



Informe sobre el **POTENCIAL DE VALORIZACIÓN** de residuos en plantas cementeras de Andalucía

Objetivo 2030



Informe realizado para la Fundación Laboral Andaluza del Cemento y el Medio Ambiente (FLACEMA) por:

Benito Navarrete Rubia

Luz Marina Gallego Fernández

Miriam Mármol López

Departamento de Ingeniería Química y Ambiental
Escuela Técnica Superior de Ingeniería de la Universidad de Sevilla



Potencial de valorización de residuos en las plantas cementeras de Andalucía

Actualización año 2025

ÍNDICE

	Página
INTRODUCCIÓN.....	2
GLOSARIO.....	3
PROCEDIMIENTO.....	5
Capítulo 1. Contexto y Marco Legal.....	6
1.1.- Marco legal europeo	
1.2.- Marco legal nacional	
1.2.- Marco legal andaluz	
Capítulo 2. El empleo de residuos como materias primas alternativas y combustibles alternativos en el proceso de fabricación del cemento.....	10
2.1.- Características de la fabricación del cemento y su huella de carbono	
2.2.- La valorización de residuos como estrategia de economía circular	
2.2.1.- Valorización material: El uso de las materias primas alternativas	
2.2.2.- Valorización energética: El uso de combustibles alternativos	
2.2.3.- Posicionamiento competitivo y potencial de mejora	
2.2.4.- Marco técnico para la valorización de residuos	
2.3.- La estandarización de combustibles alternativos como herramienta de mejora	
Capítulo 3. Análisis de la generación y consumo de residuos valorizables en Andalucía.....	23
3.1.- Generación de residuos valorizables en Andalucía	
3.2.- Consumo de combustibles en la industria cementera andaluza	
Capítulo 4. Análisis del potencial de valorización y escenarios de futuro.....	31
4.1.- Metodología y planteamiento de los escenarios de estudio	
4.2.- Resultados y discusión del análisis de los escenarios	
Capítulo 5. Conclusiones.....	40
BIBLIOGRAFÍA E INFORMACIÓN CONSULTADA.....	44

INTRODUCCIÓN

El presente informe ha sido elaborado por el Grupo de Ingeniería Ambiental y de Procesos del Departamento de Ingeniería Química y Ambiental de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de la Universidad de Sevilla, para la Fundación Laboral Andaluza del Cemento y el Medio Ambiente (FLACEMA). Su finalidad es actualizar y dar continuidad al estudio previamente publicado en 2021 [1], incorporando los avances y retos más recientes que afronta la industria cementera andaluza en materia de valorización de residuos.

La relevancia de este estudio se acentúa en el contexto actual de transición ecológica, marcado por la creciente exigencia regulatoria y social. Los objetivos europeos de neutralidad climática sitúan a la industria cementera en una posición crucial. En este escenario, la valorización de residuos se consolida como instrumento fundamental para la descarbonización del sector y como impulso hacia una economía circular, reduciendo la dependencia de los combustibles fósiles y minimizando el depósito de residuos en vertederos.

El estudio se ha elaborado empleando como datos de base las estadísticas de producción de residuos en Andalucía, proporcionadas por la Consejería de Sostenibilidad y Medio Ambiente de la Junta de Andalucía; los estudios y publicaciones sobre valorización de residuos en la industria cementera realizados por la Fundación Laboral Andaluza del Cemento y el Medio Ambiente (FLACEMA), la Agrupación de Fabricantes de Cemento de España (OFICEMEN), la Agrupación de Fabricantes de Cemento de Andalucía (AFCA), la Fundación Laboral del Cemento y del Medio Ambiente (CEMA), el Observatorio de la Economía Circular de la Industria Cementera y la Asociación Europea del Cemento (CEMBUREAU), así como bibliografía científica y técnica especializada, referenciada al final de este documento.

GLOSARIO

- **Autorización Ambiental Integrada (AAI):** Es una resolución de la Consejería competente en materia de medio ambiente por la que se permite, a los solos efectos de la protección del medio ambiente y de la salud de las personas, y de acuerdo con las medidas recogidas en la misma, explotar la totalidad o parte de las actividades sometidas a dicha autorización conforme a lo previsto en la ley 7/2007, de 9 de julio, así como en la normativa básica de aplicación.
- **Documentos de Referencia (BREFs):** Informes de la Unión Europea que detallan las mejores técnicas disponibles para la prevención y control de la contaminación en diversas industrias.
- **Capacidad de Producción (CP):** Capacidad máxima de bienes y servicios que una empresa puede producir en un periodo determinado utilizando todos sus recursos de manera eficiente.
- **Combustible Derivado de Residuos (CDRs):** Combustibles que se obtienen a partir de residuos, tanto municipales como industriales, mediante procesos de tratamiento y preparación.
- **Combustible Sólido Recuperado (CSR):** Combustible sólido obtenido de residuos no peligrosos, diseñado para la valorización energética en plantas de incineración o co-incineración.
- **Factor de Emisión (FE):** Es un valor que relaciona la cantidad de contaminantes liberados a la atmósfera con una actividad específica, como el consumo de combustible o la producción de un bien.
- **Materia Prima Alternativa (MPA):** Cualquier residuo, subproducto o material recuperado proveniente de otras industrias o actividades que se utiliza para sustituir total o parcialmente las materias primas naturales tradicionales.
- **Mejores Técnicas Disponibles (MTDs):** La fase más eficaz y avanzada de desarrollo de las actividades y de sus modalidades de explotación, que demuestren la capacidad práctica de determinadas técnicas para constituir la base de los valores límite de emisión y otras condiciones del permiso destinadas a evitar o, cuando ello no sea practicable, reducir las emisiones y el impacto en el conjunto del medio ambiente.
- **Neumáticos Fuera de Uso (NFU):** neumático gastado que debe gestionarse de forma especial para su reutilización, reciclaje o valorización.

- **Poder Calorífico Inferior (PCI):** Es la cantidad de calor que se libera en la combustión completa de una unidad de combustible, excluyendo el calor latente del vapor de agua generado.
- **Residuos no Peligrosos (RnP):** Residuos que no presentan riesgos significativos para la salud humana ni para el medio ambiente.
- **Residuos Peligrosos (RP):** Residuos que presentan características que los hacen peligrosos para la salud humana o el medio ambiente, como toxicidad, inflamabilidad, reactividad, corrosividad o explosividad.
- **Tasa de Sustitución Térmica (TSR):** Porcentaje de energía térmica en un proceso industrial que proviene de combustibles alternativos.
- **Valor Límite de Emisión (VLE):** Cantidad máxima permitida de una sustancia contaminante que se puede liberar a la atmósfera desde una fuente emisora, como una industria, durante un periodo determinado.

PROCEDIMIENTO

Este estudio aborda la valorización de residuos en la industria cementera de forma estructurada, de acuerdo con los informes equivalentes publicados por Flacema en 2016 y 2021.

En primer lugar, se realiza una revisión detallada del marco administrativo y legal que regula esta actividad a nivel europeo, nacional y autonómico. A continuación, se describen los aspectos clave del proceso de producción de cemento. El análisis se centra posteriormente en la situación específica de Andalucía, definiendo con detalle el estado de la valorización tanto material como energética. Además, se examina la posición de España y su potencial en esta materia, incluyendo su marco técnico.

En segundo lugar, se analiza la evolución de la producción de residuos y el consumo de combustibles en Andalucía desde el último año analizado en el anterior informe hasta la fecha en la que se dispone de estadísticas validadas por organismos de referencia (2019-2023). Este análisis presta especial atención a los residuos no reciclables con alto potencial para su aprovechamiento energético.

Finalmente, se evalúa el potencial energético de dichos residuos a través de diferentes escenarios, detallando la metodología utilizada. Estos escenarios se construyen a partir de unas variables clave de producción y valorización, como la capacidad de producción (CP) en las cementeras andaluzas, la tasa de sustitución térmica (TSR) y la distribución de los principales tipos de combustibles alternativos. Este enfoque permite estimar tanto la capacidad futura para el uso de estos combustibles como la reducción de emisiones de CO₂.

Capítulo 1. CONTEXTO Y MARCO LEGAL

El modelo económico global actual se encuentra en una encrucijada al enfrentarse a una transformación impulsada por dos grandes desafíos: la [crisis climática](#) y el [agotamiento de los recursos naturales](#). Ambos problemas nos conducen hacia un sistema productivo poco sostenible y precisan una reorientación hacia la [circularidad](#) y la [descarbonización](#).

El [cambio climático](#), originado por el aumento de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) a la atmósfera, es la consecuencia directa de un modelo basado en los combustibles fósiles. En 2023, la dependencia global de estos combustibles superó el 81,5 % en las fuentes de energía primaria [2]. Enfrentar el cambio climático supone un reto importante que impulsará el desarrollo de fuentes energéticas limpias alternativas, generando oportunidades para la innovación tecnológica. Esta transición se centra en las energías renovables, que requieren modificar en gran parte la infraestructura de suministro energético mundial.

En la década de los 90 la comunidad internacional y el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático (IPCC) de la ONU, generó una creciente conciencia promoviendo que la sociedad comenzase a reflexionar sobre la gravedad de los efectos del aumento de los GEI [3]. Esta toma de conciencia se vio en los compromisos firmados en el [Protocolo de Kioto \(1997\)](#) [4]. A partir de este protocolo se puso en marcha la [Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático](#) que comprometía a los países industrializados a limitar y reducir las emisiones de gases de efecto invernadero con metas específicas para cada Estado.

El compromiso ha seguido reafirmandose a través de las sucesivas [Conferencias de las Partes \(COP\)](#), de las cuales destaca el [Acuerdo de París \(COP21\)](#) celebrado en 2015, donde se fijó el objetivo de mantener el calentamiento global por debajo de los 2°C para el final de este siglo, y limitarlo a 1,5°C [5]. Otras de las cumbres clave a destacar son las de [Glasgow \(COP26\)](#), [Sharm el-Sheikh \(COP27\)](#) y [Dubái \(COP28\)](#). Todas ellas buscan reforzar los compromisos nacionales, la justicia climática para los países más vulnerables y promover la transición energética cumpliendo los objetivos de la COP21.

La [escasez de materias primas naturales](#) es una realidad presente en numerosos sectores industriales. Los recursos naturales son, en su mayoría, finitos y no renovables, por lo que su explotación continua no es sostenible. Una prueba de ello son las constantes tensiones en las cadenas de suministros globales provocadas por la volatilidad de mercados de materias primas. Esta situación fue agudizada por la pandemia de COVID-19 que puso de manifiesto la fragilidad de una economía dependiente de recursos finitos.

El modelo actual de consumo está basado en producir, consumir y desechar, usando gran cantidad de materias primas naturales que finalmente acaban depositándose directamente en vertederos. Esta tendencia obliga a emprender políticas que modifiquen la economía actual hacia una [economía](#)

circular donde el principal objetivo es la reutilización y reciclado de residuos. Estos son empleados como materias primas o combustibles alternativos cerrando el círculo de ciertos tipos de residuos de manera medioambientalmente segura.

En 2015, la ONU presentó la **Agenda 2030 sobre el Desarrollo Sostenible**, en la que se recogen una serie de postulados que a través de **17 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS)**, guían a los países y sociedades hacia la mejora de la vida de todos y la salud del planeta [6]. Los ODS identificados como más relevantes a lo largo de la cadena de valor del sector cementero, se considera que son: el ODS7 (Energía Asequible y No Contaminante), el ODS9 (Industria, Innovación e Infraestructura), el ODS11 (Ciudades y Comunidades Sostenibles), el ODS12 (Producción y Consumo Responsables) y el ODS13 (Acción por el Clima).

1.1 Marco legal europeo

La Unión Europea lidera el desarrollo e implantación del conjunto de políticas de descarbonización y economía circular. El pilar fundamental de este marco normativo es el **Pacto Verde Europeo de 2019 (European Green Deal)**, que actúa como hoja de ruta para convertir a Europa en el primer continente climáticamente neutro para 2050 [7]. El Consejo Europeo, a través de la Legislación europea sobre el clima (Reglamento (UE) 2021/1119) [8], estableció jurídicamente el principal objetivo para la transición ecológica de la UE: lograr una reducción interna neta de las emisiones de gases de efecto invernadero, al menos, un 55 % para 2030, respecto a los valores de 1990.

La Unión Europea ha desarrollado un ambicioso paquete de medidas **«Objetivo 55» (Fit for 55)** que revisan y actualizan la legislación de la UE para alcanzar los objetivos de 2030 y 2050 [9]. El Régimen de Comercio de Derechos de Emisión de la Unión Europea (RCDE) fue reformado profundamente por el paquete Fit for 55 para transformarlo en uno más ambicioso y alineado con los objetivos climáticos de la UE. Este sistema establece un límite máximo decreciente de emisiones e impone un coste a cada tonelada de CO₂ de origen fósil emitida, lo que incentiva a diferentes sectores como la industria cementera, a mejorar su eficiencia energética y a aumentar el consumo de combustibles biomásicos que computan como emisiones neutras.

Esas herramientas de descarbonización contribuyen a la transición hacia una economía circular a través del **Plan de Acción para la Economía Circular (Circular Economy Action Plan, CEAP)**, parte fundamental del Pacto Verde Europeo [10]. La pieza clave de este plan es la **Directiva Marco de Residuos (Directiva 2008/98/CE)** [11], en la que se establecen los principios de la jerarquía de residuos (prevención, preparación para la reutilización, reciclado, valorización y eliminación). Estos principios respaldan legalmente a la valorización de los residuos no reciclables como recurso en instalaciones como las cementeras.

Finalmente, la **Directiva de Emisiones Industriales (Directiva 2010/75/UE, revisada en 2024)** obliga a las instalaciones a obtener una AAI que fije los límites de emisión [12]. Estas AAI se basan en los documentos de referencia (BREFs) sobre las mejoras técnicas disponibles (MTDs), los cuales recogen y describen las tecnologías y métodos más eficaces para reducir las emisiones de manera específica para cada industria.

A través de todos estos instrumentos, Europa proporciona un marco normativo sólido que promueve la valorización de residuos como herramienta necesaria para avanzar hacia la economía circular y la descarbonización, consolidando su posición como uno de los continentes más avanzados en materia de sostenibilidad.

1.2 Marco legal nacional

El marco europeo se materializa en la legislación española principalmente a través de tres instrumentos: la Ley 7/2022, de 8 de abril, de residuos y suelos contaminados para una economía circular [13], el Plan Estatal Marco de Gestión de Residuos (PEMAR) 2024-2035 [14] y el Plan Nacional Integrado de Energía y Clima (PNIEC) 2021-2030 [15]. Esta ley es especialmente relevante, ya que establece un marco jurídico para promover un modelo de economía circular eficiente en el uso de los recursos y la protección del medio ambiente, mientras que el plan funciona como hoja de ruta para el cumplimiento de los objetivos nacionales y europeos.

El principio rector de estas normativas es la **jerarquía de residuos**, a la que ya nos referimos en el apartado anterior. Al implementar este principio, la legislación nacional refuerza la prioridad de la valorización, tanto material como energética, frente a la eliminación en vertederos. Para fomentar este principio, la Ley 7/2022 introduce un impuesto estatal sobre el depósito de residuos en vertederos, la incineración y la co-incineración. Este impuesto incrementa significativamente el coste del vertido, que impulsa a productores y gestores de residuos a que busquen alternativas más sostenibles como la valorización.

Con el PEMAR se definen estrategias, directrices y objetivos, que establecen una obligación para las Comunidades Autónomas de alinear su planificación asegurando el cumplimiento de las metas nacionales. De este modo, el Plan funciona como mecanismo que garantiza que las directrices estatales, especialmente aquellas que tienen relación con la reducción de vertido y el fomento de la valorización, sean implementadas eficazmente en las políticas autonómicas, como la andaluza. Complementando este marco El PNIEC, la hoja de ruta de España para la transición energética identifica la valorización energética de residuos como una herramienta clave para la descarbonización de sectores industriales con altas emisiones, como el cementero.

1.3 Marco legal andaluz

En el ámbito autonómico, el instrumento clave de planificación es el Plan Integral de Residuos de Andalucía. Hacia una Economía Circular en el Horizonte 2030 (PIRec 2030) [16]. Este Plan se sitúa como uno de los pilares fundamentales de la gestión de residuos de la comunidad, junto con la Ley 3/2023, de 30 de marzo, de Economía Circular de Andalucía (LECA) [17] y el Plan Andaluz de Acción por el clima (PAAC) [16].

El objetivo más ambicioso del PIRec es reducir a un máximo del 10 % la cantidad de residuos municipales depositados en vertederos para 2035. Este objetivo obliga a la Administración a buscar salidas alternativas para los residuos no reciclables. En este escenario, la valorización energética en instalaciones industriales como las cementeras es una solución indispensable para el cumplimiento de los objetivos del plan.

