con agua.

Para la hidrólisis de la celulosa se empleó un preparado celulolítico que incluía endo- β -1,4-glucanasas, celobiohidrolasas y β -D-glucosidasas de *Trichoderma viride*, obtenido de Sigma Aldrich (ref. 219466), con una actividad de 10.000 unidades/g. Este preparado se empleó con un buffer citrato 0,1M y pH = 5,0, preparado en el laboratorio con ácido cítrico anhidro y citrato de sodio tribásico dihidrato, así como una solución de hidróxido sódico para ajustar el pH.

La extracción organosolv se llevó a cabo en una botella ISO de 1L, con 500 ml de GVL-H₂O de 80-20 y 15 g de hoja de roble. Se deseaba llegar a los 50 g, pero la baja densidad del material



BIOFORIN

GESTIÓN BIOREGIONAL
DE LOS RECURSOS FORESTALES
PARA LA NUEVA BIOECONOMÍA INDUSTRIAL



hacía imposible la ratio deseada, pues excedería el volumen de disolvente empleado. El calentamiento del disolvente se logró mediante el uso de un equipo autoclave empleado habitualmente para la esterilización de material y muestras microbiológico. En la figura 9 (1ª imagen) se muestra la botella ISO tras el tratamiento con la lignina extraída oscureciendo el disolvente e impidiendo ver así la biomasa.

Para separar el disolvente de la biomasa pretratada se empleó un matraz Kitasato para acelerar el proceso mediante vacío y un embudo buchner, visibles en la figura 9 (3ª imagen), así como papel de filtro resma.

Finalmente, para la hidrólisis de la celulosa se emplearon dos agitadores magnéticos con calefacción y termómetros de alcohol para controlar la temperatura.



Figura 9: 1ª Imagen: Resultado del proceso de extracción organosolv. 2ª Imagen: Disolvente filtrado. 3ª Imagen: matraz Kitasatos y embudo Buchner durante el segundo lavado. 4ª Imagen: biomasa filtrada y lavada dos veces.



Figura 10: Izquierda: Biomasa tras las extracción y tres lavados. Derecha: biomasa original triturada (bote) y extraída (vidrio de reloj).

**BIOFORIN**GESTIÓN BIOREGIONAL
DE LOS RECURSOS FORESTALES
PARA LA NUEVA BIOECONOMÍA INDUSTRIAL

Procedimiento

Extracción organosol

El procedimiento se inició con la trituración de 250 g de hoja de roble con un molino de corte y el secado a 60°C durante 24h en una estufa con ventilación forzada. Tras esta preparación, se dispusieron 15 g de hoja triturada en 500 ml de GVL-agua (80:20) dentro de una botella ISO de 1L y se calentaron a 121°C durante 1h empleando un autoclave de esterilización de material microbiológico. Se dejó enfriar durante toda la noche en una nevera a entre 2 y 6°C y, a la mañana siguiente, se filtró el licor de extracción con la biomasa empleando un matraz Kitasato y un embudo Buchner con un filtro de papel resma, asistiendo el filtrado con una bomba de vacío (Figura 9.3-4).

Se separó el líquido obtenido para un futuro aislamiento de la lignina y la hemicelulosa, que se realizará mediante la evaporación del agua del disolvente, que forzará la precipitación de la hemicelulosa manteniendo la lignina en disolución con la GVL.

La fracción sólida extraída se lava tres veces en frío con 500 ml de GVL-agua 80:20 para eliminar la lignina que puede depositarse en la superficie del material tras la extracción, obteniendo fracciones líquidas cada vez más transparentes y una fracción sólida más clara con cada lavado (Figura 9.2-4). Estas fracciones también se destinarán tras el proyecto a la recuperación del disolvente y la precipitación de la lignina empleada, fortaleciendo el enfoque circular y “Residuo 0” de este proceso.

Finalmente, se seca la biomasa tras la extracción (BE en adelante) a 60°C y ventilación forzada durante 24h y se deja lista para la hidrólisis enzimática.

Hidrólisis enzimática

Para realizar la hidrólisis enzimática, se preparó en primer lugar la disolución tampón donde tuvo lugar la reacción, una disolución de citrato 0,1 M empleando citrato sódico y ácido cítrico, ajustada a pH 5 empleando hidróxido sódico. En dos vasos con 105 ml de esta solución se añadieron 2 g de BE y un imán agitador, se colocaron sobre agitadores magnéticos con calefacción y se inició el calentamiento y la agitación, llevando la solución a 50°C. Al alcanzar esta temperatura, a uno de los vasos se añadieron 0,1 g de enzima, manteniendo el otro como control para determinar el efecto de la acidez de la disolución tampón sobre la celulosa, pues provocará cierta hidrólisis.

Se mantuvo la mezcla en agitación y calefacción, ajustando la temperatura con la ayuda de termómetros de alcohol, durante 5h, momento en el que se calentaron los vasos a 95°C durante 15 minutos para inactivar las enzimas que estuvieran aún activas en la suspensión. Tras finalizar este proceso, las suspensiones se almacenaron en botellas ISO en nevera a entre 2 y 6°C hasta su uso en los ensayos de potencial de biometanización (BMP, por sus siglas en inglés).

Determinación del potencial de biometanización

Para analizar el efecto de los pretratamientos realizados sobre un proceso de digestión anaerobia se realizaron ensayos de potencial de biometanización sobre la biomasa original (BO), la biomasa extraída (BE), la biomasa hidrolizada con enzimas (BH) y la biomasa extraída y tratada con el tampón citrato, pero sin enzimas, que denominamos biomasa control (BC). Como inóculo se empleó un digestato de una planta de digestión anaerobia en condiciones mesófilas.

El ensayo de potencial de biometanización se realiza mediante un dispositivo consistente en botellas herméticas en cuyo tapón se clava una aguja conectada a conducciones de silicona que dan a una serie de contadores. Estos contadores son columnas en forma de “V” rellenas con un aceite transparente e incoloro de forma que, al aumentar la presión en el interior de las botellas, se produce una burbuja que al ascender dispersa la luz de un láser. Al estar calibrados para que cada burbuja tenga un volumen conocido, cada vez que una burbuja atraviesa la columna, el dispositivo cuenta el volumen correspondiente a la burbuja y anota la hora, por lo que se conoce el volumen de gas producido y el tiempo correspondiente a cada incremento.

Para realizar este experimento se preparó más disolución tampón de citrato 0,1M y pH 5 como medio para la digestión anaerobia, evitando la variación entre los ensayos BO y BE, consistentes



BIOFORIN

GESTIÓN BIOREGIONAL
DE LOS RECURSOS FORESTALES
PARA LA NUEVA BIOECONOMÍA INDUSTRIAL



en biomasa seca, y los ensayos BH y BC, que consistían en biomasa sumergida en el tampón. Así, tanto la BO como la BE se añadieron sobre la disolución tampón en la misma proporción que la seguida en los ensayos de hidrólisis enzimática. Por último, se añadió digestato como inóculo del proceso y se inició la agitación magnética y la calefacción a 30°C, conectándose el contador de burbujas con las botellas.

3.2. Resultados

Durante el proceso se sucedieron diversos incidentes que provocaron la interrupción del suministro eléctrico al sistema, lo que supuso una parada en la calefacción, la agitación y la adquisición de datos hasta en dos ocasiones. El proceso se inició el 05/12/2025 y debería durar al menos un mes, así que el proyecto finalizará antes de que se complete el experimento y se obtengan los resultados.

Para compensar la ausencia de datos propios, se ofrece a continuación una breve revisión de un artículo especialmente apropiado, pues trata sobre la mejora de los procesos de digestión anaerobia de distintos tipos de biomasa lignocelulósica mediante la extracción organosolv de la lignina como pretratamiento. Pretratamiento y digestión anaerobia de biomasa de los tres tipos: madera blanda (pino), madera dura (olmo) y biomasa herbácea (paja de arroz) [1].

En el primer artículo se reportan los resultados del tratamiento organosolv en concentraciones de las distintas fracciones de la biomasa lignocelulósica obtenidas (Figura 11, Figura 12 y Figura 13):

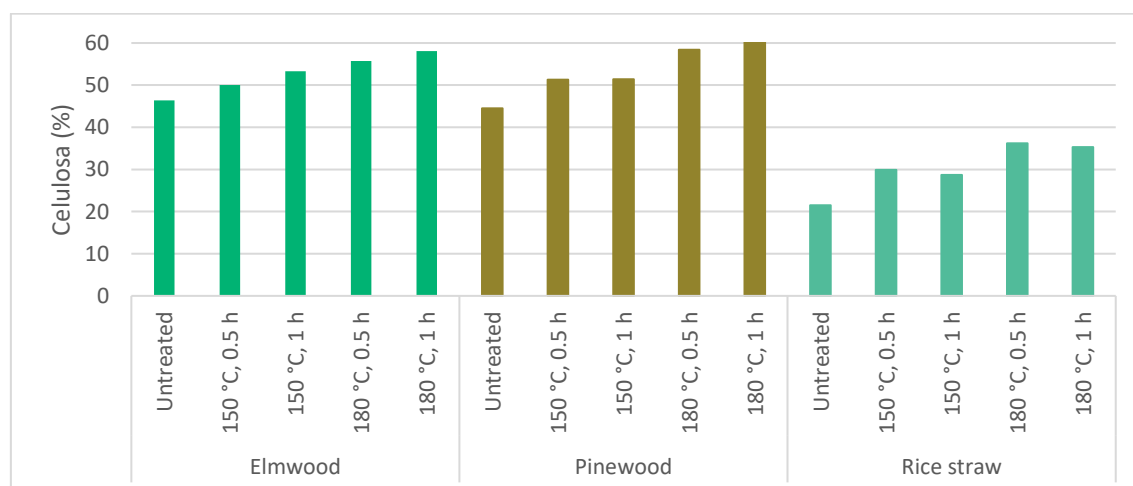


Figura 11: Contenido en celulosa para cada biomasa según el pretratamiento realizado.



