

Universitat Jaume I

INGRES Ingeniería de Residuos
(Dpto. de Ingeniería Mecánica y Construcción)

MEMORIA TÉCNICA

*El CSR producido a partir de rechazos de la
planta de tratamiento mecánico-biológica
de Onda.*

Comparación con otros CSR comerciales.



Dr. D. ANTONIO GALLARDO IZQUIERDO
INGRES Ingeniería de Residuos
Universitat Jaume I

Castelló de la Plana, a 15 de diciembre de 2019



INGRES INGENIERÍA DE RESIDUOS
Tel:964728187 Fax:964728106
www.ingres.uji.es



Realización del trabajo:

Grupo INGRES:

Antonio Gallardo Izquierdo

Natalia Edo Alcón

Andrea Jorge Ortiz

Sara Romero Sales



INGRES INGENIERÍA DE RESIDUOS
Tel:964728187 Fax:964728106
www.ingres.uji.es



**UNIVERSITAT
JAUME I**

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	6
2. OBJETIVOS	7
3. MARCO LEGAL DEL CSR Y SU SITUACIÓN EN OTROS PAÍSES EUROPEOS ...	7
4. CSR COMERCIALES.....	15
5. DESCLASIFICACIÓN DEL CSR COMO RESIDUO.....	17
6. CARACTERIZACIÓN FÍSICA DEL RECHAZO DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE ONDA.....	19
7. CARACTERIZACIÓN QUÍMICA DEL CSR DE ONDA.....	24
8. CARACTERIZACIÓN QUÍMICA DE CSR COMERCIALES	25
9. COMPARACIÓN DEL CSR DE ONDA, COMERCIALES LOS ESTÁNDARES DE CALIDAD.....	26
10. CONCLUSIONES	28
11. REFERENCIAS.....	29



INGRES INGENIERÍA DE RESIDUOS
Tel:964728187 Fax:964728106
www.ingres.uji.es



**UNIVERSITAT
JAUME I**

1. INTRODUCCIÓN

La normativa europea define los combustibles sólidos recuperados (CSR) como aquellos combustibles sólidos producidos a partir de residuos no peligrosos, destinados a ser utilizados para la recuperación energética en plantas de incineración o co-incineración y que cumple con los requisitos de clasificación y las especificaciones establecidas en la norma UNE-EN 15359 (2012). Por otro lado, aquellos combustibles que no cumplan con estándares fijados por dicha norma serán considerados como Combustibles Derivados de Residuos (CDR) y no como CSR.

Los CSR están compuestos principalmente por papel/cartón y plásticos, siendo estos materiales los responsables de sus elevados poderes caloríficos (Nasrullah et al., 2017). Además, los residuos no peligrosos pueden provenir de múltiples fuentes como: RSU, rechazos del tratamiento de RSU, residuos comerciales, residuos industriales, residuos voluminosos o residuos de construcción y demolición (Garcés et al., 2016; UNE-EN 15359, 2012). Para su fabricación es necesario la eliminación del material no combustible o no deseado (por ejemplo, PVC), la trituración, el secado y, en algunos casos, su pelletización (Nasrullah et al., 2015a; Pressley et al., 2014).

A nivel europeo, el tratamiento mecánico-biológico (TMB) de los residuos sólidos urbanos (RSU) es una opción cada vez más utilizada para la producción de CSR (Rada and Andreottola, 2012; Ragazzi and Rada, 2012), puesto que los rechazos de estas instalaciones tienen un elevado poder calorífico y pueden ser transformados en un CSR tras su procesado (Rotter et al., 2011)(Figura 1).



Figura 1 CSR producido a partir de rechazo del TMB

Por otra parte, los CSR son una alternativa viable a los combustibles fósiles convencionales y puede reemplazarlos parcialmente en industrias productoras de calor y

electricidad (Nasrullah et al., 2017). En este sentido, los CSR son usados principalmente en plantas de producción de energía y hornos de cemento (co-combustión), así como en plantas incineradoras (mono-combustión) (Flamme and Geiping, 2012; Iacovidou et al., 2018; Rotter et al., 2011).

El uso de CSR en plantas de producción de energía tiene dos ventajas principales desde el punto de vista medioambiental. Por un lado, reduce las emisiones de CO₂ debido a que los CSR poseen el carbono de origen biogénico del flujo de residuos inicial y cuyas emisiones se consideran neutras (Nasrullah, 2015; Séverin et al., 2010). Por otro, reduce las emisiones de otros tipos de contaminantes por su bajo contenido en nitrógeno y azufre (Gallardo et al., 2014; Sami et al., 2001; Velis et al., 2010). Además, el coste de abastecimiento de estos combustibles es menor al asociado a otros combustibles fósiles, por lo que son más asequibles (Iacovidou et al., 2018; Sami et al., 2001). Sin embargo, también tiene algunos inconvenientes como: la mayor producción de cenizas y escorias en las calderas (Jappe Frandsen, 2005), o su mayor contenido en cloro que puede afectar a las cenizas volantes y, por lo tanto, al uso de las mismas para la producción de cemento (Brás et al., 2017). Asimismo, el elevado contenido en cloro también es responsable de los mayores costes operativos y de mantenimiento requeridos para mitigar los efectos de la corrosión en los equipos (Iacovidou et al., 2018).

2. OBJETIVOS

El objetivo del trabajo ha sido determinar el marco legal en los países europeos del CSR producido a partir de rechazos generados en la planta de tratamiento mecánico-biológica (PTMB) y comparar el CSR que se puede producir en la Planta de Onda con otros combustibles alternativos puestos en el mercado.

El plan de trabajo que se ha seguido en el estudio de investigación es el siguiente:

- Estudio del marco legal del CSR y su situación en otros países europeos.
- Determinación de la existencia CSR desclasificado como residuos.
- Caracterización física del rechazo.
- Caracterización química del rechazo.
- Comparación con otros CSR comerciales.

3. MARCO LEGAL DEL CSR Y SU SITUACIÓN EN OTROS PAÍSES EUROPEOS

En la Lista Europea de Residuos (LER), los CSR reciben el código 19 12 10: Residuos combustibles (combustible derivado de desperdicios) (Comisión Europea, 2014). Por lo tanto, la legislación aplicable a los CSR tanto en la Unión Europea como en España es la misma que se aplica a los residuos:

- Directiva 2008/98/CE de 19 de noviembre, sobre los residuos (Parlamento Europeo y Consejo de la Unión Europea, 2008).
- Directiva 2010/75/UE, de 24 de noviembre, sobre las emisiones industriales (Parlamento Europeo y Consejo de la Unión Europea, 2010).
- Ley 22/2011, de 28 de julio, de residuos y suelos contaminados (España, 2011).
- Real Decreto Legislativo 1/2016, de 16 de diciembre, por el que se aprueba el texto refundido de la ley de prevención y control integrados de la contaminación (España, 2016).
- Real Decreto 815/2013, de 18 de octubre, por el que se aprueba el Reglamento de emisiones industriales y de desarrollo de la Ley 16/2002 (España, 2013a).

Derivado de esta legislación, destacan los siguientes aspectos:

- Los CSR en ningún caso pierden su condición de residuo. Por lo tanto, los titulares de actividades en cuyo proceso se utilicen estos combustibles tienen que adquirir la condición de gestores de residuos y sus obligaciones, por lo que están sometidos a la autorización por parte de la Administración con competencia en Medioambiente de la CC.AA. correspondiente.
- Su utilización como combustible alternativo está sometido al Reglamento de emisiones industriales, donde se establecen unos valores límites de emisión específicos para las instalaciones de incineración y co-incineración de residuos.
- Cuando la instalación de incineración o co-incineración este afectada a la normativa de prevención y control integrados de la contaminación, su régimen de explotación queda sometido a la Autorización Ambiental Integrada. En ella se determina las características de los materiales a incinerar o co-incinerar y los límites de emisión. Estos se fijan teniendo en cuenta las Mejores Tecnologías Disponibles para el sector de actividad, las características técnicas de la instalación y el ámbito geográfico en el que se ubica.

