



2022  
Lleida

27·1  
junio · juny  
julio · juliol

Cataluña  
Catalunya

## 8º CONGRESO FORESTAL ESPAÑOL

La **Ciencia forestal** y su contribución a  
los **Objetivos de Desarrollo Sostenible**

8CFE

Edita: Sociedad Española de Ciencias Forestales  
**Cataluña | Catalunya · 27 junio | juny - 1 julio | juliol 2022**  
**ISBN 978-84-941695-6-4**  
© Sociedad Española de Ciencias Forestales

Organiza



## Caracterización de la astilla de madera en Cataluña y primera aproximación al estudio de su incidencia en las emisiones asociadas

RADDI, A.<sup>1</sup>, ALCOVERRO G.<sup>1</sup>, CODINA, M.<sup>1</sup> y OLIVEIRA, S. <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Grupo de aprovechamientos, mecanización y biomasa forestal. *Centro de Ciencia y Tecnología Forestal de Cataluña.*

### Resumen

La biomasa forestal es una fuente de energía natural, renovable y sostenible, ideal para calefacción doméstica, industrial y redes de calor. Entre otras ventajas, la energía producida por la biomasa forestal se asocia a la neutralidad de las emisiones de CO<sub>2</sub>. Sin embargo, este proceso –como toda combustión– genera emisiones que deben tenerse en cuenta y minimizar. Los factores que inciden en las emisiones procedentes de la combustión de biomasa son la tecnología del equipo, su regulación y mantenimiento, los sistemas secundarios de reducción de emisiones y la calidad del biocombustible. Este estudio presenta una caracterización de la calidad de la astilla forestal producida en Cataluña y una primera aproximación de las posibles relaciones entre la calidad del biocombustible y las emisiones que se generan durante su combustión.

Las conclusiones evidencian los márgenes para una mejora cualitativa de la astilla producida y la necesidad de profundizar ulteriormente en el estudio de su incidencia en las emisiones relacionadas.

### Palabras clave

Calidad astilla, biomasa forestal, emisiones.

## 1. Introducción

La bioenergía es la fuente de energía renovable más extendida en Europa y puede asumir el liderazgo en la mejora de la calidad del aire. Los objetivos necesarios para aumentar la cuota de las fuentes de energía renovables deben ir acompañados de una reducción significativa de las emisiones a la atmósfera. La energía térmica utilizada para calefacción y refrigeración desempeñará un papel crucial, tanto en lo que se refiere a la protección de la calidad del aire como a la descarbonización y la transición energética. Por ello es esencial cubrir la importante demanda de energía con fuentes de energía limpias y neutras en carbono. La producción de calor a partir de biomasa forestal es parte de la respuesta a este desafío y ya hoy en día el calor procedente de esta biomasa proporciona la mayor parte de la energía térmica renovable (CAMIA et al., 2021). Para aumentar la conciencia de cómo la industria de la bioenergía puede seguir contribuyendo a la mejora de la calidad del aire, es necesario el compromiso y la contribución de todos los actores: responsables políticos, industria forestal, instaladores, consumidores finales. El objetivo común es poner en marcha una acción conjunta para favorecer, por una parte, el desarrollo de tecnologías de alta eficiencia y bajo impacto y, por otra, acciones dirigidas a reducir las emisiones. Las modernas instalaciones de biomasa forestal han reducido considerablemente las emisiones en comparación con las antiguas. Al favorecer la sustitución, se avanza en la descarbonización de la economía y en la reducción de los contaminantes, que en altas concentraciones pueden ser perjudiciales para el hombre (material particulado, óxido de nitrógeno, dióxido de azufre, monóxido de carbono, benzopireno).

Al mismo tiempo, para aumentar la cuota de energías renovables y reducir las emisiones a la atmósfera es importante velar por la calidad de los biocombustibles. Es bien sabido que la producción de astilla de madera, en general, presenta una gran variabilidad en sus características, lo que conlleva la necesidad indispensable de garantizar los estándares de calidad.

El parámetro más importante para la clasificación de la astilla es el contenido de ceniza, así como la humedad y su tamaño (DUCA et al., 2014; TOSCANO et al., 2016; MANCINI et al., 2020). Otros parámetros tales como el nitrógeno, sulfuro, contenido de cloro y otros elementos menores pueden ser relevantes especialmente para la biomasa residual (DUCA et al., 2016).

La humedad de la astilla forestal, por ejemplo, tiene un gran impacto en la eficiencia de la combustión y en las emisiones en la atmósfera. Se estima que el uso de leña con menos de un 20 % de humedad permite una reducción de las emisiones de ocho veces (en comparación con la madera con un 30 % humedad) y, al mismo tiempo, aumenta la eficiencia del aparato en que se lleva a cabo la combustión (SACCARDI, 2020). Las normas de calidad de los combustibles y los esquemas de certificación, como DBOSQ®, también contribuyen a garantizar niveles bajos de emisiones en la atmósfera.

## 2. Objetivos

El objetivo del estudio es caracterizar la calidad de la astilla de madera producida en Cataluña a través de las muestras recogidas a lo largo de un período de dos años. En el marco de la operación *Plan de biomasa km 0* del proyecto de especialización y competitividad territorial *Barcelona smart rural*, financiado por el PO FEDER de Cataluña 2014-2020 y la *Diputación de Barcelona*, se compara también la caracterización de la astilla procedente de cinco patios logísticos con las emisiones generadas en tres calderas de potencia media (200-500 kW) situadas en la provincia de Barcelona.

La disponibilidad de información y estadísticas con un buen nivel de precisión y fiabilidad es fundamental, tanto para informar correctamente a la opinión pública como para permitir a los responsables políticos tomar las mejores decisiones desde el punto de vista económico, medioambiental y social.

## 3. Metodología

El estudio consta de dos partes. Primero, se ha realizado un análisis estadístico de las analíticas realizadas desde 2019 hasta 2021 en el laboratorio de biocombustibles agroforestales del *Centro de Ciencia y Tecnología Forestal de Cataluña* (CTFC). Los parámetros de la astilla estudiados han sido: humedad, cenizas, densidad, granulometría, fracción de finos ( $\leq 3,15$  mm) y poder calorífico inferior (PCI).

De toda la base de datos del laboratorio, se ha tenido en consideración solo la astilla de madera procedente de árboles enteros sin raíces y de fuste (clase 1.1.1. y 1.1.3 según la norma UNE-EN ISO 17225-1) para aplicaciones en edificios residenciales, edificios comerciales pequeños y edificios públicos.

La preparación de muestras se realizó siguiendo la norma ISO 14780. La densidad a granel se determinó siguiendo la norma ISO 17831-1. El contenido de humedad se determinó en la estufa *Memmert* a  $105 \pm 2^\circ\text{C}$ , de acuerdo con la norma ISO 18134-2. El contenido de ceniza se analizó con un horno *Carbolite VMF 10/6*, de acuerdo con la ISO 18122. El poder calorífico superior (PCS) se determinó con un calorímetro *IKA C200* según la ISO 18125. El poder calorífico inferior (PCI) se calculó a partir del PCS, en función del contenido de hidrógeno. La composición elemental, contenido en carbono (C), contenido en hidrógeno (H), contenido en nitrógeno (N) se determinó con el analizador elemental *Flash 2000*, de acuerdo con la ISO 16948.

