



ESTUDIO

# Coprocesado

Recuperación material de la fracción mineral de los combustibles derivados de residuos en la industria cementera



ESTUDIO

# Coprocesado

Recuperación material de la fracción mineral de los combustibles derivados de residuos en la industria cementera

**Equipo redactor**

D. Arturo Alarcón

D. Daniel del Barrio

D. Domingo A. Martín

D. Pedro Mora

Grupo técnico paritario de Fundación CEMA con representantes de técnicos de los nueve grupos cementeros y de los sindicatos CCOO del Hábitat y UGT FICA, Federación de Industria, Construcción y Agro.

**Fecha**

Julio 2023

**Editado por**

Fundación CEMA

C/ José Abascal, 53 – 1º planta. 28003 Madrid

[www.fundacioncema.org](http://www.fundacioncema.org)

**Sobre Fundación CEMA**

La Fundación Laboral del Cemento y el Medio Ambiente es una organización paritaria de ámbito estatal y de carácter tripartito, de la que forma parte la patronal del cemento OFICEMEN y los dos sindicatos mayoritarios del sector, CCOO del Hábitat y UGT FICA, Federación de Industria, Construcción y Agro.

La Fundación CEMA es una iniciativa pionera en la industria cementera europea que trabaja en los ámbitos de la sostenibilidad, la prevención de riesgos laborales y la economía circular.



# ÍNDICE

<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>6</b>
<b>ANTECEDENTES</b>	<b>7</b>
2.1. Planteamiento del estudio	8
2.1.1. Selección de los tipos de residuos	9
2.1.2. Método de determinación	10
<b>TRATAMIENTO Y ANÁLISIS DE MUESTRAS</b>	<b>11</b>
3.1. Envío y codificación de muestras	11
3.2. Tratamiento de muestras	11
3.3. Análisis de muestras	13
3.3.1. Espectrometría de fluorescencia de rayos X (FRX)	14
3.3.2. Espectroscopía de emisión con fuente de plasma de acoplamiento inductivo (ICP)	14
<b>RESULTADOS</b>	<b>15</b>
4.1. Análisis de cenizas	16
4.2. Vehículos fuera de uso	19
4.3. Lodos de depuradora	21
4.4. Harinas cárnicas	23
4.5. Combustible derivado de residuos industrial	24
4.6. Combustible derivado de residuos urbano	28
4.7. Maderas	30
<b>ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD</b>	<b>32</b>
5.1. Variabilidad de los análisis	32
5.2. Determinaciones con 4 óxidos	35
<b>RESUMEN DE RESULTADOS</b>	<b>38</b>
<b>CONCLUSIONES</b>	<b>41</b>
<b>REFERENCIAS</b>	<b>43</b>



# INTRODUCCIÓN

El estudio **“Coprocesado: Recuperación material de la fracción mineral de los combustibles derivados de residuos en la industria cementera”** ha sido impulsado por la Fundación Laboral del Cemento y el Medio Ambiente (en adelante Fundación CEMA), con el objetivo principal de determinar el porcentaje de reciclado material, cuantificando el contenido mineral presente en seis de las principales tipologías de combustibles alternativos empleados en la industria cementera: combustibles derivados de residuos de origen urbano e industrial, harinas cárnicas, madera, vehículos fuera de uso y lodos de depuradora.

Para el planteamiento, diseño y ejecución del estudio se constituyó en el marco de la Fundación CEMA un grupo de trabajo paritario formado por técnicos de los grupos cementeros aglutinados en OFICEMEN y por técnicos de los sindicatos CCOO del Hábitat y UGT FICA.

El presente informe técnico ha sido elaborado por el Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones (IECA) y por la Universidad Politécnica de Madrid (UPM), en virtud del convenio de colaboración firmado entre la Fundación CEMA y la citada Universidad. El documento incluye los resultados de las analíticas de los residuos realizados por LOEMCO (laboratorio oficial para ensayo de materiales de construcción), para las seis tipologías de residuos mencionadas.

**La Fundación CEMA quiere agradecer especialmente la colaboración de todas las fábricas de cemento, que han permitido disponer de las muestras de residuos necesarias para la realización de las analíticas incluidas en el presente estudio.**



## ANTECEDENTES

Hablamos de **“coprocesado”**, cuando se produce un doble aprovechamiento material y energético de los residuos en la misma operación. En la [Directiva 2018/851, de 30 de mayo de 2018, por la que se modifica la Directiva 2008/98/CE sobre los residuos](#), se señala expresamente que *“La Comisión evaluará la tecnología de coprocesamiento que permite la incorporación de minerales en el proceso de coincineración de residuos municipales. Cuando se disponga de un método fiable, la Comisión examinará, como parte de esta revisión, si dichos minerales pueden contabilizarse para los objetivos de reciclado”*.

El concepto de *“coprocesado”*, entronca también con la [Estrategia Española sobre Economía circular “España circular 2030”](#) aprobada en junio del 2020, que marca, entre otros objetivos, que para el año 2030 se debe reducir en un 30 % el consumo nacional de materiales en relación con el PIB y reducir la generación de residuos en un 15 % respecto a lo generado en 2010.

En este sentido el ejemplo mejor documentado técnicamente de recuperación simultánea, tanto material como energética de un residuo en el sector cementero español, lo encontramos en los neumáticos fuera de uso. El alto poder calorífico del caucho se utiliza como sustituto de combustibles (valorización energética) y los componentes inertes (principalmente hierro y aluminio), como sustitutos de materias primas (valorización material). Así, en el documento [“Estudio del coprocesado de NFU en fábricas de cemento”](#), elaborado en el año 2017 por los dos sistemas colectivos de responsabilidad ampliada de productor de neumáticos fuera de uso, SIGNUS y TNU, con la colaboración de la Fundación Gómez Pardo, OFICEMEN y Fundación CEMA, se cuantificó en un 24,66 % la contribución al reciclado material cuando se coprocesan neumáticos fuera de uso en el horno de una fábrica de cemento. En esa misma línea en abril del año 2018, el Ministerio de transición ecológica francés, comunicó a ALIAPUR (sistema colectivo de gestión de NFU francés), que a partir de 2018 ya se puede computar como valorización material el 23,75 %.

A nivel internacional, ya hay varios países que han incluido en su legislación una mención expresa al coprocesado. El primero fue Chile, mediante su [Decreto 29 del año 2013, que establece norma](#)

de emisión para incineración, coincineración y coprocesamiento, donde se dice textualmente: «Es así como se hace necesario incorporar el término “coprocesamiento” utilizado en el sector cementero, el cual se refiere a la recuperación de material y energía en el proceso de producción de clínker».

Otro ejemplo lo encontramos en Portugal, donde la Agencia Nacional de Medio Ambiente de Portugal (APA) ha aceptado la metodología del coprocesamiento y reconoce que se produce un doble aprovechamiento energético y material de los residuos; prueba de ello es que en el artículo 111 del Decreto-Lei n.º 102-D/2020, de régimen general de gestión de los residuos, los impuestos se ajustan de acuerdo con el reciclaje de materiales verificado de los residuos coprocesados.

Finalmente, la última mención al coprocesado la encontramos en el Décret relatif aux déchets, à la circularité des matières et à la propreté publique, aprobado el pasado 8 de marzo de 2023, en la región Valona (Bélgica) que cita textualmente: en el Chapitre 3, section 1 e Art. 30, 3º: «*promouvoir, favoriser et soutenir des innovations en matière de valorisation, notamment toute opération de valorisation consistant en une combinaison simultanée de recyclage et de récupération d'énergie à partir d'un flux de déchets dans un procédé de traitement thermique visant la fabrication de produits*».

Con estos antecedentes, lo que se pretende con el presente informe es conocer en detalle la contribución al reciclado material, de otras tipologías de residuos empleadas habitualmente en la industria cementera, más allá del ejemplo conocido de los NFU.

Esta información técnica se considera de vital importancia de cara al posicionamiento del coprocesado de residuos en fábricas de cemento como una opción dentro de la jerarquía de gestión de residuos de la UE por encima de la mera valorización energética.

## 2.1. PLANTEAMIENTO DEL ESTUDIO

Para la elaboración del estudio se ha contado con la participación de LOEMCO, la Escuela Técnica Superior de Minas de la Universidad Politécnica de Madrid, con los laboratorios de las fábricas de los grupos cementeros que han facilitado las muestras, bajo la coordinación técnica de IECA y la coordinación general de la Fundación CEMA.

El objetivo principal del estudio es determinar el índice de reciclado<sup>1</sup> de seis de las principales tipologías de residuos usados como combustibles alternativos en las fábricas de cemento españolas, mediante una metodología reconocida a nivel europeo.

---

<sup>1</sup> Recycled index o IR, ver 2.1.2.



### 2.1.1. Selección de los tipos de residuos

Los residuos han sido seleccionados considerando los siguientes criterios:

- Consumo actual agregado y potencial de consumo futuro. Proporción relativa de consumo de cada tipología.
- Potenciales tasas de índice de reciclado y conocimiento relativo de las mismas dentro del sector.

La selección de los tipos de residuos se resume en la siguiente figura. La columna de la derecha representa el número de muestras recogidas por cada tipo.






	<b>CDRU de origen urbano y CDRI de origen industrial</b> Consumo 2021: 341.085 t Cantidad potencial: >1.000.000 t/año	8+23
	<b>Harinas animales, HC</b> Consumo 2021: 95.753 t Cantidad potencial: >130.000 t/año	11
	<b>Lodos de depuradora, LD</b> Consumo 2021: 14.442 t Cantidad potencial: >100.000 t/año	7 <sup>2</sup>
	<b>Vehículos fuera de uso, VFU</b> Consumo 2021: 34.309 t Cantidad potencial: >70.000 t/año	8
	<b>Madera, MD</b> Consumo 2021: 44.769 t Cantidad potencial: 150.000 t/año	6

Figura 1. Tipos de residuos seleccionados

<sup>2</sup> Enviadas en dos tandas, 4 en enero y 3 en febrero 2022.

## 2.1.2. Método de determinación

El índice de reciclado se basa en la metodología propuesta en el artículo<sup>3</sup> *Determination of the material-recyclable share of SRF during co-processing in the cement industry*, publicado en Resources, Conservation & Recycling en 2020.

La metodología descrita en el artículo se basa en determinar el índice de reciclado, como un porcentaje de la contribución de la fracción mineral presente en las cenizas del combustible utilizado en la fabricación de cemento de acuerdo con la siguiente fórmula:

$$R - index_9[\% (d)] = \frac{AC}{100} * \frac{c_{Al_2O_3} + c_{CaO} + c_{Fe_2O_3} + c_{K_2O} + c_{MgO} + c_{Na_2O} + c_{SO_3} + c_{SiO_2} + c_{TiO_2}}{10000}$$

Donde los sumandos  $c_1$ ,  $c_2$ ,  $c_n$ , en el numerador, son las fracciones en peso de los distintos óxidos presentes en la fracción de cenizas del residuo en cuestión. En la fórmula se presentan 9 óxidos.

La consideración de qué óxidos pueden ser considerados en la fórmula, se han extendido en el tiempo en el seno del<sup>4</sup> ISO/TC 300 WG5, que es el comité encargado de la redacción de la norma ISO CD 4349 *Solid Recovered Fuels. Determination of the Recycling-Index for co-processing*. Existen dos posibilidades: 9 y 4 óxidos. Ambas posibilidades<sup>5</sup> han sido consideradas en este estudio.

La norma ISO CD 4349 establece una serie de pasos para llegar a la determinación del Índice de Reciclado, IR.

En primer lugar, determinar el contenido de cenizas de acuerdo con lo indicado en la norma<sup>6</sup> UNE-EN-ISO 21656.

Y, en segundo lugar, determinar el contenido elemental y los consiguientes óxidos mediante dos técnicas de análisis: espectrometría de fluorescencia de rayos X (FRX) o espectroscopía de emisión con fuente de plasma de acoplamiento inductivo (ICP).

Los análisis de óxidos se han llevado a cabo mediante la técnica de FRX<sup>7</sup> y para algunas muestras se ha realizado un contraste mediante ICP. Adicionalmente se realizó un contraste mediante el método de la EN 196-2<sup>8</sup> para las determinaciones de  $SO_3$ .

3 Determination of the material-recyclable share of SRF during co-processing in the cement industry. S.A. Viczek, A. Aldrian, R. Pomberger, R. Sarc. Resources, Conservation & Recycling 156 (2020) 104696.

4 ISO - ISO/CD 4349 - Solid recovered fuels — Method for the determination of the Recycling-Index.

5 Una reseña completa sobre los óxidos considerados puede encontrarse el apartado 4.

6 UNE-EN ISO 21656:2021 Combustibles sólidos recuperados. Determinación del contenido de ceniza.

7 El análisis de  $SO_3$  ha sido llevado a cabo por ICP

8 UNE-EN 196-2. Métodos de ensayo de cementos. Análisis químico de cementos



## TRATAMIENTO Y ANÁLISIS DE MUESTRAS

En los siguientes epígrafes se presentan tanto las actividades de recepción, codificación y, envío de las muestras al laboratorio, como el tratamiento de las mismas realizadas por LOEMCO-Laboratorio Oficial de Ensayo de Materiales de Construcción.

### 3.1. ENVÍO Y CODIFICACIÓN DE MUESTRAS

Ocho grupos cementeros han contribuido a la selección y envío de las muestras utilizadas en las fábricas, de acuerdo al protocolo de toma de muestras diseñado al efecto y de acuerdo a los siguientes criterios:

- Selección de las muestras por proveedor tomadas en el lugar más cercano al suministro, acopio, silo o incluso camión, evitando mezclar distintas procedencias.
- Las muestras se cuartearán para lograr la máxima representatividad en los 5 kg de muestra enviadas.
- Las muestras se embolsarán, embridarán, etiquetarán y remitirán a la Fundación CEMA, para codificación y envío de forma anónima, para garantizar la total confidencialidad y posteriormente el laboratorio LOEMCO, que se encargará de su tratamiento y análisis.

### 3.2. TRATAMIENTO DE MUESTRAS

La Fundación CEMA procedió a la recepción y codificación de un total de 63 muestras de residuos las cuales se recibieron en el laboratorio en su mayoría durante el mes de enero, a excepción de 3 muestras de lodos que se recibieron en el mes de febrero de 2022.

Las muestras fueron enviadas al laboratorio en bidones de plástico de distintos tamaños o en sacos de plástico, todos ellos correctamente cerrados y sin presentar pérdidas de muestra.

Para obtener la porción de cada muestra para su análisis se siguieron los pasos descritos en la norma UNE-EN 15443:2011 *Combustibles sólidos recuperados. Métodos para la preparación de la muestra del laboratorio*.

