



Universidad de Valladolid



ESCUELA DE INGENIERÍAS  
INDUSTRIALES

Máster en Ingeniería Industrial

**MÁSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL**  
**ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES**  
**UNIVERSIDAD DE VALLADOLID**

**TRABAJO FIN DE MÁSTER**

**ANÁLISIS DEL USO DE CENIZAS DE BIOMASA  
EN HORMIGONES ECO-EFICIENTES EN EL  
ÁMBITO DE LA ECONOMÍA CIRCULAR**

Autor: D. Santiago Tinaut Rodríguez

Tutor: Dr. D. Julio Francisco San José Alonso

Director: Dr. D. Gregorio Antolín Giraldo

Valladolid, julio de 2022



## RESUMEN

En la actualidad, el aumento de las emisiones de gases de efecto invernadero y la incesante extracción de materias primas está acelerando el calentamiento global y el agotamiento de los recursos naturales del planeta. Por estos motivos es necesaria una transición del modelo económico hacia un modelo en el que las materias primas permanezcan el máximo tiempo posible dentro del ciclo productivo, esto implica que los residuos de un proceso puedan ser empleados como componentes de otro, este modelo es el de la Economía Circular.

Además de aprovechar los residuos, para reducir el impacto medioambiental de la sociedad, es necesario el desarrollo de fuentes de energías renovables como la de la biomasa, que mediante su combustión permite obtener energía eléctrica y térmica y cuyo balance neto en carbono es nulo. En los últimos años ha aumentado el desarrollo de plantas de biomasa en España y por ello la producción de cenizas de biomasa como residuo de dichas plantas.

Estos residuos pueden ser sustitutos parciales del cemento y de los áridos que componen el hormigón, dando lugar a hormigones eco-eficientes con una huella de carbono inferior a la de los convencionales.

En el presente Trabajo de Fin de Máster se estudia la reducción de las emisiones asociada al empleo de cenizas de biomasa en hormigones eco-eficientes mediante el software SimaPro aplicando la metodología del Análisis de Ciclo de Vida alcanzándose ahorros de emisiones de 12,4 kg CO<sub>2</sub> por metro cúbico de hormigón (un 10% de ahorro).

**Palabras clave:** Economía Circular, Análisis de Ciclo de Vida, central de biomasa, cenizas volantes, cenizas de hogar, hormigón eco-eficiente, SimaPro, CO<sub>2</sub>.

## ABSTRACT

Currently, the increase in greenhouse gas emissions and the incessant extraction of raw materials is accelerating global warming and the depletion of the planet's natural resources. For these reasons, it is necessary to transition the economic model towards a model in which raw materials remain as long as possible within the production cycle, which means that waste from one process can be used as components of another, this model is the Circular Economy.

In addition to taking advantage of waste, in order to reduce society's environmental impact, it is necessary to develop renewable energy sources such as biomass, which can be burned to obtain electrical and thermal energy and whose net carbon balance is zero. In recent years there has been an increase in the development of biomass plants in Spain and therefore in the production of biomass ash as a waste from these plants.

These residues can be partial substitutes for the cement and aggregates that make up concrete, giving rise to eco-efficient concretes with a lower carbon footprint than conventional ones.

This Master's thesis studies the reduction of emissions associated with the use of biomass ashes in eco-efficient concretes using SimaPro software by applying the Life Cycle Analysis methodology achieving savings in CO<sub>2</sub> emissions of 12.4 kg/m<sup>3</sup> (i.e., 10%).

**Keywords:** Circular Economy, Life Cycle Assessment, biomass power plant, biomass ash, eco-efficient concrete, SimaPro.

## AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, me gustaría agradecer a toda mi familia por su apoyo durante todo el proceso hasta llegar hasta aquí. Le doy las gracias en especial a mi madre, por haberme dado siempre tantos ánimos para seguir adelante y a mi padre, por haberme guiado durante todo el periodo de mis estudios y cuyos consejos siempre han sido de gran valor para construir mi carrera universitaria. Gracias a ellos he llegado a alcanzar mis objetivos académicos.

Quiero dar también las gracias a Gregorio Antolín, por haberme propuesto hacer este interesante Trabajo de Fin de Máster, con el que he aprendido infinidad de cosas y por haber estado dispuesto asesorarme siempre que lo he necesitado. Por último, pero no por ello menos importante, quiero darle las gracias a Julio San José por su paciencia, su comprensión y su acompañamiento en este trabajo, sin el cual no hubiera sido posible su realización.

Finalmente quiero agradecer a Nuria todo el ánimo que me ha transmitido en estas últimas etapas de mi carrera académica.