En segundo lugar, se ha realizado una pequeña comparación de cómo puede relacionarse la calidad de la astilla con las emisiones. Dicha comparativa se ha llevado a cabo con la astilla de cinco patios logísticos, cada patio con distintas características por lo que respeta la materia prima y la

cadena de producción de la astilla. De cada patio productor de astilla se mandó una remesa en tres calderas de potencia media (200-500 kW) con distintas características tecnológicas.

En cada una de las remesas de astilla se midieron las emisiones resultantes a la vez que en el silo se tomaba la muestra de astilla para ser analizada en el laboratorio del CTFC.

Referente a la toma de datos de las emisiones se utilizó el Testo 380 para la medición del material particulado (PM<sub>10</sub>) y el Testo 350 para el oxígeno (O<sub>2</sub>), monóxido de carbono (CO), monóxido de nitrógeno (NO), dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>), óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>) y dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>).

El protocolo seguido para la toma de datos para el Testo 350 es de 3 fases de 5 minutos cada una con tomas de datos cada 10 segundos, un total de 90 medidas. En el Testo 380 se hace solo 1 fase de 5 minutos con toma de datos cada 5 segundos, 60 medidas en total.

Como las calderas tratadas no requieren un condicionamiento según la UNE-EN 15259 se siguió el apartado 6.2 de la IT-AT 002. Para garantizar una toma de datos homogénea durante todo el tiempo de medición y entre distintas mediciones, éstas se realizaron con la caldera funcionando a su potencia nominal.

#### 4. Resultados

El laboratorio de biocombustibles del CTFC representa un observatorio privilegiado por lo que se refiere a la caracterización de los biocombustibles agroforestales que se consuman en Cataluña. Los resultados de las analíticas de astilla forestal hechas desde 2019 hasta 2021 por el laboratorio representan una muestra significativa que permite definir la calidad de la producción de este biocombustible en Cataluña durante este período.

Tabla 1. Resumen de la caracterización de la astilla en Cataluña (2019-2021).

	Muestras (N)	Media ( $\mu$ )	Desviación típica ( $\sigma$ )	Coefficiente variación (C.V.)	Error estándar ( $\sigma_{\mu}$ )	Intervalo de confianza (95%)		Clase
Humedad	122	30,1	9,1	30,3%	0,8	28,5	31,7	M35
Cenizas	78	1,9%	2,6	134,9%	0,3	1,3%	2,5%	A3.0
Densidad	63	278	30,8	11,1%	3,9	270,5	286,0	BD250
Fración finos ( $\leq 3,15$ mm)	71	8,1%	0,06	71,6%	0,01	6,7%	9,4%	F10
PCI	45	3.525	629,2	17,9%	93,8	3.335,4	3.713,5	

La tabla 1 resume las características principales de las propiedades analizadas con los indicadores estadísticos calculados y la clase correspondiente según el valor promedio. Aunque se tenga que declarar el valor mínimo, el PCI sólo tiene valor informativo y no sirve para la clasificación la astilla.

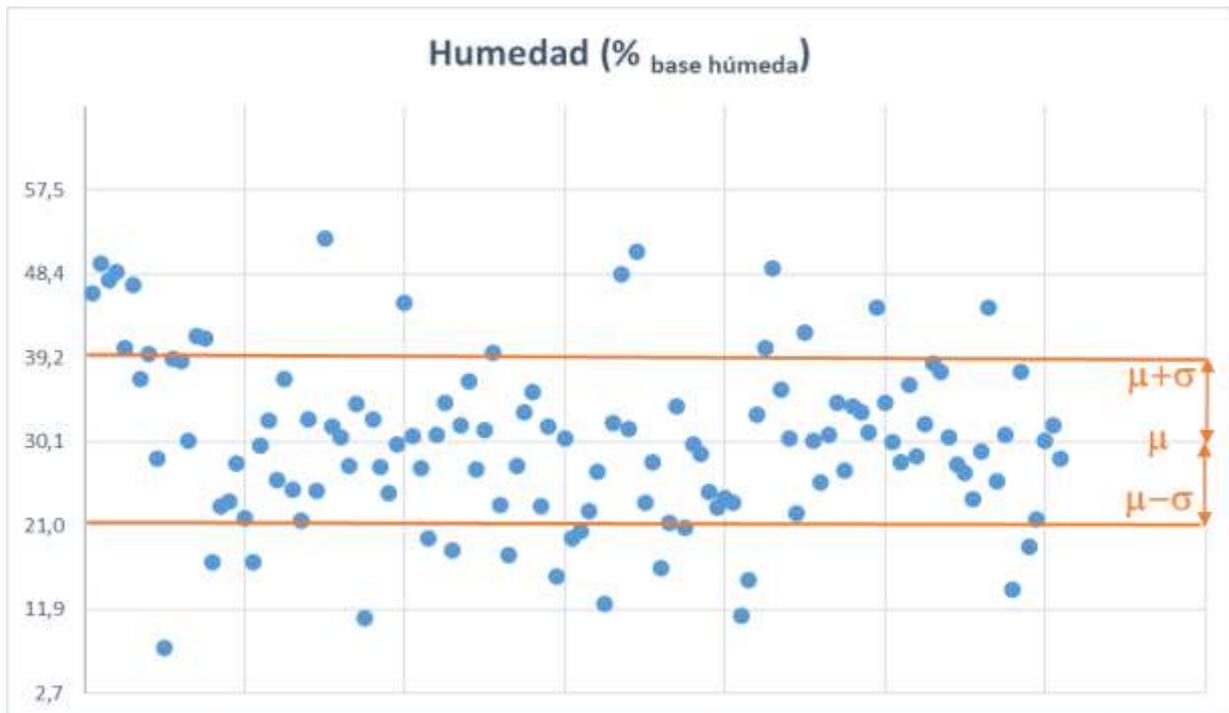


Figura 1. Humedad de las muestras de astilla (2019-2021).

En detalle, por lo que concierne a la humedad, el 70,5% de las observaciones recae en el intervalo  $\mu \pm \sigma$ , donde el valor del promedio es 30,1%, lo que corresponde a una clase M35 (Fig. 1).

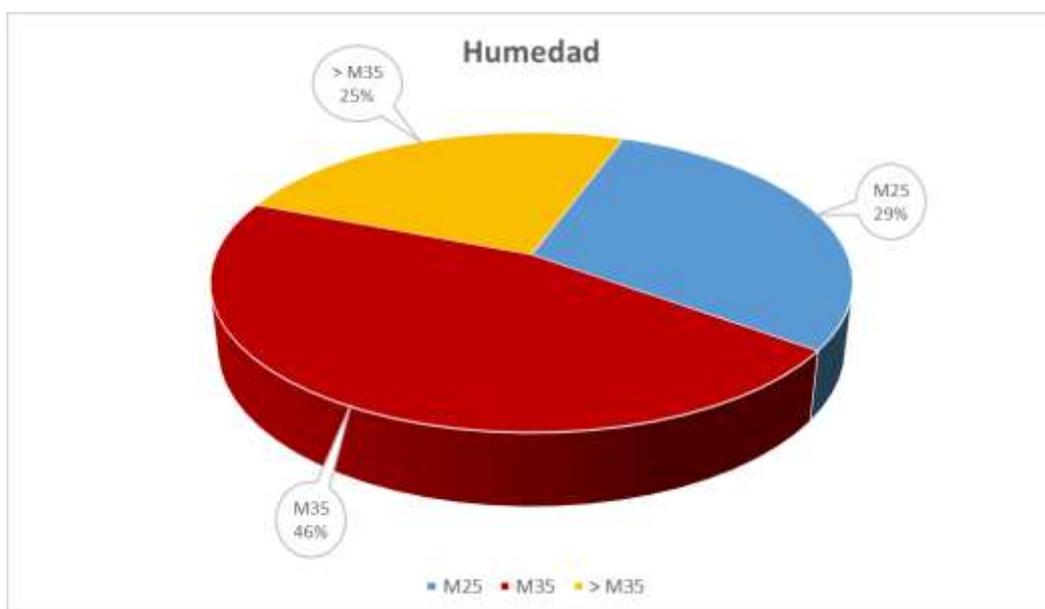


Figura 2. Clasificación de la astilla según la humedad.