Finalmente, el traslado de CSR está regulado en la UE por el Reglamento CE 1013/2006 del Parlamento Europeo y del Consejo de 14 de junio de 2006 relativo a los traslados de residuos (Parlamento Europeo y Consejo de la Unión Europea, 2006); y en España por

Real Decreto 180/2015, de 13 de marzo, por el que se regula el traslado de residuos en el interior del territorio del Estado (España, 2015b).

En cuanto al control de la calidad de los CSR, en Europa están sujetos a unos parámetros específicos de calidad y deben cumplir una serie de estándares que aseguren la protección del medio ambiente, de los equipos utilizados para su recuperación energética y la calidad del producto final, si existe.

El Comité Técnico CEN/TC 343 “Solid Recovered Fuels” ha definido los parámetros que son importantes para la calidad de los CSR y ha establecido un sistema para la clasificación de su calidad, el cual se recoge en la norma UNE-EN 15359 (2012): “Combustibles sólidos recuperados: especificaciones y clases”. El sistema propuesto está basado en los valores límite de tres parámetros que dan una idea inmediata, pero simplificada, de cómo es el combustible en cuestión:

- El poder calorífico inferior (PCI) como parámetro económico, puesto que describe la cantidad de calor o energía generada en su combustión.
- El contenido en cloro como parámetro técnico, dado que es una medida de los efectos potenciales de corrosión, escorificación y ensuciamiento en las calderas. Además, en el caso de las cementeras, un contenido elevado en cloro también afecta a la calidad del cemento obtenido. Este parámetro es uno de los factores más limitantes respecto a la comerciabilidad de los CSR (Rotter et al., 2011).
- El contenido en mercurio como parámetro medioambiental, puesto que es una medida de la toxicidad liberada al medio ambiente como consecuencia de la combustión del material. De entre todos los metales pesados, se elige el mercurio como parámetro medioambiental debido a sus impactos en la salud humana a medio y largo plazo; así como por su alta volatilidad, lo que hace que sea más difícil de capturar por los sistemas de control y depuración de los gases de combustión (Iacovidou et al., 2018).

Cada uno de estos tres parámetros se divide en cinco clases con sus correspondientes valores límite (Tabla 3.1) y se le asigna un número del uno al cinco en función del valor obtenido para el mismo. La clase 1 hace referencia a las especificaciones más deseables para un CSR y a medida que el número de clase aumenta la calidad del CSR va disminuyendo. La combinación de los números obtenidos para cada parámetro constituye

el código clase del CSR, teóricamente existen 125 combinaciones de códigos clase (Del Zotto et al., 2015; Di Lonardo et al., 2016).

Tabla 3.1 Estándares de calidad del CSR en Europa (UNE-EN 15359, 2012)

Parámetro de clasificación	Medida estadística	Unidad	Clases				
			1	2	3	4	5
PCI	Media	MJ/kg (ar)	≥ 25	≥ 20	≥ 15	≥ 10	≥ 3
CI	Media	% (d)	≤ 0,2	≤ 0,6	≤ 1,0	≤ 1,5	≤ 3
Hg	Mediana	mg/MJ (ar)	≤ 0,02	≤ 0,03	≤ 0,08	≤ 0,15	≤ 0,50
	Percentil 80	mg/MJ (ar)	≤ 0,04	≤ 0,06	≤ 0,16	≤ 0,30	≤ 1,00

En el caso del Hg, el mayor de los dos valores estadísticos es el que determina el número de clase

ar: según se recibe

d: en base seca

Adicionalmente, algunos países como Alemania, Italia, Finlandia, Austria, Francia o Suiza han definido sus propios estándares de calidad para los CSR (Flamme and Geiping, 2012; Gallardo et al., 2014). Además, estos estándares pueden variar en función del tipo de instalación (hornos de cemento, centrales eléctricas o instalaciones de co-incineración), puesto que en función del proceso de recuperación energética la calidad requerida para el CSR será diferente (Sarc and Lorber, 2013)

Las normas para cada uno de estos países son:

- Alemania: RAL-GZ 724 (2008) Quality and test instructions Solid Recovered Fuels (BGS (Ed.), 2008).
- Austria: BMLFUW (2008) Richtlinie für Ersatzbrennstoffe [Guideline for Waste Fuels] y BMLFUW (2010) Verordnung über die Verbrennung von Abfällen Abfallverbrennungsverordnung – AVV [Waste Incineration Directive].
- Finlandia: SFS 5875 (2000) Solid Recovered Fuel - Quality Control System
- Italia: UNI 9903 (2004) Non mineral refuse derived fuels RDF.
- Francia: Arrêté du 23/05/16 relatif à la préparation des combustibles solides de récupération en vue de leur utilisation dans des installations relevant de la rubrique 2971 de la nomenclature des installations classées pour la protection de l'environnement (Republique Française, 2016).
- Suiza: BUWAL (2005) Richtlinie zur Entsorgung von Abfällen in Zementwerken [Guideline for the disposal of waste in cement plants].

En las siguientes tablas (Tabla 3.2 a Tabla 3.7) se presentan los valores límites definidos por las diferentes normas. Cabe señalar que las normas de Finlandia y Italia han sido remplazadas por la norma del CEN (Flamme and Geiping, 2012).

En el caso de Alemania, además de los valores límites expuestos en la Tabla 3.2 para metales pesados, existen una serie de parámetros que también deben tenerse en cuenta a la hora de determinar la calidad de un CSR: humedad, PCI, cenizas y contenido en cloro. Para estos parámetros el valor límite depende del uso que vaya a dársele al CSR y del acuerdo al que se llegue con el consumidor (Flamme and Geiping, 2012; Rotter et al., 2011)

Tabla 3.2 Estándares de calidad para el CSR en Alemania (BGS (Ed.), 2008)

Contenido en metales pesados ³⁾	Media (ppm)		Percentil 80 (ppm)	
Cd	4		9	
Hg	0,6		1,2	
Tl	1		2	
As	5		13	
Co	6		12	
Ni	25 ¹⁾	80 ²⁾	50 ¹⁾	160 ²⁾
Se	3		5	
Te	3		5	
Sb	25		60	
Pb	70 ¹⁾	190 ²⁾	200 ¹⁾	500 ²⁾
Cr	40 ¹⁾	125 ²⁾	120 ¹⁾	250 ²⁾
Cu	120 ¹⁾	350 ²⁾	500 ¹⁾	1000 ²⁾
Mn	50 ¹⁾	250 ²⁾	100 ¹⁾	500 ²⁾
V	10		25	
Sn	30		70	
Be	0,5		2	

¹⁾ Para CSR procedentes de residuos específicos.

²⁾ Para CSR procedentes de las fracciones de elevado poder calorífico de los residuos municipales.

³⁾ Los contenidos de metales pesados que se mencionan son válidos hasta un poder calorífico de ≥ 16 MJ/kg para las fracciones de elevado poder calorífico de los residuos municipales y hasta un poder calorífico de ≥ 20 MJ/kg para los procedentes de residuos específicos. Para poderes caloríficos que no estén dentro de este límite,

Contenido en metales pesados ³⁾	Media (ppm)	Percentil 80 (ppm)
--	-------------	--------------------

deben reducirse consecuentemente los valores mencionados, puesto que no se permite un aumento.