BIOFORIN

GESTIÓN BIOREGIONAL
DE LOS RECURSOS FORESTALES
PARA LA NUEVA BIOECONOMÍA INDUSTRIAL

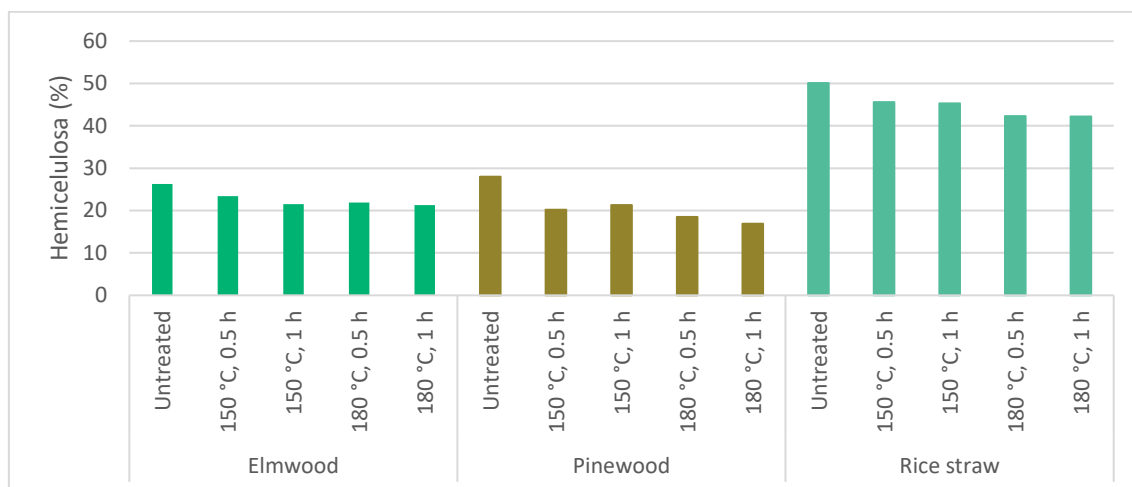


Figura 12: Contenido en hemicelulosa para cada biomasa según el pretratamiento realizado.

Como puede observarse en la figura 11, la fracción correspondiente a la celulosa aumenta con la duración y la temperatura del pretratamiento. Esto se debe a la extracción de hemicelulosa (figura 12) y de lignina (figura 13), enriqueciendo la biomasa en la fracción más resistente al organosolv. Se puede apreciar que la hemicelulosa es la fracción más abundante en la paja de arroz, mientras que la celulosa lo es en ambas biomases leñosas (dura y blanda).

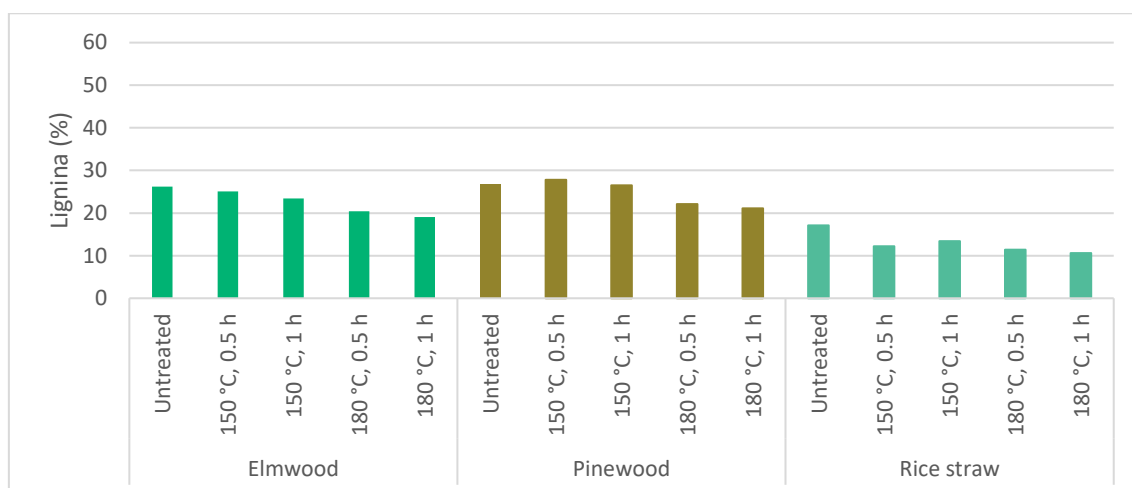


Figura 13: Contenido en lignina para cada biomasa según el pretratamiento realizado.

Esto es interesante a la hora de interpretar la producción de metano, medido en este artículo en función de la masa de carbohidratos (CH) (Figura 14), pues generalmente se esperaría que la celulosa fuese más fácilmente biodegradable que los distintos azúcares que componen la hemicelulosa. Esto apuntaría a una biometanización mayor en las maderas dura (olmo) y blanda (pino), por contener mayor proporción de celulosa dentro de una fracción similar de carbohidratos (Figura 15). Sin embargo, el resultado muestra que la biomasa herbácea consistente en paja de arroz tuvo un desempeño mejor durante su biometanización, lo que puede deberse a que los niveles de lignina de esta biomasa fueron menores en todo momento que en las biomases leñosas.



BIOFORIN

GESTIÓN BIOREGIONAL
DE LOS RECURSOS FORESTALES
PARA LA NUEVA BIOECONOMÍA INDUSTRIAL

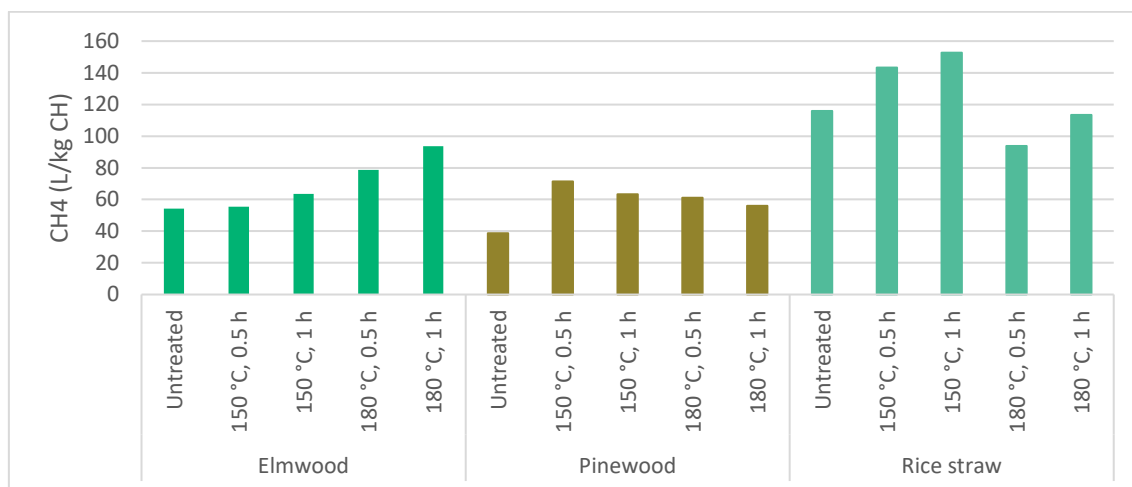


Figura 14: Producción de metano por masa de carbohidratos (CH) en función del pretratamiento y la biomasa de partida.

De hecho, la biometanización de la paja de arroz sin tratar por masa de hidratos de carbono es superior a la de pino y olmo en sus mejores tratamientos, lo que tiene su paralelismo en cuanto a proporción de lignina en la biomasa, menor en la paja de arroz sin tratar que en los tratamientos más eficaces de olmo y pino. En esta relación se profundiza en la figura 16, en la que se representa la producción de metano por masa de carbohidratos frente al contenido en lignina. En esta gráfica se aprecia la tendencia inversamente proporcional de estas dos variables, mostrada por una recta de ajuste lineal.

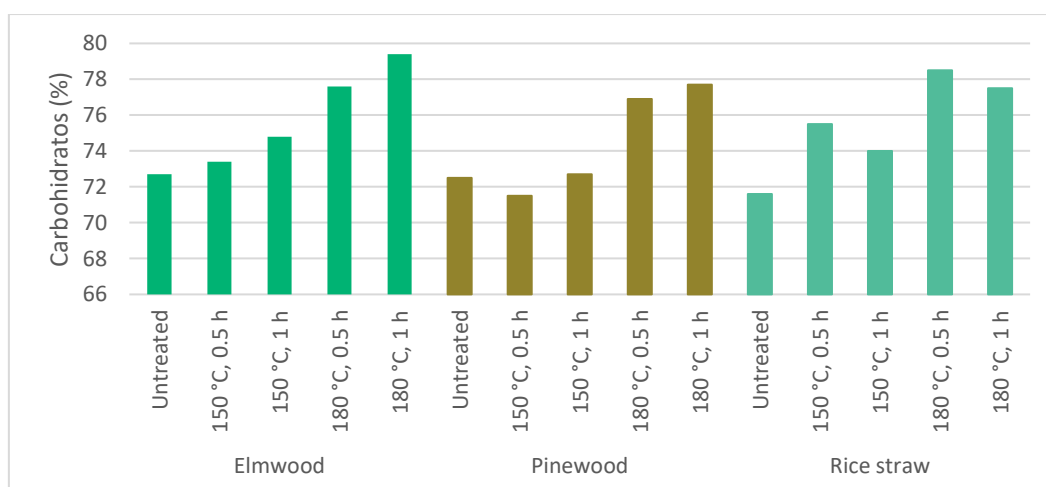


Figura 15: Contenido en carbohidratos (celulosa + hemicelulosa) de cada una de las biomásas en función del tratamiento.



BIOFORIN

GESTIÓN BIOREGIONAL
DE LOS RECURSOS FORESTALES
PARA LA NUEVA BIOECONOMÍA INDUSTRIAL

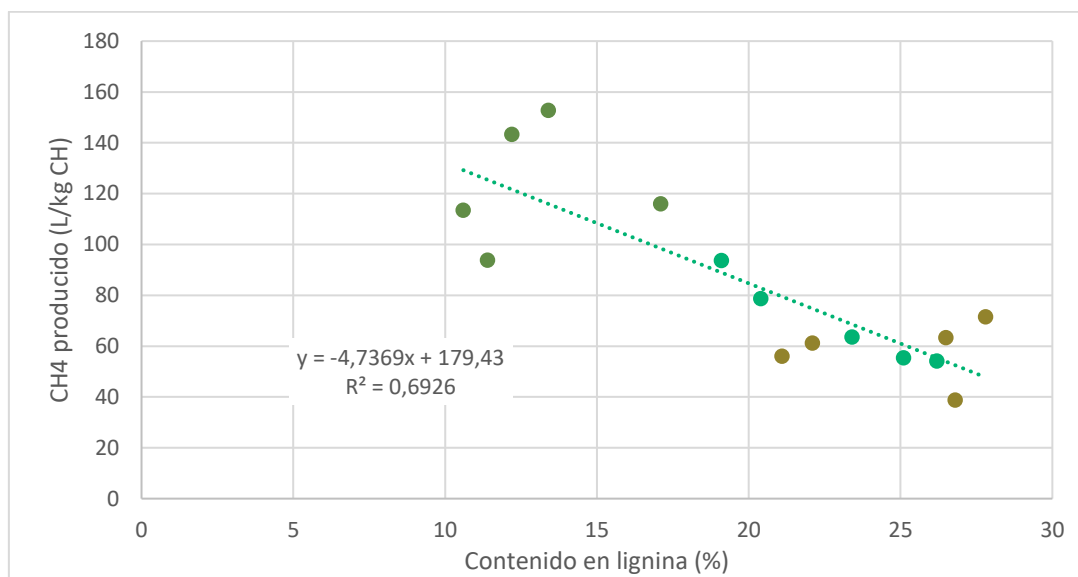


Figura 16: Relación entre el metano producido y el contenido de lignina de la biomasa. En verde oscuro los puntos de la paja de arroz, en verde claro los de olmo y en marrón los de pino.