# ÍNDICE

RESUMEN .....	III
AGRADECIMIENTOS .....	V
ÍNDICE .....	V
ÍNDICE DE FIGURAS .....	VIII
ÍNDICE DE TABLAS.....	X
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS .....	1
1.1 Antecedentes .....	1
1.2 Justificación.....	2
1.3 Objetivos.....	2
1.4 Planteamiento del trabajo .....	3
CAPÍTULO 2. INTRODUCCIÓN A LA ECONOMÍA CIRCULAR Y SU APLICACIÓN A LOS MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN .....	5
2.1 Concepto de la Economía Circular .....	5
2.2 Economía Circular en España.....	7
2.2.1 Situación del modelo de Economía Circular en España .....	7
2.2.2 PERTE de Economía Circular de 2022.....	7
2.2.3 Referencias a la Economía Circular dentro de las normas UNE .....	8
2.3 La descarbonización de la construcción.....	9
2.3.1 Impacto ambiental del sector de la construcción .....	9
2.3.2 Hoja de ruta del Green Building Council España para la descarbonización de la construcción .....	9
2.3.3 Novedades en el Código Estructural Español.....	10
2.4 Iniciativas de descarbonización de la construcción en España.....	10
2.4.1 Proyecto de investigación: Hormigón autocompactante a partir de cenizas de la combustión de biomasa de olivo .....	10
2.4.2 Proyecto de construcción de un carril bici con áridos reciclados.....	11
CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA DEL ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA .....	13
3.1 Introducción.....	13
3.2 Análisis de Ciclo de Vida .....	13
3.2.1 Definición .....	13
3.2.2 Tipos de ACV.....	14
3.3 Marco Normativo.....	15
3.4 Fases del Análisis de Ciclo de Vida .....	16

3.4.1	Fase de definición del objetivo y alcance .....	17
3.4.2	Fase de análisis del inventario (ICV).....	18
3.4.3	Fase de evaluación del impacto ambiental (EICV) .....	20
3.4.4	Fase de análisis de interpretación .....	21
3.5	Soporte informático aplicado al ACV: SimaPro 7.2.....	21
CAPÍTULO 4. LA BIOMASA COMO RECURSO ENERGÉTICO .....		25
4.1	Concepto de biomasa.....	25
4.2	Tecnologías de aprovechamiento termoquímico de la biomasa .....	27
4.2.1	Combustión.....	27
4.2.2	Gasificación .....	28
4.3	Características generales de las plantas de combustión de biomasa .....	29
4.4	Cenizas generadas en las plantas de combustión de biomasa .....	31
4.4.1	Generación y retención de cenizas en las plantas de biomasa .....	31
4.4.2	Sistemas de retención de las cenizas volantes .....	32
4.5	Aspectos cuantitativos sobre las cenizas de combustión de biomasa.....	35
4.5.1	Caracterización de la biomasa mediante del análisis inmediato.....	35
4.5.2	Balance de ceniza entre cenizas de fondo y volantes.....	38
4.6	Planta de biomasa de Cubillos de Sil .....	39
4.6.1	Características de la planta térmica y consumo de biomasa .....	40
4.6.2	Emisiones gaseosas de la planta y normativa asociada a las mismas .....	43
CAPÍTULO 5. PROPIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS DE LAS CENIZAS DE BIOMASA.....		45
5.1	Factores influyentes en las características de las cenizas .....	45
5.1.1	Influencia del tipo de entrantes o de la mezcla de entrantes .....	46
5.1.2	Influencia del acondicionamiento aplicado a los entrantes .....	46
5.1.3	Influencia del equipo de combustión .....	46
5.2	Propiedades físicas de las cenizas .....	47
5.2.1	Cenizas de hogar.....	47
5.2.2	Cenizas volantes .....	48
5.3	Composición química de las cenizas .....	48
5.4	Cenizas de la planta de Cubillos del Sil.....	49
5.4.1	Estimación de las cantidades de ceniza .....	49
5.4.2	Aspecto y granulometría .....	51
5.4.3	Análisis químico.....	56
5.5	Valorización de las cenizas .....	58
CAPÍTULO 6. USO DE LAS CENIZAS DE BIOMASA EN LA FORMULACIÓN DE HORMIGONES ECO-EFICIENTES .....		60