Tabla 3.3 Estándares de calidad para le CSR en Austria (Flamme and Geiping, 2012; Lorber et al., 2012)

Parámetro	Co-incineración de residuos					Co-incineración en hornos de cemento	
	Central térmica	Calcinador	Caldera de parrilla	Caldera de lecho fluidizado	Alto horno	Pre-calcinador	Quemador primario del horno
PCI (MJ/kg)	11 - 15	11 - 18	11 - 16	11 - 16	> 25	14 - 16	20 - 25
Tamaño partícula (mm)	< 50	< 50 - 80	< 300	< 20-100	< 10	< 120	< 10 - 30
Impurezas (%)	< 1	0	< 3	< 1 - 2	0	-	< 1
Cl (%)	< 1,5	< 0,8	< 0,8 - 1	< 0,8 - 1	< 2	0,6 - 0,8	< 0,8 - 1
Cenizas (%)	< 35	-	-	< 20	< 10	20-30	< 10
As (mg/MJ)*	1,00 / 1,5					2,00 / 3,00	
Cd (mg/MJ)*	0,17 / 0,34					0,23 / 0,34	
Co (mg/MJ)*	0,90 / 1,60					1,50 / 2,70	
Cr (mg/MJ)*	19,0 / 28,0					25,0 / 37,0	
Hg (mg/MJ)*	0,075 / 0,15					0,075 / 0,15	
Ni (mg/MJ)*	7,00 / 12,0					10,0 / 18,0	
Pb (mg/MJ)*	15,0 / 27,0					20,0 / 36,0	
Sb (mg/MJ)*	7,00 / 10,0					7,00 / 10,0	

* Valor para la media / Valor para el percentil 80

Tabla 3.4 Estándares de calidad del CSR en Finlandia (SFS 5875, 2000)

Parámetro	Clases		
	I	II	III
Cl (%)	< 0,15	< 0,5	< 1,5
S (%)	< 0,2	< 0,3	< 0,5
N (%)	< 1,0	< 1,5	< 2,5
K y Na (%)	< 0,2	< 0,4	< 0,5
Hg (ppm)	< 0,1	< 0,2	< 0,5
Cd (ppm)	< 1,0	< 4,0	< 5,0
Aluminio (metálico)	1)	2)	3)

Parámetro	Clases		
	I	II	III

- 1) El aluminio metálico no está permitido, pero se acepta dentro de los límites de precisión.
- 2) El aluminio metálico se minimiza por separación de fuentes y en el proceso de producción del combustible.
- 3) El contenido en aluminio metálico se acuerda por separado.

Tabla 3.5 Estándares de calidad del CSR en Italia (UNI 9903-1, 2004)

Parámetro	CSR estándar	CSR alta calidad
Humedad (%)	< 25	< 15
PCI (MJ/kg)	> 15	> 19
Cenizas (%)	< 20	< 15
Cl (%)	< 0,9	< 0,7
S (%)	< 0,6	< 0,3
Pb (ppm)	< 200	< 100
Cu (ppm)	< 300	< 50
Mn (ppm)	< 400	< 200
Cr (ppm)	< 100	< 70
Ni (ppm)	< 40	< 30
As (ppm)	< 9	< 5
Cd + Hg (ppm)	< 7	< 4

Tabla 3.6 Estándares de calidad del CSR en Francia (Republique Française, 2016)

Parámetro	Estándar
PCI (MJ/kg)	> 12
Cl (%)	< 1,5
Hg (mg/Kg)	< 3
Br (%)	< 1,5
Total halógenos (%)	< 2

Tabla 3.7 Estándares de calidad del CSR en hornos de Cemento de Suiza (Flamme and Geiping, 2012; A Gallardo et al., 2014)

Parámetro	Estándar hornos de cemento
Humedad (%)	< 10
PCI (MJ/kg)	25,1 – 31,4

Parámetro	Estándar hornos de cemento
Cl (%)	< 1
S (%)	< 0,5
As (mg/MJ)	0,60
Cd (mg/MJ)	0,08
Co (mg/MJ)	0,80
Cr (mg/MJ)	4,00
Cu (mg/MJ)	4,00
Hg (mg/MJ)	0,02
Ni (mg/MJ)	4,00
Pb (mg/MJ)	8,00
Sb (mg/MJ)	0,20
Sn (mg/MJ)	0,40
Tl (mg/MJ)	0,12
V(mg/MJ)	4,00

Junto con las diferentes normativas expuesta anteriormente, en España se han definido unas estándares de calidad del CSR para los hornos de cemento (Tabla 3.8) (Carlos Alberola et al., 2017; Gallardo et al., 2014). Además, a nivel europeo también existen unos valores límite para el uso de CSR en cementeras propuestos por EURITS (European Union for Responsible Incineration and Treatment of Special Waste) (Gallardo et al., 2014; Garcés et al., 2016), los cuales se presentan en la Tabla 3.9.

Tabla 3.8 Estándares de calidad del CSR en hornos de cemento en España (Gallardo et al., 2014)

Parámetro	Estándar horno de cemento
Humedad (%)	< 1
Cenizas (%)	< 10
S (%)	< 3
N (%)	< 3
Pb (mg/kg)	<2.500
Cr (mg/kg)	<1.500
Ba (mg/kg)	<5.500
Halógenos (%)	<5

Tabla 3.9 Estándares de calidad del CSR en hornos de cemento en Europa: EURITS (Gallardo et al., 2014; Garcés et al., 2016)

Parámetro	Estándar hornos de cemento	Parámetro	Estándar hornos de cemento
PCI (MJ/kg)	15	Hg (mg/kg)	2
Cenizas (%)	5	Tl (mg/kg)	2
Cl (%)	0,5	Mo (mg/kg)	20
S (%)	0,4	V (mg/kg)	200
N (%)	0,7	Cr (mg/kg)	200
F (%)	0,1	Co (mg/kg)	200
Br/l (mg/kg)	0,01	Ni (mg/kg)	200
As (mg/kg)	10	Cu (mg/kg)	200
Se (mg/kg)	10	Pb (mg/kg)	200
Te (mg/kg)	10	Mn (mg/kg)	200
Cd (mg/kg)	10	Sn (mg/kg)	200
Sb (mg/kg)	10	Zn (mg/kg)	500

Así pues, como se ha visto en los diferentes estándares revisados, además de los tres parámetros propuestos por el CEN (PCI, Cl y Hg), existen otras propiedades como el contenido en humedad, fracción volátil, tamaño de partícula, contenido en ceniza, metales pesados, etc. que también son importantes para evaluar la calidad de los CSR, sus posibles usos y su comportamiento en las instalaciones de recuperación energética.

4. CSR COMERCIALES

La utilización de los CSR como combustibles requiere que sean de calidad y estables en el tiempo, de forma que se puedan sustituir a los combustibles fósiles sin causar limitaciones operativas y técnicas. Existen empresas que se dedican a la fabricación de CSR de alta calidad y que han registrado sus propias marcas.