La norma UNE-EN 15410 *Combustibles sólidos recuperados. Método para la determinación del contenido en elementos principales (Al, Ca, Fe, K, Mg, Na, S, Si, Ti)* establece en su primer apartado que la técnica de fluorescencia de rayos X (FRX) es válida para la determinación de los elementos principales (Al, Ca, Fe, K, Mg, Na, S, Si, Ti) y sus óxidos. El paso previo que aquí describe la norma tiene como objetivo calcinar una submuestra representativa de cada combustible sólido recuperado (CSR), con el fin de obtener una ceniza homogénea para su posterior análisis por FRX.

El primer paso de la preparación fue conseguir una submuestra de aproximadamente 1 kg, representativa de la muestra original recibida. En un segundo paso, y a partir de esta submuestra, se extrajo una muestra para análisis representativa, que sería la que en un tercer y último paso se procesaría para su calcinación y posterior análisis de la ceniza resultante.

Para el primer paso se siguieron las indicaciones descritas en el capítulo 8 de la norma UNE-EN 15443 sobre división de muestras. Las muestras de lodos, maderas y harinas pudieron dividirse con cuarteadores de ranuras. Las muestras de CDR y VFU tuvieron que ser divididas por apilamiento en cono y cuarteado, ya que la forma y tamaño de las partículas de estos materiales dificultaba el cuarteo con cuarteadores de ranuras.

En todo momento se mantuvo la precaución de homogeneizar bien las muestras, incluso en aquellas que presentaban un contenido en finos en el fondo del bidón o del saco.

Todas las submuestras representativas de cada muestra de residuo se pesaron y se secaron durante 24 h a 100 °C para determinar su humedad y trabajar en el siguiente paso con muestras secas. Las muestras de harinas y lodos pudieron cuartearse en el laboratorio de química hasta obtener unos 100 g como porción para análisis.

Las submuestras representativas de CDR urbano, CDR industrial, maderas y VFU necesitaron tareas de corte y molienda para obtener una porción de 100 a 300 g para análisis.

Con los molinos de anillos y bolas, que el laboratorio emplea para preparar muestras convencionales, no fue suficiente para la obtención de una porción final para análisis suficientemente representativa, por lo que fue necesario emplear previamente batidoras de vaso y molinillos de café doméstico, para conseguir una granulometría homogénea de todas ellas. Este hecho hizo que en muchas de las muestras este proceso fuera lento y costoso.

Las muestras de VFU, están constituidas por partículas grandes de hasta 100 mm aproximadamente y de materiales muy heterogéneos como plásticos, gomas, textil, trozos de neumáticos fuera de uso (NFU), etc., por lo que no pudieron cortarse con las batidoras ni el molinillo. Con los VFU, a partir de la submuestra representativa de la muestra original, se procedió a pesar el conjunto y posteriormente cada partícula. En función del peso relativo de cada partícula sobre el total de la submuestra, se procedió a cortar con cuchilla una porción de cada partícula proporcional a su peso relativo en el conjunto. Con la fracción de cada partícula se conformó una porción para calcinar de unos 200 g.

Las porciones para análisis así obtenidas se calcinaron a 550 °C tal y como se indica en el apartado 5 de la norma<sup>9</sup> UNE-EN 15410.

El material resultante (cenizas) de cada calcinación se molió nuevamente con un molino vibratorio de anillos hasta su paso completo por el tamiz de 100 µm. Las muestras originalmente recibidas así preparadas se consideraron libres de su parte orgánica, quedando las cenizas constituidas únicamente por la parte mineral.

Las muestras una vez preparadas se embolsaron en sobres de plástico con autocierre e introducidas en botes de plástico con tapa.

### 3.3. ANÁLISIS DE MUESTRAS

Las 63 muestras preparadas por LOEMCO, según la descripción anterior hasta obtener las cenizas de cada uno de los CDR<sup>10</sup>, fueron enviadas para su análisis a un laboratorio acreditado según la ISO/IEC 17025:2017 para ser analizadas por FRX o ICP<sup>11</sup>.

Una vez se analizaron los resultados obtenidos por FRX se decidió analizar por la técnica de espectrometría de emisión con plasma acoplado inductivamente (ICP) una muestra representativa de cada tipo de combustible derivado de residuos, analizando por esta vía un total de 6 muestras. El objetivo de este análisis adicional fue comprobar la influencia de la técnica de análisis en los resultados obtenidos inicialmente por FRX<sup>12</sup>, así como acotar las variabilidades observadas en el análisis de algunos óxidos.

---

9 UNE-EN 15410:2012 Combustibles sólidos recuperados. Método para la determinación del contenido en elementos principales (Al, Ca, Fe, K, Mg, Na, P, Si, Ti).

10 Combustibles derivados de residuos.

11 Una reseña completa de las técnicas de análisis se presenta en 3.3.1 y 3.3.2.

12 En el caso del SO<sub>3</sub> el contraste es entre ICP y el método de la EN 196-2 por ser un análisis muy común en la evaluación de la conformidad de los cementos.

### 3.3.1. Espectrometría de fluorescencia de rayos X (FRX)

La técnica de fluorescencia de rayos X permite medir la longitud de onda y la intensidad de luz (rayos X) emitida por los átomos de cada elemento excitado en la muestra. Mediante un tubo de rayos X, se irradia la muestra con un haz de rayos X primario provocando la emisión de rayos X fluorescentes con energía de radiación característica para cada elemento contenido en la muestra. Ello permite conocer los elementos presentes en la muestra y su concentración.

Una porción de cada muestra de ceniza procedente de CSR se funde con un fundente que también incluye un agente oxidante. La mezcla se vierte en un molde de platino y el disco resultante se analiza con el equipo de FRX. El análisis por FRX se complementa junto con una pérdida por ignición a 1000 °C. Los datos resultantes de ambas determinaciones se combinan para presentar un cierre total de los elementos contenidos en cada muestra de ceniza.

Mediante esta técnica de análisis, y a partir de la determinación de los elementos presentes en cada ceniza, se calculan los óxidos mayoritarios de cada elemento ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{SO}_3$ ,  $\text{SiO}_2$  y  $\text{TiO}_2$ ) contenidos en las muestras de ceniza de todos los CSR analizados.

### 3.3.2. Espectroscopía de emisión con fuente de plasma de acoplamiento inductivo (ICP)

La espectroscopía de emisión atómica con plasma de acoplamiento inductivo con detector óptico (ICP-OES), es otra técnica de análisis multielemental capaz de determinar y cuantificar los elementos objeto de la norma UNE-EN 15410. El plasma de acoplamiento inductivo (ICP) es una fuente de ionización que junto a un espectrofotómetro de emisión óptico (OES) constituye el equipo de ICP-OES.

En este caso la porción de muestra debe llevarse a estado líquido para poder ser analizada por el equipo de ICP. Para ello, la porción de cada ceniza preparada se mezcla con un fundente y se funde en un horno a 1000 °C. A continuación, la masa fundida resultante se enfría y se disuelve con ácido.

La muestra líquida se introduce de forma continua en el sistema de nebulización del equipo de ICP, formando un aerosol que es transportado por gas Argón a la antorcha del plasma. Gracias a la alta temperatura del plasma, los analitos son atomizados e ionizados generándose los espectros de emisión atómicos de líneas características. Los espectros son dispersados por la red de difracción y el detector sensible a la luz se encarga de medir las intensidades de cada línea. El software del equipo relaciona estas intensidades con cada elemento y su concentración.

Al igual que para el caso de FRX, la concentración de cada óxido se calcula a partir de cada concentración elemental determinada.



## RESULTADOS

La siguiente gráfica representa los distintos tipos de muestras analizadas de un total de 63.

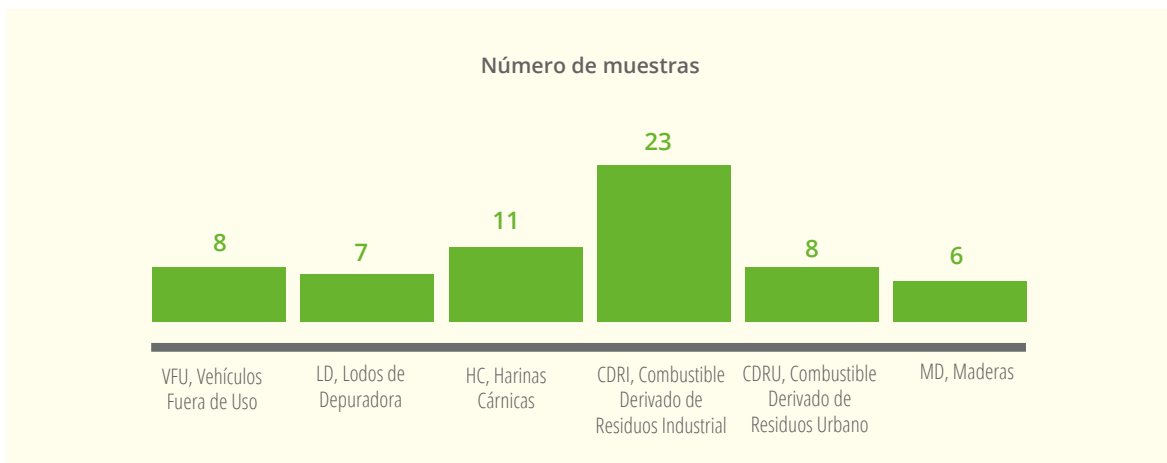


Figura 2. Tipos de residuos analizados

El índice de reciclado se calcula a partir de la contribución de 9 óxidos en la fracción de cenizas en el combustible. La norma ISO CD 4349 permite que este cálculo pueda hacerse con los nueve óxidos citados o con sólo 4, los señalados en verde en la tabla siguiente.

Tabla 1. Óxidos a considerar

$Al_2O_3$	$CaO$	$Fe_2O_3$	$K_2O$	$MgO$	$Na_2O$	$SO_3$	$SiO_2$	$TiO_2$
-----------	-------	-----------	--------	-------	---------	--------	---------	---------

La comparativa entre los resultados considerando 4 o 9 óxidos se presentan en el apartado 5.

Los resultados que se incluyen a continuación se han calculado con 9 óxidos determinados mediante la técnica de FRX.

Todos los óxidos de la tabla 1 están presentes en el clínker por lo que sus contribuciones son completamente necesarias para la fabricación del clínker portland. Una reseña completa de la composición del clínker, incluidos óxidos adicionales como los óxidos de Manganeso,  $Mn_2O_3$  y el  $SO_3$  pueden encontrarse en la tabla 4.3 de la bibliografía de referencia manejada en este estudio<sup>13</sup>.

## 4.1. ANÁLISIS DE CENIZAS

En primer lugar ha de realizarse la determinación de cenizas. Los contenidos de cenizas por tipo de residuo se presentan en la siguiente gráfica.

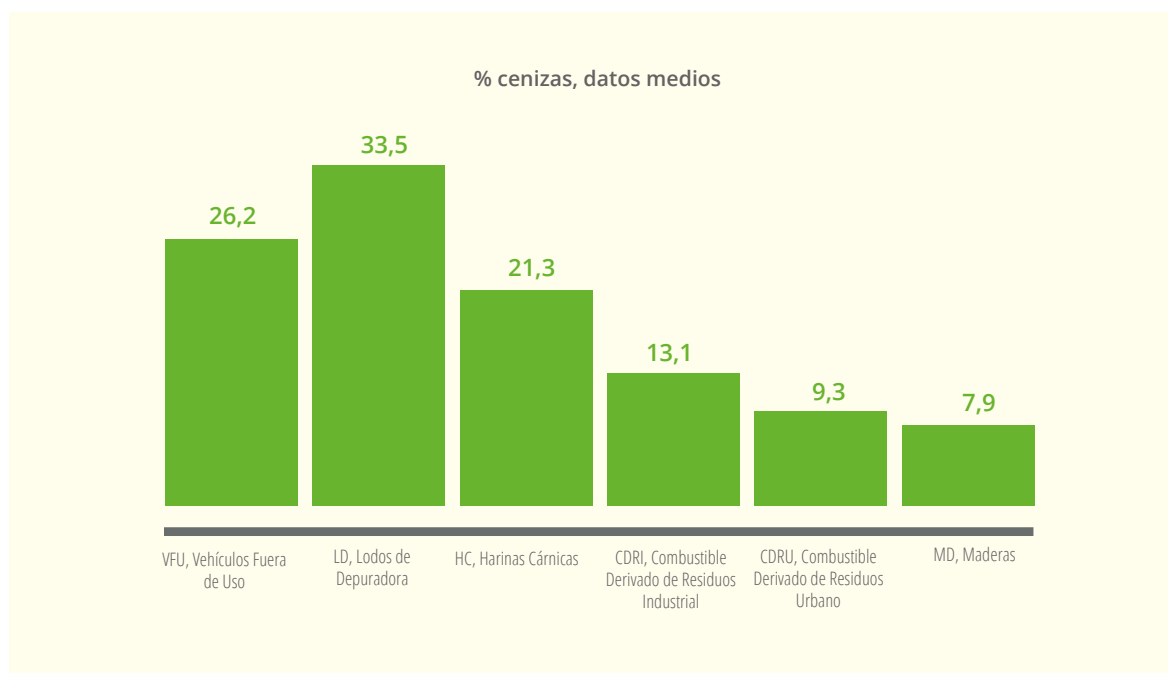


Figura 3. Contenidos de cenizas por tipo de residuo

Los contenidos de cenizas varían por tipo de residuo. Los lodos de depuradora y los vehículos fuera de uso presentan contenidos de ceniza en un rango de 27 al 32 %, por su parte los dos tipos de CDR y las maderas presentan contenidos menores del 15 %.

Los datos individuales de cenizas por tipos de residuos se presentan en la siguiente figura.