6.1	Hormigones convencionales .....	60
6.1.1	Cemento.....	61
6.1.2	Áridos .....	63
6.1.3	Agua de amasado .....	63
6.2	Comportamiento y características del hormigón convencional .....	63
6.2.1	Resistencia mecánica .....	64
6.2.2	Fraguado y endurecimiento .....	64
6.2.3	Consistencia del hormigón fresco.....	65
6.2.4	Durabilidad.....	65
6.3	Introducción de cenizas de biomasa en la formulación de hormigones eco-eficientes.....	66
6.3.1	Hormigones eco-eficientes.....	66
6.3.2	Consideraciones medioambientales de los hormigones eco-eficientes .....	66
6.3.3	Resultados de estudios sobre la viabilidad del uso de cenizas de biomasa en la formulación de hormigones .....	67
6.4	Porcentajes de sustitución de cenizas posibles en el hormigón .....	69
6.4.1	Utilización de la ceniza de fondo o escoria .....	70
6.4.2	Utilización de la ceniza volante.....	70
6.4.3	Valores escogidos en este estudio.....	71
CAPÍTULO 7. VALORACIÓN MEDIANTE EL SOFTWARE SIMAPRO DEL ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA DE UN HORMIGÓN CON CENIZAS DE BIOMASA.....		72
7.1	Estudio ACV de hormigón convencional.....	72
7.1.1	Definición del objetivo y alcance del ACV .....	72
7.1.2	Análisis del inventario de datos (ICV) empleado en el ACV .....	73
7.1.3	Evaluación del impacto ambiental (EICV) de 1 m <sup>3</sup> de hormigón convencional.....	76
7.1.4	Análisis de los resultados del ACV de 1m <sup>3</sup> de hormigón convencional.....	78
7.2	Estudio ACV de hormigón eco-eficiente (con cenizas de biomasa).....	79
7.2.1	Definición del objetivo y alcance del ACV .....	79
7.2.2	Análisis del inventario (ICV) empleado en el ACV .....	80
7.2.3	Evaluación del impacto ambiental (EICV) de 1m <sup>3</sup> de hormigón eco-eficiente .....	80
7.2.4	Análisis de los resultados del ACV de 1m <sup>3</sup> de hormigón eco-eficiente .....	82
7.2.5	Consideración de otras alternativas para introducir las cenizas de biomasa por separado en hormigones eco-eficientes.....	83
7.3	Aplicación de hormigón eco-eficiente para un carril bici y comparación con hormigón convencional	84
7.3.1	Definición del objetivo y alcance del estudio ACV comparativo.....	84
7.3.2	Análisis del inventario de datos empleado en el ACV .....	84

7.3.3	Comparación del impacto ambiental del pavimento de un carril bici de hormigón convencional frente a uno de hormigón eco-eficiente.....	85
7.3.4	Análisis de los resultados de la comparativa .....	85
7.4	Proyecciones técnico-económicas sobre el uso de cenizas de biomasa .....	86
CAPÍTULO 8. CONCLUSIONES Y SUGERENCIAS DE DESARROLLOS FUTUROS.....		89
8.1	Conclusiones.....	89
8.2	Sugerencias para desarrollos futuros .....	91
BIBLIOGRAFÍA.....		92
ANEXOS .....		1
Anexo 1: Fichas de caracterización de biomasa Phyllis2.....		1
Anexo 2: Análisis de granulometría de las cenizas de hogar de la planta de Cubillos de Sil .....		1
Anexo 3: Análisis químico de las cenizas volantes de la planta de Cubillos de Sil .....		1
Anexo 4: Estimación de la fracción de cenizas de hogar a partir de las emisiones de partículas en chimenea.....		1

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b>	Ciclo de la Economía Circular [5].....	5
<b>Figura 2.</b>	Comparativa del modelo de la economía lineal actual frente al modelo de la Economía Circular .....	6
<b>Figura 3.</b>	Ensayo del cono de Abrams para medir la consistencia del hormigón experimental con cenizas de biomasa como sustituto de filler en la composición del hormigón .....	11
<b>Figura 4.</b>	Dosificación del hormigón sostenible H-ECO para el carril bici en Sestao (Parte superior) y carril bici terminado (Parte inferior).....	12
<b>Figura 5.</b>	Ejemplo del ciclo de vida completo de un elemento hecho de hormigón [19] .....	14
<b>Figura 6.</b>	Tipos de ACV en función de los límites del ACV [20] .....	15
<b>Figura 7.</b>	Esquema de las Normas ISO de Gestión Ambiental del producto [22] .....	16
<b>Figura 8.</b>	Fases de un ACV [Elaboración propia].....	17
<b>Figura 9.</b>	Fase de definición del objetivo y del alcance del ACV [Elaboración propia] .....	18
<b>Figura 10.</b>	Esquema del análisis de inventario del ACV de un producto [Elaboración propia].....	18
<b>Figura 11.</b>	Flujo genérico del ciclo de vida de un producto [19] .....	19
<b>Figura 12.</b>	Elementos de la fase EICV [Elaboración propia] .....	20
<b>Figura 13.</b>	Comparación de distintas herramientas de software ACV en función de su dificultad y grado de precisión [24] .....	22
<b>Figura 14.</b>	Logo del software Simapro .....	22
<b>Figura 15.</b>	Selección de datos en SimaPro .....	23
<b>Figura 16.</b>	Ejemplo de comparativa entre dos tipos de hormigón mediante el método del protocolo de gases de efecto invernadero (Emisiones de CO <sub>2</sub> equivalentes).....	23
<b>Figura 17.</b>	Ejemplo de la red de trazabilidad de los recursos empleados para la producción de 1 m <sup>3</sup> de hormigón. ....	24
<b>Figura 18.</b>	Diferentes orígenes de la biomasa [26] .....	25