La empresa alemana REMONDIS ha desarrollado dos CSR que están sujetos a un control de calidad y protegidos por una marca registrada: BPG® y SBS®. Además, su uso y el cumplimiento de las regulaciones está garantizado por la etiqueta de calidad RAL-GZ 724 (estándar de calidad alemán). El BPG® es un CSR producido a partir de residuos

industriales o comerciales específicos y que se separan en origen. El SBS® es un CSR producido a partir de fracciones de elevado poder calorífico de los RSU (Glorius, 2014). Adicionalmente, la empresa también produce otro CSR, que no está registrado, a partir de fracciones de alto poder calorífico con un alto contenido biogénico y de diferentes residuos biológicos denominado BIOBS. Los materiales que utiliza para su fabricación son: fracciones de elevado poder calorífico procedentes de plantas de TMB, residuos voluminosos, madera, rechazos de afino del compostaje y otros biorresiduos (Glorius, 2015). Las especificaciones de las dos marcas registradas de combustibles y las clases que existen de cada uno de ellos se presentan en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1 Especificaciones de calidad para las marcas de CSR de REMONDIS (Glorius, 2009)

Parámetro	BPG® 1 Centrales eléctricas	BPG® 2 Cementeras	BPG® 3 Hornos de cal	SBS® 1 Centrales eléctricas	SBS® 2 Centrales eléctricas /cementeras
PCI (MJ/kg)	16 – 12	20 – 24	23 – 27	13 – 18	18 – 23
Cl (%)	< 1	< 1	< 1	< 0,7	< 1
F (%)	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05
Humedad (%)	< 35	< 20	< 12,5	< 35	< 20
S (%)	< 0,2	< 0,3	< 0,3	< 0,5	< 0,8
Cenizas (%)*	< 20	< 15	< 9	< 20	< 15
As (mg/kg)*	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10
Be (mg/kg)*	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1
Cd (mg/kg)*	< 9	< 9	< 9	< 9	< 9
Co (mg/kg)*	< 12	< 12	< 12	< 12	< 12
Cr (mg/kg)*	< 120	< 120	< 120	< 250	< 250
Cu (mg/kg)*	< 400	< 400	< 400	< 1.000	< 1.000
Hg (mg/kg)*	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 1	< 1
Mn (mg/kg)*	< 100	< 100	< 100	< 400	< 400
Ni (mg/kg)*	< 50	< 50	< 50	< 160	< 160
Pb (mg/kg)*	< 100	< 100	< 100	< 400	< 400
Sb (mg/kg)*	< 120	< 120	< 120	< 120	< 120
Se (mg/kg)*	< 4	< 4	< 4	< 5	< 5
Sn (mg/kg)*	< 70	< 70	< 70	< 70	< 70
Te (mg/kg)*	< 4	< 4	< 4	< 5	< 5
Tl (mg/kg)*	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1
V (mg/kg)*	< 15	< 15	< 15	< 25	< 25

Parámetro	BPG [®] 1 Centrales eléctricas	BPG [®] 2 Cementeras	BPG [®] 3 Hornos de cal	SBS [®] 1 Centrales eléctricas	SBS [®] 2 Centrales eléctricas /cementeras
-----------	--	----------------------------------	-------------------------------------	--	--

*Valores sobre muestra seca

En Reino Unido, la empresa CEMEX ha registrado también una marca comercial de CSR de alta energía denominada ClimaFuel[®]. Este CSR se fabrica a partir de RSU y residuos comerciales e industriales, principalmente papel, cartón, madera, alfombras, textiles y plásticos. El CSR es utilizado en las cementeras de la propia empresa como sustituto del carbón. Las características de ClimaFuel[®] son: un poder calorífico de 17 a 22 MJ/kg, una humedad menor al 15 % y un contenido en Cl inferior al 1 % (CEMEX, n.d.; Puig Ventosa et al., 2012).

Asimismo, en España, CEMEX también ha desarrollado una marca registrada de CSR de alta energía: EnerFuel[®]. Este CSR se fabrica a partir de RSU y residuos industriales del mismo modo que el ClimaFuel[®] y está compuesto principalmente por madera, plásticos, briks, textil y papel/cartón. Las características del EnerFuel[®] son: una humedad inferior al 20%, un tamaño de partícula de hasta 4 cm y cumplir los estándares de calidad europeos definidos por la norma UNE-EN 15359 (2012) (Berganza, 2012; Puig Ventosa et al., 2012).

5. DESCLASIFICACIÓN DEL CSR COMO RESIDUO

La desclasificación del CSR como residuos, cumpliendo ciertas exigencias de calidad y uso, facilitaría una mayor utilización como combustible, tanto en los actuales sectores donde se viene utilizando como en otros nuevos (Gallardo et al., 2017). En este sentido, tan solo Italia tiene una legislación específica para la desclasificación de los CSR (Velzeboer and van Zomeren, 2017); mientras que Austria establece unos límites para la desclasificación de combustibles producidos a partir de residuos de madera y otros combustibles de sustitución en general.

En Italia, el Decreto Ministerial n. 22 (Italian Ministerial Decree, 2013) introdujo los criterios de fin de condición de residuos (EoW, en inglés) para clasificar a los CSR como combustibles (Di Lonardo et al., 2016). Esta ley establece que, de las 125 combinaciones de código clase para un CSR que se obtienen con la norma UNE-EN 15359 (2011), no todas son adecuadas para clasificarlos como combustible, sino solo las combinaciones que tienen un número de clase mayor o igual a 3 para el PCI y el Cl y un número de 1 o

2 para el Hg. Además, también se fijan unos valores límite máximos para los metales pesados indicados por la norma UNE-EN 15359 (2012) que los CSR deben de cumplir (Tabla 5.1). Finalmente, el decreto establece que solo se permite el uso de los CSR clasificados como combustible para la co-combustión en plantas de cemento y centrales térmicas con una capacidad mayor a 50 MW. Aquellos CSR cuyos códigos clases no cumplan los criterios de EoW seguirán considerándose residuos y sus usuarios serán las plantas de producción de energía e estaciones de combustión autorizadas para la valorización de residuos.

Tabla 5.1 Criterios para el EoW de los CSR en Italia (Italian Ministerial Decree, 2013)

Parámetro	Medida estadística	Valor límite
PCI (MJ/kg)	-	Código clase ≥ 3
Cl (%)	-	Código clase ≥ 3
Hg (%)	-	Código clase ≥ 2
Cenizas (%)*	Media	(véase nota 1)
Humedad (%)	Media	(véase nota 1)
Sb (mg/kg)*	Mediana	50
As (mg/kg)*	Mediana	5
Cd (mg/kg)*	Mediana	4
Co (mg/kg)+	Mediana	100
Cr (mg/kg)*	Mediana	18
Mn (mg/kg)*	Mediana	250
Ni (mg/kg)*	Mediana	30
Pb (mg/kg)*	Mediana	240
Cu (mg/kg)*	Mediana	500
Tl (mg/kg)*	Mediana	5
V (mg/kg)*	Mediana	10

* Sobre materia seca

Nota: (1) No hay valores límite de las cenizas y humedad. Los valores límite son acordados entre productor y consumidor.

Austria, en su Ordenanza de Incineración de Residuos (AAV) (BMLFUW (Ed.), 2010), establece unos criterios para la EoW de “otros combustibles de sustitución” en general (Tabla 5.2), de los cuales quedan excluidos los residuos peligrosos y los desechos médicos. No obstante, estos criterios no son específicos para CSR. La ordenanza limita la valorización energética de aquellos combustibles que cumplan estos criterios a

instalaciones de incineración con una potencia térmica nominal $\geq 50\text{kW}$ y un valor límite de emisiones para partículas y polvo de 20 mg/m^3 , así como a instalaciones comprendidas en el ámbito de la AAV.

Tabla 5.2 Criterios para el EoW de otros combustibles de sustitución en Austria (BMLFUW (Ed.), 2010)

Parámetro	Valor límite (mg/MJ)	
	Media	Percentil 80
S	200	300
Cl	100	150
Hg	0,02	0,03
Sb	0,5	0,75
As	0,8	1,2
Pb	4	6
Cd	0,05	0,075
Cr	1,4	2,1
Co	0,7	1,05
Ni	1,6	2,4

6. CARACTERIZACIÓN FÍSICA DEL RECHAZO DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE ONDA

En la planta de TMB de Onda (Figura 6.1) se tratan los RSU mezclados gestionados por el Consorcio de Residuos C2 (Zona Centro de la provincia de Castellón), procedentes de 46 municipios cuya población suma 364.947 habitantes. La capacidad de tratamiento de la instalación es de 120.000 t/año, sin embargo, en 2018 se trataron un total de 160.395 t de RSU mezclados.