13 Cement Chemistry. HFW Taylor. Thomas Telford, 1990.



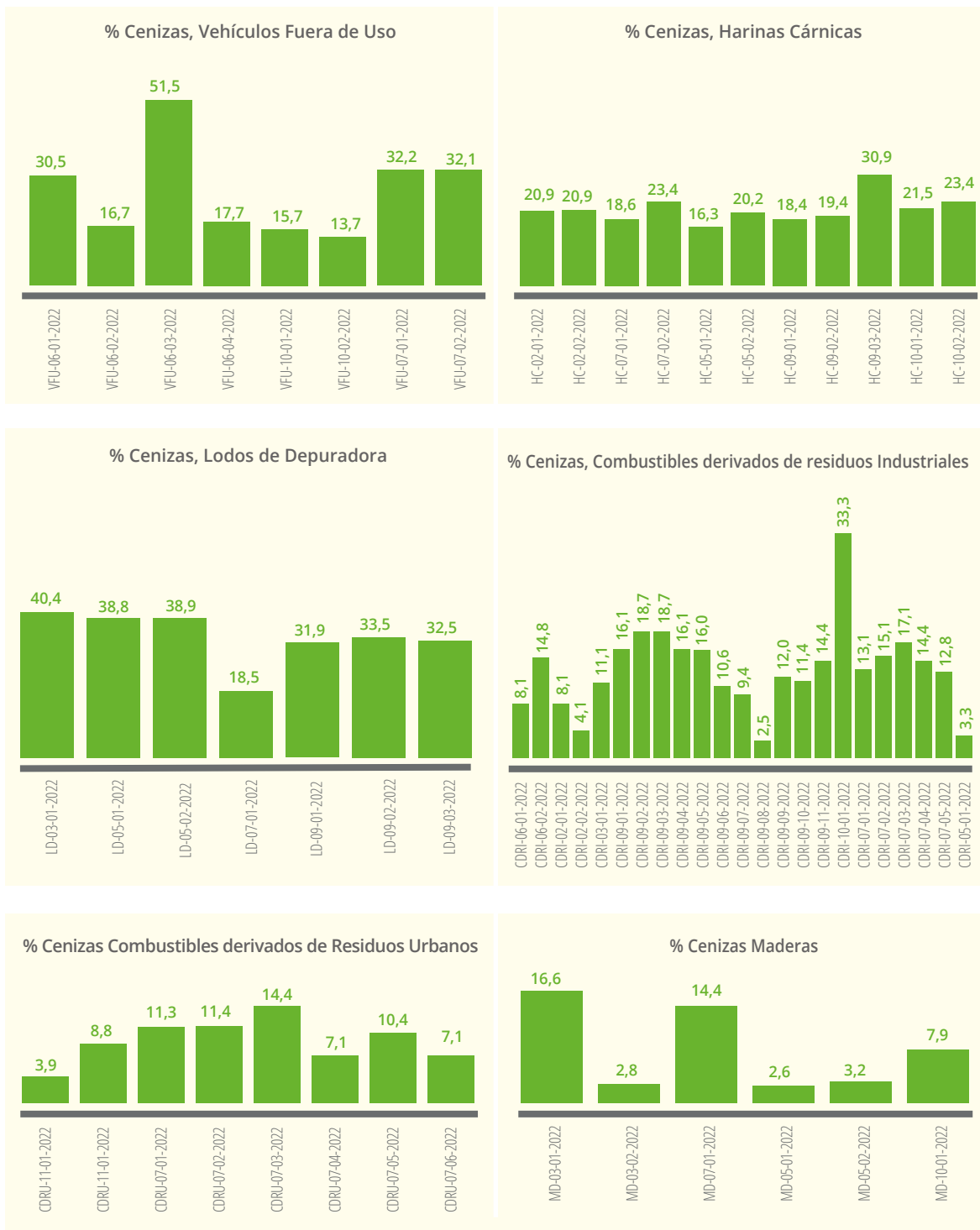


Figura 4. Datos individuales de los contenidos de cenizas

Puede comprobarse gráficamente que la variabilidad del contenido de cenizas dentro de un mismo tipo de residuos no es despreciable; esta cuestión se analizará con detalle más adelante. En cualquier caso, los rangos de composición de los porcentajes de cenizas encontrados son compatibles con las cifras analizadas en la literatura científica (6,1 % - 33,8 %).

El índice de reciclado está directamente correlacionado con el contenido de cenizas, por lo que el contenido de cenizas es un indicador de cuál va a ser en términos relativos al IR de cada tipo de residuo considerado. La correlación se aprecia muy claramente en el siguiente diagrama:

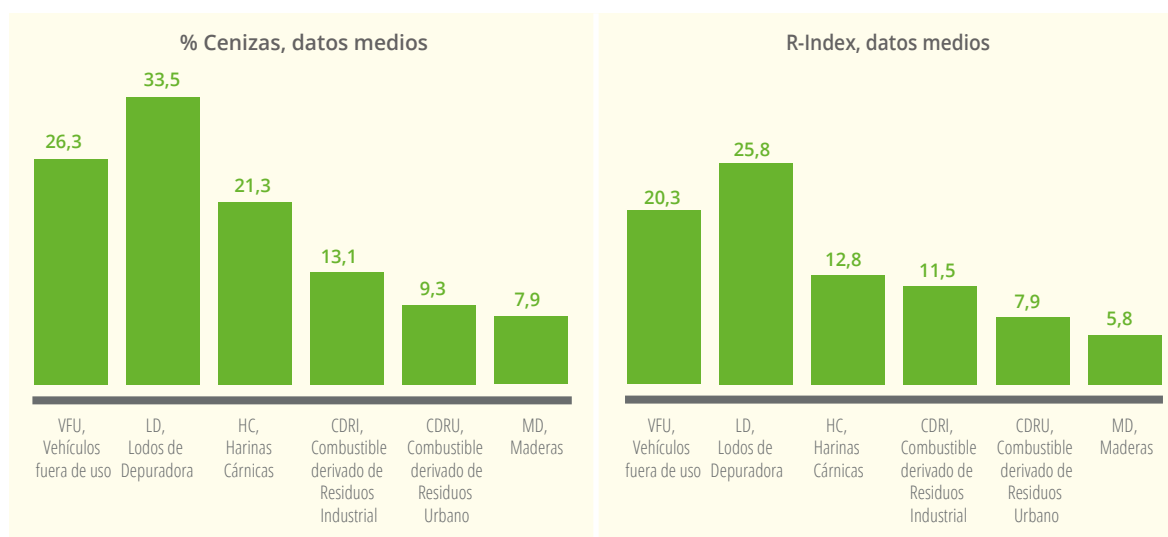


Figura 5. Correlación entre contenido de cenizas e IR

Para cada tipo de residuo y para cada muestra, el contenido de cenizas de la muestra seca se ha incluido en las tablas de resultados con la nomenclatura *Ash*.

A continuación, en los siguientes epígrafes se analizarán separadamente los valores de los óxidos contenidos de cenizas e IR, para cada uno de los grupos de residuos.

Con carácter general, el análisis de datos muestra la variabilidad de resultados que hayan podido obtenerse y cómo éste se relaciona con la variabilidad de las muestras. La variabilidad obtenida puede relacionarse con alguna o varias de estas causas:

- Diferente contenido de cenizas de la muestra. Esto puede deberse, en general, a un contenido mayor de finos en forma de residuo sólido en la muestra.
- Por una posible diferente clasificación del residuo en su categoría o por aparentes mezclas de residuos.

- Por una diferenciación visual clara en la muestra. Ya sea por la granulometría de la misma, o por diferencias en su composición y naturaleza.

Dichas diferencias observables se discutirán y presentarán a lo largo del informe. Estas muestras con una mayor variabilidad corresponden a diferentes proveedores y, por tanto, orígenes y métodos de tratamiento en cada una de las plantas suministradoras. Cada corriente de residuos cuenta con criterios de aceptación definidos en cada fábrica, y son explicadas fundamentalmente por la existencia de diferentes proveedores y por estar dentro de los rangos de los criterios de aceptación definidos. Es decir, se acepta como una realidad intrínseca al residuo y a su sistemática de gestión, las variabilidades encontradas en este estudio.

A continuación, se realiza el análisis por tipo de residuo.

## 4.2. VEHÍCULOS FUERA DE USO

Los valores de óxidos medidos mediante fluorescencia de rayos X, FRX<sup>14</sup>, contenido de cenizas e índice de reciclado, RI, se presentan en la siguiente tabla. En esta tabla y siguientes la muestra en azul es la que se ha repetido con la técnica ICP. Una comparativa entre estas dos técnicas se realiza en el apartado 5.1.

Tabla 2. Valores para las muestras de vehículos fuera de uso

		Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	CaO (%)	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	K <sub>2</sub> O (%)	MgO (%)	Na <sub>2</sub> O (%)	SO <sub>3</sub> (%)	SiO <sub>2</sub> (%)	TiO <sub>2</sub> (%)	ASH (%)	RI
VFU-06-01-2022	Fábrica 5.1	1,76	20,10	3,61	0,25	2,33	0,46	2,18	11,57	0,94	30,51	<b>13,18</b>
VFU-06-02-2022	Fábrica 5.1	5,79	23,10	4,25	0,33	10,40	0,71	2,16	31,63	2,57	16,68	<b>13,50</b>
VFU-06-03-2022	Fábrica 5.1	6,88	14,20	19,35	0,82	3,19	3,47	0,96	35,91	1,22	51,49	<b>44,28</b>
VFU-06-04-2022	Fábrica 5.1	6,01	17,00	8,91	0,49	7,14	0,95	2,68	39,33	1,20	17,73	<b>14,84</b>
VFU-10-01-2022	Fábrica 9.1	4,24	21,20	6,72	0,30	2,58	0,27	4,68	35,78	1,48	15,65	<b>12,09</b>
VFU-10-02-2022	Fábrica 9.1	3,74	15,90	1,72	0,32	11,55	0,48	5,47	30,05	1,23	13,65	<b>9,62</b>
VFU-07-01-2022	Fábrica 6.1	8,78	17,75	15,82	1,43	3,29	1,60	1,70	31,60	1,28	32,17	<b>26,78</b>
VFU-07-02-2022	Fábrica 6.1	10,60	17,70	15,63	1,40	3,00	1,75	1,54	33,13	1,34	32,14	<b>27,67</b>

14 Las determinaciones de SO<sub>3</sub> se han realizado mediante ICP, esto es así para todos los tipos de residuos.

Gráficamente se detectan tres patrones diferentes en los resultados. En naranja oscuro, una muestra con un índice de reciclado mayor que las restantes. En verde oscuro, muestras aparentemente mezcladas con CDR. Las muestras en amarillo se han identificado como plásticos de fragmentadora.

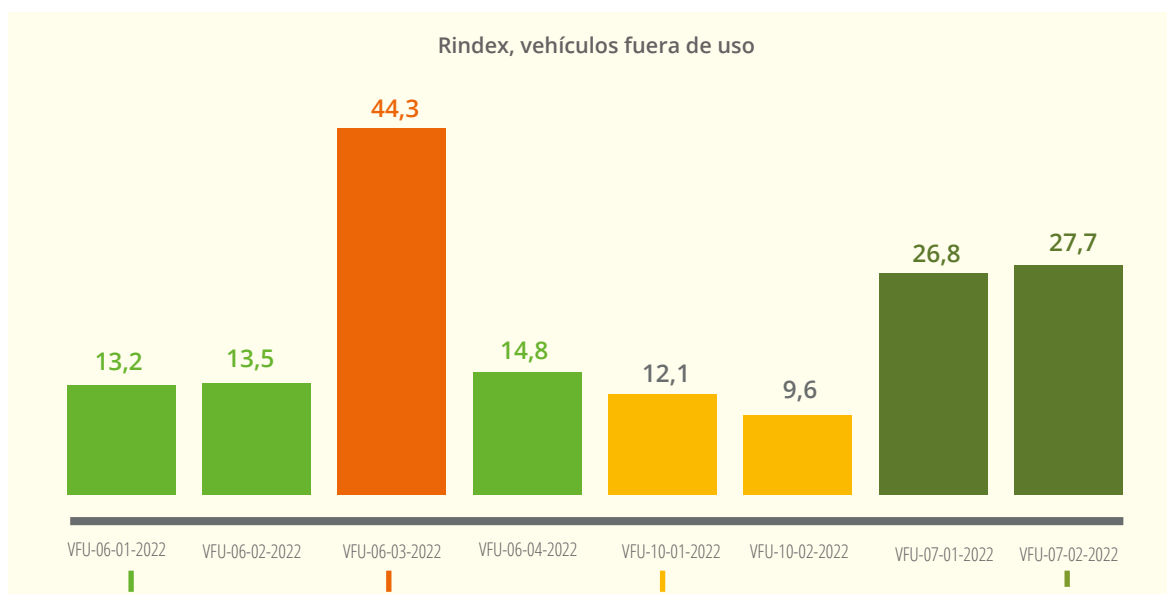


Figura 6. Resultados de IR en vehículos fuera de uso (VFU)

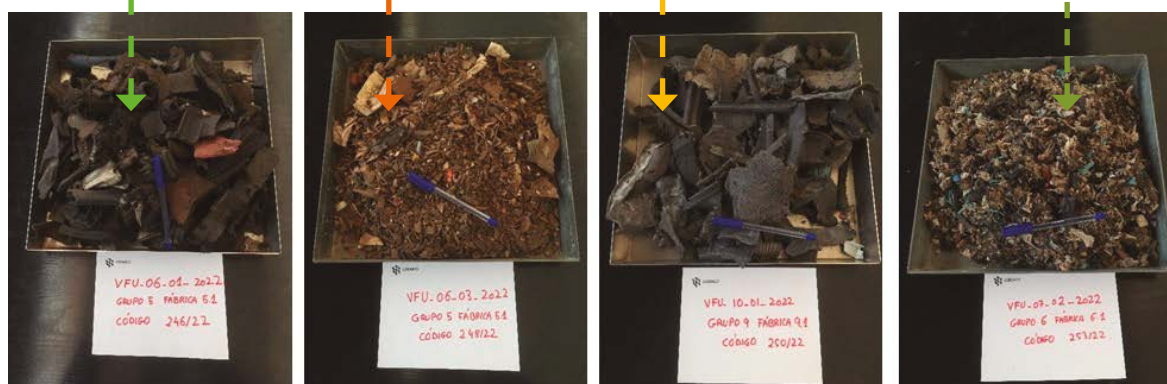


Figura 7. Imágenes de las muestras de vehículos fuera de uso (VFU)

La muestra VFU-06-03-2022 posee un valor contenido de cenizas mucho mayor que el resto de los componentes de la muestra. Visualmente se trata de una muestra significativamente distinta de las restantes. La muestra corresponde a la segunda de las fotografías de la figura 7, con aparentemente un contenido en finos mucho mayor. La muestra correspondiente a plásticos de fragmentadora corresponde a la última por la derecha de las fotografías anteriores.