Cohérentemente con lo que se aprecia en la figura 1, la mayoría de las muestras (46%) se puede clasificar como M35, el 25% como superior a este valor y el 29% como M25 (Fig. 2).

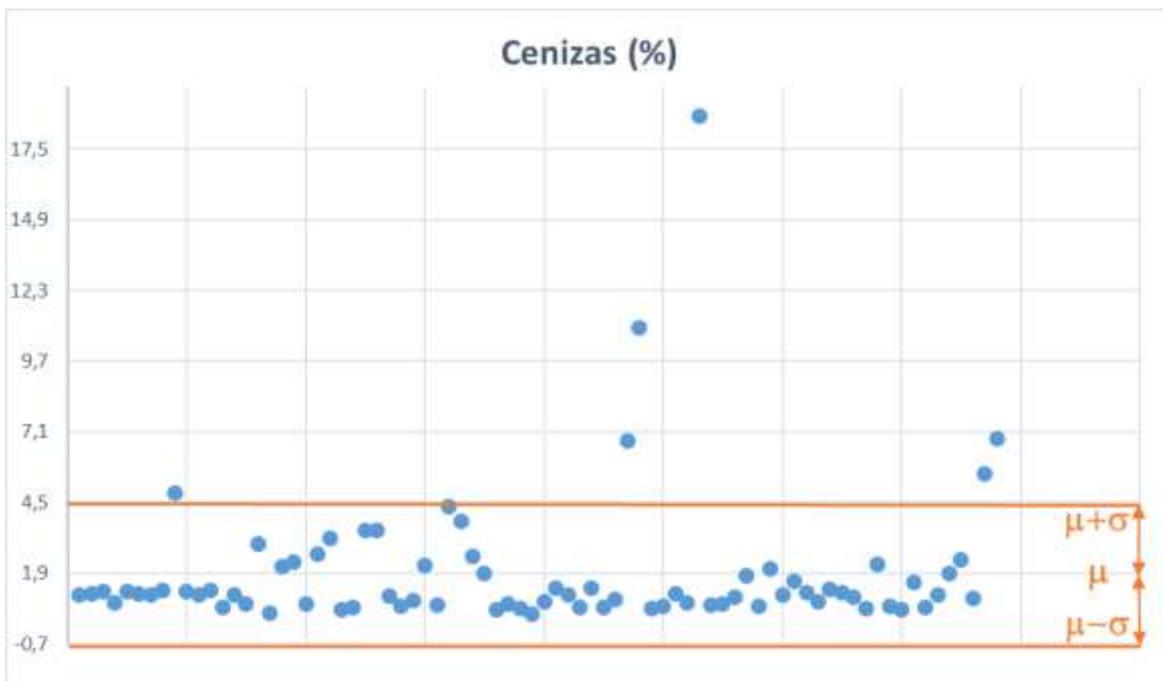


Figura 3. Contenido de cenizas de las muestras de astilla (2019-20219)

En cuanto a las cenizas, el promedio resulta poco representativo del conjunto de datos por su heterogeneidad (C.V. 134,9%). Sin embargo, el 86% de las observaciones presenta valores inferiores al 3%, lo que recaería en la clase A3.0 (Fig. 3).

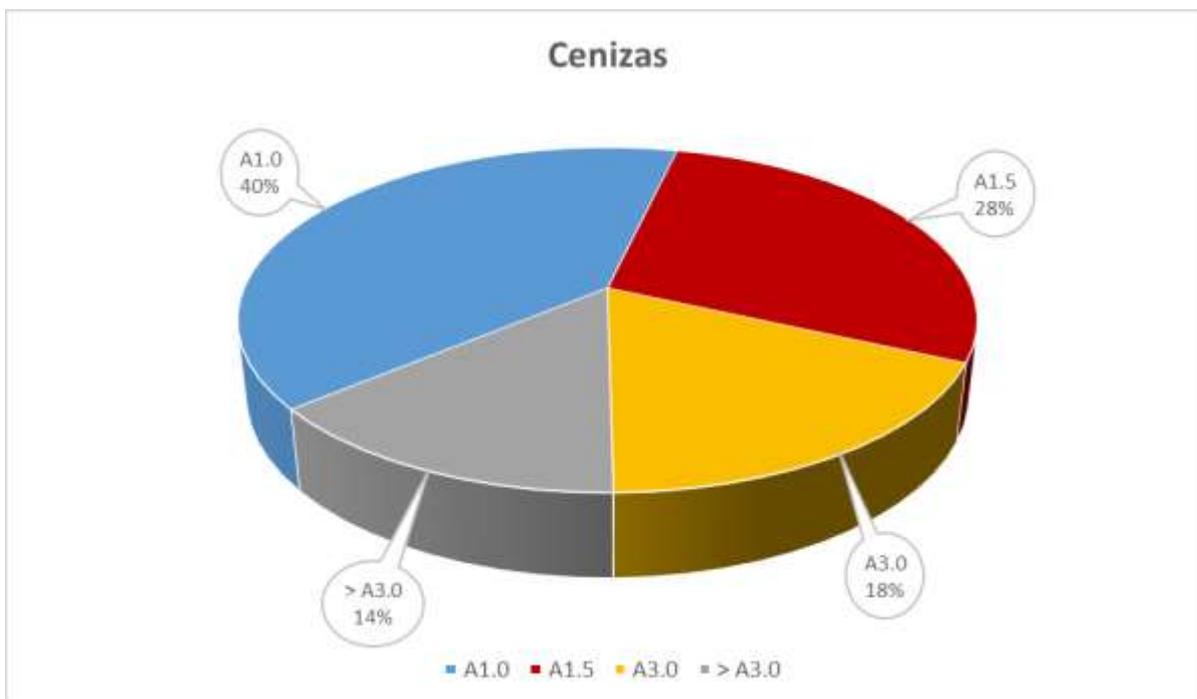


Figura 4. Clasificación de la astilla según el contenido de cenizas

El 68% de las muestras se pueden clasificar como A1.0 o A1.5, mientras que un 18% cabe en la clase A3.0. El restante 14% presenta valores superiores al 3% de cenizas (Fig. 4).