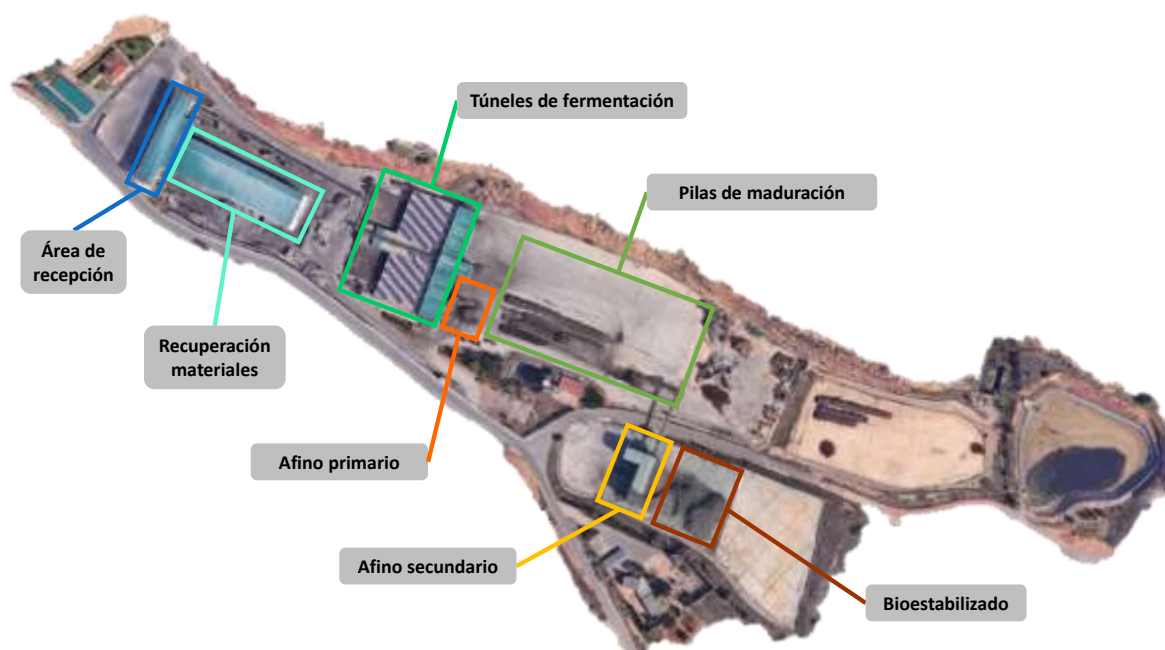


Figura 6.1 Planta de recuperación y compostaje de Onda

La recuperación de los materiales reciclables se realiza de forma mecánica y manual, separando: PET, PEAD, plástico mix, cartón, brik, metales férricos, metales no férricos y vidrio. La fracción orgánica de los residuos se destina a bioestabilización mediante túneles durante 8-9 semanas y posterior maduración en pilas (Figura 6.1). Tras el tratamiento de los RSU se obtienen un flujo de materiales recuperados (5,5%), un flujo de material bioestabilizado (4,7%) y tres corrientes de rechazo (75,3%) (Figura 6.2):

- Rechazo de recuperación manual (RRM-O): generado en la etapa de recuperación de materiales, tras la separación de los materiales reciclables del rebose del trómel de pretratamiento, con un diámetro de partícula superior a 80 mm.
- Rechazo de afino primario del bioestabilizado (RAB1-O): generado en el trómel intermedio de afino del material pre-bioestabilizado que procede de la fermentación en túneles, con un tamaño de partícula entre 80 y 30 mm.
- Rechazo de afino secundario del bioestabilizado (RAB2-O): generado en la mesa densimétrica de afino final del bioestabilizado, con un tamaño de partícula entre 30 y 14 mm.

Las pérdidas del proceso (emisiones gaseosas y líquidas) suponen el 14,5% del material entrante.



Figura 6.2 Rechazos generados en la planta de recuperación y compostaje de Onda

Se ha estudiado estos tres rechazos y se ha determinado su composición. El estudio se ha dividido en dos Fases. La Fase 1 comprende las estaciones de primavera-verano y la Fase 2 las de otoño-invierno.

Una vez realizada la caracterización y el estudio estadístico de los datos obtenidos en las Fases 1 y 2, a pesar de que existen diferencias significativas entre ellas para algunas de las facciones, en la tabla 6.1 y las figuras 6.3, 6.4 y 6.5 se muestran las composiciones medias anuales de los tres rechazos.

Tabla 6.1 Composición media anual de los rechazos

Material	RMM-0		RAB1-0		RAB2-0	
	Media	Desv. St	Media	Desv. St	Media	Desv. St
FO	20,20	5,53	63,86	10,76	67,25	7,06
Papel/Cartón	16,02	4,86	-	-	-	-
Film	11,60	1,62	2,39	1,38	0,37	0,40

P. Rígido	10,85	1,88	6,04	3,70	1,08	0,52
Textil	8,50	3,99	1,33	1,72	0,04	0,13
Metales	3,65	1,10	3,72	4,06	0,36	0,79
Madera	2,98	1,58	1,24	1,72	0,12	0,26
Brik	1,66	0,36	0,44	1,58	0,01	0,02
Inertes	1,01	0,94	6,48	7,25	3,35	2,65
RTP	0,88	0,84	0,87	1,39	0,08	0,33
Vidrio	0,81	0,50	10,83	5,25	27,29	6,51
Otros	12,44	3,09	2,79	4,51	0,05	0,13
Finos	9,41	11,17	-	-	-	-

Como se observa en la tabla 6.1 y figura 6.3, el RMM-0 es un material muy heterogéneo formado principalmente por materiales altamente combustibles como: fracción orgánica, papel/cartón, plásticos, textiles y otros (pañales, juguetes, zapatos, espumas o piezas de plástico de gran tamaño). La composición media es similar a la obtenida en el trabajo de Gallardo et al. (2014) donde se analizó este mismo rechazo y a los obtenidos para la planta de TMB de Zaragoza (Aranda Usón et al., 2012). Así como a los valores de las 8 plantas de TMB de Castilla y León analizadas por Montejo et al. (2013), salvo por el porcentaje de papel/cartón que en estas fue mayor. Por otro lado, los resultados difieren un poco de los obtenidos por Ramos Casado et al. (2016) para una instalación de este tipo en Navarra, donde el porcentaje de papel/cartón es mayor (48,5%) y el contenido en fracción orgánica, plástico film y metales menor (15,3%, 2,6% y 0,8%, respectivamente).