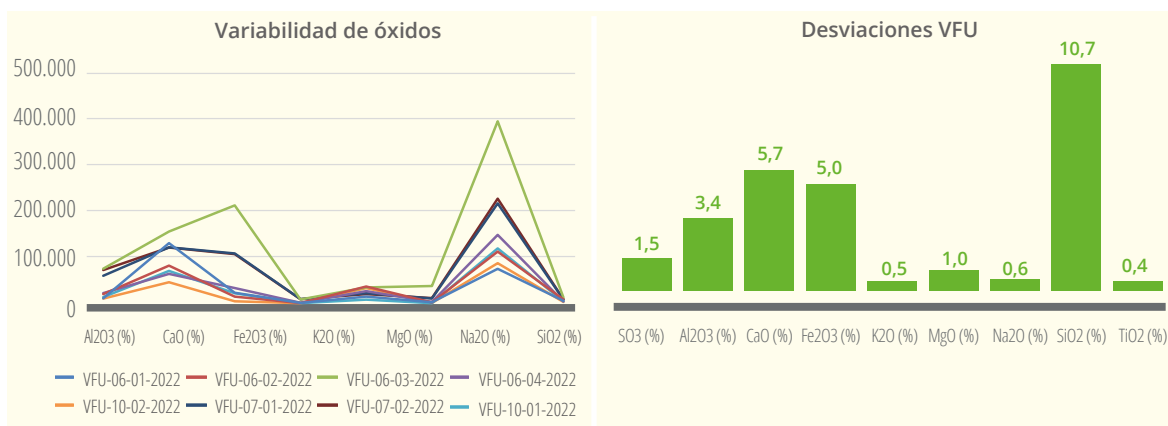


Figura 8. Variabilidad de resultados individuales y desviación típica de las determinaciones

La dispersión de los análisis correspondientes a cada uno de los óxidos no es alta, excepto en el caso del óxido de silicio cuya desviación es más alta que en el resto de los óxidos. El análisis de las dispersiones se analizará posteriormente de manera conjunta.

En relación con el conjunto de datos, el valor que podría considerarse atípico se decidió repetirlo mediante la técnica de análisis ICP. Los resultados han repetido satisfactoriamente obteniéndose valores del RI de 43,9 por FRX y 42,26 por ICP. Los valores encontrados para los óxidos fueron igualmente muy similares, ver primera gráfica del apartado 5.1.

### 4.3. LODOS DE DEPURADORA

Los valores de óxidos medidos mediante fluorescencia de rayos X, FRX, contenido de cenizas e índice de reciclado, RI, se presentan en la siguiente tabla.

Tabla 3. Valores para las muestras de lodos de depuradora (LD)

		Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	CaO (%)	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	K <sub>2</sub> O (%)	MgO (%)	Na <sub>2</sub> O (%)	SO <sub>3</sub> (%)	SiO <sub>2</sub> (%)	TiO <sub>2</sub> (%)	Ash	RI
LD-03-01-2022	Fábrica 2.1	12,20	22,70	11,68	1,82	3,63	0,97	3,60	24,95	0,88	40,38	<b>33,28</b>
LD-05-01-2022	Fábrica 4.1	11,51	22,10	10,98	1,86	3,84	1,09	4,98	21,84	0,95	38,79	<b>30,70</b>
LD-05-02-2022	Fábrica 4.1	11,74	22,70	10,85	1,92	3,87	1,11	4,14	22,44	0,98	38,87	<b>31,00</b>
LD-07-01-2022	Fábrica 6.1	9,99	22,00	9,59	2,67	4,97	1,80	3,11	15,16	0,88	18,49	<b>12,97</b>
LD-09-01-2022	Fábrica 8.4	9,81	23,30	13,04	1,78	3,95	1,06	1,14	21,14	1,03	31,92	<b>24,34</b>
LD-09-02-2022	Fábrica 8.4	10,06	21,60	10,52	1,90	3,51	1,11	5,37	22,06	0,95	33,51	<b>25,83</b>
LD-09-03-2022	Fábrica 8.4	13,93	11,95	18,91	1,53	2,62	0,61	3,42	15,14	0,69	32,54	<b>22,38</b>

Los contenidos de ceniza y por tanto los índices de reciclado son uniformes, excepto en el caso de la muestra codificada como LD-07-01-2022. Comprobado el aspecto visual de esta muestra, efectivamente, su forma de presentación en forma fibrilar a modo de pequeños gusanos de lodo es bastante diferente al aspecto pulverulento de las restantes muestras. Esta muestra corresponde a la tercera de las fotografías de la imagen siguiente.



Figura 9. A la izquierda muestra en forma de fibrilar, a la derecha muestras pulverulentas

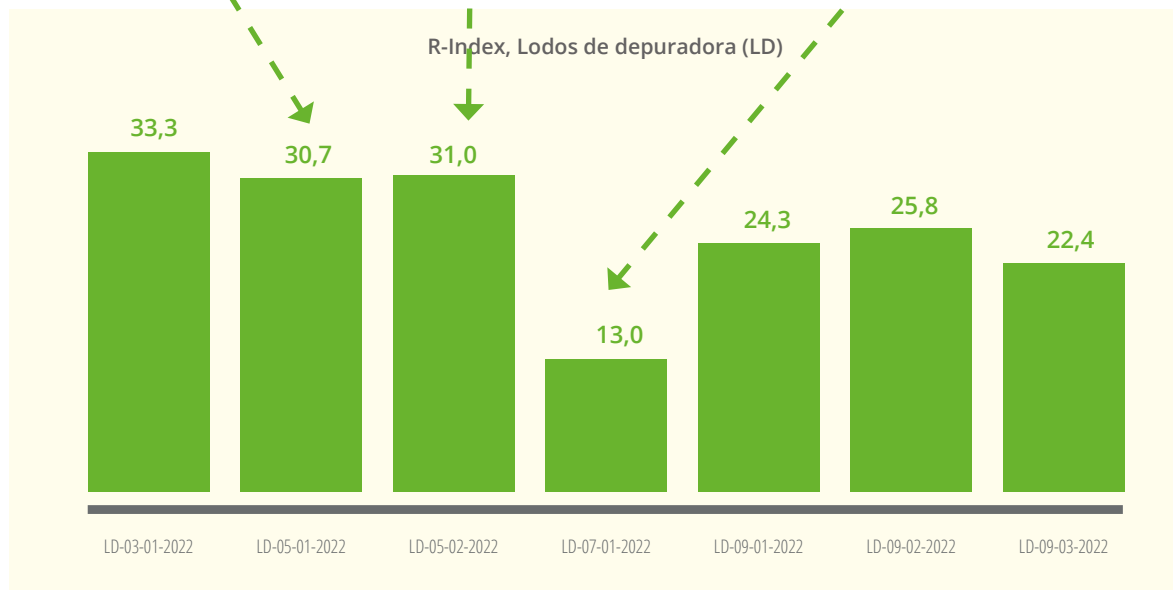


Figura 10. IR para lodos de depuradora (LD)

Gráficamente se ve que los valores obtenidos son bastante uniformes para todas las muestras con los índices de reciclado más altos del grupo en el rango del 30 al 35 %.

## 4.4. HARINAS CÁRNICAS

Los valores de óxidos medidos mediante fluorescencia de rayos X, FRX, contenido de cenizas e índice de reciclado, RI, se presentan en la siguiente tabla.

Tabla 4. Valores para las muestras de harinas cárnicas (HC)

		Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	CaO (%)	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	K <sub>2</sub> O (%)	MgO (%)	Na <sub>2</sub> O (%)	SO <sub>3</sub> (%)	SiO <sub>2</sub> (%)	TiO <sub>2</sub> (%)	Ash (%)	RI
HC-02-01-2022	Fábrica 1.1	0,88	40,90	0,63	5,00	1,49	4,63	1,15	6,76	0,08	20,89	<b>12,85</b>
HC-02-02-2022	Fábrica 1.1	0,32	47,00	1,02	3,67	1,31	3,10	0,73	3,54	0,03	20,94	<b>12,72</b>
HC-07-01-2022	Fábrica 6.2	0,42	40,50	3,76	5,19	1,51	4,31	0,68	3,99	0,02	18,55	<b>11,20</b>
HC-07-02-2022	Fábrica 6.3	0,41	45,50	0,75	3,32	1,22	4,02	0,72	3,79	0,06	23,39	<b>13,98</b>
HC-05-01-2022	Fábrica 4.2	0,67	40,50	0,90	6,27	1,68	4,96	0,62	5,60	0,03	16,30	<b>9,98</b>
HC-05-02-2022	Fábrica 4.2	0,72	41,10	1,87	4,36	1,56	4,51	1,21	5,66	0,04	20,23	<b>12,35</b>
HC-09-01-2022	Fábrica 8.1	0,71	40,10	0,55	5,37	1,58	4,52	0,77	5,89	0,40	18,43	<b>11,04</b>
HC-09-02-2022	Fábrica 8.1	1,13	42,70	1,06	3,84	1,40	4,02	0,75	7,25	0,12	19,43	<b>12,10</b>
HC-09-03-2022	Fábrica 8.1	0,04	49,60	0,23	1,60	1,30	2,84	0,43	0,97	0,01	30,90	<b>17,62</b>
HC-10-01-2022	Fábrica 9.2	0,85	40,30	0,72	4,80	1,44	4,28	0,97	6,32	0,06	21,51	<b>12,85</b>
HC-10-02-2022	Fábrica 9.1	0,99	41,40	0,84	3,63	1,10	3,51	0,58	6,72	0,11	23,41	<b>13,78</b>

Se encuentran valores muy uniformes para el IR excepto en la muestra 9 en el que el porcentaje de cenizas es ligeramente mayor (30,9 % frente una media de 21,27 %).

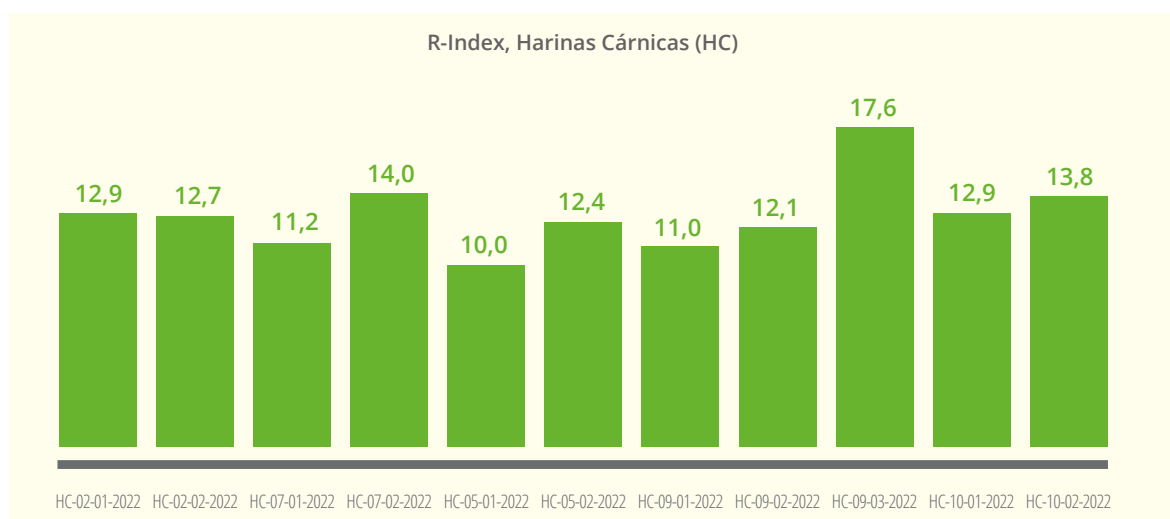
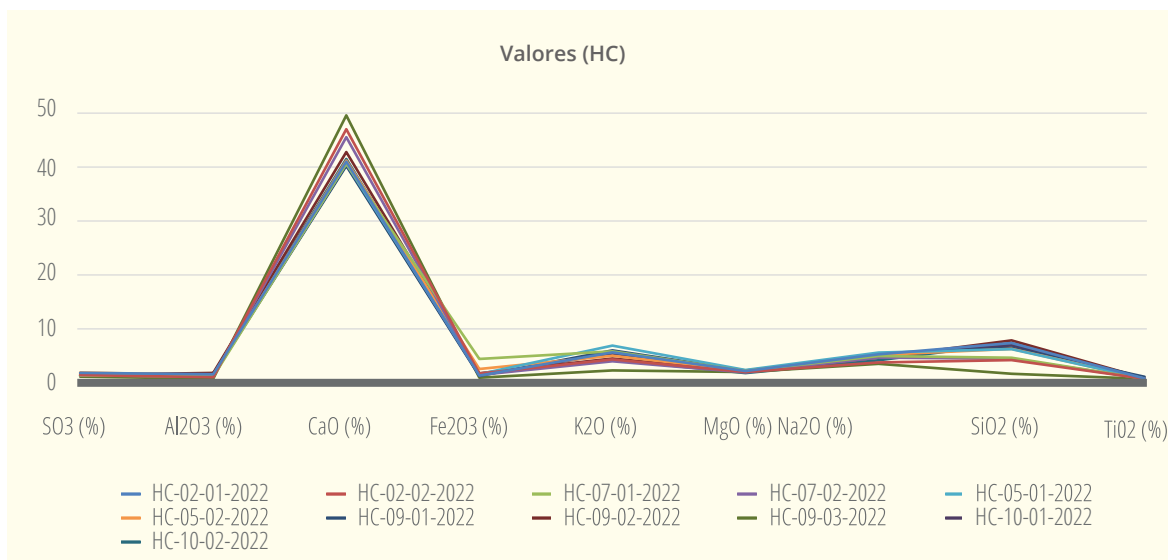


Figura 11. Valores de IR para harinas animales (HC)

El análisis de los datos estadísticos principales de los óxidos muestran rangos de variación y desviaciones acotadas excepto en el caso del óxido de calcio.

Tabla 5. Estadísticos para el análisis de óxidos en harinas animales (HC)

	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	CaO (%)	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	K <sub>2</sub> O (%)	MgO (%)	Na <sub>2</sub> O (%)	SO <sub>3</sub> (%)	SiO <sub>2</sub> (%)	TiO <sub>2</sub> (%)	CENIZAS (%)
<b>MAX</b>	1,13	49,60	3,76	6,27	1,68	4,96	1,21	7,25	0,40	30,90
<b>MIN</b>	0,04	40,10	0,23	1,60	1,10	2,84	0,43	0,97	0,01	16,30
<b>MED</b>	0,65	42,69	1,12	4,28	1,42	4,06	0,78	5,14	0,09	21,27
<b>DESV</b>	0,32	3,22	0,97	1,26	0,17	0,66	0,24	1,87	0,11	3,83



Gráficamente puede comprobarse la coincidencia en los resultados individuales de las muestras para todos los óxidos. Los contenidos de CaO son los mayores en términos relativos para este tipo de residuo.

## 4.5. COMBUSTIBLE DERIVADO DE RESIDUOS INDUSTRIAL

Los valores de óxidos medidos mediante fluorescencia de rayos X, FRX, contenido de cenizas e índice de reciclado, RI, se presentan en la siguiente tabla.