<b>Figura 19.</b> Tipos de equipos de combustión de biomasa [27] .....	28
<b>Figura 20.</b> Tipos de gasificadores de biomasa [26] .....	29
<b>Figura 21.</b> Esquema genérico de una planta de combustión de biomasa [26] .....	30
<b>Figura 22.</b> Curvas de eficiencia de retención de las partículas en función del tamaño de estas y de la velocidad de paso de los gases de combustión [26]. .....	32
<b>Figura 23.</b> Esquema ilustrativo del funcionamiento de recogida de partículas gruesas de un ciclón mediante la inducción de una velocidad de rotación [27] .....	33
<b>Figura 24.</b> Esquema de las partes que componen un ciclón parte (izquierda) y esquema de un ciclón múltiple o multiciclón (derecho) para los casos con flujo de gases elevado y partículas a retener pequeñas .....	33
<b>Figura 25.</b> Esquema del funcionamiento de una cámara de sedimentación .....	34
<b>Figura 26.</b> Esquema de las partes de un filtro de mangas .....	34
<b>Figura 27.</b> Esquema del funcionamiento de retención de partículas de un precipitador electrostático ..	35
<b>Figura 28.</b> Partes de un precipitador electrostático .....	35
<b>Figura 29.</b> Esquema del análisis inmediato de la biomasa [29] .....	36
<b>Figura 30.</b> Bases de cálculo para la biomasa [29] .....	37
<b>Figura 31.</b> Balance de cenizas generadas a una central de combustión de biomasa .....	38
<b>Figura 32.</b> Planta de eléctrica de biomasa de Forestalia en Cubillos de Sil [30] .....	39
<b>Figura 33.</b> Vista aérea de la disposición de los distintos sistemas de la planta de eléctrica de biomasa de Forestalia en Cubillos de Sil. En la parte inferior de la imagen se ven las pilas de almacenamiento de biomasa de larga duración. [30].....	40
<b>Figura 34.</b> Vista aérea de la zona de almacenamiento de corta duración de biomasa forestal y de los dispositivos de manejo y alimentación de biomasa [30].....	41
<b>Figura 35.</b> Vista de las cintas de alimentación de biomasa forestal hacia la caldera de la planta de Forestalia [30]. .....	42
<b>Figura 36.</b> Dispositivos para mover las balas de paja agrícola previo a su introducción en la caldera de la planta de Forestalia en Cubillos de Sil [30]. .....	42
<b>Figura 37.</b> Parte inferior de la cámara de combustión de la caldera de biomasa de Forestalia en Cubillos de Sil, con los registros de acceso al cenicero de fondo [30]. .....	43
<b>Figura 38.</b> Balance de cenizas generadas a una central de combustión de biomasa .....	50
<b>Figura 39.</b> Comparación visual de ambos tipos de cenizas de la planta de Cubillos del Sil analizadas en el laboratorio de Cartif (Parte superior), muestra de cenizas de fondo (Parte central) y muestra de cenizas de hogar (Parte inferior) .....	52
<b>Figura 40.</b> Curva de granulometría de las cenizas de hogar de la planta de Cubillos de Sil [Anexo 2] ..	53
<b>Figura 41.</b> Curva logarítmica de granulometría de las cenizas de hogar con su derivada para ver el tamaño de cenizas más probable .....	53
<b>Figura 42.</b> Curva de granulometría de las cenizas de hogar con su derivada para ver mejor la distribución de tamaños .....	54
<b>Figura 43.</b> Curva combinada de la mezcla de los áridos con cenizas de hogar de la planta de Cubillos de Sil.....	55
<b>Figura 44.</b> Esquema del proceso de producción del cemento de Portland [48] .....	62
<b>Figura 45.</b> Comparación visual entre cemento (izquierda) y cenizas volantes (derecha) .....	66
<b>Figura 46.</b> Esquema ilustrativo de la composición de un hormigón convencional [Elaboración propia].	70
<b>Figura 47.</b> Esquema ilustrativo de un hormigón eco-eficiente con un 20% de sustitución de áridos por cenizas de hogar [Elaboración propia] .....	70
<b>Figura 48.</b> Esquema ilustrativo de un hormigón eco-eficiente con un 20% de sustitución de áridos por cenizas de hogar [Elaboración propia] .....	70