También es posible que la celulosa no sea tan fácilmente biodegradable debido a su alto grado de cristalinidad, que reduce la capacidad de las enzimas para acceder a las fibras, pero se necesitaría un estudio de la cristalinidad de la celulosa antes y después del pretratamiento para determinar el efecto que está teniendo en los resultados observados.

Lo que podemos concluir es que la biomasa herbácea es mucho más interesante de cara a su valorización energética mediante biometanización que la biomasa leñosa debido a su menor contenido en lignina, y que un pretratamiento capaz de eliminar con mayor eficacia la lignina de la biomasa producirá un mayor aumento en la biometanización de la misma, siempre que respete la integridad de los monosacáridos tratados. Por todo esto se puede considerar la hoja de roble, y de las frondosas y coníferas en general, con pocas excepciones, como la fracción más interesante para su valorización energética por biometanización en comparación con otras fracciones como corteza y tronco, debido a su menor contenido en lignina.



BIOFORIN

GESTIÓN BIOREGIONAL
DE LOS RECURSOS FORESTALES
PARA LA NUEVA BIOECONOMÍA INDUSTRIAL



4. ACCIÓN C3.3 - Procesos termoquímicos para la valorización de recursos forestales

Las tecnologías termoquímicas como la gasificación y la pirólisis, son procesos avanzados de conversión energética que permiten aprovechar de forma eficiente las fracciones de biomasa residual generadas durante la gestión forestal sostenible, como son las ramas, cortezas, astillas u hojas. Estas tecnologías transforman la biomasa sólida en productos de alto valor energético y/o material mediante la aplicación de altas temperaturas en condiciones controladas, contribuyendo a una gestión más circular y sostenible de los recursos forestales.

La pirólisis consiste en la descomposición térmica de la biomasa en ausencia de oxígeno, produciendo tres fracciones principales: biocarbón (biochar), bioaceite y gas de síntesis (syngas). El biochar puede emplearse como mejorador de suelos o sumidero de carbono; el bioaceite se puede refinar para obtener combustibles líquidos o compuestos químicos; y el gas puede aprovecharse energéticamente para generar calor o electricidad. Por su parte, la gasificación se realiza con una cantidad limitada de agente oxidante (aire, oxígeno o vapor de agua), convirtiendo la biomasa en un gas de síntesis compuesto principalmente por monóxido de carbono, hidrógeno y metano, que puede utilizarse como combustible en motores, turbinas o como materia prima en procesos químicos e industriales, así como en biochar parecido al generado por pirólisis.

Ambas tecnologías ofrecen una alternativa sostenible frente al uso de combustibles fósiles, al tiempo que valorizan residuos forestales que, de otro modo, podrían quedar subutilizados o representar un riesgo de incendio. Su aplicación en el contexto de la gestión forestal sostenible no solo mejora la eficiencia energética y económica del aprovechamiento de los recursos, sino que también contribuye a la mitigación del cambio climático mediante la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y la promoción de una bioeconomía circular.

4.1. Elección de la tecnología



Figura 17 Planta de gasificación y pirólisis usada para las pruebas en laboratorio

Para las pruebas de producción de biochar a escala laboratorio, se ha utilizado el equipo de gasificación y pirólisis del que dispone EURECAT en sus instalaciones de la sede de Manresa. Esta planta está diseñada para ofrecer la mayor versatilidad posible a la hora de establecer y monitorizar todos los parámetros operativos que repercuten en los rendimientos y/o la calidad de los productos finales, a saber:

- Temperatura de trabajo
- Rampa de calentamiento
- Modo de alimentación



BIOFORIN

GESTIÓN BIOREGIONAL
DE LOS RECURSOS FORESTALES
PARA LA NUEVA BIOECONOMÍA INDUSTRIAL



- Batch
- Continuo
- “Hot feeder”
- Lecho del reactor
 - Fijo
 - Fluidizado
- Uso de catalizadores
 - In situ
 - Ex situ

Además, permite la obtención y caracterización completa y de manera individual de las fracciones biochar, aceites pirolíticos y gas de síntesis.

Debido al conocimiento previo de las tecnologías en las que se iba a evaluar la validez del biochar como material principal, se pudo elegir una tecnología que generase un producto con las características más adecuadas para estos usos previamente definidos. A saber:

- Descontaminación de efluentes gaseosos procedentes de la producción de biogás, centrándose en la captura de H₂S
- Descontaminación de efluentes acuosos procedentes de aguas de EDAR, centrándose en el tratamiento de PFAS y metales pesados
- Enmienda para suelos agrícolas/fertilizante.

Para ello, el biochar a producir debía tener:

- Alta área superficial
- Estructura porosa desarrollada, especialmente con buena proporción de microporos y mesoporos
- Distribución homogénea del tamaño de poro
- Contenido moderado de cenizas con presencia de metales alcalinos y alcalinotérreos (Na, K, Ca, Mg)
- Elevado contenido de carbono
- Bajo contenido de compuestos volátiles
- pH alcalino
- Presencia de grupos funcionales superficiales oxigenados

Las características que tener en cuenta para realizar las mezclas que diesen lugar a las propiedades buscadas en los biochar, han sido las siguientes:

Contenido de lignocelulosa: La lignina, celulosa y hemicelulosa son los principales componentes de la biomasa que influyen en su comportamiento durante la gasificación. La biomasa con alto contenido de lignina tiende a producir más carbón (biochar), mientras que una mayor cantidad de celulosa y hemicelulosa puede resultar en mayor rendimiento de gases y líquidos.

Volatilidad: La proporción de compuestos volátiles es importante para el rendimiento de gases durante la gasificación.

Contenido de cenizas: Residuos con menor contenido de cenizas son preferibles, ya que estas pueden afectar la eficiencia del proceso.

Relación carbono/nitrógeno (C/N): Para la activación posterior del biochar y sus aplicaciones en remediación ambiental, es importante un equilibrio favorable en el contenido de carbono.

Después de analizar en qué condiciones experimentales se generan biochar con estas propiedades, se optó por elegir la vía de la gasificación (mayor temperatura de reacción, presencia parcial de oxígeno en la reacción) ya que una mayor temperatura en el reactor ayuda a que más compuestos y elementos volátiles dejen su espacio libre, contribuyendo así a una mayor porosidad del biochar, aun sacrificando rendimiento de producción.

$$(\text{Rendimiento de producción}) = \frac{\text{Biochar producido (peso)}}{\text{Material original (peso)}}$$

Es por ello que la tecnología elegida para la producción de los biochar haya sido la gasificación, según las condiciones de operación que se muestran en la **Tabla 11**.



BioForin cuenta con el apoyo de 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 11 Condiciones de operación de las pruebas de producción de biochar

Lecho del reactor	Fijo	
Temperatura máxima de reacción	700	°C
Tiempo a máxima temperatura	30	minutos
Rampa de calentamiento del reactor	3	°C/min
Tiempo de calentamiento del reactor	226	minutos
Concentración de oxígeno en atmósfera	1,3%	(v/v)

4.2. Diseño de las mezclas

Para evaluar distintas composiciones de biochar, generado a partir de mezclas de las fracciones aportadas por la Associació de Propietaris del Montnegre – Corredor, Consorci per la Gestió de Residus del Vallès Oriental (CGRVO) y Consorci per al Tractament de Residus Sòlids Urbans del Maresme (CTRSUM), se definieron una serie de composiciones basadas en las caracterizaciones de dichas fracciones (detalladas en el entregable RB2.4 Roadmap teórico de la valorización de bioproductos).

Estas mezclas se indican en la **Tabla 12**:

Tabla 12 Composición de las mezclas diseñadas

Mezcla	Especie	Sección	Mezcla (%)	Objetivo
1	Mezcla de coníferas (<i>Coniferae/Pinopsida</i>)	Tronco	40	Producción de biochar para adsorción de PFAS, metales pesados y compuestos orgánicos
	Alcornoque (<i>Q. suber</i>)	Corteza	30	
	Encina (<i>Q. ilex</i>)	Tronco	20	
	Pino piñonero (<i>P. pinea</i>)	Corteza	10	
2	Mezcla de especies (1)		60	Biochar con mayor porosidad para adsorción de amonio y nitratos en tratamiento de agua
	Hojas		40	
3	Mezcla de especies (1)		60	Biochar para enmienda de suelos y secuestro de carbono
	FORM		40	
4	Mezcla de especies (1)		60	Biochar combinado con digestato para uso en mejora de suelos
	Digestato		40	



5	Encina (<i>Q. ilex</i>)	Tronco	100	
6	Mezcla de coníferas (<i>Coniferae/Pinopsida</i>)	Corteza	100	
7	Mezcla de coníferas (<i>Coniferae/Pinopsida</i>)	Tronco	100	
8	Pino piñonero (<i>P. pinea</i>)	Corteza	100	
9	Roble (<i>Q. humilis</i>)	Tronco	100	
10	Alcornoque (<i>Q. suber</i>)	Corteza	100	

Encina (*Quercus ilex*):

Tronco de encina: El tronco de encina tiene un buen equilibrio entre celulosa (29.7%), hemicelulosa (23.5%) y lignina (25.4%), con un bajo contenido de cenizas (2.71%). Esto lo hace una excelente opción para la gasificación y posterior activación del biochar, generando porosidad adecuada para la adsorción de contaminantes como amonio y metales pesados (HMs).

Mezcla de coníferas (*Coniferae/Pinopsida*):

Corteza de mezcla de coníferas: La corteza de la mezcla de coníferas presenta un alto contenido de lignina (62.6%), lo que es favorable para la producción de un biochar muy estable y rico en carbono, con un bajo contenido de cenizas (1.26%). Estas características son ideales para la adsorción de compuestos polares, como los PFAS y HM.