Tabla 6. Valores para las muestras de combustibles derivados de residuos de origen industrial (CDRI)

		Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	CaO (%)	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	K <sub>2</sub> O (%)	MgO (%)	Na <sub>2</sub> O (%)	SO <sub>3</sub> (%)	SiO <sub>2</sub> (%)	TiO <sub>2</sub> (%)	Ash (%)	Rindex
CDRI-06-01-2022	Fábrica 5.1	69,59 <sup>15</sup>	16,85	2,72	1,35	1,35	7,94	1,01	29,54	4,23	7,98	<b>10,72</b>
CDRI-06-02-2022	Fábrica 5.1	9,00	21,10	7,36	1,98	2,04	1,74	0,98	40,08	1,48	14,80	<b>12,64</b>
CDRI-02-01-2022	Fábrica 1.1	10,07	24,20	13,95	2,00	3,07	2,53	1,74	23,03	3,22	8,06	<b>6,72</b>
CDRI-02-02-2022	Fábrica 1.1	13,19	24,10	7,32	2,79	3,16	3,20	1,32	24,09	3,91	4,09	<b>3,38</b>
CDRI-03-01-2022	Fábrica 2.1	10,36	30,70	2,26	1,24	2,18	3,49	2,44	21,47	2,28	11,09	<b>8,26</b>
CDRI-09-01-2022	Fábrica 8.2	12,75	21,70	2,32	1,32	2,89	6,08	1,19	38,19	1,78	16,10	<b>14,14</b>
CDRI-09-02-2022	Fábrica 8.2	5,68	19,05	6,20	1,26	4,13	2,74	2,82	25,27	13,20	18,73	<b>14,74</b>
CDRI-09-03-2022	Fábrica 8.2	24,82	14,60	15,98	0,89	2,12	3,66	0,93	29,18	3,06	18,69	<b>17,84</b>
CDRI-09-04-2022	Fábrica 8.3	30,90	26,00	3,36	0,88	2,03	2,45	4,11	20,14	3,78	16,13	<b>14,54</b>
CDRI-09-05-2022	Fábrica 8.3	27,16	26,20	8,21	0,92	1,90	2,71	3,66	21,34	3,70	16,01	<b>14,85</b>
CDRI-09-06-2022	Fábrica 8.1	43,75	23,00	6,67	1,18	2,14	2,73	1,98	14,35	4,01	10,62	<b>10,50</b>
CDRI-09-07-2022	Fábrica 8.1	16,27	34,10	2,43	0,87	1,70	1,89	2,41	29,48	3,39	9,41	<b>8,58</b>
CDRI-09-08-2022	Fábrica 8.1	14,17	17,10	2,73	1,72	2,37	3,16	2,91	23,55	22,90	2,50	<b>2,22</b>
CDRI-09-09-2022	Fábrica 8.1	16,77	24,00	2,04	1,77	1,95	2,67	1,05	31,73	4,43	11,94	<b>10,28</b>
CDRI-09-10-2022	Fábrica 8.1	15,50	23,10	4,34	3,69	1,74	2,40	1,66	28,34	3,40	11,41	<b>9,93</b>
CDRI-09-11-2022	Fábrica 8.1	7,24	36,70	2,70	0,91	2,26	2,00	2,65	23,62	2,63	14,35	<b>11,31</b>
CDRI-10-01-2022	Fábrica 9.2	9,14	13,50	20,08	0,81	2,07	4,55	0,79	34,16	1,62	33,26	<b>28,83</b>
CDRI-07-01-2022	Fábrica 6.3	5,86	33,60	1,20	1,35	1,89	5,70	1,15	16,50	7,96	13,14	<b>9,85</b>
CDRI-07-02-2022	Fábrica 6.2	13,50	27,20	3,55	1,85	2,61	5,13	1,38	32,57	2,71	15,05	<b>13,60</b>
CDRI-07-03-2022	Fábrica 6.2	12,13	27,30	3,91	1,50	2,10	4,52	1,64	26,41	2,87	17,08	<b>13,98</b>
CDRI-07-04-2022	Fábrica 6.3	7,76	33,00	1,85	1,45	1,62	5,34	2,05	15,10	7,53	14,41	<b>10,82</b>
CDRI-07-05-2022	Fábrica 6.3	25,04	30,70	5,37	0,78	1,72	2,64	1,89	9,85	9,76	12,77	<b>11,07</b>
CDRI-05-01-2022	Fábrica 4.2	6,74	28,00	0,98	9,31	2,65	10,00	1,97	7,30	0,71	3,31	<b>2,46</b>

15 Este valor de 69 % de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> se sale completamente de la recta de calibración ajustada para valores de óxidos del 15 al 16 % como máximo. Por otra parte, la pérdida por calcinación de esta muestra ha sido negativa en un 14,41 %, ello quiere decir que la muestra en vez de perder, ha ganado masa por oxidación en el proceso de perlado lo cual requeriría realizar el proceso de preparación de la pastilla en atmósfera inerte.

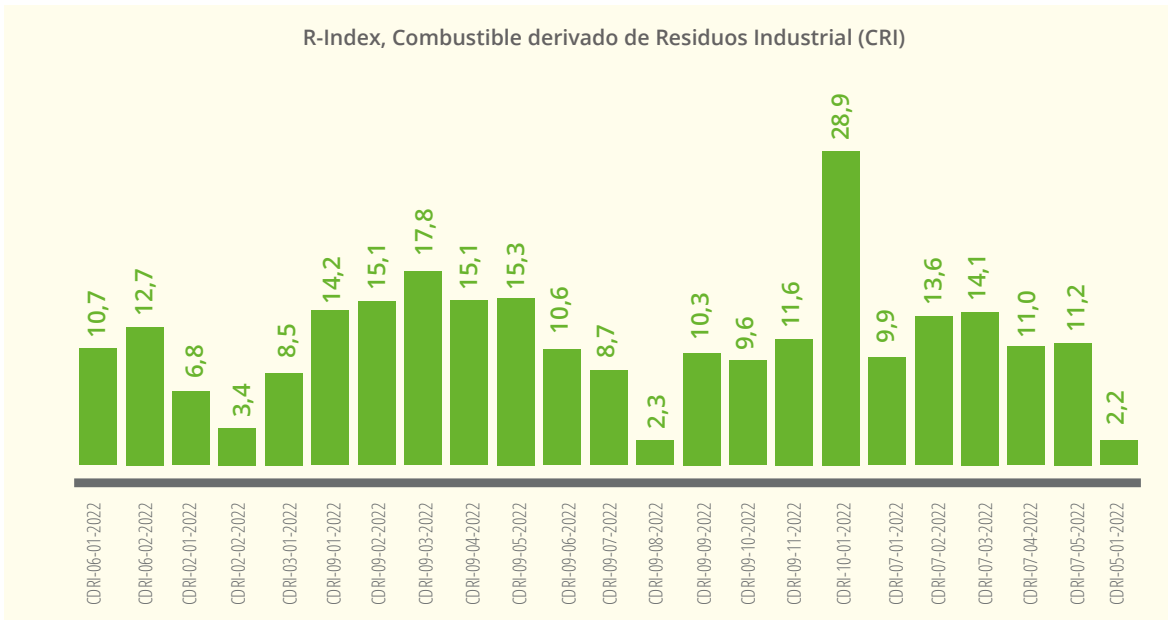
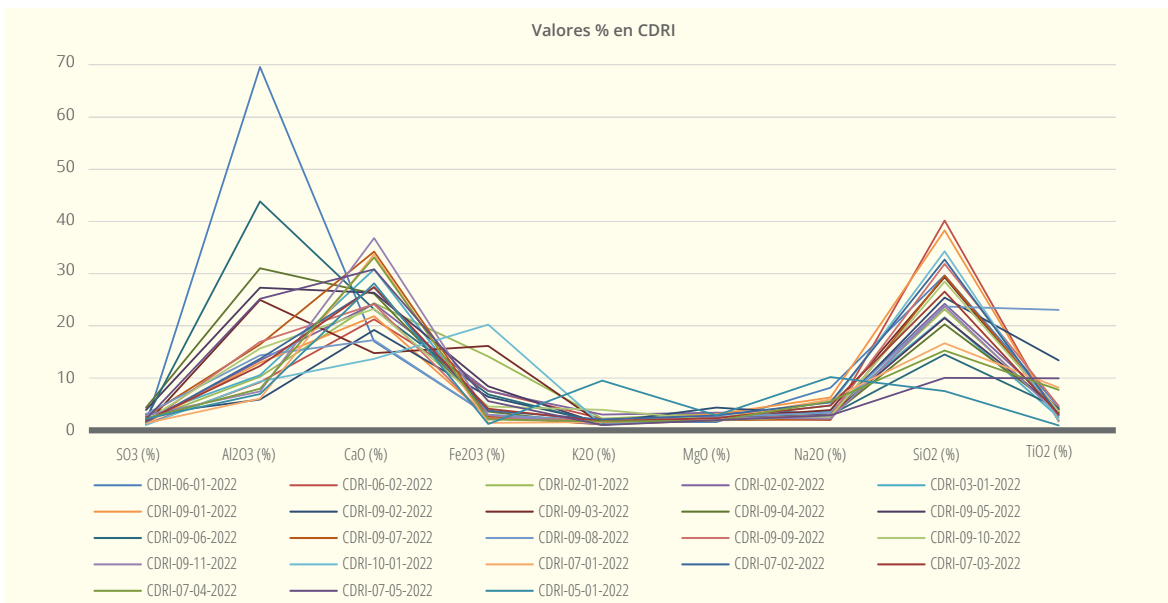


Figura 12. IR para las muestras de combustibles derivados de residuos de origen industrial (CDRI)

La variabilidad de resultados es aceptable dada la heterogeneidad intrínseca del residuo. En el caso de la muestra 10 el porcentaje de cenizas es apreciablemente mayor (33,26 % frente a una media de 13,8 %).



Para este grupo de muestras se ha observado una alta variabilidad en la determinación de  $Al_2O_3$ . Sin embargo, la repetición de la muestra CDRI-09-11-2022 cuyo análisis por FRX arrojó un resultado de 7,24 % de  $Al_2O_3$  tiene un resultado por ICP del 7,22 %. Es decir, la variación porcentual en la determinación de este óxido entre las dos técnicas es menor del 1 % y por tanto dicha variabilidad deberíamos atribuirla a la propia naturaleza de las muestras.

A continuación, se presenta el aspecto de las dos muestras, con altos contenidos de  $Al_2O_3$ , a la derecha, y cenizas, a la izquierda. En este último caso la cantidad de material particulado fino es común en otras tipologías de residuos con mayores contenidos de cenizas.



Figura 13. Muestras de combustibles derivados de residuos de origen industrial (CDRI)

Aspecto del conjunto de las muestras de CDRI. Las muestras en su heterogeneidad presentan sin embargo un patrón común de composición, que se rompe en ocasiones por la granulometría, o en el caso de la fotografía inferior derecha con una aparente mezcla de biomasa en la misma.



Figura 14. Otras muestras de combustibles derivados de residuos de origen industrial (CDRi)

## 4.6. COMBUSTIBLE DERIVADO DE RESIDUOS URBANO

Los valores de óxidos medidos mediante fluorescencia de rayos X, FRX, contenido de cenizas e índice de reciclado, RI, se presentan en la siguiente tabla.

Tabla 7. Valores para las muestras de combustibles derivados de residuos de origen urbano (CDRU)

		Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	CaO (%)	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	K <sub>2</sub> O (%)	MgO (%)	Na <sub>2</sub> O (%)	SO <sub>3</sub> (%)	SiO <sub>2</sub> (%)	TiO <sub>2</sub> (%)	Ash (%)	Rindex
CDRU-11-01-2022	Fábrica 10.1	19,11	32,20	2,14	0,90	2,80	1,50	2,16	18,88	16,85	3,89	<b>3,75</b>
CDRU-11-02-2022	Fábrica 10.1	37,05	21,10	1,85	0,56	4,11	1,42	3,05	19,98	7,70	8,80	<b>8,52</b>
CDRU-07-01-2022	Fábrica 6.2	11,69	32,80	4,25	2,22	2,69	4,39	4,25	15,42	3,29	11,25	<b>9,12</b>
CDRU-07-02-2022	Fábrica 6.1	10,40	31,30	2,11	2,15	2,83	3,05	3,89	15,70	4,56	11,36	<b>8,63</b>
CDRU-07-03-2022	Fábrica 6.1	9,47	23,20	7,58	1,43	2,88	3,06	1,97	31,64	1,92	14,37	<b>11,95</b>
CDRU-07-04-2022	Fábrica 6.1	10,30	29,30	2,19	2,66	3,32	7,39	3,91	17,94	7,26	7,05	<b>5,94</b>
CDRU-07-05-2022	Fábrica 6.1	9,17	36,00	6,00	2,54	3,36	3,82	2,98	18,74	4,86	10,44	<b>9,13</b>
CDRU-07-06-2022	Fábrica 6.1	9,47	26,80	2,86	2,50	4,64	6,94	3,45	18,15	8,91	7,06	<b>5,91</b>

Para las muestras CDRU-11-02-2022 y CDRU-07-03-2022 se ha encontrado una alta variabilidad en la determinación de óxido de aluminio y óxido de silicio.

Para la primera de ellas se ha repetido el análisis mediante ICP encontrándose un valor de 37,05 % por FRX y de 35,40 % por ICP. En el caso del óxido de silicio el valor por FRX es de 19,98 % y por ICP es de 19,35 %. Lo que se considera dentro de los márgenes esperables.

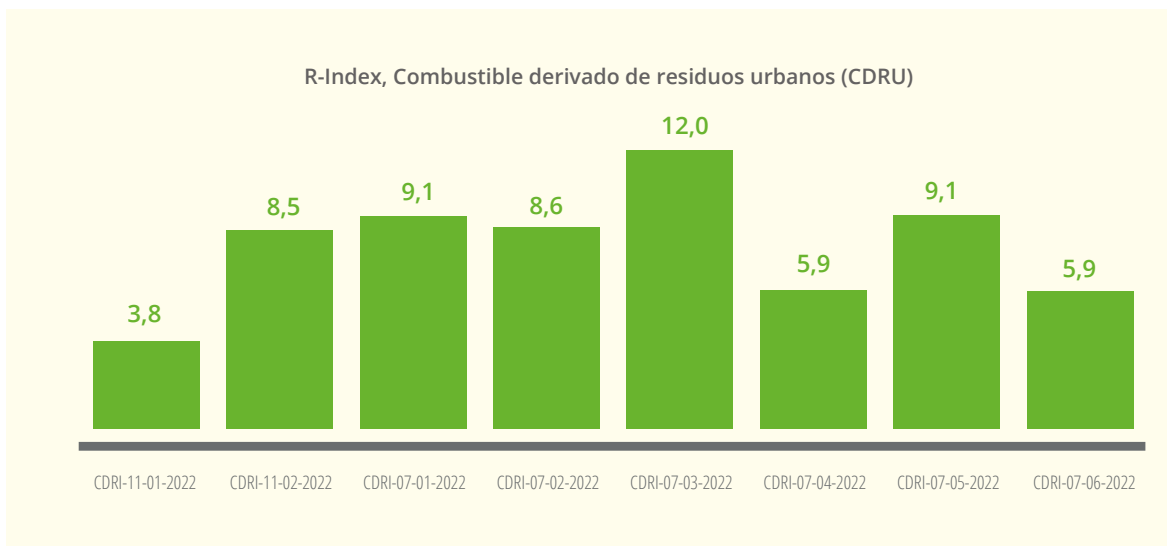


Figura 15. valores de IR en combustibles derivados de residuos de origen urbano (CDRU)

Es útil ver cómo son las muestras de CDRU en relación con el aspecto de las de CDRI. Una vez más, dentro de la propia heterogeneidad del residuo, el patrón es muy reconocible tal y como se puede apreciar en las siguientes imágenes.