<b>Figura 49.</b> Esquema ilustrativo del hormigón eco-eficiente escogido para el estudio del ACV con un 20% de sustitución de áridos por cenizas de hogar y un 10% de sustitución del cemento por cenizas volantes [Elaboración propia].....	71
<b>Figura 50.</b> Esquema ilustrativo de la composición de un hormigón convencional .....	72
<b>Figura 51.</b> Mapa del proceso de la producción del hormigón convencional [Elaboración propia].....	73
<b>Figura 52.</b> Descripción en SimaPro de los procesos que abarca la piedra caliza empleada para la producción de cemento .....	74
<b>Figura 53.</b> Descripción en SimaPro de los procesos que abarca el clinker empleado para la producción de cemento .....	74
<b>Figura 54.</b> Selección del cemento en SimaPro que engloba el procesamiento descrito de la piedra caliza y el procesamiento mencionado del clinker .....	74
<b>Figura 55.</b> Descripción en SimaPro de los procesos que abarca la grava empleada en la fabricación del hormigón convencional .....	75
<b>Figura 56.</b> Descripción en SimaPro de los procesos que abarca el agua empleada en la fabricación del hormigón convencional .....	75
<b>Figura 57.</b> Descripción en SimaPro de lo que incluye los consumos de la infraestructura de una planta hormigonera.....	76
<b>Figura 58.</b> Distintos tipos de emisiones absolutas de CO <sub>2</sub> en cada componente de 1 m <sup>3</sup> de hormigón convencional incluyendo la planta de elaboración, calculados con SimaPro. ....	77
<b>Figura 59.</b> Aportaciones porcentuales de los distintos tipos de emisiones de CO <sub>2</sub> en cada componente del hormigón convencional incluyendo la planta .....	77
<b>Figura 60.</b> Esquema ilustrativo de la composición de un hormigón eco-eficiente.....	79
<b>Figura 61.</b> Mapa del proceso de la producción del hormigón eco-eficiente con cenizas de biomasa [Elaboración propia].....	80
<b>Figura 62.</b> Distintos tipos de emisiones absolutas de CO <sub>2</sub> en cada componente de 1 m <sup>3</sup> de hormigón eco-eficiente incluyendo la planta de elaboración, calculados con SimaPro. ....	81
<b>Figura 63.</b> Aportaciones porcentuales de los distintos tipos de emisiones de CO <sub>2</sub> en cada componente del hormigón eco-eficiente, incluyendo la planta.....	81
<b>Figura 64.</b> Comparación de las emisiones de CO <sub>2</sub> generadas en la producción del pavimento para el carril bici con hormigón convencional frente al hormigón eco-eficiente .....	85

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Tecnologías de aprovechamiento o adecuación dependiendo del tipo de biomasa [26] .....	26
<b>Tabla 2.</b> Emisiones de la Planta de biomasa de Cubillos de Sil.....	44
<b>Tabla 3.</b> Análisis químico de los porcentajes (%) de los componentes de las cenizas volantes de incineración de diferentes tipos de biomasa [35].....	48
<b>Tabla 4.</b> Análisis químico de los porcentajes (%) de los componentes de las cenizas de fondo de incineración de diferentes tipo de biomasa [35].....	49
<b>Tabla 5.</b> Valores de las fracciones de cenizas de los distintos tipos de biomasa que se emplea en la planta de Cubillos de Sil.....	50
<b>Tabla 6.</b> Resultados experimentales del ensayo de equivalente de arena de las cenizas de hogar de la planta de Cubillos de Sil.....	54
<b>Tabla 7.</b> Resultados del ensayo de dosificación de los áridos de acopios mezclados con cenizas de hogar de la planta de Cubillos de Sil.....	55
<b>Tabla 8.</b> Tabla de resultados del análisis químico de las cenizas volantes de la planta de Cubillos de Sil con la humedad total y el contenido en carbono orgánico .....	56