El alto contenido de lignina y el bajo contenido de cenizas también hacen que este material sea excelente para la separación de compuestos orgánicos a través de métodos de separación física. Esto se debe a que un mayor contenido de lignina implica una estructura más amorfa y una mejor disposición en la red del material, lo que mejora la separación física.

Si se activa este biochar, podría ser perfecto para cualquier proceso de separación que involucre el uso de sustancias químicas durante la activación. Incluso, podría ser muy eficiente en aplicaciones de tratamiento de agua.

Tronco de mezcla de coníferas: Un buen contenido de lignina (41.3%) y bajo contenido de cenizas (0.5%) hacen de esta fracción una excelente opción para generar biochar poroso y con capacidad de adsorber contaminantes acuosos.

Mezcla de frondosas (Bosque mediterráneo):

Tronco de mezcla de frondosas: Con 33.7% de lignina y un bajo contenido de cenizas (1.52%), este material tiene un buen potencial para la gasificación. Su balance entre celulosa y hemicelulosa también sugiere que puede producir un biochar con áreas mesoporosas útiles para adsorber amonio, nitratos y PFAS.

Pino piñonero (*Pinus pinea*):

Corteza de pino piñonero: La corteza tiene un alto contenido de lignina (58.1%) y un bajo contenido de cenizas (1.17%), lo que la hace adecuada para producir un biochar estable. Tal vez se deba tener cuidado con su contenido de volátiles (totales). Biochar útil para HMs y PFAS. El alto contenido de lignina y el bajo contenido de cenizas también hacen que este material sea excelente para la separación de compuestos orgánicos a través de métodos de separación física.

Roble (*Quercus humilis*):

Tronco de roble: tiene un contenido de lignina del 35.4%, lo que le otorga una estructura más rígida y menos amorfa en comparación con otras especies. Además, presenta una relación C/N



BIOFORIN

GESTIÓN BIOREGIONAL
DE LOS RECURSOS FORESTALES
PARA LA NUEVA BIOECONOMÍA INDUSTRIAL



relativamente baja (41.84), lo que puede influir en la estabilidad del biochar resultante. El bajo contenido de cenizas (2.55%) es favorable para la activación de biochar, ya que contribuye a una mayor porosidad, haciéndolo adecuado para la adsorción de compuestos como amonio y nitratos en soluciones acuosas. La mayor porosidad, resultante de la activación, mejora la eficiencia en la separación física de contaminantes. Posiblemente útil para corrientes acuosas que contienen amonio y nitratos.

Alcornoque (*Quercus suber*):

Corteza de alcornoque: destaca por su alto contenido de lignina (75.3%), lo que favorece la creación de una estructura amorfa y estable, ideal para la producción de biochar de alta estabilidad. Su bajo contenido de cenizas (1.25%) refuerza su capacidad para adsorber contaminantes orgánicos, como PFAS y otros compuestos no polares, debido a su mayor afinidad por la separación física y química de estos compuestos. Si se activa, este biochar puede ser muy eficaz en procesos de adsorción de contaminantes, tanto orgánicos como inorgánicos, lo que lo hace también útil en aplicaciones de tratamiento de aguas. Excelente candidata para biochar destinado a la adsorción de contaminantes orgánicos como PFAS y otros compuestos no polares.

4.3. Ensayos experimentales

En total se realizaron hasta 17 ensayos de gasificación para 10 mezclas (composiciones) de materiales distintos. Algunas de las mezclas se repitieron con el objetivo de disponer de una mayor cantidad de biochar para las posteriores activaciones y evaluaciones de su uso en las distintas aplicaciones previamente definidas.

Los rendimientos de producción para cada tipología de mezcla (en peso de producto final respecto a producto inicial) obtenidos se muestran en la siguiente figura:

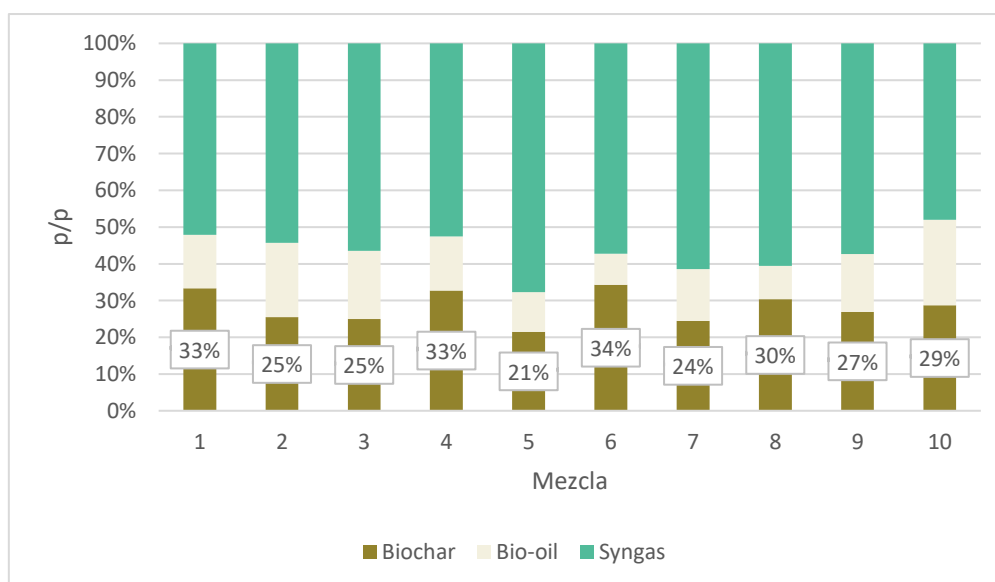


Figura 18 Rendimientos de producción de biochar, bio-oil y syngas

Las altas temperaturas y la presencia de oxígeno en el gasificador llevan el proceso a generar en mayor medida gas de síntesis (56,8% $\pm$ 6%), dejando el biochar en segundo plano (28,3% $\pm$ 4%) y finalmente el aceite pirolítico (15% $\pm$ 5%).

No obstante, la reducción del rendimiento (y por la tanto una menor producción de biochar en peso), queda compensada por las características del biochar generado, que dispone de mayor porosidad y área superficial que un biochar generado en condiciones de pirólisis.



BIOFORIN

GESTIÓN BIOREGIONAL
DE LOS RECURSOS FORESTALES
PARA LA NUEVA BIOECONOMÍA INDUSTRIAL



4.4. Caracterización de los productos

Biochar

El biochar generado durante los distintos ensayos ha sido caracterizado con el objetivo de conocer sus propiedades físico-químicas. Por ello, se han realizado los siguientes análisis:

- pH
- Conductividad
- Análisis elemental (CHONS)
- TGA
- FRX para P, Ca, Al, Fe, K
- Análisis inmediato (Humedad, ST, SV)
- Área superficial
- FTIR
- Microscopía Electrónica de Barrido (SEM por sus siglas en inglés)
- RAMAN (Indicador de la estructura del carbono y grafitización)
- Punto de cero carga
- TPD de CO₂ para medir la basicidad del material
- TPD de amoníaco (NH₃) para medir la acidez Brønsted y Lewis

Además, se ha analizado también un biochar comercial (hecho con astilla de pino en condiciones de pirólisis) para utilizarlo como comparativa base.

Tabla 13 Caracterizaciones de los distintos biochar generados

Mezcla	pH	Cond μS/cm	Análisis elemental (% sms)						TGA (%peso/inicial)					FRX (ppm)					Sólidos			
			C	H	O	N	S	C/N	100°C	250°C	500°C	750°C	1000°C	P	Ca	Al	Fe	K	Humedad (% smf)	Sólidos Volátiles (%sms)	C fijo (% sms)	Cenizas (% sms)
1	12,4	7190	69,2	1,0	21,3	0,9	0,1	74,4	98,49	97,77	97,33	95,57	91,04	6944	86078	10418	9317	35920	1,51	28,53	67,68	2,27
2	12,3	4760	74,1	1,5	6,3	2,6	0,1	28,3	97,94	96,20	95,31	92,19	82,61	9776	82733	1750	3370	69220	2,06			
3	12,4	2720	86,7	1,2	2,2	0,6	0,1	154,8	99,49	98,20	97,64	95,51	90,27	5372	96990	3427	1901	26448	0,51	33,97	44,70	20,82
4	12,5	6500	66,0	1,3	29,4	1,2	0,1	55,0	99,23	98,20	96,93	91,95	97,22	9033	87643	10220	13951	15810	0,76	37,45	50,02	11,77
5	11,2	1100	78,8	1,2	5,6	0,6	0,1	131,3	98,85	97,92	96,94	88,50	85,16	7021	151416	1735	921	39518	1,15	24,16	64,43	10,27
6	11,6	1062	86,4	3,1	5,5	5,0	0,0	17,3	98,98	98,35	97,48	95,16	92,84	925	23257	4933	2391	3184	1,01	19,14	78,27	1,59
7	11,9	1700	88,3	1,4	9,7	0,5	0,1	176,6	98,57	97,24	96,26	93,87	91,00	2287	66983	3528	1689	13513	1,42	30,76	64,71	3,12
8	11,6	410	88,8	1,5	9,1	0,5	0,1	177,6	99,13	98,73	98,36	97,20	95,06	2818	22030	5198	1772	3896	0,87	31,26	66,68	1,19
9	12,6	7010	81,3	1,5	16,4	0,8	0,1	104,2	98,58	97,64	96,71	93,81	85,86	3310	113111	3240	2535	27638	1,41	18,21	72,95	7,43
10	12,0	3600	80,3	3,0	11,4	5,3	0,0	15,2	98,39	97,60	96,36	91,69	85,96	3282	59275	7040	5013	27727	1,61	24,26	68,62	5,51
Com	8,1	66	72,6	2,8	24,2	0,4	0,1	201,5						788	33817	1959	1343	10594				



pH

Los biochares presentan valores de pH elevados, entre 11,5 y 12,7, indicando una fuerte alcalinidad como resultado del tratamiento térmico severo en condiciones de gasificación. Este carácter básico está relacionado con la eliminación de grupos ácidos superficiales y la concentración relativa de óxidos metálicos (Ca, K, Mg) en la fracción sólida.

El biochar de la Mezcla 9, con el pH más alto (12,7), podría priorizarse para ambientes altamente ácidos, mientras que el de la Mezcla 2, con el valor más bajo (11,5), podría ser más adecuado para aplicaciones que requieran una alcalinidad moderada.