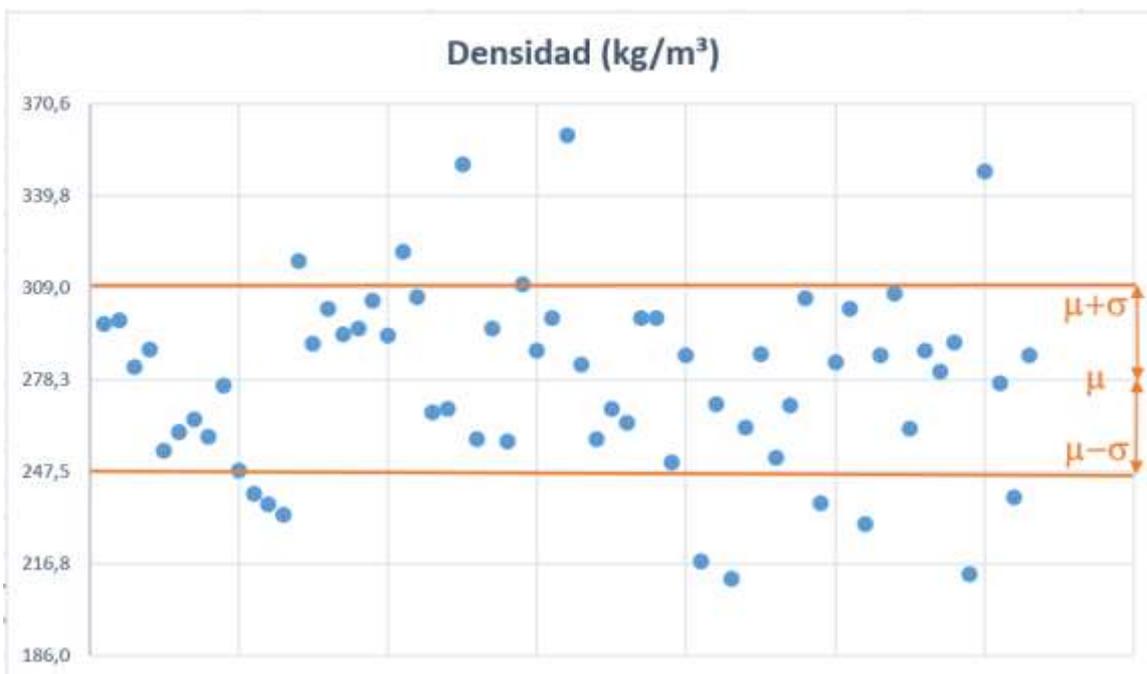


Figura 5. Densidad de las muestras de astilla (2019-2021)

Referente a la densidad, el 74,6% de las observaciones recae en el intervalo  $\mu \pm \sigma$ , con un valor promedio de 278 kg/m<sup>3</sup> (Fig. 5), es decir la clase BD250.

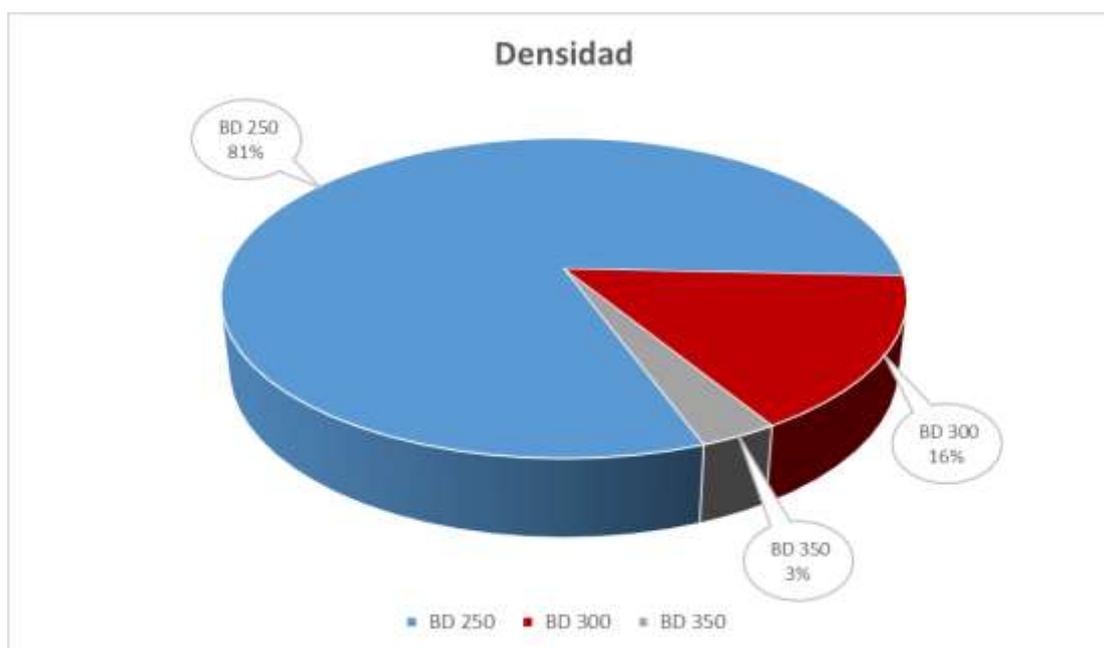


Figura 6. Clasificación de la astilla según la densidad

De hecho, el 81% de las muestras tienen una densidad menor de 300 kg/m<sup>3</sup> (aunque siempre superior a los 200 kg/m<sup>3</sup>), mientras que solo un 19% de las muestras tienen una densidad mayor (Fig. 6).

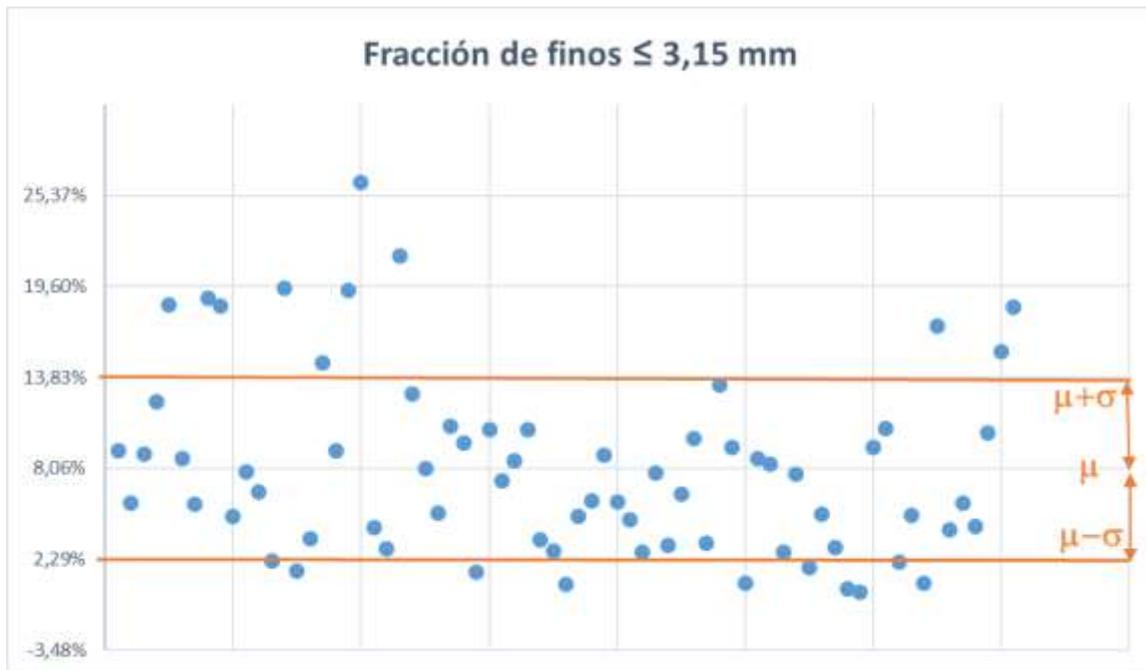


Figura 7. Contenido de la fracción de finos de las muestras de astilla.