El **PIRec 2030** ha supuesto una simplificación de los procedimientos administrativos en materia de residuos que ayuda a una rápida implementación práctica de sus principios. La mejora en la recogida separada de biorresiduos y envases es una de las actuaciones que ha aumentado la eficiencia del reciclaje pudiendo obtener un combustible sólido recuperado (CSR) de mayor calidad.

La **LECA** establece el marco jurídico para la transición de Andalucía hacia una economía circular, fomentando el uso eficiente de los recursos y reducción de la producción de residuos. Este principio se materializa a través de la simbiosis industrial de la industria cementera donde transforma los residuos de otros sectores en recursos energéticos o materiales.

El **PAAC** fue aprobado en 2021, alinea los objetivos regionales con los del Pacto Verde Europeo y el Acuerdo de París. Está compuesto por tres programas: programa de mitigación, de adaptación y comunicación y participación. En concreto el programa de mitigación es especialmente relevante en este estudio ya que identifica la valorización material y energética en la industria cementera como una estrategia clave para la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero.

En resumen, el marco andaluz en su conjunto (**LECA**, **PAAC** y **PIRec 2030**) crea la necesidad de aumentar la valorización energética a través de un sólido marco administrativo posicionando a las cementeras andaluzas como una industria clave y necesaria para alcanzar un modelo económico circular alineado con los objetivos nacionales y europeos.

CAPÍTULO 2. EL EMPLEO DE RESIDUOS COMO MATERIAS PRIMAS ALTERNATIVAS Y COMBUSTIBLES ALTERNATIVOS EN EL PROCESO DE FABRICACIÓN DEL CEMENTO.

2.1 Características de la fabricación del cemento y su huella de carbono.

El cemento es el material de construcción más utilizado del mundo con una producción mundial de 4.000 millones de toneladas al año [18]. Es el principal constituyente del hormigón y está valorado por su resistencia, durabilidad e inercia térmica, aspectos clave para la eficiencia energética. A pesar de su importancia, es responsable de aproximadamente el 8% de las emisiones mundiales de CO₂ [19]. A nivel nacional, el sector cementero representa cerca del 5% de las emisiones totales de CO₂ de España. [20]

Su composición química es variada y contiene una mezcla de óxidos, principalmente sílice (SiO₂), alúmina (Al₂O₃), óxido de hierro (Fe₂O₃), cal (CaO), yeso (CaSO₄·2H₂O), magnesia (MgO) y óxidos de álcalis (Na₂O y K₂O). Las propiedades principales del cemento son adquiridas a través de someter materias primas naturales, como caliza, marga, arcillas, entre otras, a un intenso tratamiento térmico, alcanzando temperaturas que superan los 1500°C.

El proceso industrial por vía seca es la tecnología de producción más extendida por su viabilidad técnica, económica y medioambiental. Este proceso consta de cinco etapas de producción principales:

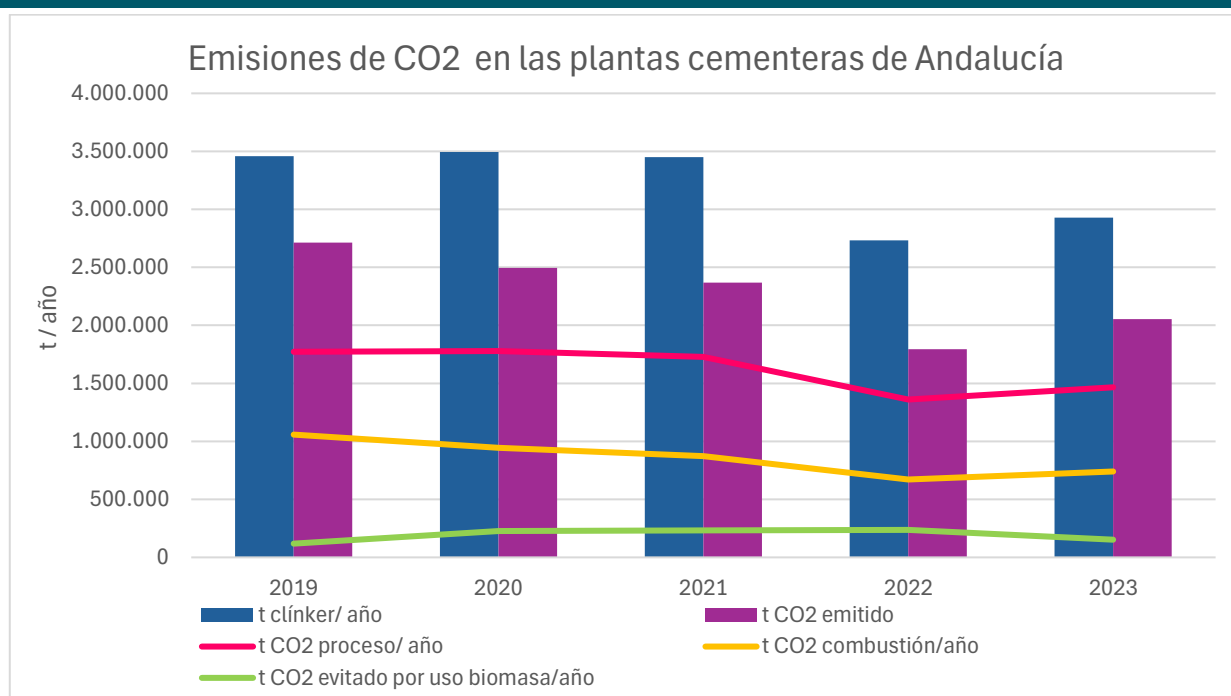
- 1ª Obtención y preparación de las materias primas: en las canteras se extraen, a través de voladuras controladas, en el caso de materiales duros (como calizas y pizarras), mientras que en el caso de materiales blandos (arcillas y margas) se utilizan excavadoras para su extracción.
- 2ª Trituración, prehomogeneización y molienda de crudo: para obtener una granulometría adecuada se trituran los materiales y, posteriormente, se realiza una homogeneización y una molienda para reducir su tamaño produciendo el denominado "crudo".
- 3ª Fabricación del clínker: el crudo se calienta antes de su entrada en el horno rotativo con los gases de combustión procedentes del propio horno. Posteriormente, se somete a altas temperaturas para producir el clínker de cemento. Este proceso puede incluir una precalcinación, para aumentar la eficiencia térmica antes de su cocción final en el horno rotatorio.
- 4ª Extracción del horno, enfriado con aire, transporte y almacenamiento del clínker: antes de ser almacenado se enfría para que se conserven sus propiedades.
- 5ª Fabricación de cemento: el clínker se muele finalmente junto con una cantidad de aditivos como yeso (además de otros tipos de aditivos según el tipo de cemento) para producir el cemento.

La etapa del proceso que mayor aporte a la huella de carbono tiene es la producción de clínker. Esta huella tiene dos orígenes distintos:

- **CO₂ de combustión:** Es el CO₂ que proviene de la combustión de los combustibles empleados en el horno (tradicionalmente fósiles) para alcanzar las temperaturas necesarias en la producción de clínker.
- **CO₂ del proceso:** es el CO₂ intrínseco que se libera en el horno por la reacción química de descarbonatación de la caliza ($\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$)

Los datos recogidos en la Figura 1 muestran la evolución de la huella de carbono durante los años 2019 hasta 2023. En este periodo la reducción de la producción de clínker y el CO₂ total emitido fue de un 15,3 % y 24,3 % respectivamente. Igualmente, el CO₂ de proceso y el de combustión sufrieron un descenso considerable respecto a 2019.

Figura 1 Producción de clínker y emisiones de CO₂ en las plantas cementeras de Andalucía (2019-2023).
Fuente: OFICEMEN.

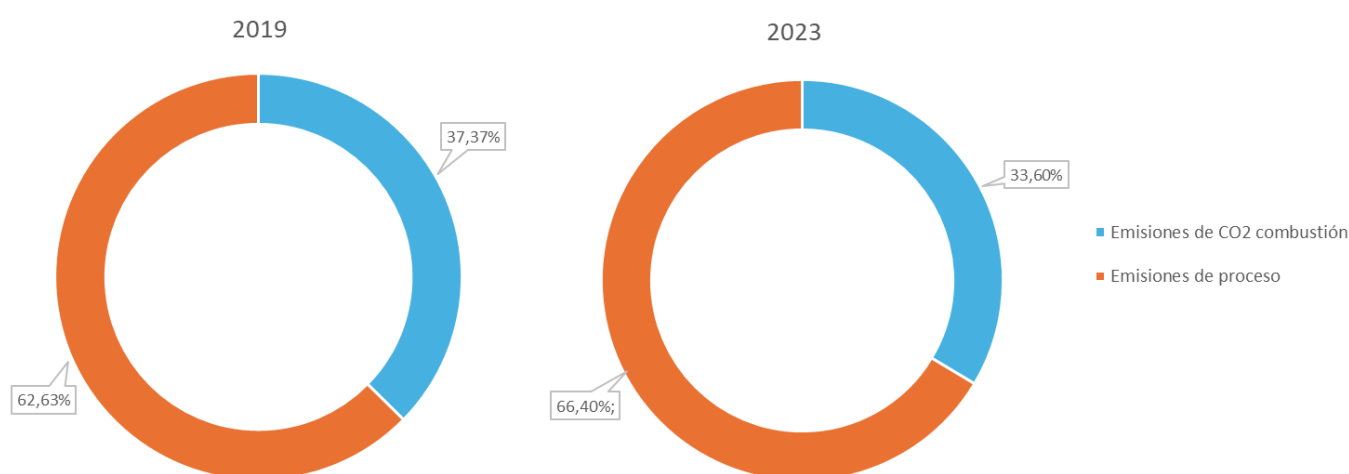


Cabe destacar la **disminución de las emisiones derivadas de la combustión**, fruto de la sustitución progresiva de combustibles fósiles por biomasa y otras fuentes alternativas.

El CO₂ evitado por el empleo de combustibles con biomasa se ha incrementado respecto a 2019, y tanto las emisiones de proceso como las de combustión muestran tendencias descendentes. En conjunto, los datos confirman una **reducción de la intensidad de carbono del sector cementero andaluz** gracias a la innovación tecnológica y la valorización energética.

En la Figura 2 se comparan las fuentes de emisiones de CO₂ entre 2019 y 2023, en la producción de cemento en Andalucía. Mientras que en 2019 las emisiones de combustión representaban el 37,4%, en 2023 se redujeron hasta un 33,6%. Las emisiones de proceso aumentaron desde un 62,6% en 2019, hasta un 66,4% en 2023.

Figura 2. Comparación de las fuentes de emisiones de CO₂ en la producción de cemento en Andalucía entre 2019 y 2023



2.2.- La Valorización de residuos como estrategia de economía circular.

La fabricación de cemento presenta características que la hacen especialmente adecuada para aplicar los principios de la economía circular, ya que permite aprovechar una amplia variedad de residuos que no se pueden reutilizar ni reciclar, para sustituir tanto a las materias primas naturales como a los combustibles fósiles en el proceso productivo.

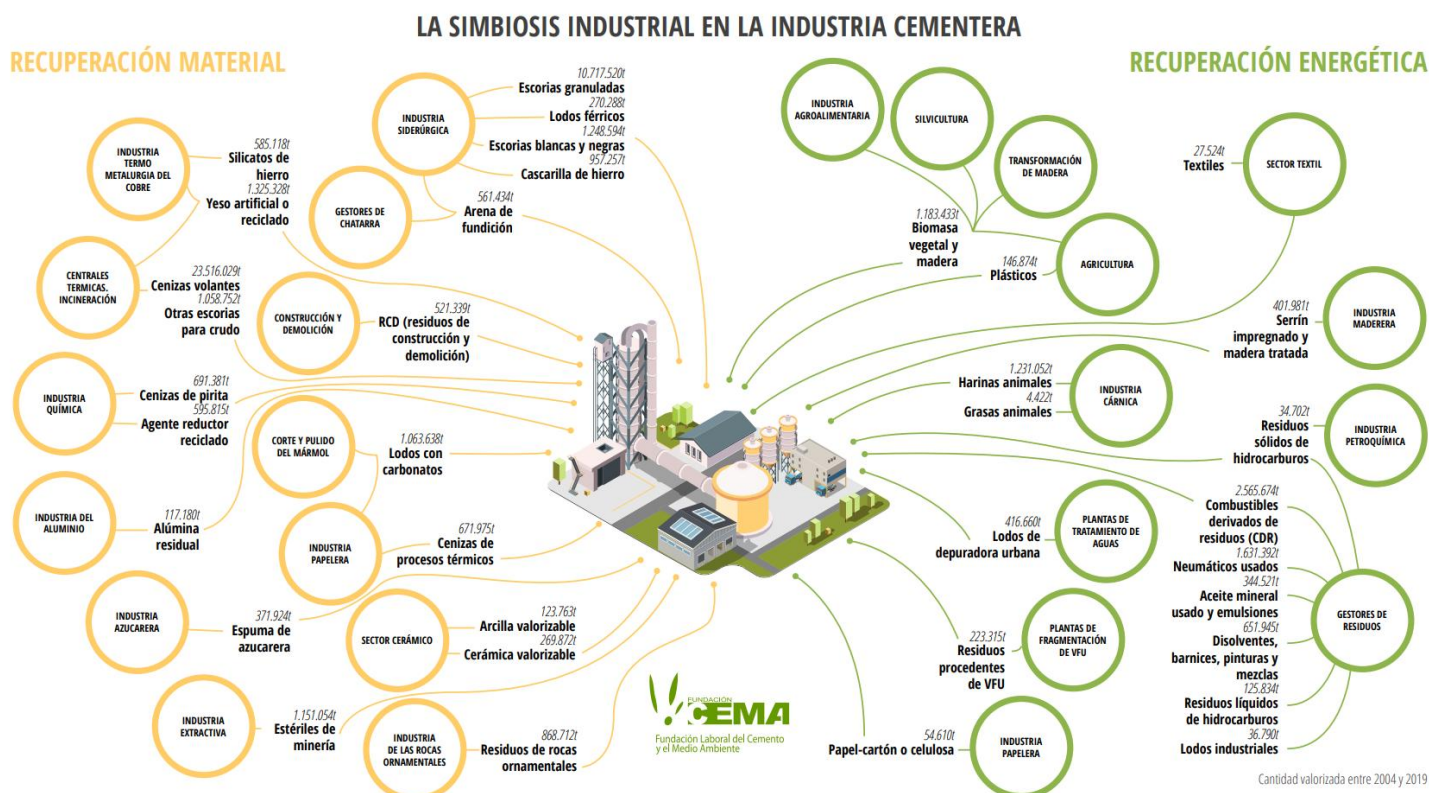
Esta práctica, conocida como **simbiosis industrial**, está consolidada en la industria cementera española. Como se observa en la Figura 3, en la actualidad se valorizan materiales de hasta 25 tipos de industrias distintas, respetando la jerarquía de gestión de residuos establecida por la UE. Las altas temperaturas alcanzadas en el horno y los largos tiempos de residencia de los gases de combustión en el proceso garantizan la destrucción completa de los compuestos orgánicos más persistentes, lo que proporciona un valor añadido en términos de seguridad.

Existen dos tipos principales de valorización en la industria cementera que se analizarán en los siguientes apartados:

- Valorización o recuperación material, mediante el uso de materias primas alternativas.
- Valorización o recuperación energética, mediante el uso de combustibles alternativos.

Figura 3. Materiales y combustibles alternativos más comúnmente usados en la fabricación del cemento de diferentes industrias.

Fuente: Observatorio de la economía circular en la industria cementera. Fundación Laboral del Cemento y el Medio Ambiente (CEMA).