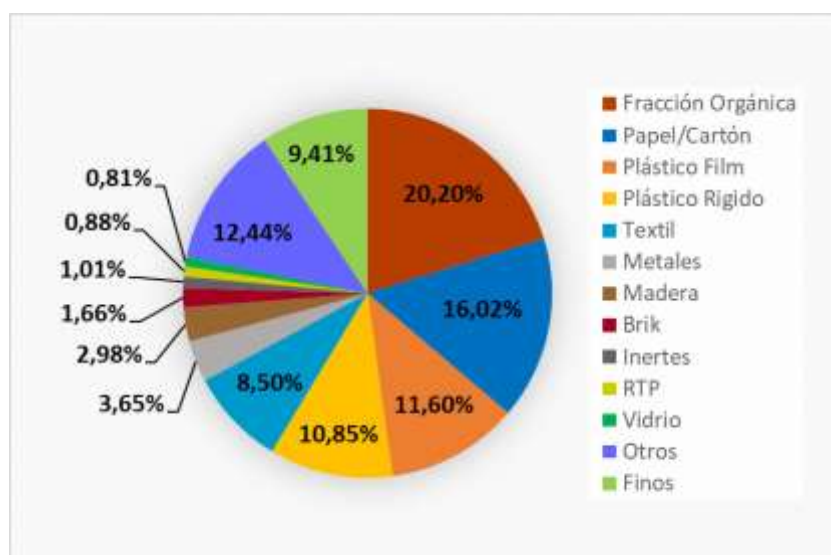


Figura 6.3 Composición media anual del rechazo grueso

El RA1-0, debido a que se origina en la etapa biológica del tratamiento, es una corriente compuesta principalmente por fracción orgánica (63.86%), lo que la hace más homogénea que la anterior (figura 6.4). Junto con esta fracción, pero en menor proporción, también se encuentran materiales como vidrio, inertes, plástico rígido y metales que suponen en conjunto aproximadamente un 27% de esta corriente.

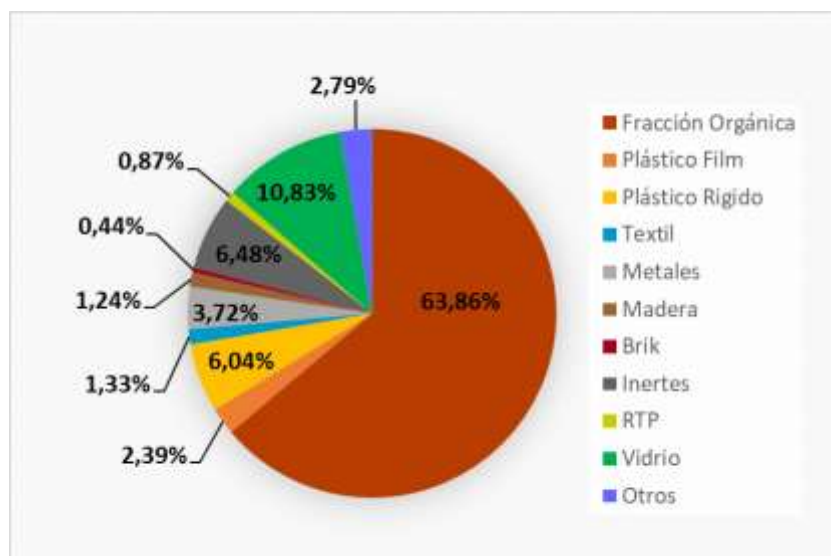


Figura 6.4 Composición media anual del rechazo de afino primario

El RAB2-0, que también se genera en la etapa biológica, está compuesto de media por un 67,25% de fracción orgánica, un 27,29% de vidrio y un 3,35% de inertes, suponiendo en conjunto casi el 98% del material (figura 6.5). Esto hace que esta corriente de rechazo sea la más homogénea de las tres estudiadas.

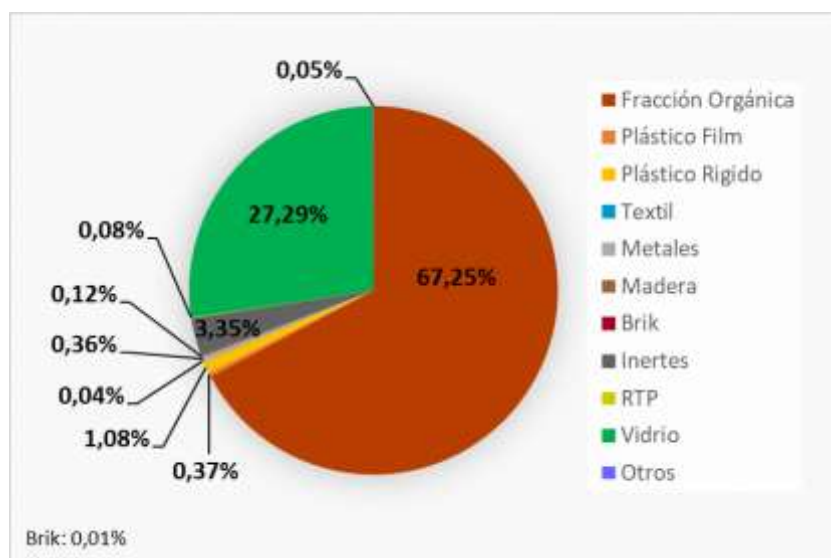


Figura 6.5 Composición media anual del rechazo de afino secundario

7. CARACTERIZACIÓN QUÍMICA DEL CSR DE ONDA

Se caracterizaron los tres rechazos (la fracción combustible) y el bioestabilizado, que son susceptibles de ser transformado en CSR. Las muestras analizadas fueron:

- RAB1-0 otoño invierno
- RAB1-0 primavera verano
- RAB2-0 otoño invierno
- RAB2-0 primavera verano
- RRM-0 otoño invierno
- RRM-0 primavera verano
- Bioestabilizado

Para su caracterización se determinaron los siguientes parámetros:

- Humedad
- Cenizas
- Poder calorífico inferior
- Azufres
- Halógenos: cloruros, fluoruros y bromuros
- Mercurio

Todos estos parámetros están incluidos en las normativas europeas de caracterización de CSR.

Se hicieron seis réplicas por rechazo, por lo que en total se determinaron los parámetros de 42 muestras. Los resultados aparecen en la tabla 7.1.

Tabla 7.1 Caracterización de la fracción combustible de los rechazos de Onda

Descripción	Humedad (%)	Cenizas (% sms)	S (%)	Hg (ppm)	Cloruros (%)	Fluoruros (%)	Bromuros (%)	PCS (MJ/kg sms)	PCS (MJ/kg smh)
RAB1-0 otoño-invierno	37,65	19,29	0,13	0,097	1,35	0,004	3,25	17,43	9,94
RAB1-0 primavera-verano	25,81	18,85	0,14	0,096	0,95	0,004	2,98	15,78	11,04
RRM-1	29,58	11,53	0,1	0,055	2,62	0,003	3,56	20,27	13,52
RRM-2	34,42	9,7	0,19	0,042	1,71	0,009	3,64	19,59	11,99
Bioestabilizado	10,17	28,48	0,21	0,3	0,768	0,008	2,32	13,63	11,92
RAB2-0 otoño-invierno	22,06	21,84	0,2	0,273	0,69	0,006	2,86	13,97	10,31
RAB2-0 primavera-verano	12,61	25,32	0,21	0,751	1,12	0,007	2,42	13,68	11,58

El análisis de los datos muestran los siguientes resultados

- Una elevada humedad, que puede ser rebajada si son sometidos a un secado. El bioestabilizado presenta una menor humedad debido a que la pierde en el proceso de compostaje.
- Elevado porcentaje de cenizas, excepto en los rechazos de la recuperación de materias, que tienen una menor suciedad. Este valor puede ser rebajado separando en origen la fracción orgánica que aporta gran parte de la suciedad y por tanto, de la ceniza.
- Los valores de azufre son bajos en general.
- Los valores de Hg son bajos en general, siendo los más altos los pertenecientes al rechazo del afino secundario y al bioestabilizado.
- Los porcentajes de cloruros están en torno al 1 %, excepto los del rechazo de la recuperación manual, en este caso aparecen trozos de plásticos rígidos que pueden contener cloro, como el PVC.
- Los porcentajes de fluoruros son muy bajos en todos los casos.
- Los porcentajes de bromuros se sitúan entre el 2 y 4%.
- Respecto al PCI, sobre materia seca, se puede considerar elevado en todos los casos excepto en el rechazo de afino secundario y el bioestabilizado. Es estos dos casos, es lógico que el PCI sea bajo, pues tienen mayor porcentaje de ceniza y de biorresiduo (fracción con el menor PCI de todas las que forman la fracción combustible del rechazo)

8. CARACTERIZACIÓN QUÍMICA DE CSR COMERCIALES

Para la caracterización de los CSR comerciales se determinaron los siguientes parámetros:

- Humedad
- Cenizas
- Poder calorífico inferior
- Azufre
- Halógenos: cloruros, fluoruros y bromuros
- Mercurio

Se analizaron seis réplicas por rechazo, por lo que en total se determinaron los parámetros de analizaron 36 muestras. Los resultados aparecen en la tabla XX.