La fracción de finos inferior a 3,15 mm resulta en la mayoría de los casos (73%) por debajo del 10% (F10), así como establecido por la normativa de la granulometría P31S y P45S, (Fig. 7), aunque el conjunto de datos destaque por su heterogeneidad (C.V. 71,6%).

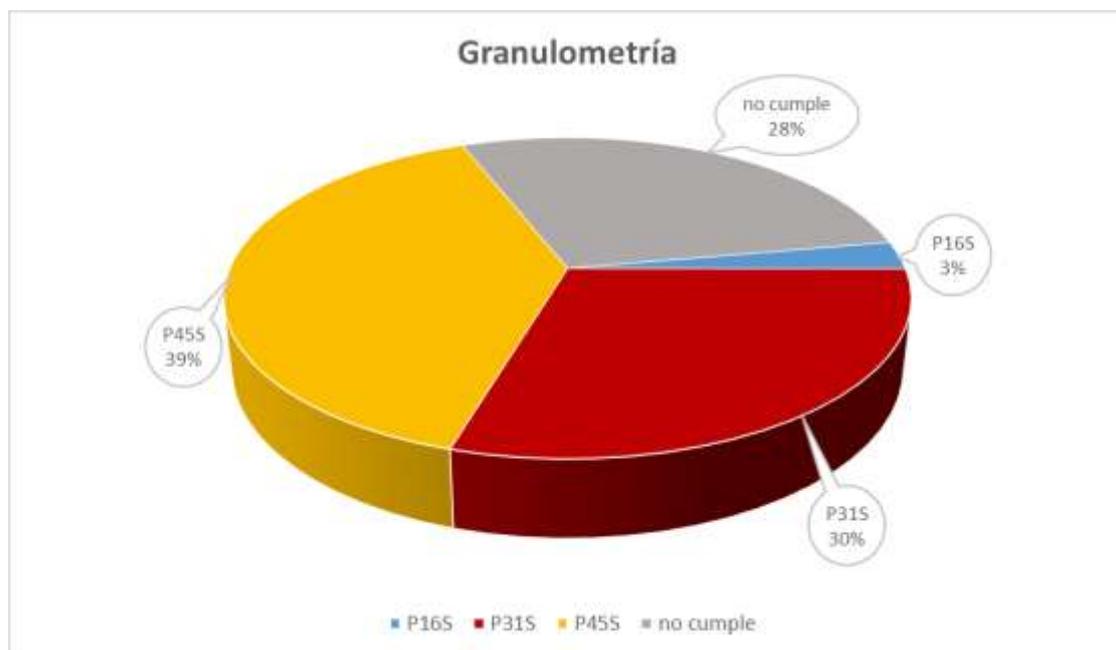


Figura 8. Granulometría de la astilla.

De hecho, analizando la granulometría de las muestras, sólo el 3% se puede clasificar como P16S y un 30% como P31S. El 39% corresponde a la clase P45S y un 28% no cumple con la normativa 17225-4 para ser empleada en edificios residenciales, comerciales pequeños y públicos (Fig. 8).

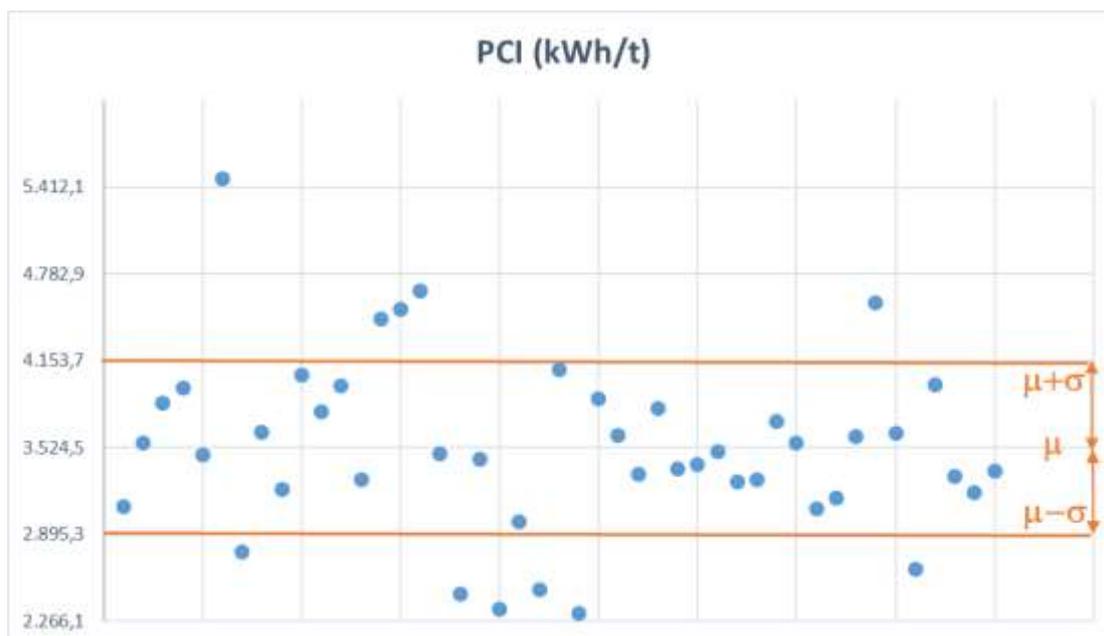


Figura 9. Poder calorífico inferior de las muestras de astilla (2019-2021).

Por último, se han elaborado los datos referentes al poder calorífico inferior (PCI). El promedio es de 3.525 kWh/t, con un 75,6% de las observaciones que recaen en el intervalo  $\mu \pm \sigma$ . Aunque, siguiendo la normativa vigente, se tenga que declarar el valor mínimo, el PCI sólo tiene valor informativo, no normativo, y no sirve para la clasificación de la astilla. De todos modos, para disponer de una referencia, se ha calculado el valor teórico correspondiente a la madera de coníferas con una humedad del 31,6%, el valor promedio obtenido de las muestras: 3.488 kWh/t.

Entre los factores que inciden en las emisiones procedentes de la combustión de biomasa, además de la tecnología del equipo, su regulación y mantenimiento, los sistemas secundarios de reducción de emisiones, se debe también tener en cuenta la calidad del biocombustible.

Aunque en la combustión completa de biomasa se forma  $\text{CO}_2$  y agua, en una combustión incompleta se pueden generar una compleja mezcla de contaminantes atmosféricos como  $\text{NO}_x$ , CO, partículas finas (incluido el *black carbon*, con efectos sobre el cambio climático). Como se ha comentado anteriormente, uno de los factores que influye en la correcta combustión es la calidad del combustible.