Figura 16. Aspecto de las muestras de combustibles derivados de residuos de origen urbano (CDRU)

## 4.7. MADERAS

Los valores de óxidos medidos mediante fluorescencia de rayos X, FRX, contenido de cenizas e índice de reciclado, RI, se presentan en la siguiente tabla.

Tabla 8. Valores para las muestras de maderas (MD)

		Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	CaO (%)	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	K <sub>2</sub> O (%)	MgO (%)	Na <sub>2</sub> O (%)	SO <sub>3</sub> (%)	SiO <sub>2</sub> (%)	TiO <sub>2</sub> (%)	Ash (%)	Rindex
MD-03-01-2022	Fábrica 2.1	6,45	33,00	3,46	1,84	2,80	0,68	0,97	24,29	1,08	16,61	<b>12,39</b>
MD-03-02-2022	Fábrica 2.1	5,40	20,80	4,58	3,59	3,52	4,35	2,82	27,36	8,53	2,84	<b>2,30</b>
MD-07-01-2022	Fábrica 6.4	5,52	24,10	2,92	1,72	2,29	2,76	2,69	38,87	2,55	14,42	<b>12,03</b>
MD-05-01-2022	Fábrica 4.1	5,13	21,80	6,23	3,48	3,97	4,71	2,64	28,72	8,35	2,55	<b>2,17</b>
MD-05-02-2022	Fábrica 4.1	5,22	24,20	4,21	3,54	3,87	3,54	2,12	27,01	8,47	3,18	<b>2,61</b>
MD-10-01-2022	Fábrica 9.1	0,97	8,29	0,70	15,00	3,60	3,25	1,55	6,17	0,07	7,94	<b>3,14</b>

Gráficamente se aprecian diferencias claras entre dos subpoblaciones de la muestra que se diferencian por distintos R-Index, el primero en el entorno del 2 % y el segundo en el entorno del 12 %. Estas diferencias también se aprecian visualmente en la muestra en la que una presencia de finos terrosos de distinto color se puede apreciar claramente en la figura 18.

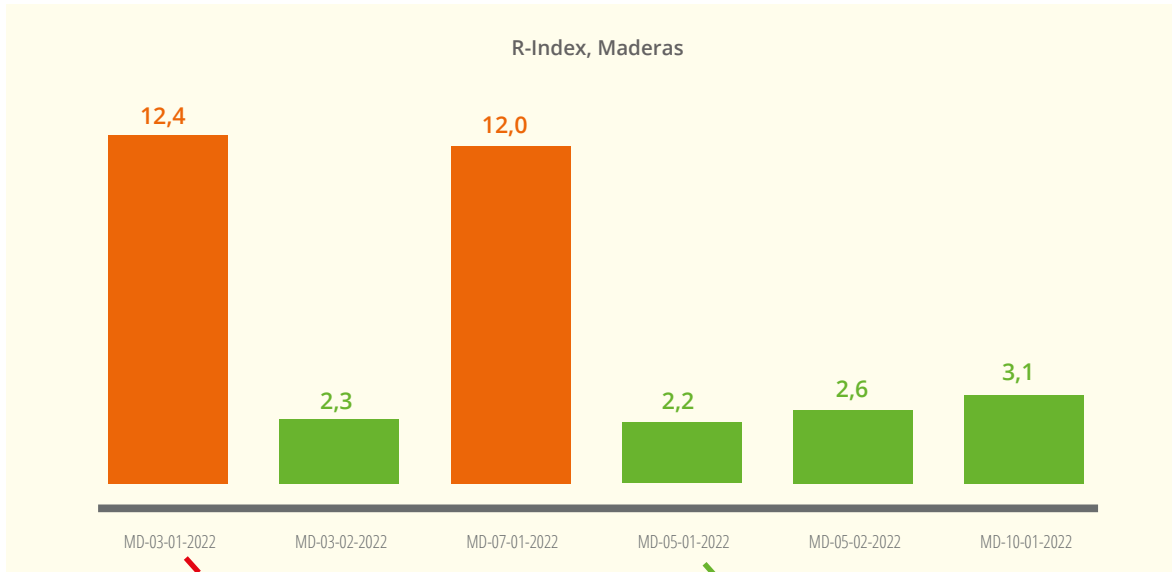


Figura 17. IR para las muestras de madera (MD)



Figura 18. Aspecto de las muestras de madera

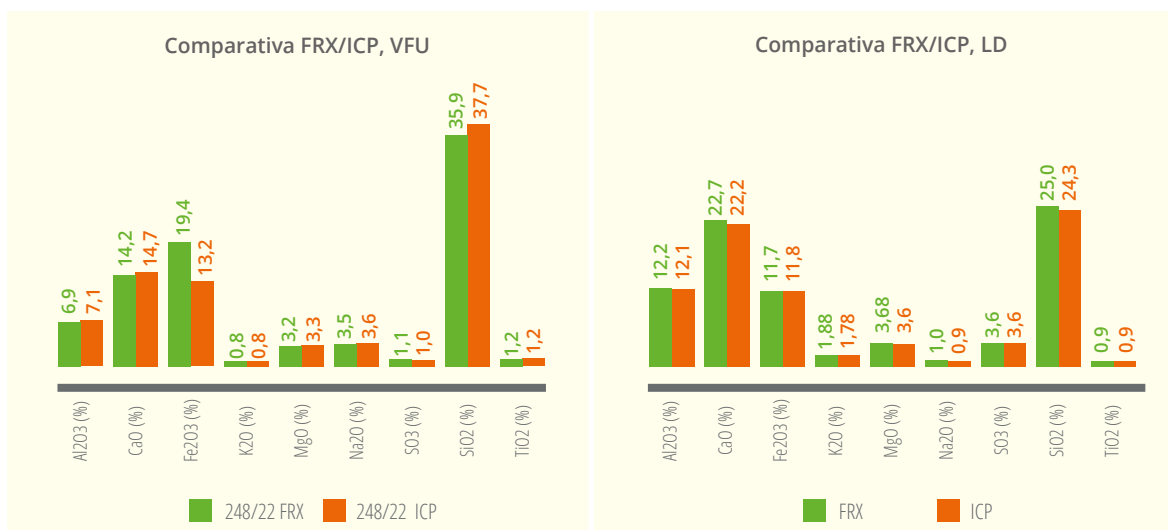


# ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

## 5.1. VARIABILIDAD DE LOS ANÁLISIS

En el apartado correspondiente se ha explicado cómo las repeticiones por ICP han confirmado los análisis previos por FRX, indicando que la posible dispersión de valores en un determinado óxido puede explicarse por la variabilidad real de las muestras.

Para una reseña completa de la comparación de unos, FRX y otros, ICP, resultados se presenta la siguiente imagen en la que se presenta el análisis de óxidos individual con las dos técnicas<sup>16</sup>. Nótese que el contraste se ha realizado para las muestras sobre las que se han obtenido mayores dispersiones de datos en alguna determinación, no encontrándose discrepancias en las determinaciones mediante los dos métodos.



16 Para la determinación de SO<sub>3</sub> el contraste es entre ICP y el método de determinación de la EN 196-2. Esta determinación es muy común en la determinación de cementos por lo que se considera esta última como método de referencia.



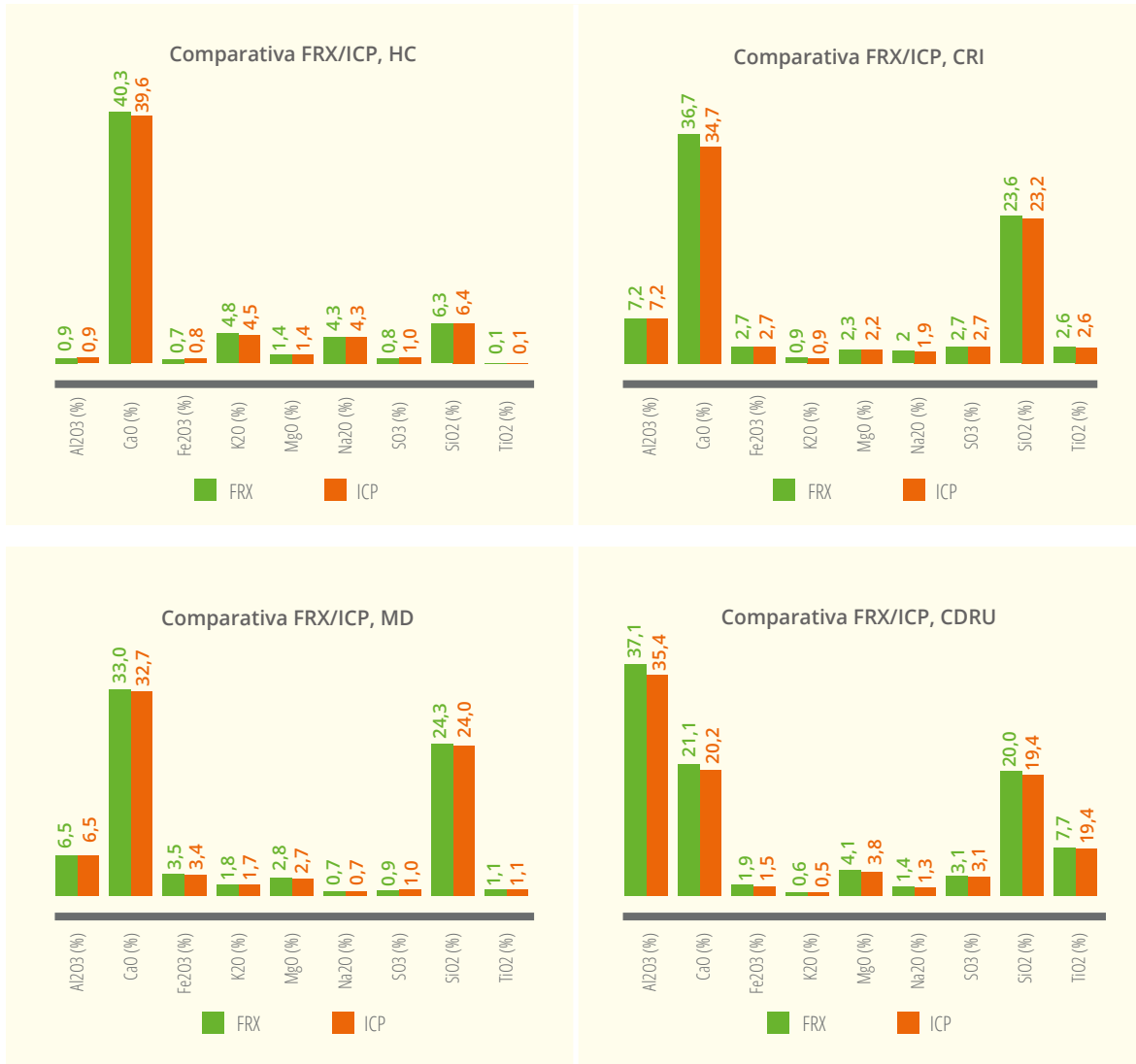


Figura 19. Análisis de óxidos mediante las dos técnicas

En primer lugar, se aprecia la distinta composición de óxidos en función del tipo de residuo. Calcio, Aluminio y Silicio son los óxidos más abundantes. En segundo lugar, se aprecia que para todos los óxidos, los resultados del ensayo están muy próximos estando los ofrecidos por ICP unas décimas por debajo de los del FRX.

Los resultados numéricos se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 9. Datos FRX e ICP

	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	CaO (%)	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	K <sub>2</sub> O (%)	MgO (%)	Na <sub>2</sub> O (%)	SO <sub>3</sub> (%)	SiO <sub>2</sub> (%)	TiO <sub>2</sub> (%)
248/22 FRX	6,88	14,20	19,35	0,82	3,19	3,47	1,10	35,91	1,22
248/22 ICP	7,14	14,70	13,20	0,83	3,33	3,63	0,96	37,70	1,24
254/22 FRX	12,20	22,70	11,68	1,82	3,63	0,97	3,59	24,95	0,88
254/22 ICP	12,10	22,20	11,75	1,74	3,56	0,89	3,60	24,30	0,88
267/22 FRX	0,85	40,30	0,72	4,80	1,44	4,28	0,80	6,32	0,06
267/22 ICP	0,90	39,60	0,76	4,50	1,41	4,23	0,97	6,39	0,06
284/22 FRX	7,24	36,70	2,70	0,91	2,26	2,00	2,71	23,62	2,63
284/22 ICP	7,22	34,70	2,71	0,85	2,22	1,94	2,65	23,20	2,55
293/22 FRX	37,05	21,10	1,85	0,56	4,11	1,42	3,11	19,98	7,70
293/22 ICP	35,40	20,20	1,54	0,51	3,83	1,28	3,05	19,35	7,60
300/22 FRX	6,45	33,00	3,46	1,84	2,80	0,68	0,86	24,29	1,08
300/22 ICP	6,52	32,70	3,36	1,72	2,74	0,68	0,97	24,00	1,08

En lo que se refiere a las determinaciones de IR mediante las dos técnicas para las muestras seleccionadas<sup>17</sup> se presenta a continuación los resultados gráficamente.

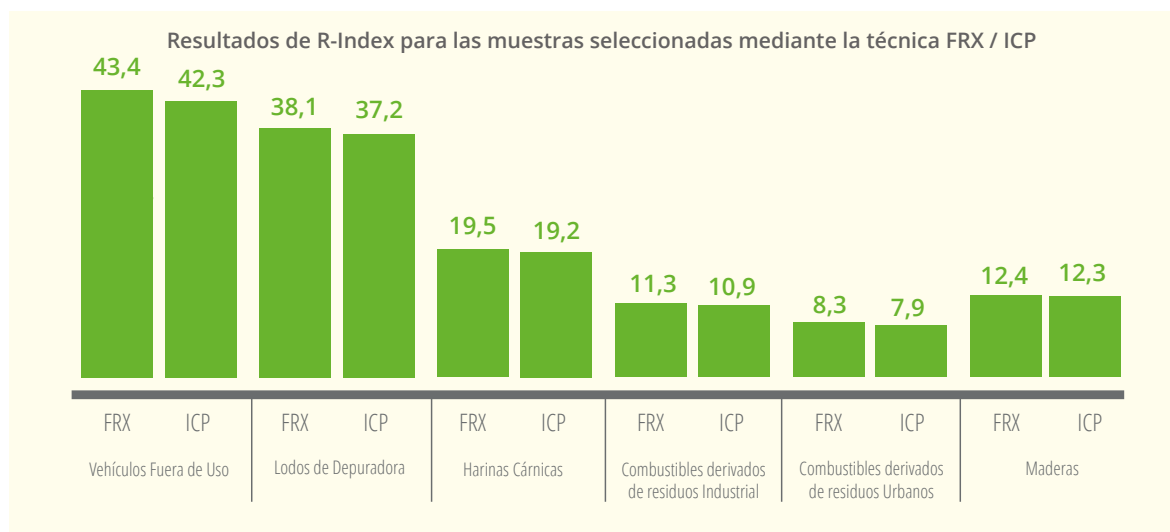


Figura 20. Resultados de IR por las dos técnicas FRX e ICP respectivamente para las mismas muestras

<sup>17</sup> Se recuerda que estas muestras NO son representativas de su población.