<b>Tabla 9.</b> Resultados del análisis de la composición inorgánica de las cenizas volantes de la planta de Cubillos de Sil. ....	57
<b>Tabla 10.</b> Estimación del análisis de composición química de las cenizas de hogar de la planta de Cubillos de Sil a través de los valores encontrados en la base de datos Phyllis2. ....	58
<b>Tabla 11.</b> Evolución de la resistencia a compresión de un hormigón normal con el paso de los días ....	65
<b>Tabla 12.</b> Caracterización de morteros con diferentes porcentajes de cenizas de fondo o de hogar como sustitutas del cemento [38] .....	69
<b>Tabla 13.</b> Resultados del cálculo con SimaPro de las emisiones de CO <sub>2</sub> emitidas en la preparación de 1 m <sup>3</sup> de hormigón convencional.....	78
<b>Tabla 14.</b> Componentes del hormigón convencional y emisiones asociadas de CO <sub>2</sub> equivalente emitidas en la preparación de 1 m <sup>3</sup> .....	78
<b>Tabla 15.</b> Resultados del cálculo con SimaPro de las emisiones de CO <sub>2</sub> emitidas en la preparación 1 m <sup>3</sup> de hormigón eco-eficiente con cenizas de biomasa .....	82
<b>Tabla 16.</b> Componentes del hormigón eco-eficiente y emisiones asociadas de CO <sub>2</sub> equivalente emitidas en la preparación de 1 m <sup>3</sup> .....	82
<b>Tabla 17.</b> Tabla con los porcentajes de sustitución de cenizas de biomasa de las cuatro alternativas planteadas. ....	83
<b>Tabla 18.</b> Resumen de los resultados del cálculo de emisiones de CO <sub>2</sub> equivalentes para cada una de las alternativas .....	83
<b>Tabla 19.</b> Cantidades de materiales utilizadas para construir el carril bici con cada uno de los dos hormigones .....	84
<b>Tabla 20.</b> Comparación de los resultados de emisiones de CO <sub>2</sub> generadas en la producción del pavimento para el carril bici con hormigón convencional frente al hormigón eco-eficiente.....	85



# CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

## 1.1 Antecedentes

Este primer capítulo se centrará en los principales objetivos que se persiguen con la realización de este Trabajo Fin de Máster (TFM). Para ello, en principio, se plantea el problema del cual surgió la idea de la realización del presente TFM. Una vez identificado, se propondrán una serie de soluciones factibles a llevar a la práctica.

En los últimos años los efectos del **cambio climático** han tomado una gran importancia en todo el mundo. El aumento de la temperatura del planeta está originando ya en la actualidad un aumento del número de desastres naturales cada año, como sequías, altas temperaturas, incendios, etc. y sus consecuencias en malas cosechas que desestabilizan la economía mundial. Este calentamiento se debe al aumento de los **gases de efecto invernadero** (GEI) en la atmósfera como consecuencia del uso de **combustibles fósiles** como fuente energética, de los cuales, muchos países como España, son fuertemente dependientes de estos recursos, que deben ser importados. Además, se estima que las reservas de estos combustibles pueden agotarse en torno a mediados del siglo XXI.

Esta situación va unida a la **extracción agresiva de materias primas**, sin permitir que estas se regeneren, y a la producción exponencial de residuos que contaminan el Medio Ambiente. Además, se emplea una gran parte de la energía consumida en estos procesos de extracción y tratamiento de residuos. La comunidad científica ya ha alertado de las consecuencias de no adaptar nuestra Sociedad a una economía más sostenible, la transición hacia un modelo más ecológico es necesaria para el bien de la prosperidad de la humanidad, que cada año aumenta considerablemente.

Como alternativa a los combustibles tradicionales, en los últimos años las fuentes de energía renovables han tenido un gran desarrollo. Estas presentan la ventaja de estar disponibles de forma ilimitada en casi cualquier lugar del planeta y, por lo general, presentan un impacto medioambiental muy escaso o, incluso nulo.

Dentro de las **fuentes de energía renovables** una de las más importantes es la **biomasa**. La biomasa, está experimentando en las últimas décadas una gran evolución, tanto desde el punto de vista tecnológico como de consumo contando con el apoyo de políticas de incentivación de la producción de este tipo de energía térmica y eléctrica. Esto unido a la gran disponibilidad de biomasa en España, a precios competitivos, que hacen que el aprovechamiento de esta fuente de energía tenga un gran atractivo en nuestro país.

Por otra parte, este aumento de consumo de biomasa acarrea un aumento en la producción de sus **cenizas** como residuo de la combustión, de las cuales se emplea una pequeña parte como Biofertilizante y el resto se acumula en vertederos.