En el marco de la operación *Plan de biomasa km 0* del proyecto de especialización y competitividad territorial *Barcelona smart rural*, financiado por el PO FEDER de Cataluña 2014-2020 y la *Diputación de Barcelona*, se han podido contrastar los resultados obtenidos de las emisiones producidas en tres diferentes calderas de biomasa<sup>1</sup> de la provincia de Barcelona por la combustión de la astilla procedente de cinco patios logísticos diferentes.

La figura 10 recoge el conjunto de datos registrados de las características de la astilla y las emisiones asociadas a su combustión. Por cada caldera, se destaca en amarillo la mejor caracterización de la astilla y las emisiones más bajas; en rojo, los valores peores y las emisiones más altas detectadas en cada instalación.

<sup>1</sup> 1) Froling Turbomat de 500 kW instalada el año 2009. 2) Herz Firematic de 200 kW, instalada el año 2015: 3) Herzomat de 199 kW, instalada el año 2014.

Caldera	Astilla	Densidad	Granulo metría	Humedad	Fracción de finos ≤3,15	Cenizas	N	CO	SO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>	PM <sub>10</sub>	O <sub>2</sub>
	origen por productor	(kg/m <sup>3</sup> )	clase	base húmeda								
(A)	(1) fuste	268,4	45	29,8%	7,8%	0,6%	0,1%	929	0,0	257	27	15,9%
	Fröling (2) fuste	306,0		27,4%	18,4%	1,1%	0,1%	2418	0,0	349	144	17,5%
Turbomat	(3) árbol entero	283,2		27,1%	26,2%	3,2%	0,3%	536	0,0	448	62	15,9%
500 kW	(4) fuste	258,4	16	27,2%	2,2%	0,8%	0,1%	694	0,0	249	53	15,8%
2009	(5) fuste quemado	304,8	45	27,5%	8,7%	1,1%	0,1%	576	0,0	268	50	15,2%
(B)	(1) fuste	258,2	31	31,4%	4,3%	0,5%	0,7%	11	0,0	141	58	9,9%
	Herz (2) fuste	321,2		32,5%	18,9%	1,2%	0,7%	112	0,0	165	38	9,7%
Firematic	(3) árbol entero	263,8		17,8%	12,8%	3,5%	1,0%	4	0,0	200	444	7,6%
200 kW	(4) fuste	310,0		34,4%	3,6%	2,1%	0,7%	6	0,0	108	18	7,2%
2015	(5) fuste quemado	295,4		19,6%	19,5%	3,0%	0,9%	34	0,0	178	32	8,8%
(C)	(1) fuste	257,4	45	30,9%	1,5%	0,4%	0,1%	2983	18,0	195	28	14,7%
	Heizomat (2) fuste	360,0		36,7%	19,4%	2,6%	0,1%	5432	24,0	233	26	15,9%
	(3) árbol entero	268,6		23,2%	21,5%	3,5%	0,3%	838	0,0	273	596	14,3%
199 kW	(4) fuste	267,4	45	24,5%	5,0%	1,3%	0,2%	2867	117,0	126	196	11,9%
2014	(5) fuste quemado	287,8		18,3%	14,8%	2,3%	0,2%	1498	6,0	167	588	12,9%

Figura 10. Valores de la caracterización de la astilla y de las emisiones asociadas.

El monóxido de carbono (CO) se genera en la combustión de cualquier combustible con base de carbono. El CO es el elemento intermedio más importante para que, en condiciones correctas de temperatura y de aportación de oxígeno, el combustible se oxide y se convierta en CO<sub>2</sub>. Por este motivo, a menudo se utiliza su valor como indicador de la calidad de la combustión. Si las condiciones no son las adecuadas, esta oxidación no se produce y se emite CO, altamente tóxico. El control de temperatura y de aportación de aire frecuentemente es más complicado en instalaciones de pequeña potencia, como las aquí consideradas, donde no se dispone ni del espacio, ni de la tecnología para controlar estos dos factores.

El dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>) va ligado a la cantidad de azufre contenida en el combustible. Su emisión se puede dar en la fase sólida por la combustión de biomasa leñosas, aunque su contenido acostumbra a ser bastante bajo. Ya que la astilla suministrada a las tres instalaciones procede de los mismos productores, resulta más probable atribuir los valores de SO<sub>2</sub> detectados en la caldera C al funcionamiento de la propia caldera, que a la calidad del biocombustible forestal.

Las emisiones de óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>) en la combustión de biocombustibles son debidas principalmente a la oxidación del nitrógeno contenido en ellos, al contrario de lo que pasa en los combustibles fósiles, donde el N contenido en el aire también contribuye a generar emisiones de NO<sub>x</sub>. De hecho, los óxidos de nitrógeno, básicamente NO que se transforma en NO<sub>2</sub> en la atmósfera, pueden formarse a partir de tres reacciones (DI NOLA, 2007): por el nitrógeno contenido en el biocombustible; por un proceso térmico que alrededor de a los 1.300°C hace reaccionar al N con el O<sub>2</sub> para formar NO (temperatura que raramente se consigue en una cámara de combustión de calderas de biomasa); a partir del nitrógeno contenido en el aire. En el caso de la combustión de la astilla, las dos últimas reacciones son minoritarias y tienen un impacto muy bajo.

Los altos valores de NO<sub>x</sub> detectados en la caldera A y, en menor medida, C, no parece se puedan atribuir a la astilla, debido a que esta proviene de la misma fuente y, en la caldera B, no se encuentran valores tan elevados como en las otras dos. Así, parece más probable que estos valores altos dependan del control de la aportación del aire primario en la cámara de combustión, un elemento fundamental para la reducción de emisiones de NO<sub>x</sub>.

La emisión de partículas con dimensiones inferiores a 10 µm (PM<sub>10</sub>) es uno de los principales problemas de las combustiones de la biomasa forestal. La composición del biocombustible es un factor importante, pero también una combustión incompleta causa la emisión de partículas, ya que las cenizas resultantes pueden ser arrastradas hacia el exterior y ser emitidas a la atmósfera. Las

partículas resultan especialmente importantes porque en ellas se pueden adherir otros productos contaminantes.

Para asegurar que el proceso de combustión sea completo es necesario que se disponga en la correcta medida de tres elementos principales: tiempo, temperatura y turbulencia. Una mezcla incorrecta entre aire y combustible, así como ausencia de temperatura y defecto o exceso de tiempo de residencia, representan un problema para la calidad de la combustión.

Como se aprecia en la Fig. 10, la caldera C, a paridad de astilla utilizada, presenta los valores peores de CO, SO<sub>2</sub> y PM<sub>10</sub>. Efectivamente, la caldera C no dispone de parrilla móvil ni intercambiadores verticales, lo que hace disminuir sus rendimientos y puede causar problemas de combustión al cambiar el tipo de astilla, ya que la ausencia de este sistema dificulta quemar astilla con tipologías diferentes de granulometría y humedad.