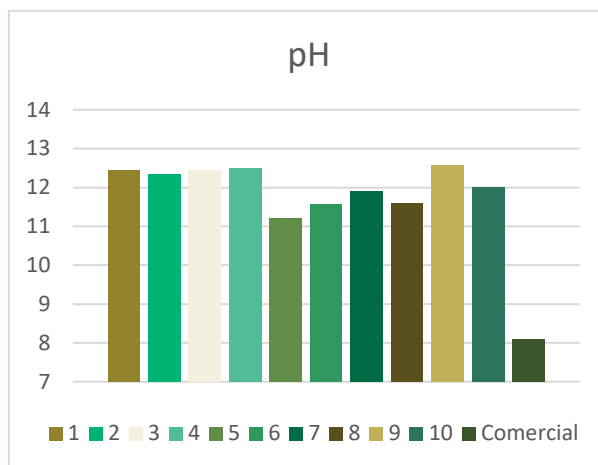


Figura 19 pH de los biochar generados

Conductividad

La conductividad de los biochares oscila entre 1062 y 7190 $\mu\text{S}/\text{cm}$, con valores especialmente altos en las Mezclas 1, 4 y 9. Estos niveles reflejan una elevada presencia de sales solubles, particularmente en biochares que contienen fracciones como digestato o especies vegetales ricas en cenizas. Una alta EC puede ser positiva para aplicaciones en remediación, al favorecer mecanismos de intercambio iónico, pero puede limitar su aplicación directa en suelos si no se controla, especialmente en cultivos sensibles a la salinidad.

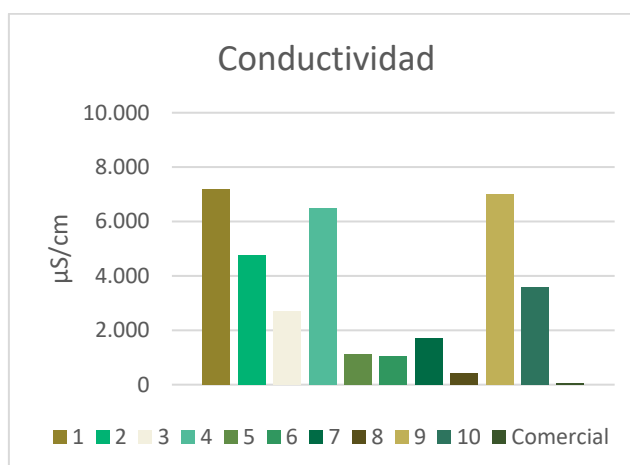


Figura 20 Conductividad eléctrica de los biochar generados

Análisis elemental

El contenido de carbono (C) en los biochares gasificados se sitúa entre 66,0% y 88,1%, siendo más alto en biochares derivados de corteza o mezclas leñosas puras, lo que denota una matriz



aromática rica en estructuras gráficas, deseable para aplicaciones que requieren estabilidad estructural y resistencia a la oxidación.

El hidrógeno (H) y el oxígeno (O) muestran valores bajos, correspondientes a una carbonización avanzada y un grado elevado de aromatización. El nitrógeno (N) se encuentra en el rango de 0,5% a 2,6%, con valores más altos en biocharres producidos a partir de biomasa con fracciones nitrogenadas, como hojas (Mezcla 2) o FORM (Mezcla 3).

El contenido de azufre (S) es muy bajo en todos los casos (<0,1%), lo cual es deseable para evitar la liberación de compuestos sulfurados durante la activación o aplicación.

Finalmente, la relación C/N, que oscila entre 26 y 138, proporciona una indicación del grado de estabilización del biochar.

Relaciones C/N elevadas, como las observadas en las Mezclas 1, 7, 8 y 10 (>75), sugieren una estructura altamente recalcitrante, adecuada para aplicaciones que requieren estabilidad a largo plazo (como suelos o lechos filtrantes). Valores más bajos, como en las Mezclas 2, 4 y 6, podrían favorecer procesos de activación química basados en funcionalización nitrogenada.

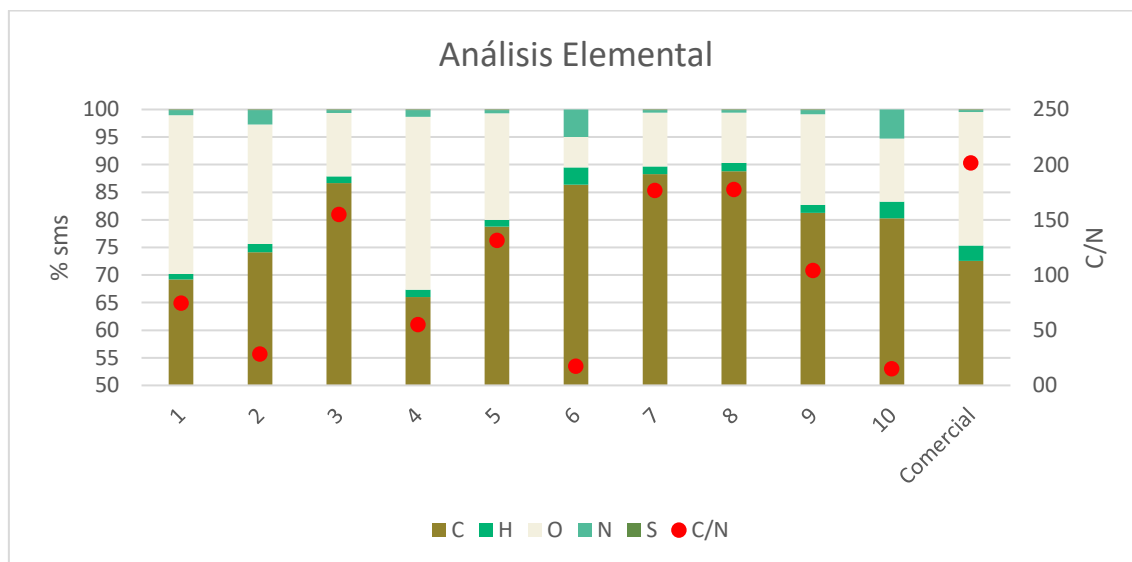


Figura 21 Composición elemental de los biochar generados

Humedad, sólidos y cenizas

Los contenidos de humedad fueron bajos en todos los casos, con valores entre 0,6% (Mezcla 3) y 1,9% (Mezcla 9), lo que indica una deshidratación efectiva del biochar tras el proceso de gasificación.

Los contenidos de humedad fueron bajos en todos los casos, con valores entre 0,51% (Mezcla 3) y 2,06% (Mezcla 2), lo que indica una deshidratación efectiva del biochar tras el proceso de gasificación.

El contenido de sólidos volátiles, presentó una variabilidad limitada con valores entre 0,77 % (Mezcla 8) y 2,63 % (Mezcla 2). Los bajos contenidos de volátiles observados en todas las mezclas indican un alto grado de conversión térmica de la materia orgánica, característico de biocharres obtenidos por gasificación. En particular, las Mezclas 1, 6 y 8, con los valores más bajos, muestran una matriz carbonosa altamente transformada y estable. Por el contrario, mezclas con contenidos de volátiles ligeramente superiores, como las Mezclas 2, 4 y 7, podrían conservar una fracción limitada de compuestos orgánicos residuales, potencialmente asociada a la presencia de grupos funcionales superficiales formados durante el proceso, lo que puede ser relevante para aplicaciones basadas en interacciones en superficie.

El contenido de cenizas se ve claramente diferenciado en dos grupos: las mezclas que contienen solamente fracciones vegetales (1, 5, 6, 7, 8, 9 y 10) tienen una cantidad de cenizas muy reducida (del 1 al 7%, mientras que las mezclas que cuentan con otro tipo de fracciones (2,

**BIOFORIN**GESTIÓN BIOREGIONAL
DE LOS RECURSOS FORESTALES
PARA LA NUEVA BIOECONOMÍA INDUSTRIAL

3 y 4) tienen un contenido en cenizas más elevado (hasta de un 20% sobre peso seco). Biochar con contenidos de cenizas especialmente altos, presentan una fracción carbonosa limitada, pero una elevada concentración de minerales, lo que los hace particularmente adecuados para aplicaciones donde la fase inorgánica desempeña un papel funcional, como procesos de inmovilización de contaminantes, intercambio iónico o enmiendas minerales para suelos. En contraste, mezclas con contenidos de cenizas menores, conservan una mayor proporción de carbono fijo, lo que podría facilitar su valorización en aplicaciones donde la matriz carbonosa tenga un mayor peso funcional.

Carbono fijo

El carbono fijo en el biochar es la fracción de carbono estable y no volátil que permanece tras eliminar humedad, volátiles y cenizas en la pirólisis, formando una matriz aromática altamente resistente a la degradación. Un mayor contenido en carbono fijo indica mayor estabilidad a largo plazo (siglos o milenios en suelo), mayor potencial para secuestrar carbono, mitigar el cambio climático y mejorar suelos como enmienda, sirviendo además como indicador clave de calidad y grado de carbonización del biochar.

Como indica la Tabla 13, el bajo contenido de cenizas en los biochar que solamente contienen fracciones forestales conlleva la elevada presencia de carbono fijo, calculado según la fórmula

$$C \text{ fijo} = 100 - \text{humedad} - \text{sólidos volátiles} - \text{cenizas}$$

Área superficial, volumen y porosidad

Los valores de área superficial Langmuir varían desde 110,1 m²/g (Mezcla 2) hasta 499,8 m²/g (Mezcla 7), con cinco mezclas superando los 400 m²/g (Mezclas 5, 6, 7, 8 y 9), lo cual indica un alto desarrollo poroso. Estas mezclas, en particular las Mezclas 7 y 8 (ambas cercanas a los 500 m²/g), presentan una elevada capacidad potencial para aplicaciones que requieren alta superficie activa, como la adsorción de gases traza (H₂S, siloxanos), compuestos orgánicos volátiles o contaminantes emergentes en agua. Por el contrario, las Mezclas 1 y 2 mostraron áreas significativamente más bajas (<160 m²/g), lo que puede limitar su capacidad adsorbente a menos que se sometan a un proceso de activación posterior.

El volumen total de poros osciló entre 0,0455 cm³/g (Mezcla 2) y 0,155 cm³/g (Mezcla 7), mostrando nuevamente que las mezclas con mayor contenido leñoso y mejor carbonización generaron una estructura más desarrollada. Este volumen es crucial para la retención de contaminantes en fase líquida o gaseosa, y su aumento está generalmente relacionado con una mayor eficacia adsorbente. En este caso, las Mezclas 5, 7 y 8 destacan por presentar tanto un volumen de poros elevado como una gran área superficial.