2.2.1 Valorización material: El uso de las materias primas alternativas.

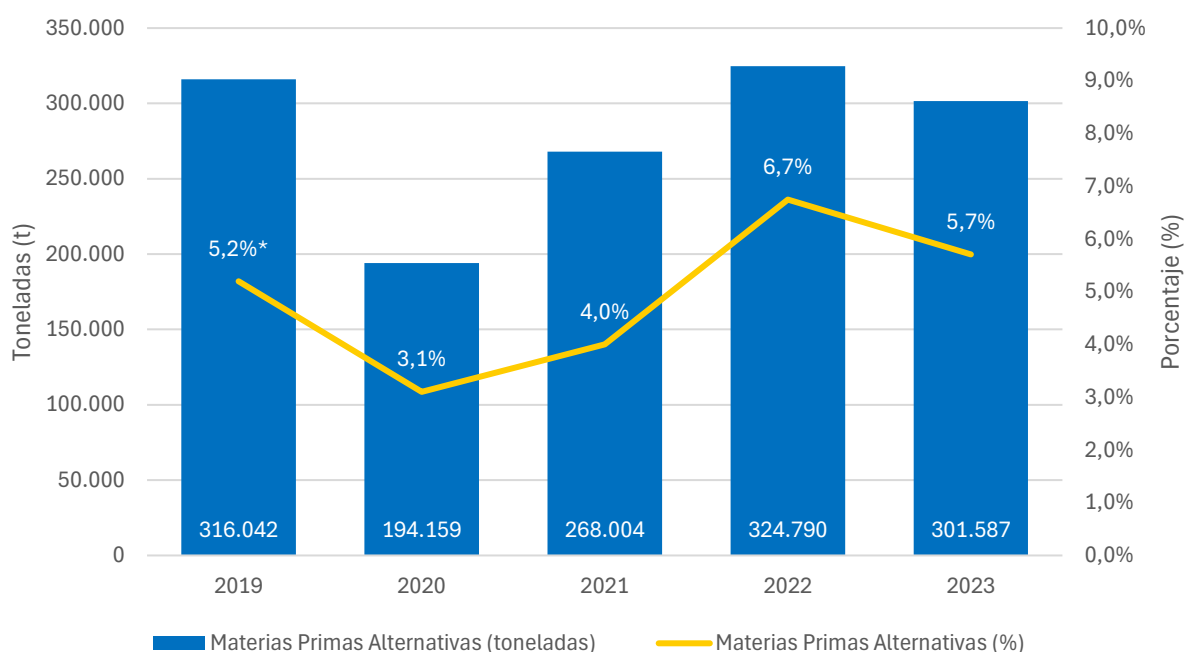
La valorización o recuperación material consiste en el uso de residuos cuya composición química permite que puedan sustituir a materias primas naturales para la producción de clínker. Estos materiales se conocen como materias primas alternativas y se incorporan al proceso por dos vías diferentes:

- Los residuos se incorporan para formar la harina de crudo que se introduce en el horno para la fabricación de clínker. Estos residuos sustituyen calizas, margas o arcillas. Además de contribuir a la circularidad con este proceso se consigue alcanzar un beneficio ambiental adicional si la materia prima alternativa utilizada es un residuo descarbonatado (escorias, cenizas, etc.), ya que se reduce el CO₂ emitido por la reacción química de calcinación de la caliza.
- Algunas materias primas alternativas se añaden directamente al clínker durante la etapa final de molienda para producir diferentes tipos de cementos.

La evolución del consumo de materias primas alternativas en la industria cementera andaluza durante el periodo 2019 – 2023 se muestra en la Figura 4. Tras representar un 5,2%¹ en 2019 las cantidades de materias primas alternativas utilizadas en 2020 y 2021 fueron significativamente menores. Esto se debe, posiblemente al impacto de la pandemia en las industrias relacionadas con los subproductos. Posteriormente, el consumo mejoró considerablemente, alcanzando su máximo en 2022, con un 6,7% de materias primas alternativas valorizadas sobre el total de materias primas utilizadas. En 2023, el consumo de materias primas alternativas representó de un 5,7% del total empleado.

Este aumento en la utilización de materias primas alternativas refleja una mayor eficiencia en el uso de recursos y una reducción progresiva del consumo de materias primas naturales, lo que contribuye directamente a disminuir la huella de carbono del cemento andaluz. La integración de subproductos industriales en el proceso productivo consolida al sector cementero como un ejemplo de avance en sus objetivos de sostenibilidad y descarbonización.

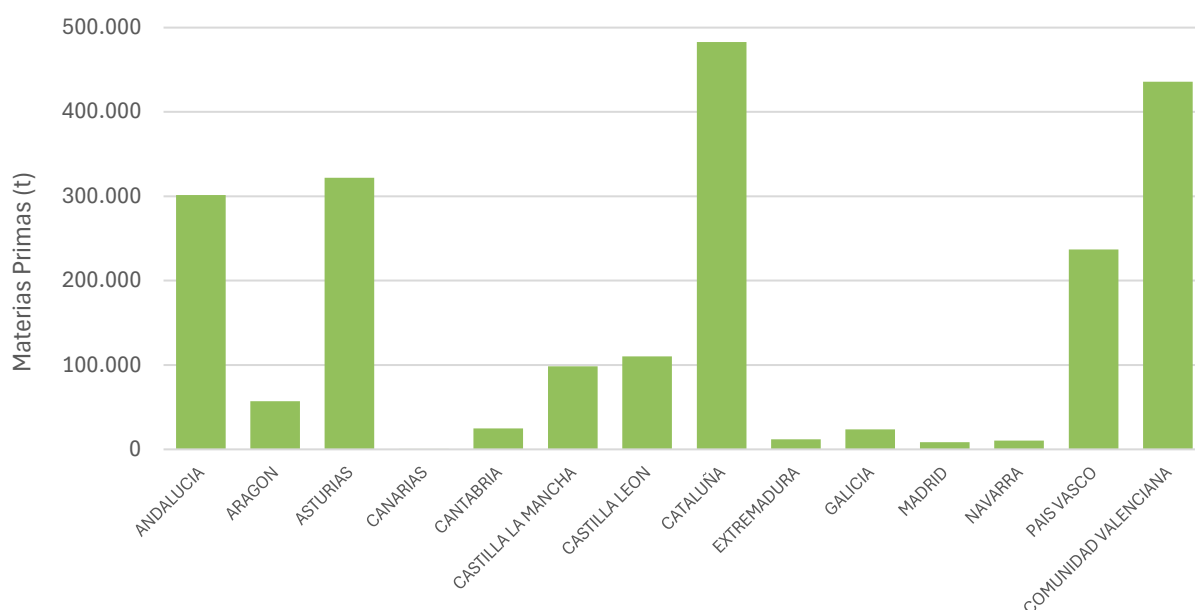
Figura 4. Evolución del consumo de Materias Primas Alternativas (toneladas y %) en la industria del cemento en Andalucía (2019-2023). Fuente: Elaboración propia.



¹ El dato de consumo de materias primas alternativas de 2019 ha sido revisado respecto al publicado en el informe anterior (2021), ajustándose de un 5,8% al 5,2% actual tras el cierre de datos definitivos publicados por OFICEMEN.

En el contexto nacional, la Figura 5 refleja el consumo de materias primas alternativas por comunidades autónomas. Respecto a la situación observada en la actualización del estudio de 2019, cabe destacar el aumento significativo del consumo en Cataluña, Comunidad Valenciana y País Vasco. Andalucía, que ocupaba en el anterior informe el segundo lugar en cuanto a consumo, en 2023 ha sido superada por Cataluña, Comunidad Valencia y Asturias, aunque se consolida también como una de las comunidades con mayor consumo de este tipo de materias primas, ocupando el cuarto lugar por debajo de las anteriormente mencionadas.

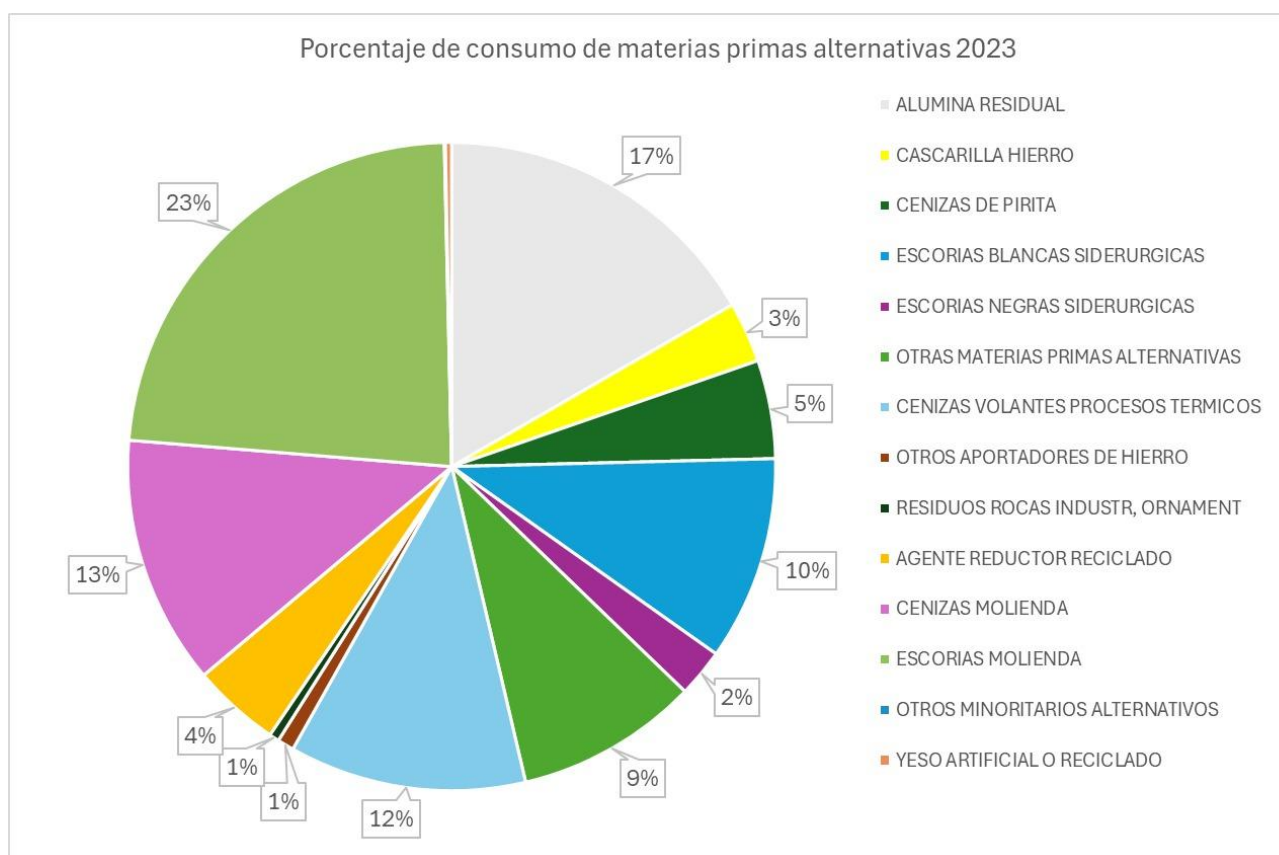
Figura 5 Consumo de materias primas alternativas en el sector del cemento por comunidades autónomas 2023.
Fuente: Elaboración propia.



La tipología de materias primas alternativas consumidas en Andalucía en 2023 se representa en la Figura 6, donde existe una predominancia de los subproductos procedentes de otros procesos industriales, lo que refleja el grado de simbiosis entre las industrias. Los dos materiales más utilizados en ese año fueron las escorias (23%) y la alúmina residual (17%), ambos añadidos en la etapa final de molienda de clínker. Esta diversidad de materias primas alternativas permite al sector reducir apreciablemente la extracción de recursos y adaptarse a la disponibilidad de los diferentes materiales.

Figura 6. Distribución de las diferentes materias primas alternativas consumidas en la fabricación del cemento en Andalucía 2023.

Fuente: Elaboración propia.

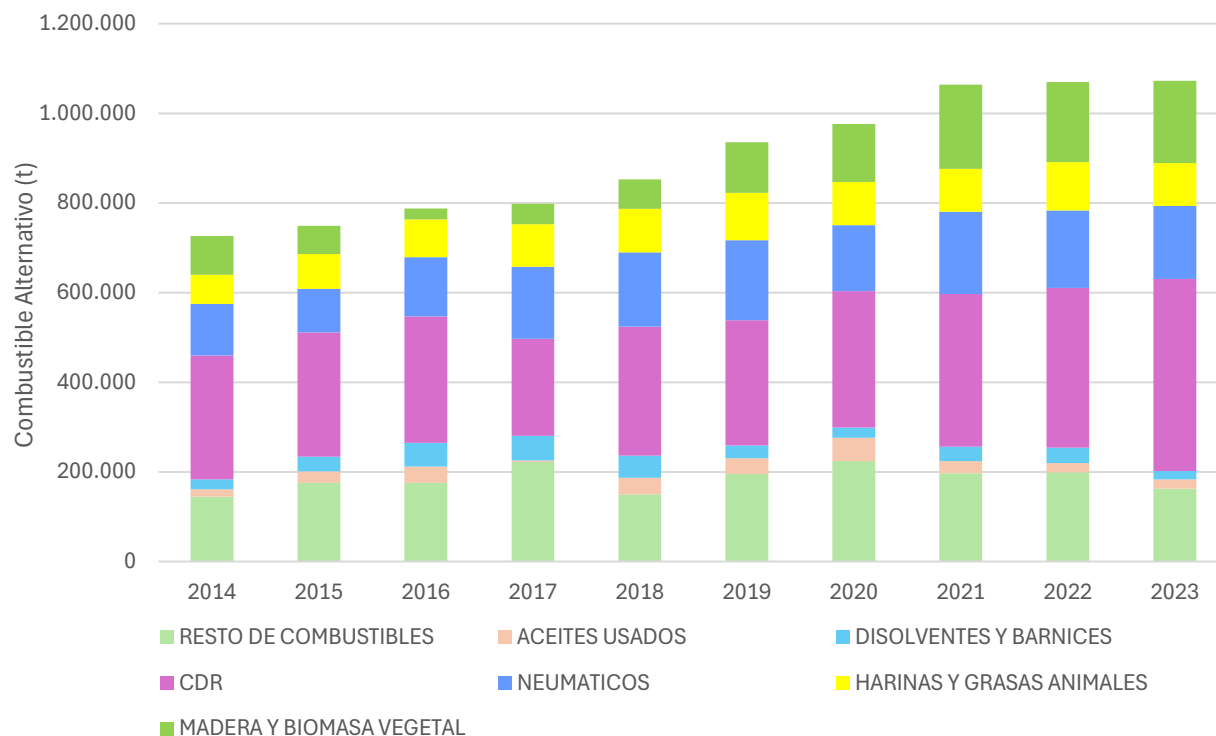


2.2.2 Valorización energética: El uso de combustibles alternativos.

La valorización energética consiste en el aprovechamiento del contenido energético de residuos que no puedan ser reutilizados, reciclados o valorizados materialmente de forma viable. Estos materiales se conocen como combustibles alternativos y, en muchos casos, se corresponden con residuos no peligrosos previamente acondicionados para aumentar su poder calorífico (combustibles derivados de residuos, CDRs). Estos combustibles sustituyen a los combustibles fósiles tradicionales, como el carbón o el coque de petróleo, en el horno de clínker. Además de contribuir a que los residuos no acaben en vertederos, también contribuye a reducir la huella de carbono del proceso industrial de producción de cemento.

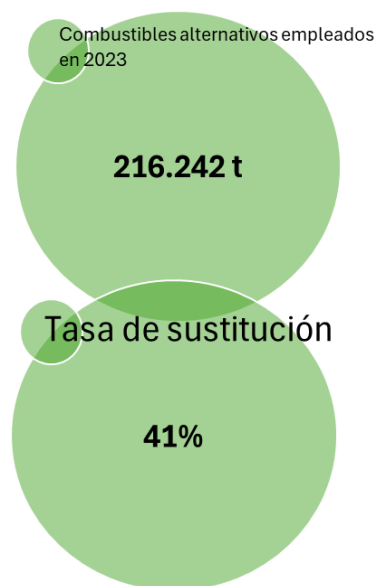
A nivel nacional, el consumo de combustibles alternativos en la industria cementera ha experimentado un aumento desde 2019 del 14,7% hasta alcanzar 1.072.758 toneladas en 2023 (Figura 7). Los principales residuos empleados son: combustibles derivados de residuos, biomásas, neumático fuera de uso (NFU) y harinas y grasas animales. En este mismo año se registró una tasa de sustitución térmica en el sector cementero nacional del 40,9%.

Figura 7. Evolución del consumo de combustibles alternativos en España por tipologías.
Fuente: Elaboración propia.