Tabla 8.1 Caracterización de pellets comerciales

Descripción	Humedad (%)	Cenizas (% sms)	S (%)	Hg (ppm)	Cloruros (%)	Fluoruros (%)	Bromuros (%)	PCS (MJ/kg sms)
Natur pellets (madera de pino)	9,39	2,74	0,03	0,0099	0,097	0,0007	3,850	17,09
Bigmat (residuos de madera)	7,74	0,59	0,02	0,0033	0,122	0,0016	4,419	17,43
madera	7,64	3,89	0,07	0,0087	0,119	0,0010	3,650	16,15
pino más madera propical	7,65	3,94	0,02	0,0043	0,130	0,0042	3,846	16,82
pino	7,24	0,72	0,02	0,0032	0,096	0,0008	1,833	17,52

El análisis de los datos muestran los siguientes resultados

- Todos los pellets tienen como origen biorresiduos procedentes de la madera, por lo que están descatalogados como residuo.
- Una humedad es baja en todos los casos. Dicha humedad es la mínima necesaria para que se pueda cohesionar los pellets.
- El porcentaje en cenizas es bajo, destacando como muy bajo dos de ellos.
- El porcentaje de azufre es muy bajo y parecido entre todos ellos.
- El porcentaje de mercurio es muy bajo y parecido entre todos ellos.
- Los halógenos se presentan en porcentajes muy bajos, siendo el mayor los bromuros.
- El PCI es muy parecido entre todos ellos y se sitúa entre 16 y 17,5 MJ/kg sms.

9. COMPARACIÓN DEL CSR DE ONDA, COMERCIALES LOS ESTÁNDARES DE CALIDAD

Tabla xx Indicadores de normativas europeas, resultados de los CSR y pellets

PAÍS	Clases															
	ITALIA		FINLANDIA			AUSTRIA						SUIZA	ESPAÑA	FRANCIA	ALEMANIA	
	CSR estándar	CSR alta calidad	I	II	III	Co-incineración de residuos				Co-incineración en hornos de cemento		Estándares hornos de cemento	Estándares hornos de cemento	Estándares hornos de cemento	Media (ppm)	
Parámetro					Central térmica	Calcinador	Caldera de parrilla	Caldera de lecho fluidizado	Alto horno	Pre-calcinador	Quemador primario del horno					
Humedad (%)	< 25	< 15											< 10	< 1		
PCI (MJ/kg)	> 15	> 19				10-18	11-15	11-16	11-16	> 25	14-16	20-25	25,1-31,4	20,9	>12	
Cenizas (%)	< 20	< 15				< 35	-	-	< 20	< 10	20-30	< 10	< 1	< 10		
Cl (%)	< 0,9	< 0,7	< 0,15	< 0,5	< 1,5	< 1,5	< 0,8	< 0,8-1	< 0,8-1	< 2	0,6-0,8	< 0,8-1	< 0,5	< 3	15	
F (%)																
S (%)	< 0,6	< 0,3	< 0,2	< 0,3	< 0,5											
Hg(ppm)			< 0,1	< 0,2	< 0,5										3	0,6

Descripción	Humedad (%)	Cenizas (% sms)	S (%)	Hg (ppm)	Cloruros (%)	Fluoruros (%)	Bromuros (%)	PCS (MJ/kg sms)	PCS (MJ/kg smh)
RAB1-0 otoño-invierno	37,65	19,29	0,13	0,097	1,35	0,004	3,25	17,43	9,94
RAB1-0 primavera-verano	25,81	18,85	0,14	0,096	0,95	0,004	2,98	15,78	11,04
RRM-1	29,58	11,53	0,1	0,055	2,62	0,003	3,56	20,27	13,52
RRM-2	34,42	9,7	0,19	0,042	1,71	0,009	3,64	19,59	11,99
Biosetabilizado	10,17	28,48	0,21	0,3	0,768	0,008	2,32	13,63	11,92
RAB2-0 otoño-invierno	22,06	21,84	0,2	0,273	0,69	0,006	2,86	13,97	10,31
RAB2-0 primavera-verano	12,61	25,32	0,21	0,751	1,12	0,007	2,42	13,68	11,58

Descripción	Humedad (%)	Cenizas (% sms)	S (%)	Hg (ppm)	Cloruros (%)	Fluoruros (%)	Bromuros (%)	PCS (MJ/kg sms)
Natur pellets (madera de pino)	9,39	2,74	0,03	0,0099	0,097	0,0007	3,850	17,09
Bigmat (residuos de madera)	7,74	0,59	0,02	0,0033	0,122	0,0016	4,419	17,43
madera	7,64	3,89	0,07	0,0087	0,119	0,0010	3,650	16,15
pino más madera propical	7,65	3,94	0,02	0,0043	0,130	0,0042	3,846	16,82
pino	7,24	0,72	0,02	0,0032	0,096	0,0008	1,833	17,52

El análisis de los datos muestran los siguientes resultados:

- La humedad que presentan los rechazos superan los límites establecidos por todas las normativas. Este punto no es crítico puesto que se puede rebajar tanto como se quiera.
- Las cenizas que presentan los rechazos son más altas que los pellets comerciales pero cumplen con muchas de las normativas, sobre todo los rechazos de la recuperación manual. No obstante, con la recogida separada del biorresiduo este parámetro se podría mejorar.
- Respecto al azufre de los rechazos, el porcentaje es más elevado que el de los pellets. Cumplen con las normativas de Italia y Finlandia que son las únicas que tienen en cuenta este parámetro.
- Respecto al mercurio, las concentraciones de los rechazos son más altas que la de los CSR comerciales, pero cumplen con las normativas europeas excepto el rechazo secundario generado en primavera-verano.
- Respecto a cloruros, los valores de los rechazos son más elevados que los CSR comerciales y no cumplen con las normativas, a excepción del biorresiduo. En

este caso habría que hacer un estudio para eliminar aquellos materiales que aportan cloro al rechazo.

- Respecto al PCI, sobre materia seca, los rechazos de recuperación material y los rechazos del afino primario presentan valores más elevados a los CSR comerciales, todos superan los límites establecidos por las normativas europeas. El PCI de los rechazos de afino secundario y biorresiduos presentan valores más bajos que los CSR comerciales, pero aun así cumplen con algunas normativas.

10. CONCLUSIONES

En este trabajo se han determinado las propiedades físicas de los tres rechazos producidos en la PTMB de Onda susceptibles de ser convertidos en CSR. Posteriormente se han determinado las propiedades químicas de la fracción no combustible de las tres corrientes de rechazos y del biosecado.

Se han determinado las propiedades químicas de varios CSR comerciales elaborados a partir de residuos forestales.

Se han comparado los tres materiales con CSR comerciales y las normativas de varios países.

La calidad de los CSR puede mejorarse mediante un proceso de producción que concentre las fracciones combustibles más adecuadas como: el plástico film, el papel/cartón y la madera, puesto que estos materiales tienen un poder calorífico elevado y presentan las concentraciones más bajas de elementos contaminantes y tóxicos. Además, este proceso también tiene que permitir eliminar la fracción no combustible y otros elementos contaminantes.