La microporosidad, representada por el volumen y el área específica de microporos, muestra que las fracciones más relevantes están centradas en el rango <2 nm, con valores de volumen que alcanzan hasta 0,161 cm³/g (Mezcla 7) y áreas microporosas superiores a 390 m²/g (Mezcla 7). Esto es especialmente importante en aplicaciones de captura de moléculas pequeñas como CO₂, NH₃ o H₂S, donde la presencia de microporos bien desarrollados favorece la adsorción selectiva. Mezclas como la 6, 7 y 9 muestran un excelente equilibrio entre microporosidad y volumen total, lo que sugiere que podrían ser utilizadas directamente o con activaciones moderadas en sistemas de adsorción en gas o líquido.

En contraste, la Mezcla 6, a pesar de su área Langmuir moderadamente alta (334,6 m²/g), presenta un valor atípicamente bajo de área en poros accesibles (10,8 m²/g), lo cual podría indicar obstrucción por cenizas o una fracción significativa de poros cerrados o colapsados. Este comportamiento sugiere que este biochar podría beneficiarse de una activación térmica suave o lavado ácido para mejorar su accesibilidad porosa.

En general, las Mezclas 5, 7, 8 y 9 destacan por sus propiedades texturales superiores, lo que las posiciona como candidatas preferentes para aplicaciones adsorbentes exigentes, mientras que las Mezclas 1, 2 y 10 podrían necesitar un proceso de activación para alcanzar un rendimiento competitivo. Estas observaciones serán fundamentales para priorizar los biochar a activar y seleccionar las condiciones más adecuadas según el entorno de aplicación (fase gaseosa, líquida o sólida).



BIOFORIN

GESTIÓN BIOREGIONAL
DE LOS RECURSOS FORESTALES
PARA LA NUEVA BIOECONOMÍA INDUSTRIAL

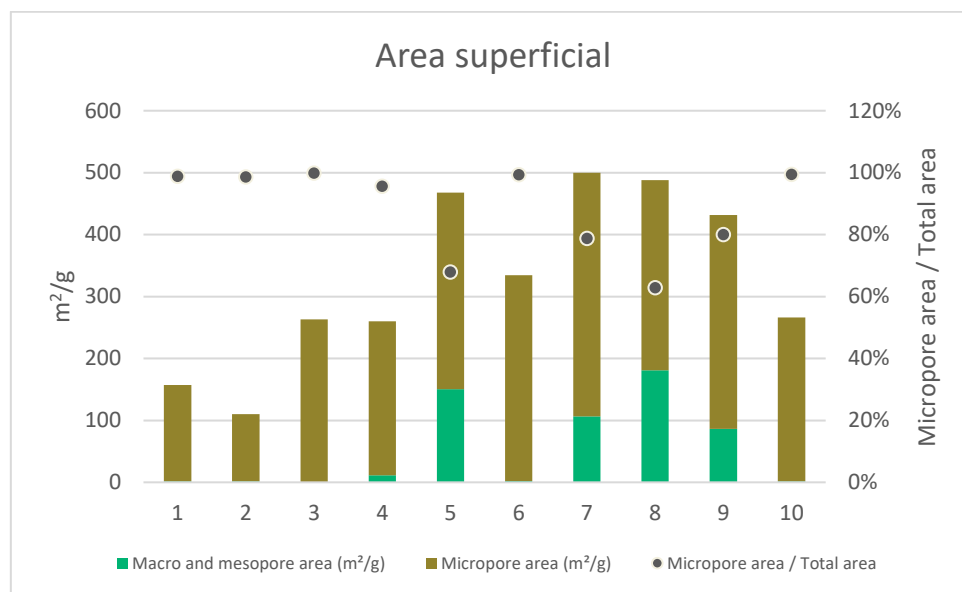


Figura 22 Area superficial total y correspondiente a los microporos de los biochar generados

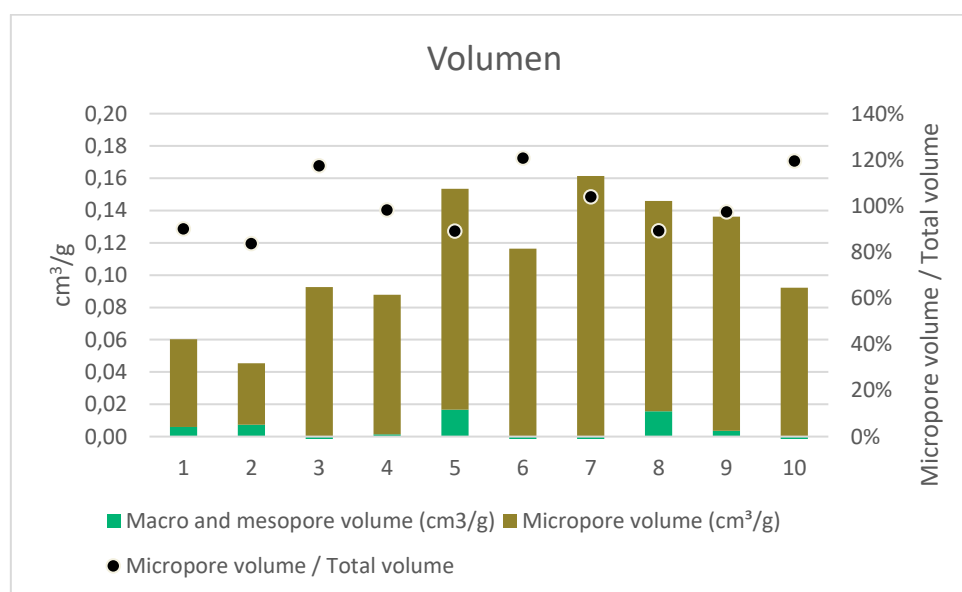


Figura 23 Volumen total y correspondiente a los microporos de los biochar generados

Análisis TermoGravimétrico (TGA)

La TGA muestra la descomposición de una muestra según se va incrementando la temperatura, en una atmósfera inerte. En este caso, al ser todas las muestras analizadas biochars producidos a 700°C, hasta que la temperatura de la TGA no ha alcanzado este valor, la reactividad de las muestras ha sido prácticamente inexistente (**Figura 24**) hasta alcanzada esta temperatura, pues



BIOFORIN

GESTIÓN BIOREGIONAL
DE LOS RECURSOS FORESTALES
PARA LA NUEVA BIOECONOMÍA INDUSTRIAL



todas las reacciones de descomposición térmica que debieron ocurrir hasta estos 700°C ya han tenido lugar durante la etapa de producción del biochar.

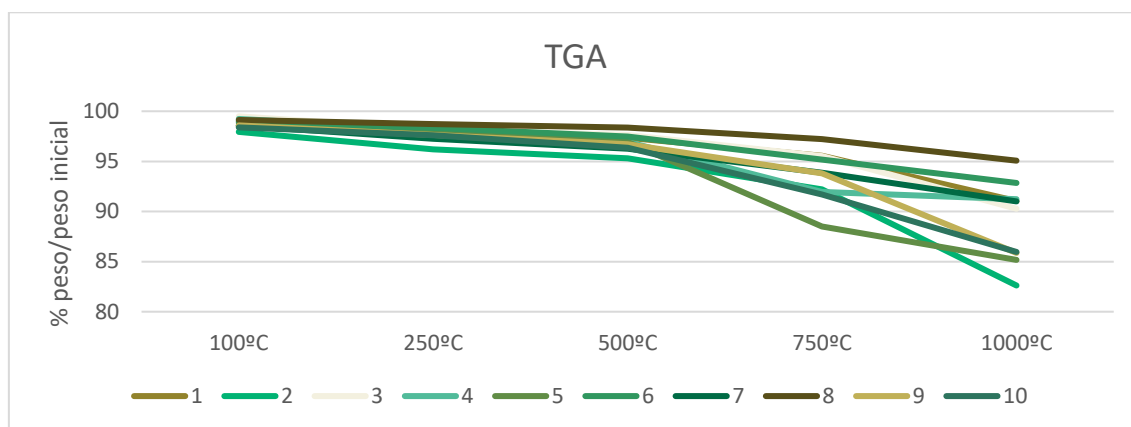


Figura 24 Análisis TermoGravimétrico de los biochar generados

El biochar que mayor descomposición térmica ha experimentado entre 0 y 1000°C ha sido el correspondiente a la mezcla 2, donde se ha perdido el 18% de la masa inicial del biochar. Por el contrario, el que menos pérdida de masa ha sufrido ha sido el biochar correspondiente a la mezcla 8, cuya pérdida ha sido solamente de un 5% de la masa inicial.

SEM

La técnica de Microscopía Electrónica de Barrido (SEM por sus siglas en inglés) nos da una imagen real ampliada de la superficie de los biochar. Aunque solamente nos permite ver los macroporos, la información que aporta sobre la morfología de la muestra puede resultar de lo más útil:

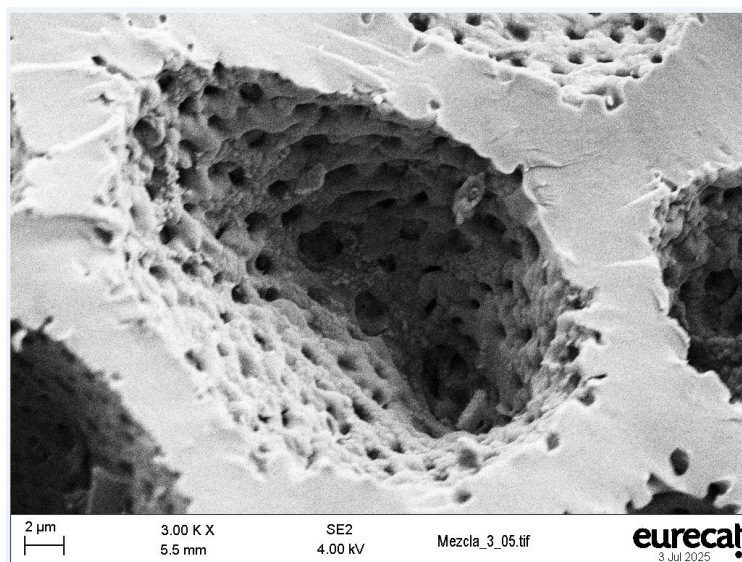


Figura 25 Imagen SEM del biochar obtenido a partir de la mezcla 1

Si tomamos como ejemplo esta imagen tomada a 3.000 aumentos en una muestra de la mezcla de biochar 1, vemos un gran macroporo central (de hasta 25 µm de largo), cuyas paredes están perforadas por otros macroporos (de 1 µm de diámetro). Aunque no sean visibles, los microporos (que representan prácticamente el total del área superficial del biochar de la mezcla 1) están presentes a lo largo de todas las paredes “lisas” que se observan en la imagen, así como en las paredes de los propios macroporos. Como se explica en el apartado “Área superficial, volumen y porosidad”, esta alta porosidad y específicamente porosidad formada por microporos es importante en aplicaciones de captura de moléculas pequeñas como CO₂, NH₃ o H₂S.