## 5.2. DETERMINACIONES CON 4 ÓXIDOS

Finalmente se ha comprobado cómo influye en los resultados el uso de 9 óxidos en comparación con cuatro. Con carácter general las determinaciones con 9 óxidos dan resultados de IR mayores. La comparativa se ha realizado para los lodos de depuradora, VFU y CDRI tal y como se presenta en las siguientes gráficas:

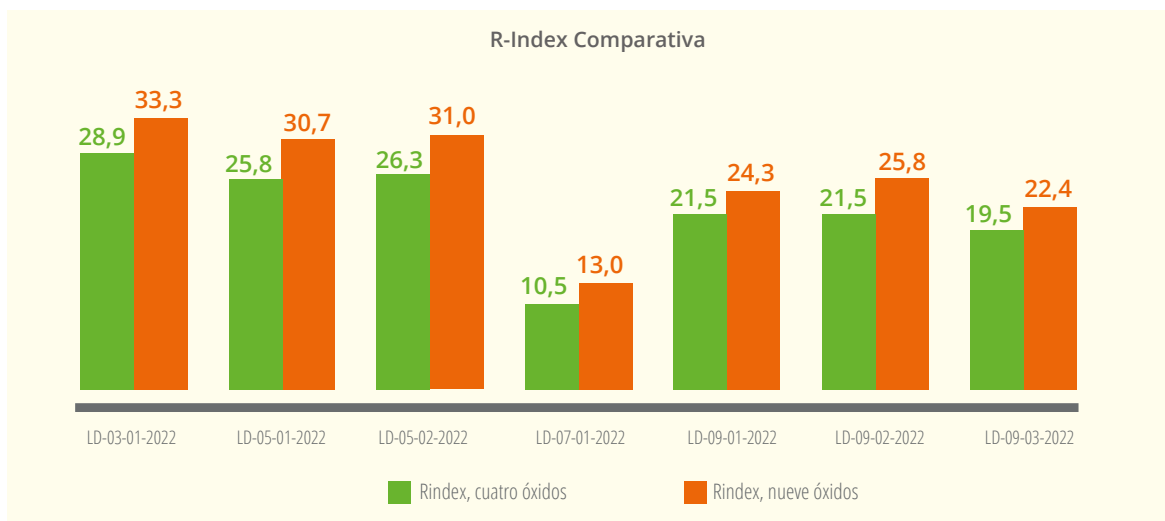


Figura 21. Comparativa para lodos de depuradora

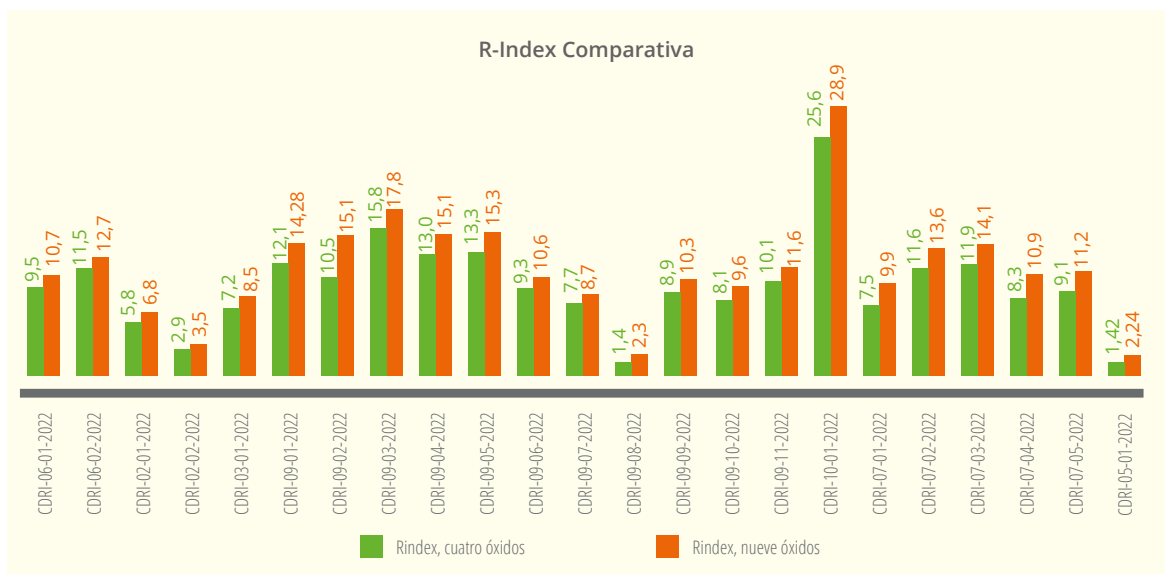


Figura 22. Comparativa para CDRI

Los resultados numéricos de la comparativa se presentan en la tabla.

Tabla 10. Datos con 4 óxidos y 9 óxidos

	RI, 4 OX	RI, 9 OX		RI, 4 OX	RI, 9 OX
LD-03-01-2022	28,89	33,29	CDRI-06-01-2022	9,48	10,74
LD-05-01-2022	25,77	30,70	CDRI-06-02-2022	11,48	12,69
LD-05-02-2022	26,33	31,00	CDRI-02-01-2022	5,74	6,76
LD-07-01-2022	10,49	12,98	CDRI-02-02-2022	2,81	3,40
LD-09-01-2022	21,48	24,34	CDRI-03-01-2022	7,18	8,47
LD-09-02-2022	21,53	25,83	CDRI-09-01-2022	12,07	14,21
LD-09-03-2022	19,50	22,38	CDRI-09-02-2022	10,53	15,05
VFU-06-01-2022	11,30	13,18	CDRI-09-03-2022	15,80	17,80
VFU-06-02-2022	10,81	13,50	CDRI-09-04-2022	12,97	15,11
VFU-06-03-2022	39,31	44,28	CDRI-09-05-2022	13,27	15,34
VFU-06-04-2022	12,63	14,84	CDRI-09-06-2022	9,32	10,60
VFU-10-01-2022	10,63	12,09	CDRI-09-07-2022	7,74	8,71
VFU-10-02-2022	7,02	9,62	CDRI-09-08-2022	1,44	2,26
VFU-07-01-2022	23,79	26,78	CDRI-09-09-2022	8,90	10,31
VFU-07-02-2022	24,77	27,67	CDRI-09-10-2022	8,13	9,60
			CDRI-09-11-2022	10,08	11,58
			CDRI-10-01-2022	25,57	28,84
			CDRI-07-01-2022	7,51	9,88
			CDRI-07-02-2022	11,56	13,62
			CDRI-07-03-2022	11,91	14,07
			CDRI-07-04-2022	8,32	10,91
			CDRI-07-05-2022	9,06	11,21
			CDRI-05-01-2022	1,42	2,24

Los datos de R-Index medios por tipo de residuos se presentan en la figura 23. Las diferencias son significativas.

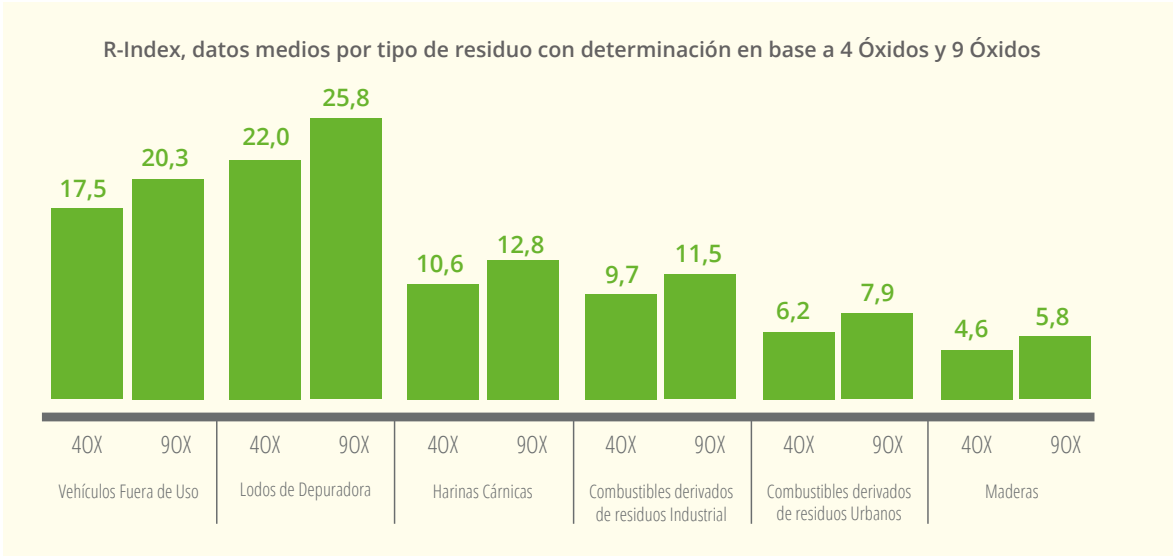
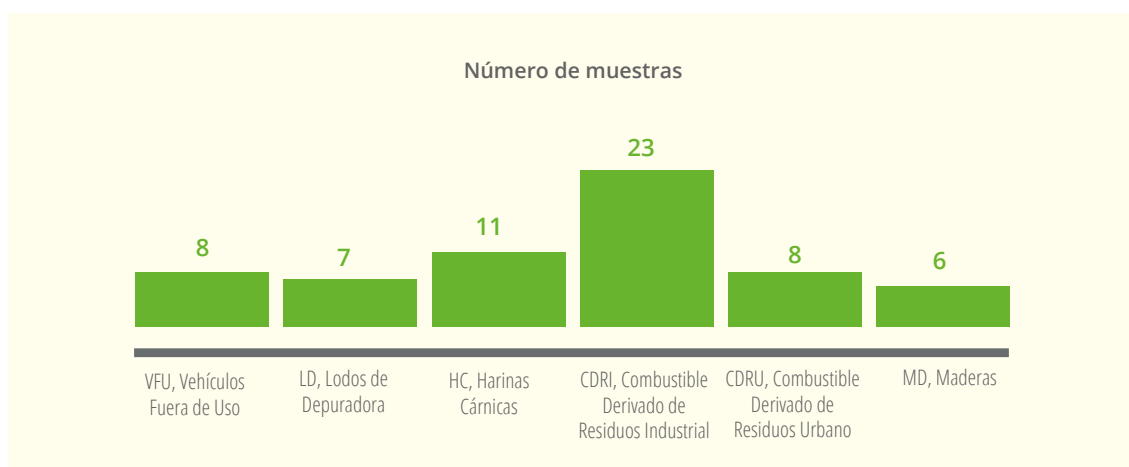


Figura 23. R-Index con 9 OX/4 OX

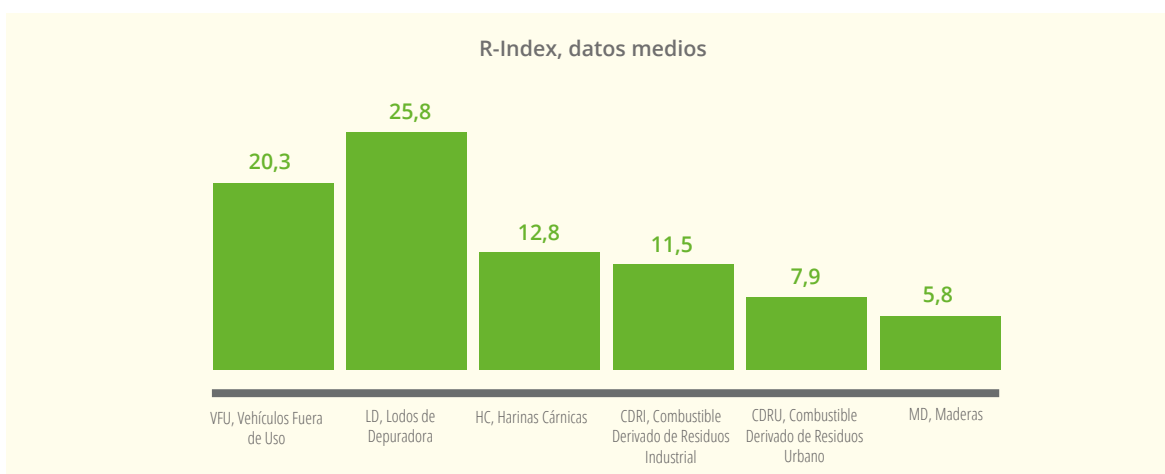
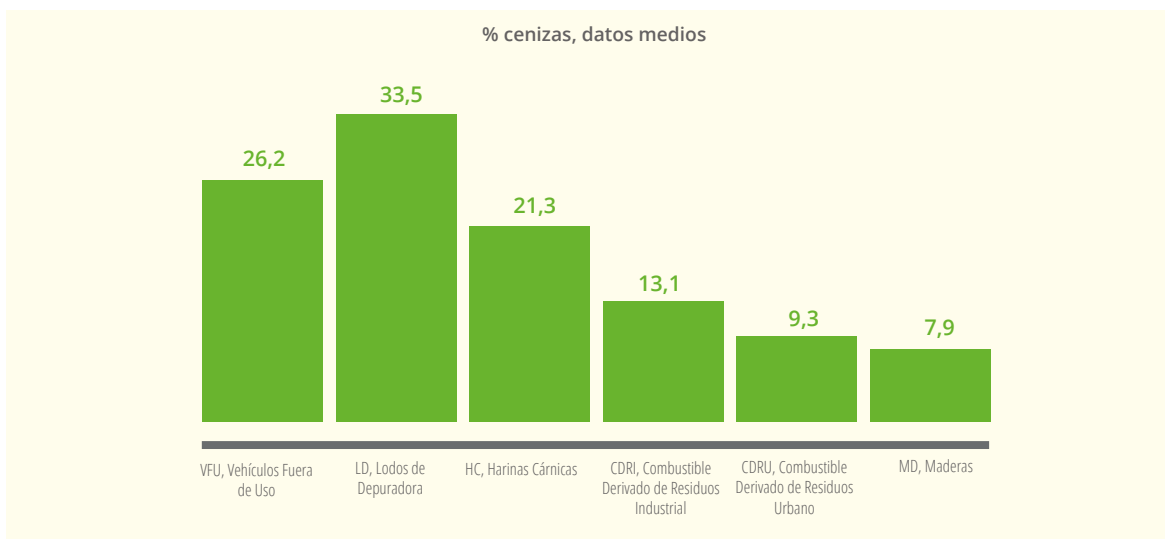