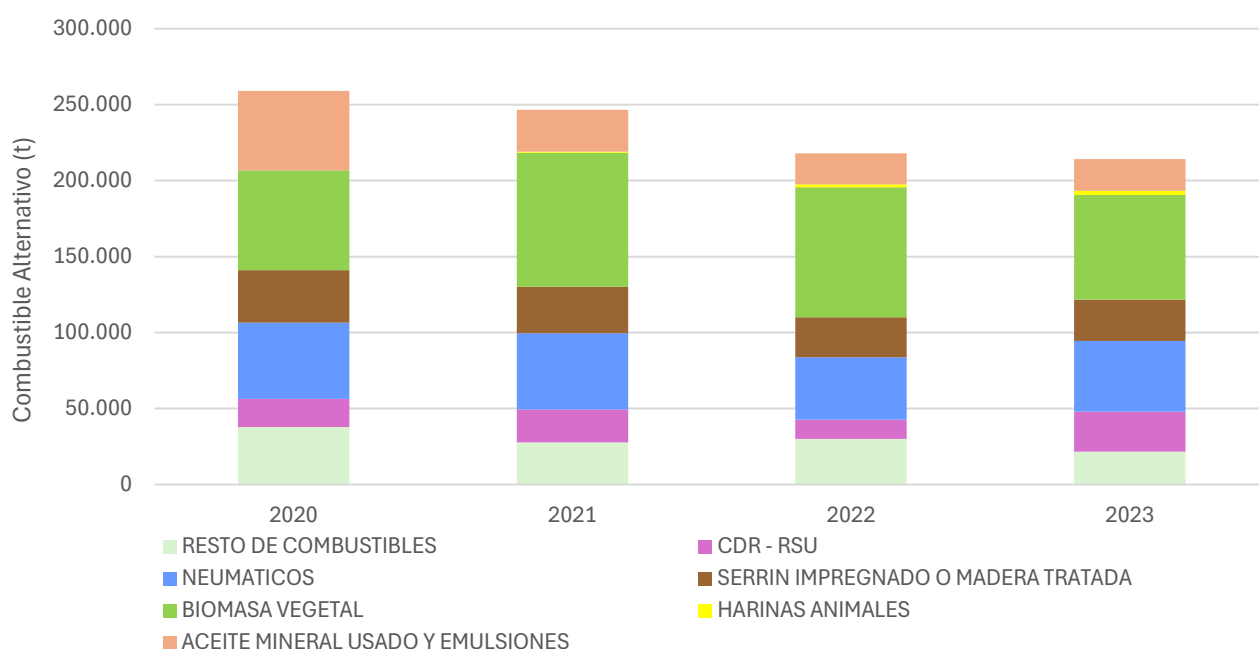
La Figura 8 expone los datos de consumo de combustibles alternativos en la industria cementera andaluza en el año 2023. El sector consumió un total de 216.242 toneladas, alcanzando una tasa de sustitución de combustibles alternativos del 41%. Este dato, cercano a la media nacional, refuerza la posición de Andalucía en la valorización energética consolidando el segundo puesto que ya ocupaba en 2019 a nivel nacional.

Figura 8. Combustibles alternativos empleados en el sector cementero andaluz en 2023.



En la Figura 9 se muestra la evolución de los consumos de los principales tipos de combustibles alternativos y su proporción relativa en Andalucía. La composición de los combustibles utilizados en Andalucía resulta ligeramente diferente a la que se registra a nivel nacional. Los combustibles predominantes en Andalucía son la biomasa, neumáticos fuera de uso y, por último, el serrín impregnado. Mientras que a nivel nacional se observa un mayor empleo de combustibles derivados de residuos, en Andalucía se está priorizando el empleo en combustibles con alto contenido biomásico. Esta preferencia regional se justificaría por la mayor disponibilidad de residuos biomásicos en la región, que reduciría los costes logísticos y de transporte.

Figura 9. Evolución del consumo de los principales tipos de combustibles alternativos en Andalucía (2020-2023).
Fuente: Elaboración propia.



El gran beneficio ambiental que presentan los combustibles alternativos es el menor factor de emisión respecto los combustibles fósiles tradicionales. Como se observa en la Tabla 1, la madera y la biomasa vegetal presentan un factor de emisión (FE) nulo. Otros, como los neumáticos fuera de uso o los combustibles derivados de residuos, aunque de origen parcialmente fósil, tienen un FE ligeramente menor a los tradicionales. El aumento del grado de sustitución térmica usando estos residuos, junto con el menor valor de FE que llevan asociados, hace más significativa la reducción de emisiones de CO₂, concretamente las asociadas a la combustión, en el proceso de producción.

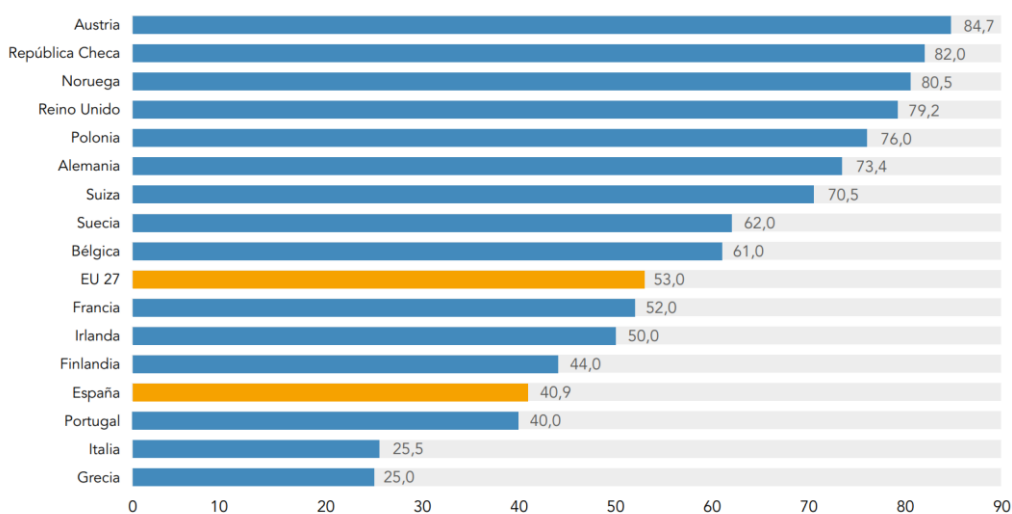
Tabla 1. Factores de emisión de CO₂ y poder calorífico de diferentes tipos de combustibles tradicionales y alternativos de la industria cementera. Fuente: Sistema Español de Inventario de Emisiones. Metodologías de estimación de emisiones.

Combustible	FE (kg CO ₂ /GJ)	PCI (GJ/t)
Coque de petróleo	99,3	33
Hulla	98,3	21
Disolventes y Barnices	85,1	20
Fueloil	77,4	42
Gasóleo	74,1	43
Aceites Usados	73,3	20
Neumáticos	58,8	30
Serrín Impregnado	49,5	16
Combustible Derivado de Residuos	31,1	21
Harinas y Grasas Animales	0	20
Madera y Biomasa Vegetal	0	15

2.2.3.- Posicionamiento Competitivo y Potencial de Mejora.

A pesar de los progresos realizados, la posición de la industria cementera española en el ámbito europeo evidencia un importante potencial de mejora en materia de valorización energética. Los datos más recientes (de 2023) representados en la Figura 10, sitúan la tasa de sustitución térmica de España en un 40,9%.

Figura 10. Porcentaje de sustitución de combustibles fósiles por combustibles derivados de residuos en Europa (2023). Fuente: Memoria de Actividades 2024 Fundación CEMA.



Este valor de sustitución térmica, aunque ha supuesto un aumento significativo desde 2019, sigue siendo un 12% menor que la media obtenida en la Unión Europea (53%). Esta diferencia es aún más pronunciada frente a países líderes en esta práctica, como Austria (84,7%), República Checa (82%) o Alemania (73,4%), que duplican la tasa de sustitución térmica (TSR) española. Esta diferencia no parece estar ocasionada por limitaciones técnicas en las instalaciones españolas, sino que podrían deberse a otros factores como:

- Políticas ambientales más ambiciosas: ciertos países cuentan con unas regulaciones más estrictas que incentivan u obligan a darle un destino final a los residuos que no sean los vertederos.
- Mejores infraestructuras de gestión de residuos: son característicos sus sistemas eficientes para la recogida, separación y pretratamiento de residuos, asegurando una buena calidad de combustibles alternativos.
- Mayor aceptación social y marcos legales favorables: existe una mayor aceptación social en relación con la gestión de residuos y un respaldo administrativo más eficiente para la valorización energética.

Para acelerar la descarbonización del sector y mejorar su competitividad en un mercado exigente, es necesario que España supere estas barreras y avance hacia niveles de TSR similares a los alcanzados por los países líderes en descarbonización. Para ello, resulta imprescindible promover políticas que impulsen la mejora del marco técnico, administrativo y de mercado, así como el de comunicación y percepción pública para el uso de combustibles alternativos.

2.2.4.- Marco técnico para la valorización de residuos.

La utilización de residuos como combustibles es una actividad rigurosamente regulada para garantizar la protección del medio ambiente y la salud pública. El instrumento legal que se encarga de establecer las condiciones específicas para cada planta es [la Autorización Ambiental Integrada \(AAI\)](#), aprobada por el organismo competente para cada comunidad autónoma.

Existen variaciones entre las autorizaciones ambientales integradas de cada fábrica de España, pero, como ha sido indicado anteriormente, todas se basan en las Mejores Técnicas Disponibles (MTDs) donde se establecen una serie de requisitos y límites para los residuos a valorizar. Los parámetros más relevantes son los siguientes:

- **Poder Calorífico Inferior (PCI):** para asegurar una combustión eficiente las autorizaciones fijan un valor mínimo de PCI para los combustibles alternativos, que normalmente está en torno a 6,3 GJ/t (1.500 kcal/kg).
- **Contenido de Cloro:** se limita entre un 1% y un 3% para prevenir problemas operativos en hornos, como la formación de pegaduras o bloqueos de equipos. Este límite depende de la configuración de la planta y la composición de las materias primas.
- **Contenido de Azufre:** se limita entre un 1% y un 6%, aunque en hornos de vía seca este parámetro es menos crítico que en otras industrias.

- **Metales Pesados:** se establecen límites estrictos para elementos como el mercurio (Hg), el cadmio (Cd) y el talio (Tl). Las altas temperaturas del horno y el ambiente alcalino favorecen la retención de la mayoría de los metales en la matriz de clínker.
- **Compuestos Orgánicos:** se establecen valores límite máximos de compuestos organohalogenados como PCB (policlorobifenilos) y PCT (policloroterfenilos), que son característicos por su persistencia ambiental y su toxicidad. Las condiciones del horno, con temperaturas superiores a 850°C durante al menos 2 segundos, tal como establece la normativa vigente sobre incineración, garantizan la destrucción completa y segura de estos compuestos, asegurando su eliminación y minimizando los riesgos ambientales

Finalmente, las emisiones de gases contaminantes y partículas a la atmósfera están reguladas actualmente por el Real Decreto 815/2013, de 18 de octubre, que aprueba el Reglamento de emisiones industriales y desarrolla la Ley de Prevención y Control Integrados de la Contaminación. En este decreto se establecen, entre otras cosas, los valores límites establecidos (VLE) nacionales para las cementeras que son de obligado cumplimiento para asegurar que la actividad se desarrolla de forma segura.

2.3.- La estandarización de combustibles alternativos como herramienta de mejora.

Uno de los principales retos de la industria cementera al utilizar combustibles alternativos en sus hornos es mantener el equilibrio entre la calidad del producto final, la operación estable del horno y el cumplimiento ambiental, dada las variaciones de composición y las características de los combustibles alternativos.

El funcionamiento óptimo del horno depende de que exista un aporte energético constante y homogéneo de combustible. La variación del poder calorífico, la humedad o la granulometría provoca fluctuaciones en la llama e inestabilidad térmica que afecta a la calidad del producto y aumenta el riesgo de atasco y la formación de anillos en el horno.

Como se ha visto en el apartado anterior, existen especificaciones técnicas que permiten evaluar la seguridad del uso de los residuos como combustible. Aun así, dentro de las posibilidades de selección de los diferentes residuos, existe un margen de mejora en la industria cementera andaluza que puede alcanzarse a través del empleo de combustibles de mejor calidad, entendiendo por tal todos aquellos combustibles alternativos que contribuyan a un menor impacto ambiental y una mayor eficiencia energética.

Una de las herramientas clave para conseguir este objetivo consiste en la **estandarización de combustibles alternativos**, que transforma un residuo heterogéneo en un **recurso energético predecible y de alta calidad**, con beneficios directos sobre la operación (como un poder calorífico constante que provoca menos paradas no programadas y mayor vida útil de los materiales refractarios al evitar choques térmicos), su comercialización y la sostenibilidad.

En Europa, esta estandarización se desarrolla en la **norma ISO 21640:2021 “Combustibles sólidos recuperados – Especificaciones y clases”**. Esta norma que anula y reemplaza la anterior ISO

15359:2012, es el estándar para la clasificación y especificaciones de los combustibles sólidos recuperados. Su metodología de evaluación del combustible se basa en tres propiedades:

- **Poder calorífico inferior:** determina el valor energético del combustible.
- **Contenido en cloro:** afecta a la operatividad del horno y corrosión de los equipos.
- **Contenido en mercurio:** indicador clave de la presencia de contaminantes.

La norma utiliza un sistema de cinco clases para cada parámetro, permitiendo clasificar un combustible sólido recuperado con un código de calidad para cada propiedad (Por ejemplo: poder calorífico inferior clase 1, Cloro clase 2, Mercurio Clase 3). Este sistema proporciona un lenguaje común y eficiente entre productores de combustibles sólidos recuperados e industrias interesadas, facilitando su compra y venta.

La estandarización es, en definitiva, una inversión que impacta directamente en la eficiencia y en la rentabilidad de la operación de producción de la industria cementera. No solo optimizando su proceso productivo y garantizando la calidad del producto, si no que refuerza su compromiso con la sostenibilidad.

Capítulo 3. ANÁLISIS DE LA GENERACIÓN Y CONSUMO DE RESIDUOS VALORIZABLES EN ANDALUCÍA

3.1 Generación de residuos valorizables en Andalucía.

Para la evaluación de la capacidad de valorización de la industria cementera andaluza resulta imprescindible dimensionar la cantidad de residuos disponibles. Para ello se han analizado los datos proporcionados por la Junta de Andalucía, en su inventario anual de producción de residuos, que incluye tanto los residuos peligrosos, como los residuos no peligrosos que pueden ser valorizables².

Tabla 2. Producción de residuos peligrosos (RP) y no peligrosos (RnoP) valorizables energéticamente (R1) registrada en Andalucía en 2023.

Fuente: Consejería de sostenibilidad y medio ambiente de Andalucía

TIPO DE RESIDUO	Producción susceptible de valorización energética (R1) (t/año)	% Total Generado
RESIDUOS PELIGROSOS (RP)	148.249	36,07%
RESIDUOS NO PELIGROSOS (RnoP)	4.049.398	19,38%
Producción total (R1)	4.197.647	

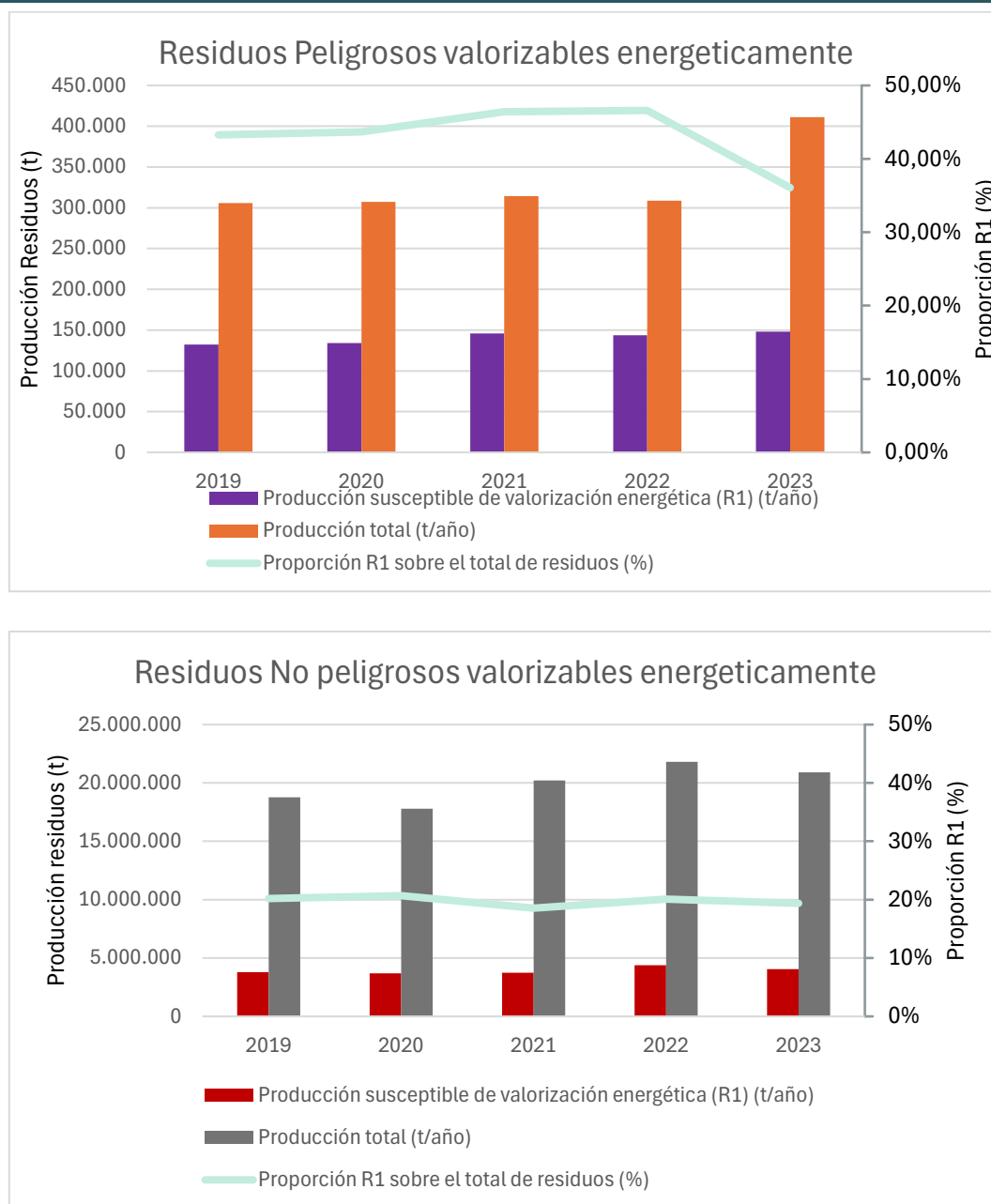
En la Figura 11 se recoge la evolución de la producción de estos residuos durante el periodo 2019-2023.