Gas de síntesis

Para los 10 ensayos realizados, el gas de síntesis generado para cada uno de ellos ha tenido la siguiente composición:

Tabla 14 Composición del gas de síntesis generado en cada uno de los ensayos

	Rendimiento	H ₂	CH ₄	CO	CO ₂	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	C ₂ H ₂	H ₂ S	C ₃ H ₈ + C ₃ H ₆	Total	PCI (MJ/kg)
1	56,49%	49,45%	6,15%	35,19%	8,74%	0,19%	0,23%	0,00%	0,03%	0,02%	100%	17,66
2	54,33%	43,40%	3,09%	39,35%	13,76%	0,15%	0,17%	0,00%	0,01%	0,07%	100%	13,43
3	52,08%	47,83%	5,17%	38,90%	7,67%	0,12%	0,17%	0,00%	0,11%	0,03%	100%	17,06
4	52,52%	41,28%	7,87%	38,69%	10,76%	0,44%	0,74%	0,02%	0,01%	0,18%	100%	16,53
5	67,74%	56,39%	9,87%	21,48%	11,87%	0,18%	0,20%	0,00%	0,00%	0,00%	100%	20,54
6	57,24%	49,73%	13,93%	27,04%	9,23%	0,03%	0,05%	0,00%	0,00%	0,00%	100%	21,49
7	61,43%	49,02%	4,85%	0,64%	44,83%	0,29%	0,37%	0,00%	0,00%	0,00%	100%	7,87
8	60,59%	66,28%	13,18%	11,58%	8,85%	0,05%	0,07%	0,00%	0,00%	0,00%	100%	29,22
9	57,35%	58,99%	9,01%	19,30%	12,09%	0,24%	0,36%	0,00%	0,00%	0,00%	100%	21,04
10	48,03%	58,33%	0,00%	31,96%	8,78%	0,41%	0,52%	0,00%	0,00%	0,00%	100%	17,15

El poder calorífico de los gases de síntesis se corresponde con un poder calorífico de singas habitual. Las mezclas 8, 6 y 9 tienen el mayor PCI (Poder Calorífico Inferior) debido a la concentración de hidrógeno, que eleva considerablemente el PCI. Por el contrario, la mezcla 7 es la que tiene un menor PCI debido a la elevada concentración de CO₂, quien no aporta poder calorífico debido a su oxidación completa.

Este gas puede ser utilizado como biocombustible sustitutorio del gas natural, reduciendo la demanda energética externa.

A destacar la presencia de H₂S (1100 ppm) en el caso del syngas generado en la mezcla 3, debido a la inclusión de FORM en la mezcla de biomasa.

4.5. Ensayos a gran escala en la planta piloto del CENER

Una vez realizados los ensayos de producción de biochar a partir de distintas mezclas a escala laboratorio, en el proyecto BIOFORIN se realizaron 3 ensayos de producción de biochar a escala piloto demostrativo (480 kg/h, 2MWt). Los valores operativos de los ensayos realizados se muestran en la Tabla 15

Tabla 15 Condiciones operativas de las pruebas del CENER

Parámetros	Unidades	Valor	Rango
Caudal de biomasa medio	kg/h	444	396-540
Humedad de la biomasa	%	23,5	22,5-24,8
Contenido en cenizas	% base seca	1,0	0,9-1,1
Potencia térmica	MWt	1,9	1,7-2,3



ER	-	0,31	0,30-0,32
Oxígeno/biomasa	kg/kg daf	0,47	0,46-0,48
Temperatura del lecho	°C	817	814-824
Temperatura del freeboard	°C	818	811-826

Con estos parámetros operativos, los resultados para el rendimiento de producción de biochar y gas de síntesis y la composición de ambos se detallan en la Figura 26 y la Figura 27 (la distinción de los resultados en 5 etapas se debe únicamente a motivos de fechas, correspondiendo cada una de ellas a diferentes turnos laborales).

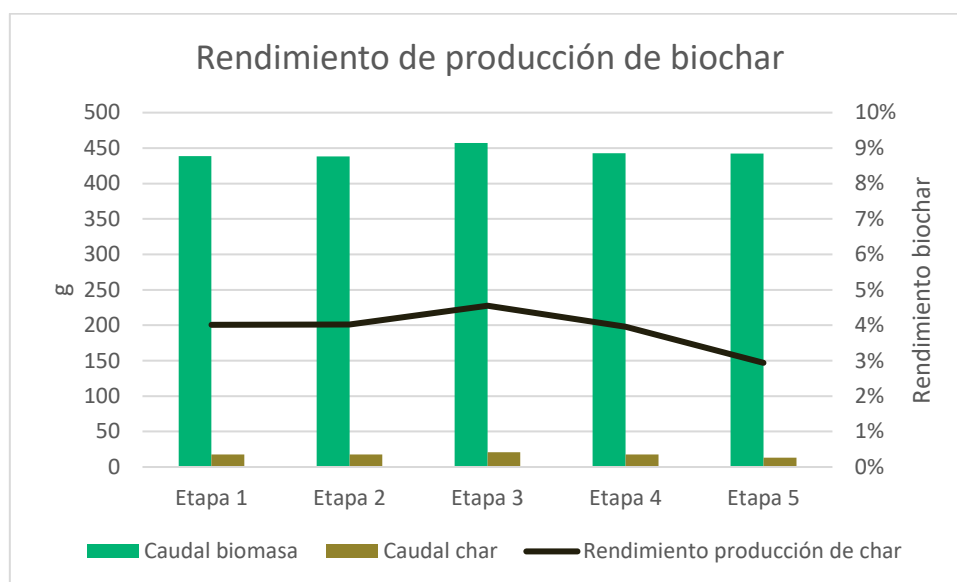


Figura 26 Caudales y rendimiento de producción del biochar en la planta del CENER

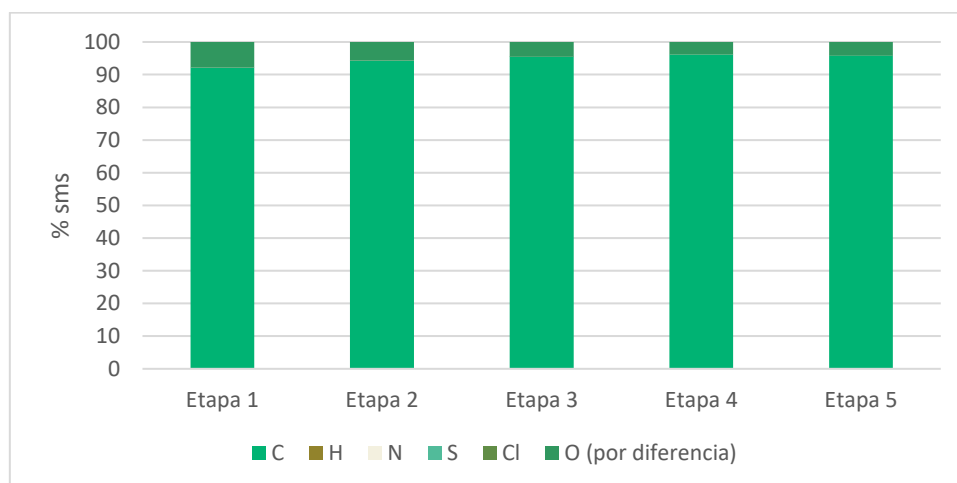


Figura 27 Análisis elemental del biochar producido en la planta del CENER

La gran diferencia entre el rendimiento de producción de biochar en la planta del laboratorio de Eurecat ($28\% \pm 4$) y la planta del CENER ($4\% \pm 0,5$) se debe a diferentes factores:



BIOFORIN

GESTIÓN BIOREGIONAL
DE LOS RECURSOS FORESTALES
PARA LA NUEVA BIOECONOMÍA INDUSTRIAL



- Temperatura de operación: En la planta de Eurecat, la temperatura máxima de trabajo ha sido de 750°C, cuando en la del CENER se han superado los 800°C. A mayor temperatura, elementos y compuestos menos volátiles se descomponen, reduciendo así la masa del producto sólido resultante (el biochar).
- Rampa de calentamiento: En Eurecat se ha trabajado en batch y con una rampa de calentamiento muy lenta (3°C/min) pensando en incrementar la cantidad de biochar generado. En el caso de la planta del CENER, la biomasa se ha ido introduciendo en continuo a un reactor que se encontraba a +800°C, favoreciendo la producción de la fracción gas.
- Objetivo final de la planta: La planta del CENER es una planta de gasificación pensada para operar en las condiciones idóneas para transformar la biomasa en un gas de síntesis, siendo el biochar un subproducto que pueden recoger y caracterizar, pero el objetivo principal es el de transformar residuo orgánico en gas de alto valor.

El gas de síntesis generado durante el proceso ha sido analizado para cuantificar los mismos componentes que se han detectado en el gas de síntesis de laboratorio. Estos son:

- Hidrógeno
- Nitrógeno (presente en la mezcla de gas portador)
- Metano
- Monóxido de carbono
- Dióxido de carbono
- Etileno
- Etano
- Acetileno
- Propano
- Butano
- Benceno

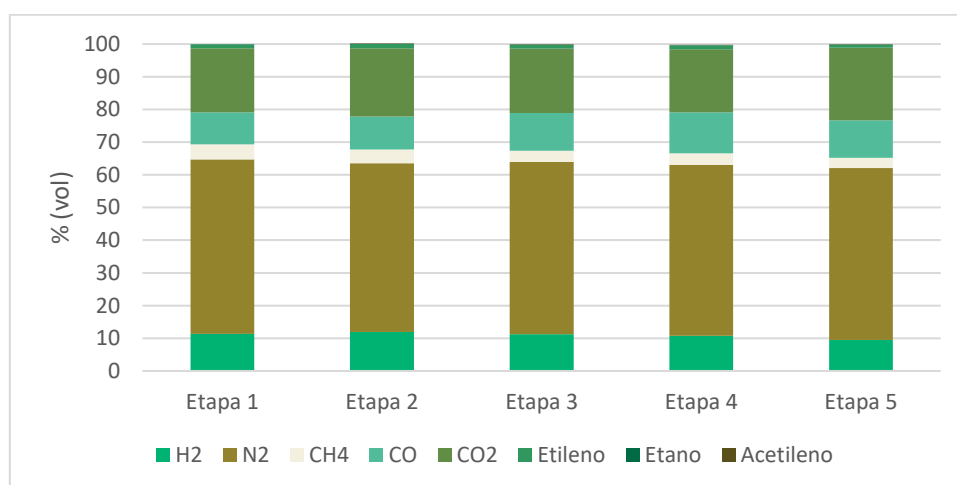


Figura 28 Caracterización del gas de síntesis analizado en la planta de gasificación del CENER