## 5. Discusión

Los resultados de las muestras de astilla para uso en edificios residenciales, comerciales pequeños y públicos analizadas desde 2019 hasta 2021 por el laboratorio de biocombustibles agroforestales del *Centro de Ciencia y Tecnología Forestal de Cataluña* (Tab. 1) ofrecen resultados dispares respecto a los parámetros que caracterizan la astilla forestal producida en Cataluña. La mejor nota es para la humedad que permitiría recaer en la clase A2, mientras el contenido de cenizas haría que se bajara hasta la clase B. La mayoría de las granulometrías corresponden a la clase P45S, o bien no cumplen con los mínimos exigidos. En cambio, el porcentaje de la fracción de finos inferior a 3,15 mm queda, como establecido por la normativa del P31S y P45S, por debajo del 10% en el 73% de los casos.

Para la atribución de la clase correspondiente a la calidad de la astilla, cabe tener en cuenta todos los parámetros normativos exigidos (humedad, cenizas y densidad).



Figura 11. Clasificación de las muestras de astilla según la norma UNE-EN ISO 17225-4 (2019-2021).

La mayoría de la astilla analizada corresponde a la clase A2 (51%); sólo el 16% se puede clasificar como A1. El 27% de las muestras de las que se analizaron todas las propiedades

requeridas, recae en la clase B y un 6% no cumple los estándares exigidos por la normativa vigente (Fig. 11).

En cuanto a las posibles relaciones entre la calidad de la astilla y las emisiones asociadas a su combustión, por cada una de las tres instalaciones considerada, se ha calculado por separado la correlación estadística de cada variable, de modo que las diferencias tecnológicas y de gestión existentes entre las distintas calderas no influyan en la comparación de las diferentes calidades de astilla procedente de cinco patios logísticos.

A pesar de que la correlación no incluye el concepto de causa y efecto, sino sólo el de la relación entre variables, sí que nos permite afirmar que entre dos variables hay una relación sistemática, aunque no se pueda afirmar que una sea la causa de la otra. El sentido de la correlación mide la variación de los valores de B con respecto a A: la relación es directa (positiva), si al crecer los valores de A lo hacen los de B; la relación es inversa (negativa), si al crecer los valores de A disminuyen los de B.

Las emisiones consideradas en este análisis estadístico son el monóxido de carbono (CO), los óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>), el material particulado (PM<sub>10</sub>) y el dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>). Por otro lado, con referencia a la calidad de la astilla, han sido consideradas la humedad, la fracción de finos ≤3,15mm, las cenizas y el contenido de nitrógeno como variables influyentes para determinar una eventual correlación con las emisiones asociadas a la combustión del biocombustible.

Tabla 2. Correlación entre variables de la combustión en la caldera A

Correlación	Humedad	Finos	Cenizas	Nitrógeno
CO	-0,030	0,234	-0,267	-0,350
SO <sub>2</sub>				
NO <sub>x</sub>	-0,451	<b>0,974</b>	<b>0,924</b>	<b>0,882</b>
PM <sub>10</sub>	-0,473	0,456	0,071	-0,065

En la caldera A, la correlación (Tab. 2) evidencia su fuerza sólo en el caso de la emisión de NO<sub>x</sub> con la fracción de finos ≤3,15mm, las cenizas y el contenido de nitrógeno de la astilla.

Tabla 3. Correlación entre variables de la combustión en la caldera B

Correlación	Humedad	Finos	Cenizas	Nitrógeno
CO	0,281	<b>0,665</b>	-0,335	-0,338
SO <sub>2</sub>				
NO <sub>x</sub>	<b>-0,852</b>	<b>0,723</b>	0,558	<b>0,820</b>
PM <sub>10</sub>	<b>-0,668</b>	0,064	0,604	<b>0,779</b>

En la caldera B, se evidencia una correlación bastante fuerte (Tab. 3) entre las emisiones de CO y la fracción de finos ≤3,15mm; entre óxidos de nitrógeno y la humedad, la fracción de finos ≤3,15mm y el contenido de nitrógeno de la astilla; entre el material particulado la humedad y el nitrógeno del biocombustible.

Tabla 4. Correlación entre variables de la combustión en la caldera C

Correlación	Humedad	Finos	Cenizas	Nitrógeno
CO	<b>0,885</b>	-0,082	-0,246	<b>-0,821</b>
SO <sub>2</sub>	0,004	-0,525	-0,426	-0,056
NO <sub>x</sub>	0,301	<b>0,707</b>	<b>0,656</b>	0,230
PM <sub>10</sub>	<b>-0,865</b>	0,515	0,636	<b>0,863</b>

Por último, en la caldera C, hay una fuerte correlación (Tab. 4) entre las emisiones de CO, humedad y nitrógeno; entre los NO<sub>x</sub>, la fracción de finos ≤3,15mm y las cenizas; entre el material particulado, la humedad y el nitrógeno de la astilla; ninguna, como era esperable, por lo que se refiere al dióxido de azufre.

Dados los resultados obtenidos, se ha querido también ir un paso más allá y comprobar qué valor asumen las emisiones en función de aquellas características de la astilla que presentan las correlaciones más fuertes.

Ahora, por tanto, no nos centramos en la fuerza de la asociación entre las dos variables, sino en la estimación de una variable siendo conocidas las otras, lo que –obviamente– será más o menos precisa en función de la fuerza de su correlación.

De todas las correlaciones evidenciadas, sólo cinco han permitido calcular un modelo linear con buenas regresiones. En la siguiente tabla (Tab. 5) se resumen los indicadores estadísticos de cada modelo: coeficiente de determinación ( $R^2$ ); error estándar (Se); *F Snedecor*.

Tabla 5. Indicadores estadísticos de los modelos lineares realizados

Caldera A		$R^2$	Se	F Snedecor
CO	Ninguna relación significativa	-	-	-
NO <sub>x</sub>	<b>Finos + cenizas</b>	<b>98,2%</b>	<b>15,9</b>	<b>55,78</b>
PM <sub>10</sub>	Ninguna relación significativa	-	-	-
Caldera B		$R^2$	Se	F Snedecor
CO	Ninguna relación significativa	-	-	-
NO <sub>x</sub>	<b>Finos + nitrógeno</b>	<b>84,5%</b>	<b>19,7</b>	<b>5,46</b>
PM <sub>10</sub>	<b>Humedad + nitrógeno</b>	<b>79,6%</b>	<b>116,7</b>	<b>3,91</b>
Caldera C		$R^2$	Se	F Snedecor
CO	<b>Humedad + nitrógeno</b>	<b>84,5%</b>	<b>984,8</b>	<b>5,44</b>
NO <sub>x</sub>	Ninguna relación significativa	-	-	-
PM <sub>10</sub>	<b>Humedad + nitrógeno</b>	<b>85,8%</b>	<b>152,8</b>	<b>6,06</b>

Los modelos con los mejores indicadores estadísticos son los siguientes:

- Caldera A: NO<sub>x</sub> (mg/m<sup>3</sup>) = 199,8 + 600,124 finos (%) + 2.827,95 cenizas (%)
- Caldera B: NO<sub>x</sub> (mg/m<sup>3</sup>) = 8,072 + 212,094 finos (%) + 15.664,265 nitrógeno (%)
- Caldera B: PM<sub>10</sub> (mg/m<sup>3</sup>) = -4.019,386 + 4.747,999 humedad (%) + 356.132,994 nitrógeno (%)
- Caldera C: CO (mg/m<sup>3</sup>) = 91,577 + 15.096,152 humedad (%) - 778.202,014 nitrógeno (%)
- Caldera C: PM<sub>10</sub> (mg/m<sup>3</sup>) = 517,956 - 2.004,983 humedad (%) + 169.141,839 nitrógeno (%)

Por supuesto, debido a las limitaciones de las observaciones, ninguno de estos modelos resulta estadísticamente significativo de acuerdo con el test *F-Snedecor* con un nivel de significancia del 1%, ni los coeficientes resultan estadísticamente significativos de acuerdo con el test *t-Student* con un nivel de significancia del 5%. Por lo tanto, más que en los valores de los parámetros obtenidos por los modelos, nos centramos en la coherencia lógica de sus coeficientes.