En 2023, en Andalucía se generaron 148.249 toneladas de residuos peligrosos y 4.049.398 toneladas de residuos no peligrosos susceptibles de valorización energética (R1). Estas cantidades representan, respectivamente, el 36% del total de residuos peligrosos y el 19,4 % del total de residuos no peligrosos generados ese año.

En Andalucía, la producción total de residuos ha aumentado a lo largo del periodo analizado. Aunque la proporción de residuos valorizables energéticamente (R1) respecto al total ha disminuido, la cantidad absoluta de estos residuos (en toneladas por año) ha seguido creciendo: aproximadamente un 12 % más en los residuos peligrosos y un 7 % más en los no peligrosos.

² Clasificados como R1 por el decreto 73/2012.

Figura 11. Residuos peligrosos (RP) y no peligrosos (RnoP) en Andalucía (2019 – 2023)



Es interesante comparar la cantidad de residuos susceptibles de ser valorizados energéticamente, con el consumo real de la industria.

En 2023, las cementeras andaluzas emplearon 216.242 toneladas de combustibles alternativos. Esta cifra representó solo el 5,15% del total de residuos energéticamente valorizables (R1) generados en Andalucía, lo que evidencia un gran margen de crecimiento de la valorización en cementeras como solución para evitar el vertido como destino final de los residuos no reciclables.

A continuación, en las tablas 3 y 4, se muestra una clasificación de los residuos peligrosos y no peligrosos susceptibles de ser valorizables, clasificados por su composición.

Tabla 3. Clasificación por composición de residuos peligrosos susceptibles de ser valorizados (R1) en Andalucía (2023).

ACEITES, CERAS Y GRASAS		
LER	Descripción LER	Producción (t)
100609	Residuos del tratamiento del agua de refrigeración que contienen aceites	12
120107	Aceites minerales de mecanizado sin halógenos (excepto las emulsiones o disoluciones)	3
120110	Aceites sintéticos de mecanizado	0
120112	Ceras y grasas usadas	124
130507	Agua aceitosa procedente de separadores de agua/sustancias aceitosas	14.198
190810	Mezclas de grasas y aceites procedentes de la separación de agua/sustancias aceitosas distintas de las especificadas en el código 19 08 09	192
200126	Aceites y grasas distintos de los especificados en el código 20 01 25	36
DISOLVENTES		
LER	Descripción LER	Producción (t)
70104	Otros disolventes, líquidos de limpieza y licores madre orgánicos	213
70204	Otros disolventes, líquidos de limpieza y licores madre orgánicos	1
70304	Otros disolventes, líquidos de limpieza y licores madre orgánicos	30
70704	Otros disolventes, líquidos de limpieza y licores madre orgánicos	0
80119	Suspensiones acuosas que contienen pintura o barniz con disolventes orgánicos u otras sustancias peligrosas	257
90103	Soluciones de revelado con disolventes	32
140603	Otros disolventes y mezclas de disolventes	2.998
200113	Disolventes	165
PINTURAS, ADHESIVOS Y EMULSIONES		
LER	Descripción LER	Producción (t)
80111	Residuos de pintura y barniz que contienen disolventes orgánicos u otras sustancias peligrosas	2.083
80117	Residuos del decapado o eliminación de pintura y barniz que contienen disolventes orgánicos u otras sustancias peligrosas	433
80409	Residuos de adhesivos y sellantes que contienen disolventes orgánicos u otras sustancias peligrosas	362
80415	Residuos líquidos acuosos que contienen adhesivos o sellantes con disolventes orgánicos u otras sustancias peligrosas	3
120108	Emulsiones y disoluciones de mecanizado que contienen halógenos	4
120109	Emulsiones y disoluciones de mecanizado sin halógenos	683
130802	Otras emulsiones	42
200127	Pinturas, tintas, adhesivos y resinas que contienen sustancias peligrosas	90
HIDROCARBUROS, ALQUITRANES, CARBÓN Y FUELÓLEO		
LER	Descripción LER	Producción (t)
50108	Otros alquitranes	44
61302	Carbón activo usado (excepto la categoría 06 07 02)	454
130701	Fuelóleo y gasóleo	198
160708	Residuos que contienen hidrocarburos	10.509
170301	Mezclas bituminosas que contienen alquitrán de hulla	86
190110	Carbón activo usado procedente del tratamiento de gases de combustión	16
191102	Alquitranes ácidos	249
Lodos y AGUAS		
LER	Descripción LER	Producción (t)
50103	Lodos de fondos de tanques	1.247
50106	Lodos oleosos procedentes de operaciones de mantenimiento de plantas o equipos	414
70111	Lodos del tratamiento in situ de efluentes que contienen sustancias peligrosas	249
70311	Lodos del tratamiento in situ de efluentes que contienen sustancias peligrosas	28
70611	Lodos del tratamiento in situ de efluentes que contienen sustancias peligrosas	9
80115	Lodos acuosos que contienen pintura o barniz con disolventes orgánicos u otras sustancias peligrosas	171
80314	Lodos de tinta que contienen sustancias peligrosas	73
130502	Lodos de separadores de agua/sustancias aceitosas	5.334
140605	Lodos o residuos sólidos que contienen otros disolventes	32
190811	Lodos que contienen sustancias peligrosas procedentes del tratamiento biológico de aguas residuales industriales	799
OTROS		
LER	Descripción LER	Producción (t)

20108	Residuos agroquímicos que contienen sustancias peligrosas	71
30104	Serrín, virutas, recortes, madera, tableros de partículas y chapas que contienen sustancias peligrosas	1
50109	Lodos del tratamiento in situ de efluentes que contienen sustancias peligrosas	2.355
50115	Arcillas de filtración usadas	382
70108	Otros residuos de reacción y de destilación	3.558
70110	Otras tortas de filtración y absorbentes usados	1
70201	Líquidos de limpieza y licores madre acuosos	167
70208	Otros residuos de reacción y de destilación	11
70214	Residuos procedentes de aditivos que contienen sustancias peligrosas	19
70301	Líquidos de limpieza y licores madre acuosos	540
70310	Otras tortas de filtración y absorbentes usados	8
70413	Residuos sólidos que contienen sustancias peligrosas	2
70513	Residuos sólidos que contienen sustancias peligrosas	29
70601	Líquidos de limpieza y licores madre acuosos	798
70608	Otros residuos de reacción y de destilación	431
70701	Líquidos de limpieza y licores madre acuosos	311
70708	Otros residuos de reacción y de destilación	2.385
70710	Otras tortas de filtración y absorbentes usados	13
80121	Residuos de decapantes o eliminadores de pintura y barniz	54
80312	Residuos de tintas que contienen sustancias peligrosas	416
80317	Residuos de tóner de impresión que contienen sustancias peligrosas	9
90101	Soluciones de revelado y soluciones activadoras al agua	91
90104	Soluciones de fijado	5
110113	Residuos de desengrasado que contienen sustancias peligrosas	134
130501	Sólidos procedentes de desarenadores y de separadores de agua/sustancias aceitosas	9
130507	Agua aceitosa procedente de separadores de agua/sustancias aceitosas	14.198
130508	Mezcla de residuos procedentes de desarenadores y de separadores de agua/sustancias aceitosas	622
130702	Gasolina	3
130703	Otros combustibles (incluidas mezclas)	10.440
150110	Envases que contienen restos de sustancias peligrosas o están contaminados por ellas	8.981
150202	Absorbentes, materiales de filtración (incluidos los filtros de aceite no especificados en otra categoría), trapos de limpieza y ropas protectoras contaminados por sustancias peligrosas	6.712
160107	Filtros de aceite	1.660
160114	Anticongelantes que contienen sustancias peligrosas	664
160305	Residuos orgánicos que contienen sustancias peligrosas	1.306
160508	Productos químicos orgánicos desechados que consisten en sustancias peligrosas o las contienen	19
170204	Vidrio, plástico y madera que contienen sustancias peligrosas o están contaminados por ellas	145
190208	Residuos combustibles líquidos que contienen sustancias peligrosas	8.137
190209	Residuos combustibles sólidos que contienen sustancias peligrosas	44.139
191206	Madera que contiene sustancias peligrosas	17
200129	Detergentes que contienen sustancias peligrosas	23

Tabla 4. Clasificación por composición de residuos no peligrosos susceptibles de ser valorizados (R1) en Andalucía (2023).

FRACCIÓN NO COMPOSTADA		
LER	Descripción LER	Producción (t)
190501	Fracción no compostada de residuos municipales y asimilados	641.922
190502	Fracción no compostada de residuos de procedencia animal o vegetal	4.124
PAPEL Y CARTÓN		
LER	Descripción LER	Producción (t)
30307	Desechos, separados mecánicamente, de pasta elaborada a partir de residuos de papel y cartón	24.847
150101	Envases de papel y cartón	275.047
191201	Papel y cartón	462.022
200101	Papel y cartón	98.001
RESIDUOS DE TEJIDOS VEGETALES Y ANIMALES		
LER	Descripción LER	Producción (t)
20102	Residuos de tejidos de animales	17
20103	Residuos de tejidos de vegetales	431.708
20202	Residuos de tejidos de animales	2.275
PLÁSTICOS		
LER	Descripción LER	Producción (t)

20104	Residuos de plásticos (excepto embalajes)	67.209
200139	Plásticos	10.746
ENVASES		
LER	Descripción LER	Producción (t)
150101	Envases de papel y cartón	275.047
150102	Envases de plástico	91.220
150103	Envases de madera	52.828
150104	Envases metálicos	13.627
150106	Envases mixtos	125.720
150107	Envases de vidrio	68.261
150109	Envases textiles	130
MADERA Y SERRÍN		
LER	Descripción LER	Producción (t)
30105	Serrín, virutas, recortes, madera, tableros de partículas y chapas distintos de los mencionados en el código 03 01 04	35.643
191207	Madera distinta de la especificada en el código 19 12 06	135.197
200138	Madera distinta de la especificada en el código 20 01 37	51.964
ROPA Y TEXTIL		
LER	Descripción LER	Producción (t)
40222	Residuos de fibras textiles procesadas	224
150203	Absorbentes, materiales de filtración, trapos de limpieza y ropas protectoras distintos de los especificados en el código 15 02 02	5.864
191208	Textiles	2.739
200110	Ropa	18.070
LODOS		
LER	Descripción LER	Producción (t)
20201	Lodos de lavado y limpieza	106
20705	Lodos del tratamiento in situ de efluentes	3.173
30305	Lodos de destintado procedentes del reciclado de papel	485
30311	Lodos del tratamiento in situ de efluentes, distintos de los especificados en el código 03 03 10	10.358
50110	Lodos del tratamiento in situ de efluentes, distintos de los mencionados en el código 05 01 09	1.873
70112	Lodos del tratamiento in situ de efluentes, distintos de los especificados en el código 07 01 11	980
70212	Lodos del tratamiento in situ de efluentes, distintos de los especificados en el código 07 02 11	576
70612	Lodos del tratamiento in situ de efluentes, distintos de los especificados en el código 07 06 11	6.668
70712	Lodos del tratamiento in situ de efluentes, distintos de los especificados en el código 07 07 11	378
80116	Lodos acuosos que contienen pintura o barniz, distintos de los especificados en el código 08 01 15	80
80307	Lodos acuosos que contienen tinta	346
190805	Lodos del tratamiento de aguas residuales urbanas	471.861
190812	Lodos procedentes del tratamiento biológico de aguas residuales industriales distintos de los especificados en el código 19 08 11	56.088
190902	Lodos de la clarificación del agua	33.201
OTROS		
LER	Descripción LER	Producción (t)
20.107	Residuos de la silvicultura	6.994
20.109	Residuos agroquímicos distintos de los mencionados en el código 02 01 08	275
20.202	Residuos de tejidos de animales	2.275
20.203	Materiales inadecuados para el consumo o la elaboración	20.101
20.304	Materiales inadecuados para el consumo o la elaboración	23.839
20.702	Residuos de la destilación de alcoholes	1
20.704	Materiales inadecuados para el consumo o la elaboración	5.524
30.301	Residuos de corteza y madera	17
30.308	Residuos procedentes de la clasificación de papel y cartón destinados al reciclado	209
40.109	Residuos de confección y acabado	0
40.220	Lodos del tratamiento in situ de efluentes, distintos de los mencionados en el código 04 02 19	36
50.117	Betunes	90
70.213	Residuos de plástico	7.584
70.215	Residuos procedentes de aditivos distintos de los especificados en el código 07 02 14	10
70.514	Residuos sólidos distintos de los especificados en el código 07 05 13	0
80.112	Residuos de pintura y barniz, distintos de los especificados en el código 08 01 11	1
80.313	Residuos de tintas distintos de los especificados en el código 08 03 12	22
80.315	Lodos de tinta distintos de los especificados en el código 08 03 14	99
80.318	Residuos de tóner de impresión, distintos de los especificados en el código 08 03 17	145
80.410	Residuos de adhesivos y sellantes, distintos de los especificados en el código 08 04 09	180
120.105	Virutas y rebabas de plástico	1.502
160.103	Neumáticos fuera de uso	35.036

160.115	Anticongelantes distintos de los especificados en el código 16 01 14	0
160.119	Plástico	2.804
160.306	Residuos orgánicos distintos de los especificados en el código 16 03 05	3.435
170.201	Madera	32.048
170.203	Plástico	7.221
170.302	Mezclas bituminosas distintas de las especificadas en el código 17 03 01	62.458
190.503	Compost fuera de especificación	94.590
190.606	Lodos de digestión del tratamiento anaeróbico de residuos animales y vegetales	107
190.809	Mezclas de grasas y aceites procedentes de la separación de agua/sustancias aceitosas que sólo contienen aceites y grasas comestibles	36.923
190.901	Residuos sólidos de la filtración primaria y cribado	632
190.904	Carbón activo usado	537
191.204	Plástico y caucho	263.599
191.210	Residuos combustibles (combustible derivado de residuos)	15.308
200.111	Tejidos	525
200.125	Aceites y grasas comestibles	221.974

Seguidamente, en las tablas 5 y 6, se presenta a modo de resumen la producción de los 10 residuos peligrosos y residuos no peligrosos valorizables, más abundantes en Andalucía.

De esta clasificación, se desprende una conclusión clara: mientras que el 83% de los residuos peligrosos más frecuentes son de origen fósil, más del 77% de los residuos no peligrosos más habituales tienen un carácter biomásico (como residuos vegetales, maderas, papel o cartón) o parcialmente biomásico (como neumáticos fuera de uso, lodos de papelería o la fracción no compostada de los residuos sólidos urbanos).

La elevada disponibilidad y la composición de los residuos no peligrosos en Andalucía ofrecen un importante potencial para aumentar su uso como combustibles alternativos con un alto contenido en biomasa, contribuyendo así a la reducción de las emisiones de CO₂ asociadas a la producción de cemento. Del mismo modo, resulta relevante considerar la valorización de los residuos peligrosos, ya que esta opción permite evitar los impactos ambientales asociados a su incineración o a su depósito en vertedero.

Tabla 5. Principales residuos peligrosos valorizables (R1) generados en Andalucía en 2023. Elaboración propia a partir de datos de la Consejería de Medio Ambiente.

Año	LER	Descripción LER	Producción (t)
2023	190209	Residuos combustibles sólidos que contienen sustancias peligrosas	44.139
2023	130507	Agua aceitosa procedente de separadores de agua/sustancias aceitosas	14.198
2023	130506	Aceites procedentes de separadores de agua/sustancias aceitosas	11.709
2023	160708	Residuos que contienen hidrocarburos	10.509
2023	130703	Otros combustibles (incluidas mezclas)	10.440
2023	150110	Envases que contienen restos de sustancias peligrosas o están contaminados por ellas	8.981
2023	190208	Residuos combustibles líquidos que contienen sustancias peligrosas	8.137
2023	150202	Absorbentes, materiales de filtración (incluidos los filtros de aceite no especificados en otra categoría), trapos de limpieza y ropas protectoras contaminados por sustancias peligrosas	6.712
2023	130502	Lodos de separadores de agua/sustancias aceitosas	5.334
2023	70108	Otros residuos de reacción y de destilación	3.558
Total (t/año)			148.249
%Total de RP 2023			83%

Tabla 6. Principales residuos no peligrosos valorizables (R1) generados en Andalucía en 2023.