## RESUMEN DE RESULTADOS

- Se han analizado 63 muestras de residuos procedentes de ocho grupos cementeros, distribuidas en las siguientes tipologías:



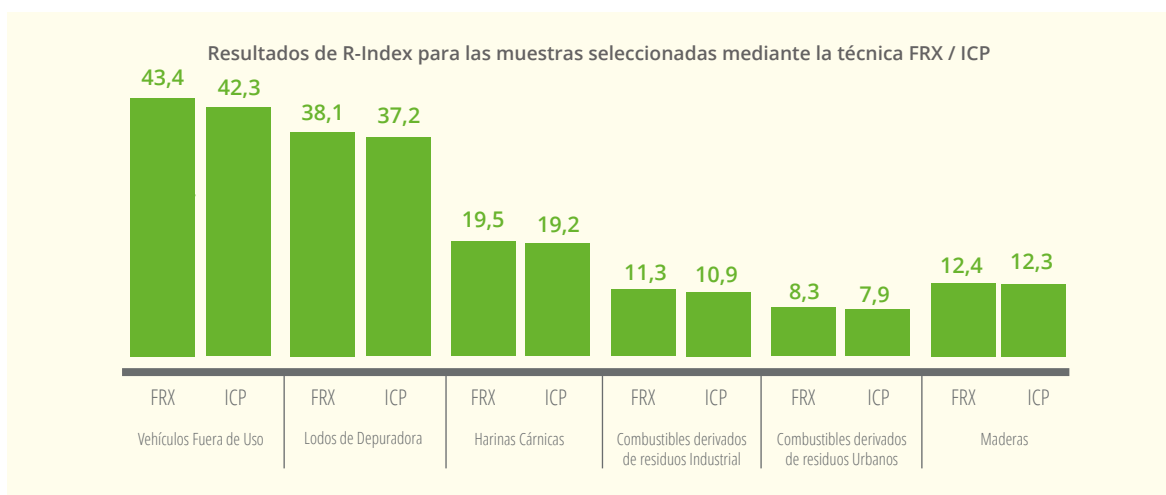
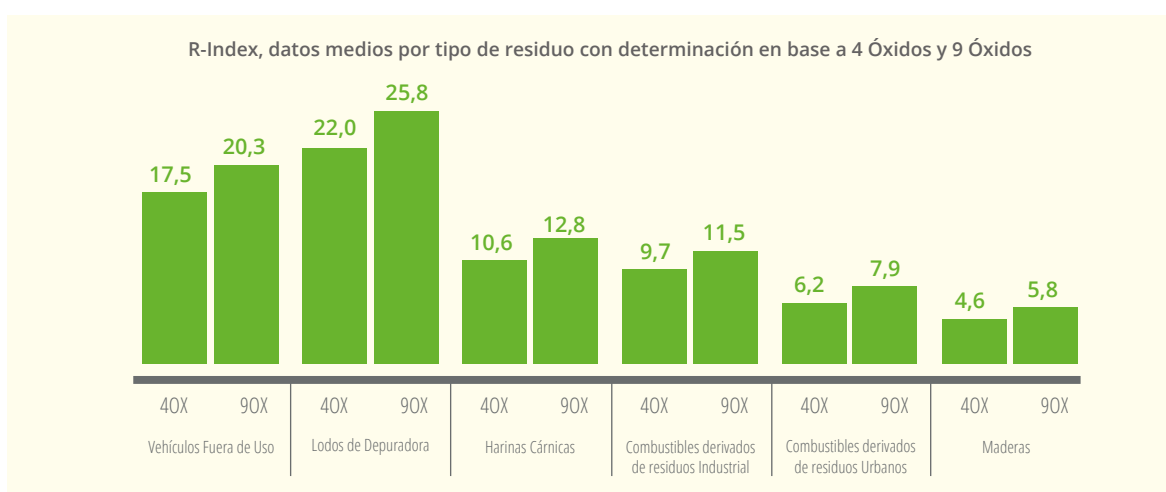
- Todas las muestras han sido analizadas mediante FRX (Espectrometría de fluorescencia de rayos X). Además, mediante la técnica ICP (Espectroscopía de emisión con fuente de plasma de acoplamiento inductivo, por sus siglas en inglés), se ha llevado a cabo un análisis de 6 muestras más, una por cada tipo de residuo, para comprobar datos discrepantes en algunos óxidos (que han descartado discordancias en la determinación) y para comprobar las diferencias globales en términos de R-Index.
- Los resultados obtenidos muestran que el índice de reciclado (R-Index) está directamente correlacionado con el contenido de cenizas, por lo que el contenido de cenizas es un indicador acerca de cuál va a ser, en términos relativos, el R-Index de cada tipo de residuo considerado.



Todos los valores obtenidos están en línea con los resultados de la literatura científica, tanto en términos de contenido en cenizas, composición de los óxidos y R-Index presentados en los apartados 4.1 a 4.7.

- La repetición de estas muestras mediante ICP o EN 196-2, ha servido también para aclarar algunos datos fuera de rango en términos relativos, así como para tener un dato adicional para explicar y acotar la variabilidad encontrada en el análisis de algunos parámetros, confirmándose el valor de éstos de manera precisa.
- Los valores fuera de rango encontrados tienen una clara correlación con el aspecto visual de las muestras, frente al resto de las de su grupo. Incluso en los CDR, que en principio puedan parecer más heterogéneos, se encuentran, dentro de su tipo, patrones muy identificables en su aspecto visual y en la composición química de su fracción de cenizas.

- La variable determinante en el R-Index es el contenido de cenizas que, siendo distinta para cada tipo de residuo, puede tener apreciable variabilidad dentro del mismo grupo.
- Es posible identificar patrones comunes que pueden identificarse visualmente por tipo de residuo, pudiéndose establecer subgrupos en los que la aparente heterogeneidad disminuye apreciablemente. Estos subgrupos por residuo pueden estar asociados a diferentes proveedores, lo que debe ser objeto de estudio en el futuro.
- La determinación del R-Index presentan una mayor diferencia en el resultado obtenido, si el cálculo se realiza teniendo en cuenta 4 o 9 óxidos, que la variabilidad encontrada en la determinación con un método analítico u otro, FRX frente a ICP, tal y como puede observarse en los gráficos siguientes.



Además, la determinación con 9 óxidos se considera más completa ya que recoge toda la variabilidad de óxidos presente en los componentes de los constituyentes del clínker portland.





## CONCLUSIONES

Los seis combustibles alternativos estudiados: combustibles derivados de residuos (CDR) de origen urbano e industrial, harinas cárnicas, madera, vehículos fuera de uso y lodos de depuradora tienen una fracción mineral que se ha cuantificado en el presente informe técnico. La fracción mineral de dichos residuos se incorpora a la matriz del clínker, sustituyendo las materias primas naturales.

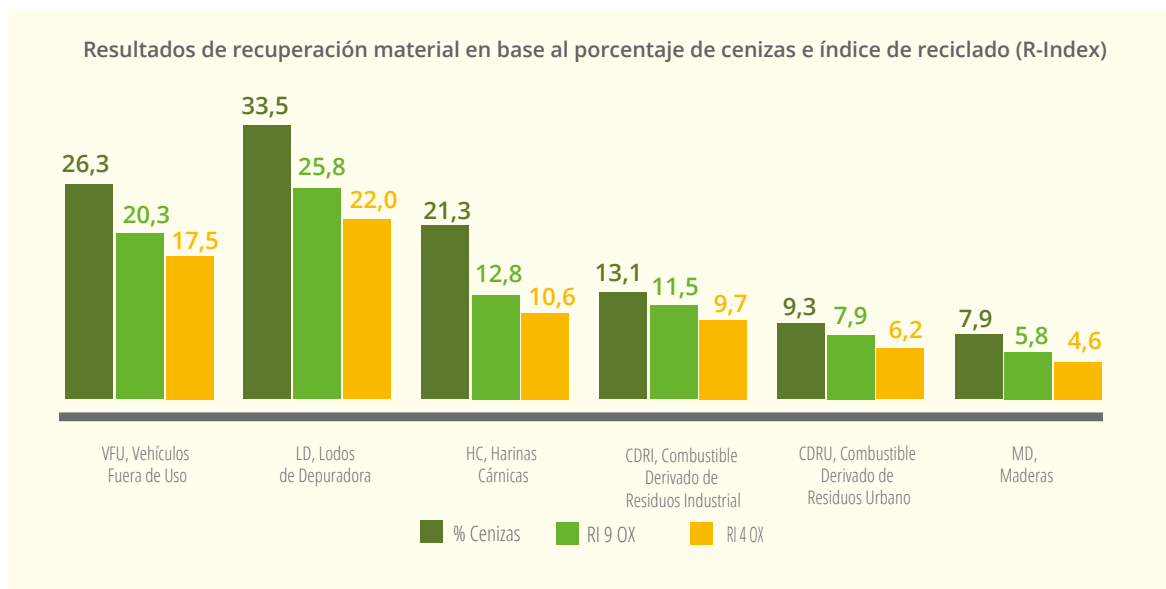
Los combustibles alternativos mencionados, además de sustituir energéticamente, mediante recuperación energética, a una parte de los combustibles fósiles, sustituyen también en un porcentaje determinado a las materias primas naturales, mediante recuperación material, en una operación conjunta denominada “coprocesado”.

Hasta ahora no existía una metodología normalizada que permitiera evaluar de forma precisa esta recuperación material. El desarrollo de la norma ISO CD 4349 “*Solid Recovered Fuels. Determination of the Recycling-Index for co-processing*”, ha permitido ahora realizar esta evaluación, con una muestra representativa de los seis combustibles alternativos incluidos en este estudio.

Para cuantificar este porcentaje de valorización material pueden utilizarse tres posibles formulaciones:

- La primera mediante el cálculo del porcentaje de cenizas presentes en la fracción mineral, en base a la norma UNE-EN-ISO 21656 “Combustibles sólidos recuperados. Determinación del contenido de ceniza”.
- La segunda a través del cálculo de un índice de reciclado, mediante la norma ISO CD 4349, que evalúa, qué óxidos presentes en la fracción de cenizas son compatibles con los óxidos que componen el clínker Portland, y contribuyen de forma positiva a sus prestaciones como conglomerante hidráulico. Este cálculo puede realizarse, a su vez, mediante dos posibilidades:
  - Cálculo con 9 óxidos constituyentes del clínker:  $Al_2O_3$ ,  $CaO$ ,  $Fe_2O_3$ ,  $K_2O$ ,  $MgO$ ,  $Na_2O$ ,  $SO_3$ ,  $SiO_2$  y  $TiO_2$ .
  - Cálculo con 4 óxidos constituyentes fundamentales del clínker:  $Al_2O_3$ ,  $CaO$ ,  $Fe_2O_3$  y  $SiO_2$ .

En función de la metodología a utilizar, el presente estudio ha acreditado los siguientes porcentajes de sustitución material para los combustibles alternativos considerados:



A la vista de todos los resultados obtenidos, podemos afirmar que **el presente estudio demuestra que existe una valorización material que es significativa en términos de porcentaje de la fracción mineral de los combustibles**. Esta fracción mineral es igualmente significativa en términos cuantitativos respecto al total de materias primas usadas en la producción de clínker.

El índice que evalúa más fielmente la magnitud del índice de reciclado es el cálculo basado en 9 óxidos puesto que incorpora la totalidad de óxidos que proporcionan las prestaciones al clínker portland. **Por esta razón, el R-Index 9 OX, según la norma ISO CD 4349 Solid Recovered Fuels. Determination of the Recycling-Index for co-processing, se propone como método de referencia para evaluar dicho indicador.**

Finalmente, el estudio demuestra que los combustibles alternativos presentan un patrón común de composición química y visual bastante homogéneo, aun tratándose de residuos de distintos proveedores, este patrón resulta perfectamente identificable entre cada tipo y subtipo de residuos, permitiendo abandonar la idea de una aparente heterogeneidad anteriormente atribuida.



## REFERENCIAS

- S.A. Viczek, A. Aldrian, R. Pomberger, R. Sarc, *Determination of the material-recyclable share of SRF during co-processing in the cement industry*, *Resources, Conservation and Recycling*, Volume 156, 2020, 104696, ISSN 0921-3449, <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.104696>.
- Estudio del coprocesado / coincineración en la valorización de NFU en cementeras (Signus, Tnu, Fundación Gómez Pardo, Oficemen y Fundación CEMA).
- ISO CD 4349 "Solid Recovered Fuels. Determination of the Recycling-Index for co-processing".
- UNE-EN 15410 Combustibles sólidos recuperados. Método para la determinación del contenido en elementos principales (Al, Ca, Fe, K, Mg, Na, S, Si, T).
- UNE-EN ISO 21656:2021 Combustibles sólidos recuperados. Determinación del contenido de ceniza.
- UNE-EN 15443 Combustibles sólidos recuperados. Métodos para la preparación de la muestra de laboratorio.
- UNE-EN 196-2. Métodos de ensayo de cementos. Análisis químico de cementos.
- Directiva 2018/851, de 30 de mayo de 2018, por la que se modifica la Directiva 2008/98/CE sobre los residuos.
- Estrategia Española sobre Economía circular "España circular 2030".
- Ley 7/2022, de 8 de abril, de residuos y suelos contaminados para una economía circular.
- Decreto N° 29, que establece la norma de emisión para incineración, coincineración y coprocesamiento y deroga Decreto n° 45, de 2007, del Ministerio Secretaría General de la Presidencia Ministerio del Medio Ambiente de la República de Chile.
- Decreto-Lei n.º 102-D/2020, de 10 de dezembro, REGIME GERAL DA GESTÃO DE RESÍDUOS (Portugal).
- Décret relatif aux déchets, à la circularité des matières et à la propreté publique. Valona (Bélgica).



Fundación Laboral del Cemento  
y el Medio Ambiente

José Abascal 53, 1ª planta  
28003 Madrid

info@fundacioncema.org  
(+34) 91 451 81 18

[www.fundacioncema.org](http://www.fundacioncema.org)  
[www.recuperaresiduosencementeras.org](http://www.recuperaresiduosencementeras.org)



@fundacionCEMA



Fundación Cema