Las emisiones de NO<sub>x</sub> crecen cuanto más alto sea el contenido de N del combustible (SKREIBERG et al., 1997) y así se confirma por la relación positiva del parámetro N en el modelo de los NO<sub>x</sub> de la caldera B, como por los coeficientes positivos de correlación entre estas dos variables en todas las calderas. En los biocombustibles de origen forestal, la mayor parte de derivados del cloro y del azufre se encuentran en las partículas de las emisiones y de las cenizas, a diferencia de los biocombustibles de origen vegetal, como los cereales, donde se encuentran en el humo en forma de HCl y SO<sub>2</sub>.

De hecho, los datos de la figura 10 evidencian que la astilla con los valores más altos de cenizas, nitrógeno y  $\text{NO}_x$  corresponden siempre a la astilla 3, la única cuya materia prima no era el fuste, sino el árbol entero. La relación positiva entre emisiones de  $\text{NO}_x$  y las cenizas en el modelo de la caldera A es coherente con los coeficientes positivos de correlación entre estas dos variables en todas las calderas.

Por lo que se refiere a la fracción de finos  $\leq 3,15\text{mm}$ , la incidencia directa sobre las emisiones de  $\text{NO}_x$  tiene también su validación en el hecho que la astilla 4, que presenta siempre de los valores más bajos de este gas, es la única astilla cribada a la cual le corresponden de los valores más bajos de la fracción de finos  $\leq 3,15\text{mm}$ .

El contenido de nitrógeno muestra también una relación positiva de las  $\text{PM}_{10}$  en los modelos, así como en los coeficientes de correlación.

Merece una reflexión la correlación inversa entre humedad y material particulado, ya que al crecer la humedad de la astilla se asocia una disminución de las  $\text{PM}_{10}$ , hecho que puede explicarse en parte por quemar un combustible menos seco. En cambio, los signos de los parámetros de los modelos de la caldera B y C resultan contrastantes: el modelo de la caldera C muestra una relación inversa, a menor humedad mayor  $\text{PM}_{10}$ , al contrario de la relación directa del modelo de la caldera B.

Por último, vemos una correlación inversa entre el contenido de nitrógeno de la astilla y las emisiones de CO y una positiva respecto a la humedad. Ambas observaciones son confirmadas por los signos de los coeficientes del modelo del CO en la caldera C. Esto podría ser debido a un desajuste en el control de temperatura y aportación de aire, hecho que puede ocasionar una combustión incompleta, empeorada aún más por una astilla húmeda. Los datos evidencian también que en el caso de la astilla 3, procedente de árboles enteros, los valores más altos de nitrógeno y de emisiones en  $\text{NO}_x$  coinciden siempre con los valores más bajos de CO, lo que sugiere que pueda haber una interacción inversa entre ambas reacciones químicas.

## 6. Conclusiones

La caracterización de las muestras de astilla para uso en edificios residenciales, comerciales pequeños y públicos producida en Cataluña entre 2019 y 2021 y analizadas por el laboratorio de biocombustibles agroforestales del CTFC revalida la importancia de cumplir con la norma de etiquetaje obligatorio (RD 818/2018) que favorece la transparencia y la mejora de la calidad mínima exigida para el consumo de astilla de uso no industrial. Es bien sabido que la producción de astilla de madera, en general, presenta una gran variabilidad en sus características, hecho corroborado por los datos aquí presentados.

Disponer de estándar de calidad certificados por terceras partes resulta fundamental para caracterizar la astilla y definir en términos contractuales lo que se vende y lo que se compra.

Los controles periódicos en los patios de los usuarios también deben formar parte del seguimiento constante de la calidad, para reducir la variabilidad y favorecer una regularidad constante del producto suministrado según los parámetros concordados entre vendedor y comprador.

Aunque la mejor tecnología disponible permita disponer de calderas de biomasa leñosa, definidas como *NZEB* – *Nearly Zero Emission Boilers*, con elevados rendimientos y niveles de emisiones muy bajos con impacto mínimo en la calidad del aire, las características de los biocombustibles pueden seguir influyendo en la eficiencia de la combustión y en las emisiones a la atmósfera.

El estudio aquí presentado y llevado a cabo en tres instalaciones alimentadas por astilla, aunque parcial y limitados por el número de datos utilizados, ofrece elementos de reflexión que nos empujan a seguir en la investigación sobre los efectos que conlleva la mejora de la calidad de la astilla forestal en la reducción de las emisiones a la atmósfera.

## 7. Bibliografía

CAMIA A., GIUNTOLI J., JONSSON R., ROBERT N., CAZZANIGA N.E., JASINEVICIUS G., AVITABLE V., GRASSI G., BARREDO J.I., MUBAREKA S.; 2021. The use of woody biomass for energy production in the EU. Publications Office of the European Union, Luxembourg,

DI NOLA, G.; 2007. Biomass fuel characterization for NO<sub>x</sub> emissions in cofiring applications. Delft University of Technology.

DUCA, D.; RIVA, G.; FOPPA PEDRETTI, E.; TOSCANO, G.; 2014. Wood pellet quality with respect to EN 14961-2 standard and certifications. *Fuel* 135:9-14.

DUCA, D.; TOSCANO, G.; PIZZI, A.; ROSSINI, G.; FABRIZI, S.; LUCESOLI, G.; 2016. Evaluation of the characteristics of vineyard pruning residues for energy applications: effect of different copper-based treatments. *Journal of Agriculture Engineering* 47.

MANCINI, M.; TOSCANO, G.; FELICIANGELI, G.; LEONI, E.; DUCA, D.; 2020. Investigation on woodchip quality with respect to ISO standards and relationship among quality parameters. *Fuel* 279.

REIAL DECRETO 818/2018 sobre medidas para la reducción de las emisiones nacionales de determinados contaminantes atmosféricos. Disposición adicional primera.

SACCARDI R; 2020. Switch4Air, 4 impegni per migliorare la qualità dell'aria in Europa. *Agriforenergy* 2: 33- 35.

SKREIBERG, O.; HUSTAD, J.E.; KARLSVIK, E.; 1997. Empirical NO<sub>x</sub> modelling and experimental results from wood-stove combustion. En: BRIDGEWATER, A. V.; BOOCOOCK, D. G. B: Developments in thermochemical biomass conversion: v.2. Blackie Academic & Professional. New York.

TOSCANO, G.; DUCA, D.; FOPPA PEDRETTI, E.; PIZZI, A.; ROSSINI, G.; MENGARELLI, C.; MANCINI, M.; 2016. Investigation of woodchip quality: Relationship between the most important chemical and physical parameters. *Energy* 106. 38-44.