Año	LER	Descripción LER	Producción (t)
2023	20103	Residuos de tejidos de vegetales	431.708
2023	150101	Envases de papel y cartón	275.047
2023	150106	Envases mixtos	125.720
2023	190501	Fracción no compostada de residuos municipales y asimilados	641.922
2023	190805	Lodos del tratamiento de aguas residuales urbanas	471.861
2023	191201	Papel y cartón	462.022
2023	191204	Plástico y caucho	263.599
2023	191207	Madera distinta de la especificada en el código 19 12 06	135.197
2023	200101	Papel y cartón	98.001
2023	200125	Aceites y grasas comestibles	221.974
Total (t/año)			4.049.398
% Total RnoP 2023			77%

3.2. Consumo de combustibles en la industria cementera andaluza.

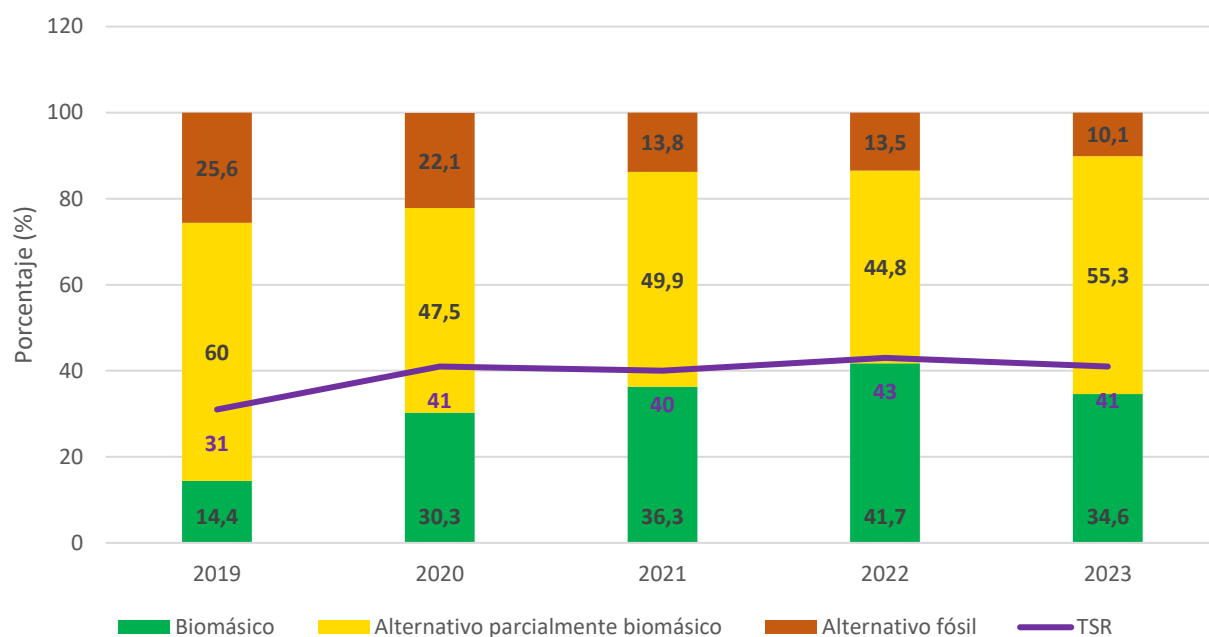
Para el análisis del potencial de valorización es necesario realizar una clasificación de los combustibles alternativos procedentes de residuos en diferentes categorías, según su composición:

- **Combustible alternativo fósil:** es aquel combustible que procede directamente de combustibles fósiles, del tratamiento de otros combustibles fósiles, aceites y lodos o derivados del refino de petróleo, la petroquímica y la industria química orgánica.
- **Combustible alternativo parcialmente biomásico:** estos combustibles se caracterizan por tener una composición con un porcentaje de residuos biomásicos.
- **Combustible alternativo biomásico:** el combustible está compuesto por residuos procedentes de biomasa.

En la **Figura 12** se presenta el análisis de los datos de consumo de combustibles del período 2019-2023, que refleja una clara tendencia positiva hacia la descarbonización de la industria cementera andaluza. La tasa de sustitución térmica ha aumentado significativamente, pasando de un 31% en 2019 a un 41% en 2020, lo que significa un aumento en el uso de combustibles alternativos como sustituto de parte de la energía proporcionada por el fósil tradicional. A partir de 2020, la tasa de sustitución se ha mantenido estable y siempre por encima del 40%, alcanzando su máximo valor en 2022, con un 43% de energía procedente de este tipo de combustibles.

Figura 12. Distribución del consumo de combustibles en la industria cementera andaluza (2019-2023). Segregación de combustibles alternativos sobre el consumo total de energía térmica.

Fuente: Elaboración propia.



Además del incremento de la tasa de sustitución térmica es importante analizar la composición de los combustibles alternativos consumidos para determinar el impacto real de la reducción de la huella de carbono. Un incremento en el uso de la fracción biomásica mostrará una evolución favorable hacia el desarrollo de una industria más baja en emisiones de CO₂ y, por tanto, más sostenible.

Se observa un evidente descenso progresivo en el porcentaje de combustibles alternativos fósiles consumidos, que pasó del 25,6% en 2019 al 10,1% en 2023. Por el contrario, el consumo de biomasa como combustible aumentó durante los primeros cuatro años (del 14,4% al 41,7%), registrándose un descenso de 7 puntos porcentuales en 2023.

El uso de combustibles parcialmente biomásicos disminuyó significativamente los primeros años analizados (del 60% en 2019, hasta el 44,8% en 2020) y se mantuvo estable en los dos años siguientes, para finalmente registrar un aumento (hasta un 55,3%) en 2023, lo que parece compensar la reducción observada en el consumo de biomasa.

Por tanto, la tendencia registrada hasta 2023 podría resultar doblemente positiva. No solo se consume mayor cantidad de energía procedente de combustibles alternativos en detrimento del fósil tradicional, sino que la composición de éstos es cada vez más sostenible, con especial importancia en el aumento de la fracción biomásica y la reducción de los combustibles derivados de materiales "tipo fósiles".

Capítulo 4. ANÁLISIS DEL POTENCIAL DE VALORIZACIÓN ENERGÉTICA DE RESIDUOS EN LAS PLANTAS CEMENTERAS DE ANDALUCÍA Y ESCENARIOS DE FUTURO

4.1 Metodología y planteamiento de los escenarios de estudio

Tras el estudio de la situación actual se ha procedido a un análisis de los posibles escenarios a futuro que serían esperables en el sector, en base a los documentos sectoriales disponibles y las tendencias en el empleo de residuos como combustibles alternativos, bajo diferentes condiciones de contorno.

Para ello se ha diseñado una matriz de escenarios con objeto de modelizar el impacto de la evolución de diferentes variables en la capacidad de consumo de combustibles alternativos y en la reducción de emisiones de CO₂ total del proceso de producción.

Se parte de un escenario de referencia que representa la situación real de las distintas variables para la industria cementera andaluza, en el año 2023.

En este escenario se contempla la producción y el consumo de las 7 fábricas de cemento que en 2023 estaban operativas en Andalucía: Niebla (Huelva), Málaga y Córdoba de Cementos Cosmos (Votorantim Cimentos), Alcalá de Guadaíra (Sevilla) del Grupo Cementos Portland Valderrivas, Carboneras (Almería) y Jerez de la Frontera (Cádiz) de Holcim España y Gádor (Almería) de Cemex España.

En 2023, el nivel de producción del sector cementero andaluz alcanzó un nivel del 49%, estimado sobre la capacidad máxima de producción de clínker de todas las fábricas ubicadas en la comunidad.

Tabla 7. Capacidad de producción de clínker del sector cementero en Andalucía en 2023

Producción Clinker 2023	Capacidad Máxima de producción	% Capacidad
2.929.046 t	5.970.000 t	49%

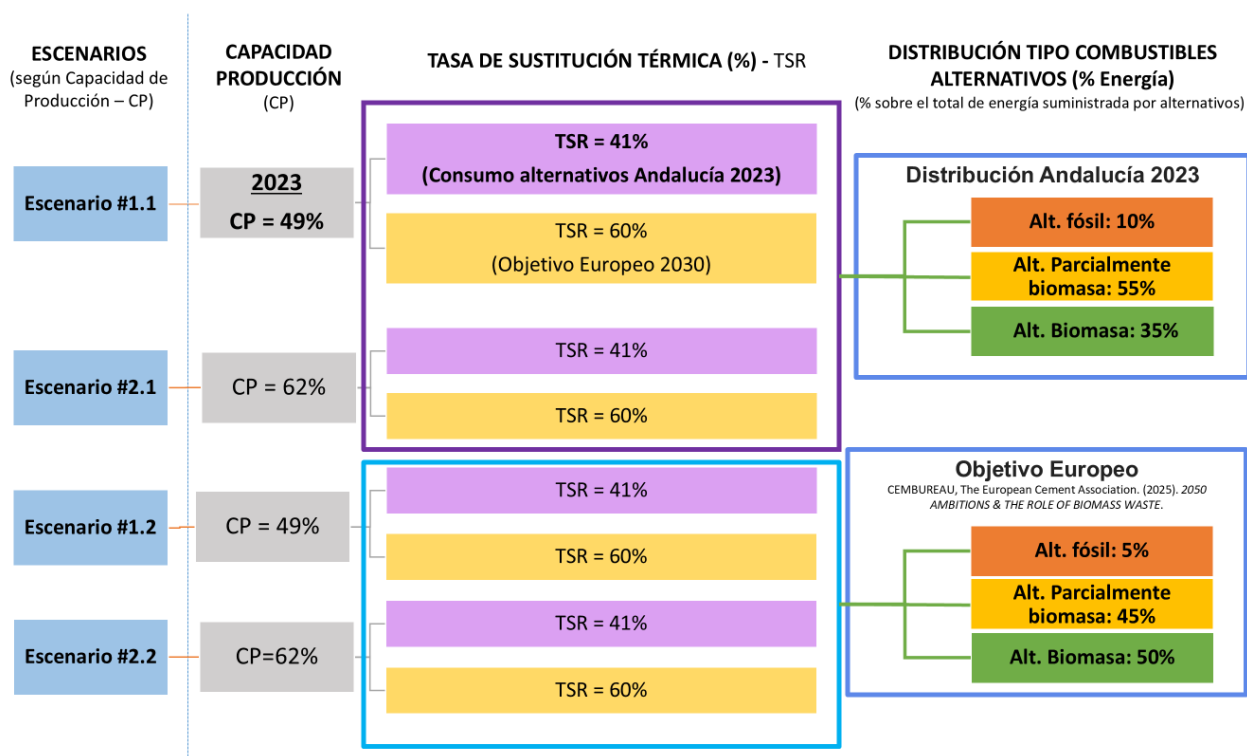
Durante el mismo ejercicio, se consumieron en la totalidad de estas fábricas 216.242 toneladas de combustibles alternativos (cantidad que representaría solo el 5,1% del total de los residuos valorizables generados en Andalucía), alcanzando una media en la tasa de sustitución térmica del 41%. Dentro de esta tasa de sustitución térmica, la distribución de los combustibles utilizados fue del 10% de combustibles alternativos fósiles, 55% de combustibles alternativos parcialmente biomásicos y 35% de combustibles alternativos biomásicos.

Tabla 8. Cálculo de la distribución de la distribución del empleo de combustibles alternativos en función del contenido de biomasa en Andalucía en 2023

COMBUSTIBLES	TONELADAS	PODER CALORÍFICO (GJULIOS)	% ENERGÍA	
TRADICIONALES	191.053	6.334.214	59%	% SOLO ALTERNATIVOS
ALTERNATIVO FÓSIL	21.616	435.184	4%	10
ALTERNATIVO PARCIAL BIOMASA	102.188	2.393.474	22%	55
ALTERNATIVO 100% BIOMASA	92.438	1.498.867	14%	35
TOTAL ALTERNATIVOS	216.242	4.327.525	41%	
TOTAL GENERAL	407.295	10.661.739	100%	

A partir de este escenario de referencia, se han analizado distintas evoluciones y combinaciones, de las variables presentadas (Capacidad de producción (%), tasa de sustitución térmica (%) y porcentaje de distribución o reparto del tipo de combustibles dentro del grupo de alternativos) (**Figura 13**).

Figura 13. Planteamiento de escenarios de valorización



Para la Capacidad de Producción (CP) se definen dos posibles niveles de actividad:

- Escenario 1 (CP 49%): porcentaje de producción real del sector cementero andaluz respecto a su capacidad de producción total (100%).
- Escenario 2 (CP 62%): este escenario de mayor actividad está planteado de manera que la capacidad de producción aumentaría hasta cubrir una demanda en Andalucía de 4.000.000 de toneladas de cemento. Esta cifra corresponde al consumo que se consideraría adecuado para Andalucía, en función de distintos factores socio económicos como: población, nivel de desarrollo económico y proyecciones de construcción e infraestructuras.

Para la tasa de sustitución térmica (TSR) se evalúan dos porcentajes de energía total suministrada por combustibles alternativos:

- TSR 41%: el nivel base, correspondiente a la situación actual en Andalucía en 2023.
- TSR 60%: objetivo definido para alcanzar en 2030 por la actual *"Hoja de ruta de la industria cementera española para alcanzar la neutralidad climática en 2050"*, publicada por la Agrupación de Fabricantes de Cemento de España (Oficemen).

Para la distribución de los tipos de combustibles, dentro del grupo de alternativos (% alternativo fósil - % alternativo parcialmente biomásico - % alternativo totalmente biomásico), se plantean dos alternativas:

- Reparto 10-55-35: correspondiente a la distribución real de los combustibles alternativos empleados por las fábricas de cemento andaluzas en 2023.
- Reparto 5-45-50: objetivo de distribución definido para alcanzarse en 2030 por la industria cementera europea en el documento *"2050 AMBITIONS& THE ROLE OFBIOMASS WASTE de CEMBUREAU"*.

Las distintas combinaciones de estas tres variables han generado un total de 8 casos de estudio (2 niveles de CP, 2 niveles de TSR y 2 tipos de distribución de combustibles).

Cálculo de la Huella de Carbono: Para determinar la huella de carbono en cada una de las combinaciones planteadas anteriormente, ha sido necesario establecer parámetros técnicos para cada tipo de combustible empleado (fósil, alternativo fósil, alternativo parcialmente biomásico y alternativo 100% biomásico).

Para cada tipo de combustible, se ha calculado la huella de carbono teniendo en cuenta el valor promedio para cada tipo de combustible, de su Poder Calorífico Inferior (PCI, GJ/t) y su Factor de Emisión (FE, kg CO₂/GJ), usando los valores representativos por categoría conforme a los datos sectoriales reales.

A continuación, se presentan las ecuaciones empleadas y una tabla con los resultados de las estimaciones realizadas en el periodo de tiempo considerado (2019 - 2023)

Ecuación 1. Valor promedio de PCI (GJ/t)

$$PCI = \frac{\sum (Energía\ procedente\ de\ residuos\ (GJ)) / (Masa\ procedente\ de\ residuos\ (t))}{5\ años}$$

Ecuación 2. Valor promedio FE (kg CO₂/GJ)

$$FE\ categoría = Aportación\ de\ cada\ tipo\ de\ residuo\ (\%) * FE\ (kg\ CO_2/GJ)$$

$$\overline{FE\ total} = \frac{\sum FE\ por\ categoría\ anual}{5\ años}$$

Tabla 9. Poder Calorífico Inferior (PCI) promedio (GJ/t) y Factor de Emisión (FE) promedio (kg CO₂/GJ) por cada categoría de combustible alternativo. Elaboración propia.

TIPO DE COMBUSTIBLE		PCI (GJ/t)	FE (kg CO ₂ /GJ)
TRADICIONAL	Coque de petróleo	32,62	99,30
ALTERNATIVOS	Alternativo fósil	19,06	73,86
	Alternativo parcialmente biomásico	23,76	54,17
	Alternativo 100% biomásico	16,40	0

En el análisis de los distintos escenarios, estos factores se asumen constantes durante el periodo de estudio. Aunque la situación podría cambiar por entradas de nuevos flujos de residuos, como se ha señalado anteriormente, la disponibilidad actual de residuos valorizables (R1) es bastante elevada y se encuentra concentrada mayoritariamente en 10 tipos, por lo que no serían esperables variaciones suficientemente significativas para estos factores.