Estos residuos podrían ser empleados como materia prima en sectores como el de la construcción, el cual presenta una huella de carbono importante que se está intentando reducir cada vez más. La reutilización de estos residuos no sólo conlleva el ahorro de recursos naturales sino también el ahorro de las emisiones de GEI asociadas a la extracción de dichos recursos. Este concepto de integrar residuos de nuevo en el ciclo productivo corresponde al modelo de **Economía Circular** y presenta grandes ventajas medioambientales y económicas para lograr el desarrollo sostenible de la Sociedad. Además, recientemente se ha visto favorecida por decisiones políticas que impulsarán su desarrollo en los próximos años.

## 1.2 Justificación

En los últimos años ha aumentado el número de plantas de biomasa en España y se sigue aumentando cada año [1][2]. Este aumento de plantas de biomasa también es consecuencia del cierre de las plantas de carbón, de las cuales se aprovechaban las cenizas para elaborar cemento y/o hormigones. Esto quiere decir que la demanda en cenizas de carbón como componente en materiales de construcción y que cuya formulación está normalizada puede ser reemplazada por una alternativa mucho más respetuosa con el medioambiente como son las cenizas de biomasa. Emplear estos residuos como componente parcial de los hormigones permite reducir la huella de carbono de estos y al mismo tiempo deshacerse de un residuo sin generar impactos negativos adicionales. Este modelo es el de la Economía Circular.

Gracias al programa de doble diploma con la ENSAM (*École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers*) pude realizar el máster en *Eco-diseño de bienes y servicios*, formándome en los conceptos de la Economía Circular. Este máster me permitió realizar unas prácticas de seis meses como Ingeniero de Proyectos en Economía Circular en la empresa de Neo-Eco ([www.neo-eco.com](http://www.neo-eco.com)). En estas prácticas estuve realizando proyectos de eco-diseño de hormigones a partir de sedimentos de río y residuos de construcción.

Por estos motivos, estuve motivado a elegir un Trabajo de Fin de Máster (TFM) que estuviese relacionado con la Economía Circular en el sector de la construcción. El director del TFM, profesor G. Antolín, que desarrolla actividades en la Fundación Cartif, me habló de su interés en realizar una aplicación real introduciendo cenizas de biomasa de la central térmica de biomasa de Cubillos de Sil (León) en la formulación del pavimento de hormigón de un carril bici en la ciudad de Ponferrada, cuya construcción es próxima.

De esta forma, se me propuso calcular el ahorro de emisiones o lo que es lo mismo, la reducción de la huella de carbono, que conllevaría emplear las cenizas en el carril bici y estudiar su viabilidad como componente parcial de los hormigones eco-eficientes, para lo cual disponía de las características de la planta y de los análisis físicos y químicos de dichas cenizas facilitados por la Fundación Cartif.

## 1.3 Objetivos

El **objetivo general** del presente TFM consiste en plantear alternativas para el hormigón convencional en forma de hormigones eco-eficiente que utilizan residuos de la combustión de biomasa, en el ámbito de la Economía Circular, evaluando las emisiones de CO<sub>2</sub> equivalentes mediante la metodología de Análisis de Ciclo de Vida.

Para alcanzar el objetivo general del TFM, se establecen los siguientes **objetivos específicos**:

- Presentar de forma resumida el concepto e interés de la **Economía Circular**, su estado de desarrollo en España y las oportunidades que ofrece en relación con la construcción descarbonizada.
- Presentar las características de la metodología del **Análisis de Ciclo de Vida (ACV)**, sus tipos, el marco normativo, las fases a considerar y una herramienta informática para facilitar su evaluación.
- Mostrar las tecnologías de **aprovechamiento energético de la biomasa** en plantas de generación eléctrica y/o térmica, las características de la biomasa utilizada y de las cenizas que se generan como residuo de la combustión.
- Describir las características técnicas de la **planta de biomasa de Cubillos de Sil**.
- Presentar las **propiedades físico-químicas de las cenizas de biomasa** y los factores que influyen sobre las mismas, concretadas para la planta de Cubillos de Sil.

- Explicar las **posibilidades para la utilización de cenizas de biomasa** en la formulación de **hormigones eco-eficientes**, incorporándolas en sustitución parcial del cemento o de los áridos del hormigón.
- Realizar **estudios ACV de las emisiones de CO<sub>2</sub> equivalentes** de la elaboración de hormigón convencional y de su alternativa eco-eficiente, utilizando cenizas de biomasa, comparando los resultados.
- Aplicar los resultados obtenidos para el ACV del hormigón convencional y del hormigón eco-eficiente para poder **comparar las emisiones de CO<sub>2</sub> equivalentes** asociadas a cada alternativa en el caso del **pavimento de un carril bici**.