Respecto al PCI, los rechazos de recuperación material y los rechazos del afino primario presentan valores más elevados a los CSR comerciales, todos superan los límites establecidos por las normativas europeas

Respecto al resto de parámetros, será necesario bajar el porcentaje de cloro, que procede principalmente de los plásticos rígidos no envases, especialmente del PVC, y del caucho. Estos materiales, junto con los textiles sintéticos, son las fuentes potenciales de elementos contaminantes y tóxicos. Además, los elementos como baterías, RAEEs, termómetros, pinturas o metales galvanizados presentan concentraciones elevadas de metales pesados. Por lo tanto, la eliminación de estos materiales es indispensable para obtener un CSR de calidad.

11. TRABAJOS FUTUROS

A partir de las conclusiones obtenidas se proponen los siguientes trabajos futuros:

- Determinar los metales pesados de las muestras analizadas, con el objetivo de conocer las posibles diferencias entre los CSR comerciales y el CSR derivado del residuo de Onda.
- Determinar las propiedades químicas de una muestra lavada del rechazo de la recuperación manual. El objetivo es determinar cómo afectará la recogida separada del biorresiduo, lo esperado será una mayor calidad del rechazo puesto que estará menos contaminado.

12. REFERENCIAS

- Bessi, C., Lombardi, L., Meoni, R., Canovai, A., Corti, A., 2016. Solid recovered fuel: An experiment on classification and potential applications. *Waste Manag.* 47, 184–194. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.08.012>
- Brás, I., Silva, M.E., Lobo, G., Cordeiro, A., Faria, M., De Lemos, L.T., 2017. Refuse Derived Fuel from Municipal Solid Waste rejected fractions- a Case Study. *Energy Procedia* 120, 349–356. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.07.227>
- Dahlén, L., Lagerkvist, A., 2008. Methods for household waste composition studies. *Waste Manag.* 28, 1100–1112. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2007.08.014>
- Di Lonardo, M.C., Franzese, M., Costa, G., Gavasci, R., Lombardi, F., 2016. The application of SRF vs. RDF classification and specifications to the material flows of two mechanical-biological treatment plants of Rome: Comparison and implications. *Waste Manag.* 47, 195–205. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.07.018>
- Di Lonardo, M.C., Lombardi, F., Gavasci, R., 2015. Quality evaluation and improvement of mechanically–biologically treated municipal solid waste in view of a possible recovery. *Int. J. Environ. Sci. Technol.* 12, 3243–3254. <https://doi.org/10.1007/s13762-014-0735-4>
- Di Lonardo, M.C., Lombardi, F., Gavasci, R., 2012. Characterization of MBT plants input and outputs: A review. *Rev. Environ. Sci. Biotechnol.* 11, 353–363. <https://doi.org/10.1007/s11157-012-9299-2>
- Edo-Alcón, N., Gallardo, A., Colomer-Mendoza, F.J., 2016. Characterization of SRF from MBT plants: Influence of the input waste and of the processing technologies.

- Fuel Process. Technol. 153, 19–27. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2016.07.028>
- Edo-Alcón, N., Gallardo, A., Colomer, F.J., Sánchez-López, I., 2017. Diseño de una metodología para el muestreo de corrientes de rechazo producidas en las plantas de tratamiento de residuos domiciliarios, in: VII Simposio Iberoamericano de Ingeniería de Residuos: Hacia Una Economía Circular. Santander, España.
- European Commission, 2017. The role of waste-to-energy in the circular economy (Documento COM(2017) 34 final). Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions, Brussels, 26.1.2017.
- European Commission, 2004. Methodology for the Analysis of Solid Waste (SWA-Tool).
- Gallardo, A., Carlos, M., Bovea, M.D., Colomer, F.J., Albarrán, F., 2014. Analysis of refuse-derived fuel from the municipal solid waste reject fraction and its compliance with quality standards. *J. Clean. Prod.* 83, 118–125. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.07.085>
- Gallardo, A., Edo-Alcón, N., Albarrán, F., 2017. El combustible sólido recuperado: Producción y marco regulador. *RETEMA* 8–16.
- Montejo, C., Costa, C., Ramos, P., Márquez, M.D.C., 2011. Analysis and comparison of municipal solid waste and reject fraction as fuels for incineration plants. *Appl. Therm. Eng.* 31, 2135–2140. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2011.03.041>
- Montejo, C., Tonini, D., Márquez, M. del C., Fruergaard Astrup, T., 2013. Mechanical–biological treatment: Performance and potentials. An LCA of 8 MBT plants including waste characterization. *J. Environ. Manage.* 128, 661–673. <https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2013.05.063>
- Nasrullah, M., Hurme, M., Oinas, P., Hannula, J., Vainikka, P., 2017. Influence of input waste feedstock on solid recovered fuel production in a mechanical treatment plant. *Fuel Process. Technol.* 163, 35–44. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2017.03.034>
- Nasrullah, M., Vainikka, P., Hannula, J., Hurme, M., 2015. Elemental balance of SRF production process: Solid recovered fuel produced from commercial and industrial waste. *Fuel* 145, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2014.12.071>
- Nithikul, J., Karthikeyan, O.P., Visvanathan, C., 2011. Reject management from a mechanical biological treatment plant in Bangkok, Thailand. *Resour. Conserv. Recycl.* 55, 417–422. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2010.11.004>
- Pressley, P.N., Aziz, T.N., Decarolis, J.F., Barlaz, M.A., He, F., Li, F., Damgaard, A., 2014. Municipal solid waste conversion to transportation fuels: A life-cycle estimation of global warming potential and energy consumption. *J. Clean. Prod.* 70, 145–153. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.02.041>
- Ramos Casado, R., Arenales Rivera, J., Borjabad García, E., Escalada Cuadrado, R., Fernández Llorente, M., Bados Sevillano, R., Pascual Delgado, A., 2016.

Classification and characterisation of SRF produced from different flows of processed MSW in the Navarra region and its co-combustion performance with olive tree pruning residues. *Waste Manag.* 47, 206–16.
<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.05.018>

Trulli, E., Ferronato, N., Torretta, V., Piscitelli, M., Masi, S., Mancini, I., 2018. Sustainable mechanical biological treatment of solid waste in urbanized areas with low recycling rates. *Waste Manag.* 71, 556–564.
<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.10.018>

UNE-EN 15359, 2012. Combustibles sólidos recuperados: Especificaciones y clases. AENOR, Asociación Española de Normalización y Certificación, Madrid.

UNE-EN 15414-3, 2011. Combustibles Sólidos Recuperados: Determinación del contenido en humedad por el método de secado en estufa. Parte 3: Humedad de la muestra para análisis general. AENOR, Asociación Española de Normalización y Certificación, Madrid.

UNE-EN 15442, 2012. Combustibles sólidos recuperados: Métodos de muestreo. AENOR, Asociación Española de Normalización y Certificación, Madrid.

Velis, C.A., Longhurst, P.J., Drew, G.H., Smith, R., Pollard, S.J.T., 2010. Production and quality assurance of solid recovered fuels using Mechanical- Biological Treatment (MBT) of waste: a comprehensive assessment. *Crit. Rev. Environ. Sci. Technol.* 40, 979–1105. <https://doi.org/10.1080/10643380802586980>

Velis, C., Wagland, S., Longhurst, P., Robson, B., Sinfield, K., Wise, S., Pollard, S., 2012. Solid recovered fuel: Influence of waste stream composition and processing on chlorine content and fuel quality. *Environ. Sci. Technol.* 46, 1923–1931.
<https://doi.org/10.1021/es2035653>