VARIABLES ANALIZADAS

Partiendo del escenario de referencia, para cada uno de los escenarios han sido estimadas las siguientes variables: Consumo de Combustibles (CC), Consumo de Combustibles Alternativos (CCal), CO₂ emitido por combustión (CO_{2c}), CO₂ emitido por el proceso (CO_{2p}), CO₂ emitido total (CO_{2et}) y CO₂ evitado frente al escenario de referencia (CO₂ evitado). En cada escenario de producción (1 y 2) queda establecido un caso de referencia, al tratarse de cantidades de producción distintas. En las siguientes ecuaciones se describe el procedimiento realizado para el cálculo de cada variable de estudio:

Ecuación 3. Consumo de combustibles alternativos y tradicionales (t/año)

$$Consumo\ energético\ de\ combustibles\ alternativos\ \left(\frac{GJ}{año}\right) = CC\ total \cdot \frac{GJ}{año} * TSR\ (\%)$$

$$Consumo\ energético\ de\ combustible\ tradicional\ \left(\frac{GJ}{año}\right) = CC\ total \cdot \frac{GJ}{año} \cdot (100 - TSR(\%))$$

$$Consumo\ de\ combustibles\ alternativos\ \left(\frac{t\ residuo}{año}\right) = \frac{CC\ \left(\frac{GJ}{año}\right)}{PCI\ \left(\frac{GJ}{t\ residuo}\right)}$$

$$\text{Consumo de combustibles tradicionales} \left(\frac{t \text{ residuo}}{\text{año}} \right) = \frac{CC_{\text{tradic.}} \left(\frac{GJ}{\text{año}} \right)}{PCI \left(\frac{GJ}{t \text{ residuo}} \right)}$$

Ecuación 4. Cálculo CO₂ de combustión (t CO₂/año).

$$CO_2 \text{ combustión} = CC \left(\frac{GJ}{\text{año}} \right) * \frac{FE \left(\frac{kg \text{ CO}_2}{GJ} \right)}{1000}$$

$$CO_2 \text{ combustión} \left(\frac{t \text{ CO}_2}{\text{año}} \right) = CO_2 c \text{ fósil tradicional} \left(\frac{t \text{ CO}_2}{\text{año}} \right) + CO_2 c \text{ Total alternativos} \left(\frac{t \text{ CO}_2}{\text{año}} \right)$$

Ecuación 5. Cálculo de CO₂ de proceso (t CO₂/año).

$$CO_2 \text{ proceso} \left(\frac{t \text{ CO}_2}{\text{año}} \right) = \text{Producción de clinker (t)} * \frac{0,62}{0,49}$$

Ecuación 6. Cálculo CO₂ emitido total (t CO₂/año).

$$CO_2 \text{ emitido} \left(\frac{t \text{ CO}_2}{\text{año}} \right) = CO_2 \text{ proceso} + CO_2 \text{ de combustión}$$

Ecuación 7. Cálculo CO₂ emitido si todo el combustible fuese fósil tradicional (t CO₂/año).

$$CO_2 \text{ de alternativo a fósil} \left(\frac{t \text{ CO}_2}{\text{año}} \right) = C_{\text{cal}} \left(\frac{GJ}{\text{año}} \right) * FE \text{ Combustible tradicional} \frac{\left(\frac{kg \text{ CO}_2}{GJ} \right)}{1000}$$

Si todo el combustible empleado hubiese sido fósil, las emisiones de CO₂ esperables hubieran sido las siguientes:

$$CO_2 \text{ emitido todo cf fósil} \left(\frac{t \text{ CO}_2}{\text{año}} \right) = CO_2 \text{ fósil sustituido alter} + CO_2 \text{ fósil tradic.} + CO_2 p$$

Ecuación 8. Cálculo CO₂ evitado (t CO₂/año).

$$CO_2 \text{ evitado referencia} \left(\frac{t \text{ CO}_2}{\text{año}} \right) = CO_2 \text{ emitido caso de referencia} - CO_2 \text{ caso de estudio}$$

4.2 Resultados y discusión del análisis de los escenarios.

PRESENTACIÓN DE LOS RESULTADOS

Aplicando la metodología descrita, para los diferentes escenarios se han calculado los consumos de combustibles tradicionales y alternativos, así como su distribución y el CO₂ emitido y evitado en cada uno de los casos.

Se presentan a continuación los resultados de las simulaciones realizadas, en dos tablas diferenciadas para cada Escenario de Producción (Escenario 1 y 2).

La primera tabla (Tabla 10) presenta las distintas simulaciones calculadas a partir del "caso de referencia" del Escenario de producción 1. (49%) y contiene los resultados para las variaciones de los dos niveles de TSR (41 y 60%) y para las dos posibles distribuciones de combustibles alternativos (10/55/35 y 5/45/50).

Tabla 10. Resultados de la evaluación del potencial de sustitución en el Escenario 1. Consumo de combustibles y emisiones de CO₂ en las fábricas de cemento con una capacidad de producción del 49%.

		ESCENARIO # 1					
		CAPACIDAD DE PRODUCCIÓN DE CLÍNKER DEL 49% (ANDALUCÍA 2023)					
		Distribución combustibles alternativos Andalucía 2023 #1.1			Distribución combustibles alternativos objetivo europeo #1.2		
		TIPO COMBUSTIBLES ALTERNATIVOS			TIPO COMBUSTIBLES ALTERNATIVOS		
		Fósil	Parcialmente Biomasa	Biomasa	Fósil	Parcialmente Biomasa	Biomasa
TSR = 41%	Distribución combustibles alternativos (%)	10	55	35	5	45	50
	Consumo disgregado combustibles alternativos	21.616	102.188	92.438	10.748	83.143	133.443
	Consumo total combustibles alternativos		216.242			227.334	
	Consumo combustible tradicional		191.053			191.053	
	CO ₂ combustión (CO ₂ combustibles alternativos + CO ₂ combustibles tradicionales)		791.268			750.699	
	CO ₂ combustibles alternativos		162.280			121.712	
	CO ₂ combustible tradicional		628.987			628.987	
	CO ₂ proceso			1.465.062			
	CO ₂ emitido total		2.256.330			2.215.761	
	CO ₂ emitido si todo fuese fósil tradicional			2.523.773			
	CO ₂ evitado frente a escenario referencia		0			40.569	
	t/año						
	Consumo combustibles alternativos	31.775	150.215	138.081	15.887	122.903	197.259
TSR = 60%	Consumo total combustibles alternativos		320.071			336.050	
	Consumo combustible tradicional		128.632			128.632	
	CO ₂ combustión (CO ₂ combustibles alternativos + CO ₂ combustibles tradicionales)		662.033			603.401	
	CO ₂ combustibles alternativos		238.549			179.917	
	CO ₂ combustible tradicional		423.484			423.484	
	CO ₂ proceso			1.465.062			
	CO ₂ emitido total		2.127.095			2.068.463	
	CO ₂ emitido si todo fuese fósil tradicional			2.523.773			
	CO ₂ evitado frente a escenario referencia		129.235			187.867	

La siguiente tabla (Tabla 11) presenta los resultados de los cálculos realizados en base al Escenario 2 de producción (62%).

Tabla 11. Resultados de la evaluación del potencial de sustitución en el Escenario 2. Consumo de combustibles y emisiones de CO₂ en las fábricas de cemento con una capacidad de producción del 62%.

		ESCENARIO # 2					
		CAPACIDAD DE PRODUCCIÓN DE CLÍNKER DEL 62%					
		Distribución combustibles alternativos Andalucía 2023 #2.1			Distribución combustibles alternativos objetivo europeo #2.2		
		TIPO COMBUSTIBLES ALTERNATIVOS			TIPO COMBUSTIBLES ALTERNATIVOS		
		Fósil	Parcialmente Biomasa	Biomasa	Fósil	Parcialmente Biomasa	Biomasa
TSR = 41%	Distribución combustibles alternativos (%)	10	55	35	5	45	50
	Consumo combustibles alternativos	27.316	129.134	116.813	13.582	105.066	168.631
	Consumo total combustibles alternativos		273.262			287.279	
	Consumo combustible tradicional		241.431			241.431	
	CO ₂ combustión (CO ₂ combustibles alternativos + CO ₂ combustibles tradicionales)		999.915			948.649	
	CO ₂ combustibles alternativos		205.072			153.806	
	CO ₂ combustible tradicional		794.844			794.844	
	CO ₂ proceso			1.853.752			
	CO ₂ emitido total		2.853.667			2.802.401	
	CO ₂ emitido si todo fuese fósil tradicional			3.191.632			
	CO ₂ evitado frente a escenario referencia		0			51.266	
	t/año						
	Consumo combustibles alternativos	40.153	189.825	174.492	20.077	155.311	249.274
TSR = 60%	Consumo total combustibles alternativos		404.470			424.662	
	Consumo combustible tradicional		162.551			162.551	
	CO ₂ combustión (CO ₂ combustibles alternativos + CO ₂ combustibles tradicionales)		836.603			762.511	
	CO ₂ combustibles alternativos		301.451			227.359	
	CO ₂ combustible tradicional		535.152			535.152	
	CO ₂ proceso			1.853.752			
	CO ₂ emitido total		2.690.355			2.616.263	
	CO ₂ emitido si todo fuese fósil tradicional			3.191.632			
	CO ₂ evitado frente a escenario referencia		163.312			237.405	

DISCUSIÓN Y ANÁLISIS DE LOS ESCENARIOS

POTENCIAL DE VALORIZACIÓN

Partiendo del caso de referencia del [escenario 1](#), que presenta una capacidad de producción de clínker del 49%, una tasa de sustitución térmica del 41% y la distribución de combustibles alternativos 10/55/35 (valores reales observados en 2023), el potencial de crecimiento del empleo de combustibles alternativos pasaría de 216.242 t/año, hasta un máximo de 336.050 t/año con una tasa de sustitución térmica del 60% (objetivo fijado por Oficemen para 2030 en su Hoja de Ruta) y la distribución de combustibles alternativos 5/45/50 (también propuesta como objetivo para 2030 por la patronal cementera europea).

En caso de referencia del [escenario 2](#), con el aumento de la capacidad de producción hasta un 62%, se alcanzaría un consumo de combustibles alternativos de 273.262 t/año para una tasa de sustitución térmica del 41% y el mix de combustibles alternativos actual.

Mediante el aumento de los valores de las variables hasta los máximos valores (TSR del 60% y distribución óptima de combustibles alternativos), que supondría la consecución de los objetivos de descarbonización fijados por el sector cementero español y europeo en 2030, el consumo de combustibles alternativos aumentaría hasta 424.662 t/año, que representaría un aumento del 96% respecto a la situación andaluza en 2023.

Resulta relevante que este último dato, solo representaría un 10% del total de los residuos potencialmente valorizables energéticamente (R1) disponibles en Andalucía en 2023.

Esto vendría a demostrar que, en Andalucía actualmente se generan cantidades de residuos valorizables más que suficientes para sostener los objetivos de valorización planteados por el sector cementero, sin que se tuvieran que crear tensiones de mercado por la escasez de determinados tipos de residuos o por otros factores de competencia con otros sectores industriales.

No obstante, en los últimos años se han podido observar en Andalucía posibles tensiones ante la creciente demanda industrial de biomasa como combustible, impulsada por los ambiciosos objetivos de descarbonización, que han generado un notable aumento de sus precios, especialmente en ausencia de una regulación que garantice su estabilidad. En Andalucía, donde el principal material 100% biomásico empleado por la industria cementera actualmente es el orujillo, si esta situación se viera prolongada y/o acrecentada por la mencionada falta de regulación, podría verse limitado el empleo de este tipo de combustibles y fomentarse la búsqueda de opciones menos sostenibles en periodos de alta demanda.

POTENCIAL DE DESCARBONIZACIÓN

En las Figuras 14 y 15 queda representada la evolución de los diferentes combustibles alternativos consumidos, según la tasa de sustitución térmica y el CO₂ evitado en cada caso de estudio, respecto al caso de referencia en cada escenario.

El CO₂ total emitido en el año 2023 que se corresponde con primer caso del escenario 1 fueron 2.256.330 tm. Estas emisiones se corresponden con 1.465.062 tm correspondientes al CO₂ de proceso (66,4%) y 791.268 tm correspondientes al CO₂ de combustión (33,6%).

No obstante, dado que las variaciones de las emisiones de CO₂ entre los diferentes casos de cada escenario se deben exclusivamente a la variación del CO₂ de combustión, ofreceremos datos de ese caso. Según los cálculos realizados, las emisiones de CO₂ de combustión obtenidas por el sector cementero andaluz en el ejercicio 2023, presentarían una reducción del 25,6 % respecto a las emisiones que se obtendrían mediante una simulación en la que todo el combustible empleado hubiera sido tipo fósil (tradicional), en lugar de haberse empleado 216.242 t de combustibles alternativos.

Figura 14. Evolución del consumo de combustibles alternativos y CO₂ evitado bajo diferente tasa de sustitución térmica y diferente distribución de combustibles alternativos, con una capacidad de producción del 49 %. (Escenario 1).

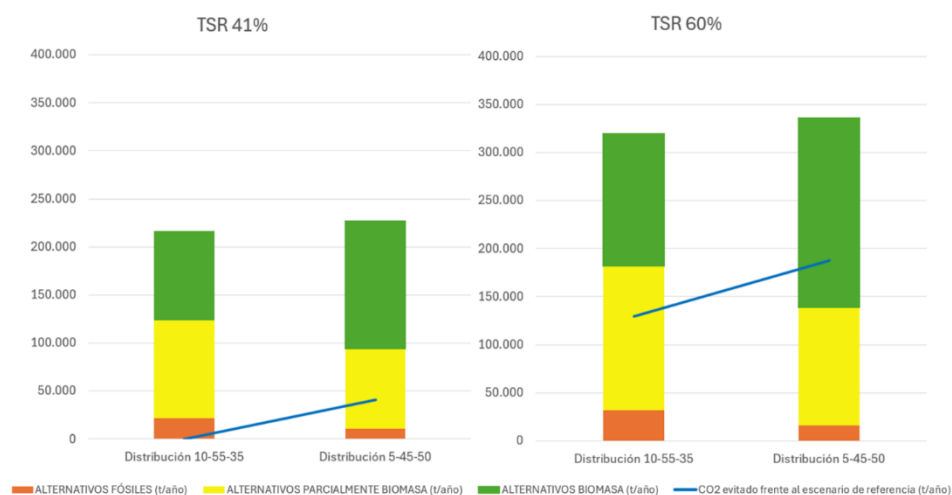
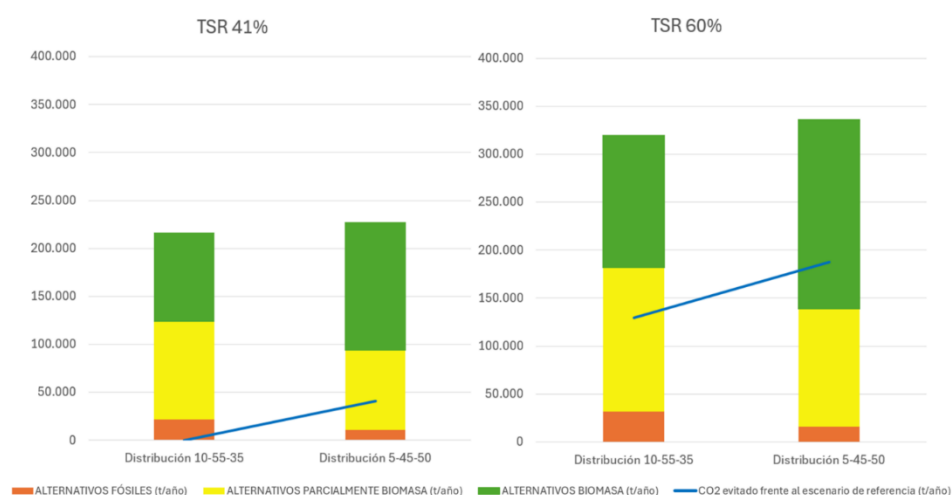


Figura 15. Evolución del consumo de combustibles alternativos y CO₂ evitado bajo diferente tasa de sustitución térmica y diferente distribución de combustibles alternativos y con una capacidad de producción del 62 %. (Escenario 2).



En el escenario 1, el CO₂ evitado aumenta significativamente a medida que aumenta la tasa de sustitución térmica y se modifica la distribución de combustibles alternativos, pasando de cero (en el caso de referencia) hasta alcanzar 187.867 t de CO₂ evitado (respecto al caso de referencia), en el

supuesto caso de conseguir los objetivos de valorización y distribución de combustibles alternativos planteados por el sector cementero español y europeo. Si adicionalmente, el sector cementero consiguiera alcanzar una capacidad de producción más optimista (Escenario 2), se llegarían a evitar hasta 237.405 toneladas de CO₂/año, lo que supondría un 43% de ahorro respecto al CO₂ procedente de la combustión.