En caso de analizar el gas de síntesis producido (excluyendo por lo tanto la parte de nitrógeno contenida en el gas analizado), los resultados obtenidos son los mostrados en la Figura 29



BIOFORIN

GESTIÓN BIOREGIONAL
DE LOS RECURSOS FORESTALES
PARA LA NUEVA BIOECONOMÍA INDUSTRIAL

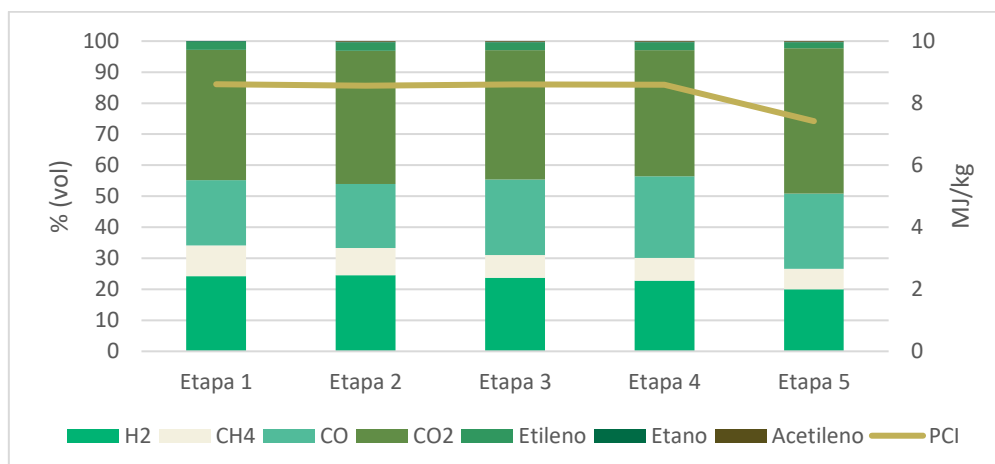


Figura 29 Composición del gas de síntesis producido

La segunda prueba realizada en el CENER se diferenció de la primera en la adición de bioestabilizado (materia orgánica con elevada cantidad de impropios que ha pasado por un proceso de compostaje), mezclado con la biomasa forestal, en una proporción del 20% de bioestabilizado.

Este segundo lote se ha gasificado según las condiciones establecidas en el primer ensayo, obteniendo un gas de síntesis con la siguiente composición (en este caso el CENER no hace distinción entre etapas operativas):

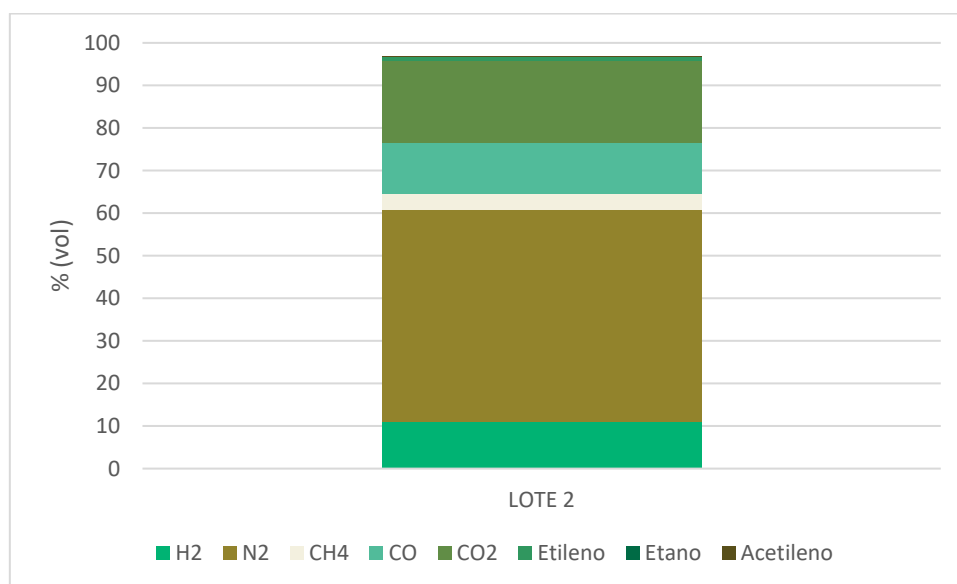


Figura 30 Caracterización del gas de síntesis analizado

Si le quitamos el nitrógeno para analizar solamente los compuestos producidos, el resultado es el que se muestra en la **Figura 31**

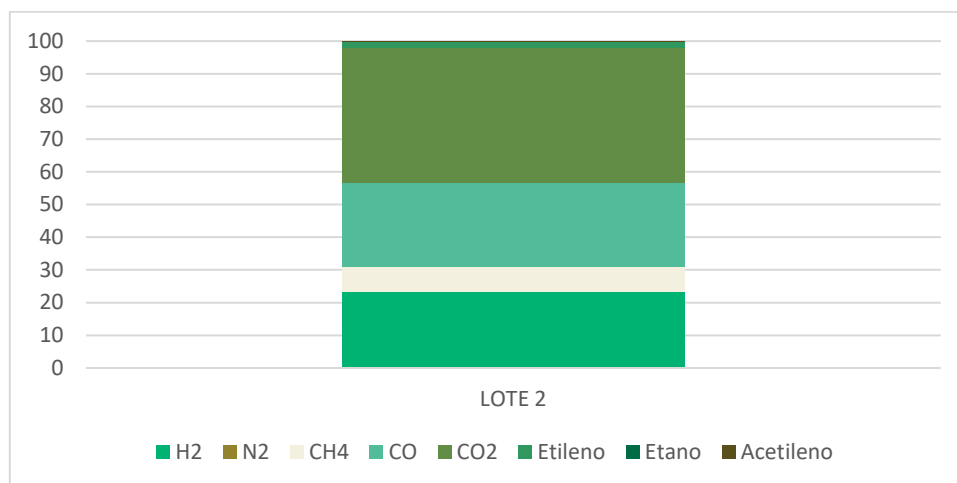


Figura 31 Caracterización del gas de síntesis producido en el segundo ensayo en el CENER

Como se observa en la Figura 32, el gas de síntesis generado en ambos ensayos tiene una composición muy similar, sugiriendo que la introducción del bioestabilizado en una cantidad del 20% no tiene efectos significativos en la composición del gas de síntesis generado durante el proceso de gasificación

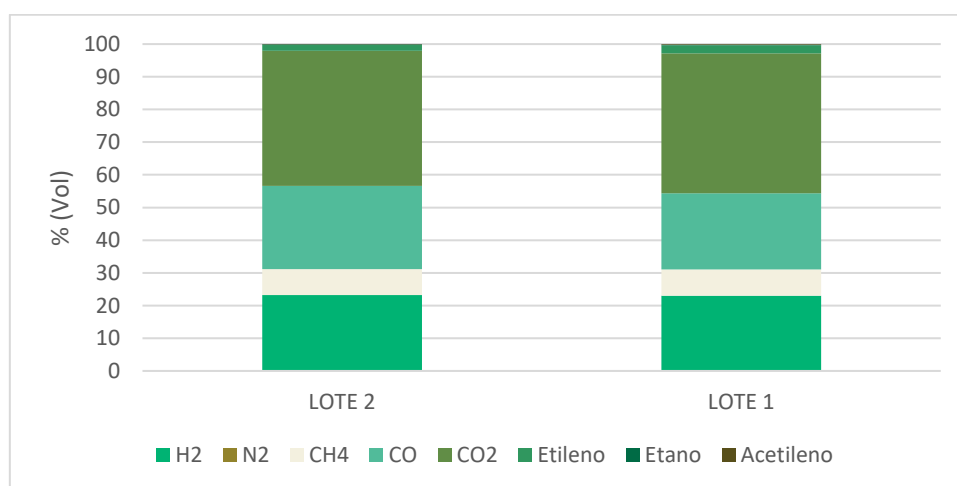


Figura 32 Comparativa entre los gases de síntesis generados en las pruebas del CENER

Tabla 16 Comparativa entre los gases de síntesis generados en las pruebas del CENER

Composición Syngas sin N2 (%vol)	Gas	Lote 1	Lote 2
	H2	23,04	23,27
	N2		
	CH4	8,01	7,88
	CO	23,30	25,44
	CO2	42,84	41,35
	Etileno	2,44	1,82
	Etano	0,21	0,13
	Acetileno	0,17	0,12



BIOFORIN

GESTIÓN BIOREGIONAL
DE LOS RECURSOS FORESTALES
PARA LA NUEVA BIOECONOMÍA INDUSTRIAL



4.6. Conclusiones

La producción de biochar mediante la tecnología de gasificación, generando además gases de síntesis con poder calorífico, es una opción muy prometedora por los siguientes motivos:

Permite valorizar fracciones generadas durante la gestión forestal que hasta ahora no se valorizan (ramas, hojas, cortezas...)

Se genera un vector energético en forma de gas de síntesis, con un poder calorífico que permite la sustitución parcial de la demanda de energía que aportan los combustibles fósiles.

El biochar producido es aplicable en distintos puntos de la cadena de valor de la gestión de residuos urbanos (purificación de biogás, depuración de aguas residuales, procesos de digestión anaerobia y compostaje), así como en terrenos agrícolas.

Para los usos evaluados en el proyecto BIOFORIN, el biochar generado durante un proceso de gasificación es más adecuado que el que se genera con la tecnología de pirólisis debido a que la mayor temperatura de proceso y la presencia de una atmósfera parcialmente oxidante, favorece la descomposición térmica de un mayor número de elementos contenidos en la biomasa, creando así un biochar con una mayor porosidad y superficie. Además, la generación de un gas de síntesis con potencial energético permite que la tecnología sea (en la mayoría de las ocasiones), energéticamente sostenible.

No obstante, todavía es una tecnología que presenta una serie de retos aún hoy por superar:

- Escalabilidad del proceso: el coste de inversión y de operación de las plantas de gasificación es hoy en día muy elevado, requiriendo además de un equipo de personas con elevada formación y conocimiento del proceso y del funcionamiento y operativa de la planta
- La activación del biochar es un proceso específico para cada aplicación, causando un incremento en el coste de producción del producto final