En definitiva, los resultados muestran que existe un potencial muy elevado para que la industria cementera andaluza avance hacia la descarbonización a través de la valorización energética. No obstante, este avance no solo viene determinado por la capacidad para valorizar de la industria, ya que también puede estar condicionado por otros factores externos como las características actuales del mercado de combustibles con contenido total o parcial de biomasa.

Capítulo 5. CONCLUSIONES

Del análisis realizado en el presente informe, se obtienen las siguientes conclusiones sobre el estado actual y futuro de la capacidad del empleo de residuos en la industria cementera andaluza:

CONTEXTO Y SITUACIÓN ACTUAL

- El contexto normativo a nivel europeo, nacional y autonómico promueve la valorización de residuos como una herramienta estratégica. Los instrumentos descritos como el impuesto nacional del depósito en vertederos, el régimen de comercio de emisiones y los objetivos del PIRec 2030 incentivan a la industria cementera a ser una figura fundamental en la transición hacia una economía circular y la descarbonización.

La industria cementera andaluza ha logrado aumentar entre 2019 y 2023 su tasa de sustitución térmica del 31% al 41%. Resulta especialmente relevante la evolución de la composición de los combustibles alternativos consumidos, llegando a duplicar la aportación de la biomasa (del 14% al 35%). Gracias al empleo de este tipo de combustibles, la industria cementera andaluza evitó la emisión de 153.668 toneladas de CO₂ en 2023.

- El consumo actual de residuos como combustibles en las cementeras andaluzas (216.242 t/año en 2023), representó en 2023 solo el 5,15% del total de residuos potencialmente valorizables energéticamente generados en Andalucía, que ascendió ese mismo ejercicio a 4.049.398 toneladas de residuos peligrosos y no peligrosos.

Esta baja proporción se debe a varios factores clave. En primer lugar, aunque las cementeras están adaptando sus procesos para utilizar combustibles alternativos, aún enfrentan limitaciones técnicas y regulatorias que restringen la cantidad y tipo de residuos que pueden valorizar. Además, la logística y la disponibilidad de residuos adecuados en la cantidad necesaria es un desafío.

- De las más de 4 millones de toneladas de residuos no peligrosos disponibles para ser valorizados en Andalucía, un 77% (3,1 millones de toneladas aproximadamente) presenta un alto contenido biomásico. Actualmente, gran parte de estos residuos, en vez de ser transformados en recursos para otras industrias, acaban siendo depositados en los vertederos. Existe una falta de incentivos claros y específicos que promuevan el empleo de este tipo de residuos valorizables, viéndose favorecidas otras alternativas más convencionales o económicamente competitivas, como el vertido de estos recursos o el empleo de combustibles fósiles por parte de la industria.

- La estandarización de combustibles alternativos como “combustibles sólidos recuperados” se presenta como una herramienta clave que transformaría muchos tipos de residuos valorizables, en combustibles alternativos aprovechables como recursos energéticos predecibles y de alta calidad. Así, la industria conseguiría alcanzar una mayor eficiencia energética y un modelo de producción más sostenible.

ANÁLISIS Y VALORACIÓN DE FUTURO (OBJETIVOS 2030)

En el presente estudio se han analizado distintos escenarios a futuro, que serían esperables en el sector cementero andaluz.

Se ha analizado la situación actual y los posibles escenarios futuros del sector, basados en los objetivos a alcanzar en 2030, reflejados en los documentos sectoriales: *“Hoja de ruta de la industria cementera española para alcanzar la neutralidad climática en 2050” de Oficemen* y *“2050 AMBITIONS& THE ROLE OFBIOMASS WASTE” de CEMBUREAU*.

Se ha elaborado una matriz de escenarios para modelizar el impacto de diversas variables en la capacidad de consumo de combustibles alternativos y en la reducción total de emisiones de CO₂.

El escenario de referencia refleja la situación real de la industria cementera andaluza en el ejercicio 2023, con siete fábricas de cemento operativas: Niebla (Huelva), Málaga y Córdoba (Votorantim Cimentos), Alcalá de Guadaíra (Sevilla, Portland Valderrivas), Carboneras (Almería) y Jerez (Cádiz, Holcim España) y Gádor (Almería, Cemex España).

En 2023, estas plantas alcanzaron un 49% de su capacidad total de producción de clínker y consumieron 216.242 t de combustibles alternativos y presentando una tasa media de sustitución térmica del 41%. Los combustibles alternativos empleados, presentaron la siguiente distribución: un 10,1% (21.616 t/año) fueron alternativos fósiles, un 55,3% (102.188 t/año) parcialmente biomásicos y un 34,6% (92.438 t/año) totalmente biomásicos.

A partir del escenario de referencia se analizaron distintas combinaciones de capacidad de producción, tasa de sustitución térmica y reparto del mix de combustibles alternativos (Figura 13), generándose un total de 8 casos de estudio, de los que podemos extraer las siguientes conclusiones principales:

- En la simulación en la que la capacidad de producción de clínker del sector cementero andaluz se mantuviera constante en los próximos años (Escenario 1: 49%), pero el sector pudiera alcanzar los objetivos de TSR (60%) y de composición del mix de alternativos (5/45/50), marcados para 2030 por Oficemen y CEMBUREAU, el uso de combustibles alternativos podría aumentar de 216.242 t/año hasta 336.050 t/año.

- En el escenario 2, en el que se analiza el impacto de las mismas variables, pero simulando que el sector cementero andaluz alcanza una capacidad de producción del 62% (la que cubrirá una demanda en Andalucía de 4.000.000 de toneladas de cemento al año), el sector podría duplicar el consumo de combustibles alternativos hasta alcanzar un consumo de 424.662 t/año (5% alternativos fósiles (20.077 t/año), 45% parcialmente biomásicos (155.311 t/año) y 50% biomásicos (249.174 t/año).
- Esta cantidad de residuos representaría tan solo un 10% del total de los residuos valorizables generados en Andalucía en 2023 (peligrosos y no peligrosos).
- Bajo estas premisas, se estima que sigue existiendo un amplio margen para poder incrementar la valorización por parte del propio sector cementero y poder contribuir de esta manera a una mejor gestión global de los residuos, quedando descartadas posibles tensiones de mercado, aun con una alta demanda.
- Los mismos escenarios planteados anteriormente, evidencian la posibilidad de reducir sustancialmente las emisiones de CO₂. En el caso de que el sector consiguiera aumentar su capacidad de producción hasta el 62% (Escenario 2) y también alcanzara los objetivos marcados para 2030 por Oficemen y CEMBUREAU en cuanto a TSR (60%) y composición de combustibles alternativos (5/45/50), se llegarían a evitar hasta un 43% de las emisiones de CO₂ procedentes de la combustión, respecto a las que se hubieran emitido si el 100% de los combustibles hubieran sido de origen fósil (575.369 toneladas menos).

COSNIDERACIONES FINALES

Aunque la disponibilidad de residuos en Andalucía actualmente es muy elevada, su aprovechamiento depende en gran medida de la capacidad de acondicionamiento. Residuos con bajo poder calorífico o con mucha humedad, como los residuos de carácter biomásico, pueden necesitar un pretratamiento (secado, homogeneización, molienda) para convertirse en un combustible de buena calidad, por lo que el desarrollo de las tecnologías necesarias será clave para maximizar el uso de los recursos de origen biomásico, asegurando su contribución a la reducción de emisiones de CO₂.

La creciente demanda industrial de biomasa, impulsada por la creciente necesidad de alcanzar los objetivos de descarbonización y sostenibilidad, está generando posibles desajustes tensiones significativas en el mercado, provocando un aumento considerable de los precios de los materiales biomásicos. Esta situación podría limitar su incorporación en la industria cementera, favoreciendo el empleo de otros combustibles alternativos, que podrían ser menos sostenibles desde el punto de vista climático. Por lo tanto, la viabilidad económica de los escenarios planteados en el estudio podría ver influenciada por esta problemática.

Para hacer frente a las diferentes incertidumbres descritas anteriormente y potenciar un mayor aprovechamiento y valorización de residuos en las cementeras andaluzas, sería conveniente que la administración pública implementase acciones como:

- Creación de incentivos financieros que favorezcan la valorización energética y material de residuos, así como subvenciones para la adaptación tecnológica y bonificaciones fiscales o financieras ligadas al uso de combustibles alternativos.
- Impulso a la infraestructura logística andaluza para la recogida, tratamiento y almacenamiento de residuos valorizables, facilitando la cadena de suministro sostenible.
- Desarrollo de programas de concienciación y formación en el sector para fomentar las prácticas de valorización y fortalecer las colaboraciones público-privadas que favorezcan la economía circular.
- Agilización y modificación de la normativa para alcanzar el fin de la condición de residuo permitiendo un espectro más amplio de residuos valorizables, con criterios claros que garanticen la seguridad ambiental y sanitaria.
- Establecer un marco regulatorio que reduzca la incertidumbre sobre precios y disponibilidad de biomasa y otros residuos energéticos, facilitando la planificación y la inversión a largo plazo

Estas medidas contribuirían a incrementar significativamente el porcentaje de residuos valorizados energéticamente en la industria cementera andaluza, reduciendo la cantidad de residuos enviados a vertederos y mejorando la sostenibilidad ambiental y económica del sector.

Los resultados del estudio confirman que incrementar el uso de combustibles alternativos, especialmente los de origen biomásico, no solo reduce significativamente la huella de carbono del proceso productivo del cemento y el consumo de recursos fósiles. También ayuda a minimizar el destino de residuos en los vertederos y fomenta la economía circular y la autosuficiencia energética en Andalucía. Solo superando las dificultades técnicas, regulatorias y económicas, Andalucía podrá consolidarse como actor clave en la transición energética, garantizando un modelo productivo sostenible y competitivo a largo plazo.

BIBLIOGRAFÍA E INFORMACIÓN CONSULTADA

- [1] B. Navarrete y L. M. Gallego, «Informe sobre el Potencial de Valorización de Residuos en Plantas Cementeras de Andalucía 2019», 2021, [En línea]. Disponible en: https://flacema.org/wp-content/uploads/2021/11/Estudio_potencial_valorizacion_FLACEMA_ETSI_2021.pdf
- [2] Energy Institute (EI), «Statistical Review of World Energy 2024», Londres, 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.energyinst.org/statistical-review>
- [3] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), *Climate Change: The IPCC Scientific Assessment*. Cambridge University Press, 1990.
- [4] Naciones Unidas, «PROTOCOLO DE KYOTO DE LA CONVENCIÓN MARCO DE LAS NACIONES UNIDAS SOBRE EL CAMBIO CLIMÁTICO», dic. 1998. [En línea]. Disponible en: <https://unfccc.int/resource/docs/convkp/kpspan.pdf>
- [5] Naciones Unidas, «Acuerdo de París», dic. 2015. [En línea]. Disponible en: https://unfccc.int/files/meetings/paris_nov_2015/application/pdf/paris_agreement_spanish_.pdf
- [6] Asamblea General de las Naciones Unidas, «Transformar nuestro mundo: la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible (Resolución A/RES/70/1)», 2015. Accedido: 25 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: https://unctad.org/system/files/official-document/ares70d1_es.pdf
- [7] Comisión Europea, «El Pacto Verde Europeo», 2021. [En línea]. Disponible en: https://ec.europa.eu/commission/presscorner/api/files/attachment/869813/EGD_brochure_ES.pdf
- [8] European Parliament and Council of the European Union, *REGULATION (UE)2021/1119 OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL*. 2021. [En línea]. Disponible en: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32021R1119>
- [9] Comisión Europea, «Comunicación de la Comisión al Parlamento Europeo, al Consejo, al Comité Económico y Social Europeo y al Comité de las Regiones: "Objetivo 55": cumplimiento del objetivo climático de la UE para 2030 en el camino hacia la neutralidad climática», jul. 2021. [En línea]. Disponible en: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/PDF/?uri=CELEX:52021DC0550>
- [10] Comisión Europea y Consejo de la Unión Europea, *COMUNICACIÓN DE LA COMISIÓN AL PARLAMENTO EUROPEO, AL CONSEJO, AL COMITÉ ECONÓMICO Y SOCIAL EUROPEO Y AL COMITÉ DE LAS REGIONES Nuevo Plan de acción para la economía circular por una Europa más limpia y más competitiva*. 2020. [En línea]. Disponible en: https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:9903b325-6388-11ea-b735-01aa75ed71a1.0018.02/DOC_1&format=PDF
- [11] Parlamento Europeo y Consejo de la Unión Europea, *Directiva 2008/98/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 19 de noviembre 2008 sobre los residuos y por la que se derogan determinadas Directivas*. 2008. [En línea]. Disponible en: <https://www.boe.es/doue/2008/312/L00003-00030.pdf>
- [12] Parlamento Europeo y Consejo de la Unión Europea, *DIRECTIVA 2010/75/UE DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO de 24 de noviembre de 2010 sobre las emisiones industriales (prevención y control integrados de la contaminación)*. 2010. [En línea]. Disponible en: <https://www.boe.es/doue/2010/334/L00017-00119.pdf>
- [13] Jefatura deL Estado, *Ley 7/2022, de 8 abril, de residuos y suelos contaminados para una economía circular*. 2022. [En línea]. Disponible en: <https://www.boe.es/buscar/pdf/2022/BOE-A-2022-5809-consolidado.pdf>
- [14] M. LA Para Transición Ecológica Y El Reto Demográfico, «Resolución de 14 de enero de 2025, de la Dirección General de Calidad y Evaluación Ambiental, por la que se formula declaración ambiental estratégica del "Plan Estatal Marco de Gestión de Residuos 2024-2035"», ene. 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.boe.es>
- [15] Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, «PLAN NACIONAL INTEGRADO DE ENERGÍA Y CLIMA (PNIEC) 2021-2030», ene. 2020. [En línea]. Disponible en: https://www.miteco.gob.es/content/dam/miteco/images/es/pnieccompleto_tcm30-508410.pdf
- [16] G. P. y D. S. Junta de Andalucía. Consejería de Agricultura, *Plan Integral de Residuos de Andalucía. Hacia una Economía Circular en el Horizonte 2030 (PIRec 2030)*. 2021. [En línea]. Disponible en: https://www.aborgase.com/wp-content/uploads/2021/09/PIRec_2030_Definitivo_compressed.pdf
- [17] Junta de Andalucía, *Ley 3/2023, de 30 de marzo, de Economía Circular de Andalucía*. Boletín Oficial de la Junta de Andalucía (BOJA), 2023. [En línea]. Disponible en: https://www.juntadeandalucia.es/eboja/2023/67/BOJA23-067-00055-6439-01_00281478.pdf
- [18] International Energy Agency, «Cement», IEA. [En línea]. Disponible en: <https://www.iea.org/reports/cement-3>
- [19] VINCI Energies; The Agility Effect, «Los fabricantes de cemento encaran la descarbonización a marchas forzadas». [En línea]. Disponible en: <https://www.theagilityeffect.com/es/case/los-fabricantes-de-cemento-encaran-la-descarbonizacion-a-marchas-forzadas/>
- [20] A. Cerrillo, «Las cementeras intensificarán el uso de residuos para sustituir el combustible fósil y reducir CO2», La Vanguardia. [En línea]. Disponible en: <https://www.lavanguardia.com/natural/cambio-climatico/20250619/10800472/cementeras-intensificaran-residuos-sustituir-combustible-fosil-reducir-co2.html>
- [21] C. y T. Ministerio de Industria y OFICEMEN, «AGENDA SECTORIAL DEL SECTOR CEMENTERO ESPAÑOL Una propuesta para la reactivación de la industria del cemento 2018», 2018. [En línea]. Disponible en: <https://industria.gob.es/es-Servicios/AgendasSectoriales/Agenda%20sectorial%20de%20la%20industria%20cementera/Agenda-Sectorial-industria-cementera.pdf>
- [22] The European Cement Association CEMBUREAU, «THE ROAD TRAVELLED, PATHWAYS AND LEVERS TO SCALE UP OUR NET ZERO AMBITION», may 2024. [En línea]. Disponible en: <https://cembureau.eu/media/ulxj5lyh/cembureau-net-zero-roadmap.pdf>



Informe sobre el **POTENCIAL DE VALORIZACIÓN** de residuos en plantas cementeras de Andalucía

Objetivo 2030



Elaborado por el Grupo de Ingeniería Ambiental y de Procesos del Departamento de Ingeniería Química y Ambiental de la Escuela de Técnica Superior de Ingeniería de la Universidad de Sevilla



Escuela Técnica Superior de
INGENIERÍA DE SEVILLA

Síguenos



FLACEMA

FLACEMA

Fundación Laboral Andaluza del Cemento y el Medio Ambiente

FLACEMA

C/ Muñoz Olivé, 1-1. 2ª planta. Mod. 6-7

41001 – Sevilla

Tlf. 954 467 003

flacema@flacema.org

www.flacema.org