## 1.4 Planteamiento del trabajo

Para cumplir los objetivos el planteamiento del TFM se desarrolla de la forma siguiente:

En el **capítulo uno** se realiza una introducción general del trabajo y se plantean los objetivos. En el **capítulo dos**, se realiza una introducción al concepto de la Economía Circular y su desarrollo actual en España, se introduce también la descarbonización de la construcción y se describen iniciativas de descarbonización de la construcción aplicando la Economía Circular.

La metodología de la herramienta del Análisis de Ciclo de Vida se explica en el **capítulo tres**, considerando la Normativa vigente y las fases que componen dicho análisis, así como el software que se utiliza en este trabajo para la evaluación ambiental de la alternativa al hormigón convencional.

En el **capítulo cuatro**, se describen las tecnologías de aprovechamiento termoquímico de la biomasa, las características generales de las plantas de combustión y los aspectos cuantitativos de la generación de las cenizas de combustión. También se introduce la planta de biomasa de Cubillos de Sil y sus características principales.

A continuación, en el **capítulo cinco**, se explican los factores influyentes en las características de las cenizas y se presentan las propiedades físicas y composición química de las cenizas de la planta de Cubillos de Sil, realizándose también una estimación de las cantidades de ceniza generadas en dicha planta.

El hormigón y su comportamiento, así como sus propiedades se presentan en el **capítulo seis**, así como el concepto de hormigón eco-eficiente, las consideraciones medioambientales que conlleva el uso de este tipo de hormigones y los resultados de estudios realizados sobre la viabilidad del uso de cenizas en la formulación de hormigones. También se justifican los valores de sustitución parcial de cemento y de áridos en hormigones por cenizas de biomasa escogidos para este trabajo.

Para la comparación del hormigón convencional con su alternativa eco-eficiente incluyendo cenizas de biomasa, se realizan en el **capítulo siete**, estudios ACV de las emisiones de CO<sub>2</sub> equivalentes mediante el uso del software Simapro 7.2. Posteriormente, se emplean estos resultados para la aplicación del pavimento de un carril bici y así poder calcular el ahorro de emisiones que implica usar hormigón eco-eficiente. En este capítulo también se hace una estimación del beneficio económico que conlleva usar las cenizas de biomasa en la formulación del pavimento del carril bici y se proyectan los resultados en torno a la demanda nacional de hormigón.

Finalmente, en el **capítulo 8** se incluye una síntesis de los resultados obtenidos en este trabajo y las conclusiones que se han podido tomar en base a estos, proponiéndose los siguientes pasos a seguir para desarrollos futuros.

# CAPÍTULO 2. INTRODUCCIÓN A LA ECONOMÍA CIRCULAR Y SU APLICACIÓN A LOS MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN

En este capítulo se introduce el concepto de la Economía Circular y su presencia en España, así como en las referencias a la Economía Circular dentro de las normas UNE. A continuación, se presenta la problemática del impacto ambiental del sector de la construcción y la necesidad de la descarbonización de este sector. Por último, se presentan dos iniciativas de Economía Circular en materiales de construcción realizadas en España.

## 2.1 Concepto de la Economía Circular

El pasado diciembre de 2021, durante un evento del Green Building Council (GBC), el director general de la Fundación COTEC dijo: “No hay mayor innovación que la Economía Circular, ya que no afecta a una empresa o un sector en concreto, sino a toda la economía en conjunto” [3].

El Ministerio de la Transición Ecológica y del Reto Demográfico (MITECO) define la **Economía Circular** como aquella en la que el valor de los productos, los materiales y los recursos se mantienen en la economía durante el mayor tiempo posible, y en la que se reduce al mínimo la generación de residuos. Todo ello con el objetivo de lograr una economía sostenible, descarbonizada, eficiente en el uso de los recursos y competitiva [4]. Las etapas de este modelo de economía se pueden observar en la **Figura 1**:



Figura 1. Ciclo de la Economía Circular [5].

El modelo circular aspira a reducir todo lo posible la generación de residuos maximizando el tiempo del ciclo productivo de los recursos disponibles y aprovechando todo lo posible aquellos residuos cuya generación no se haya podido evitar. Así se extraen materias primas, se fabrican productos y de los residuos generados se recuperan materiales, sustancias y/o energía que posteriormente se reincorporan de nuevo al mismo u a otro proceso productivo.

Se puede entender como un proceso de reciclaje lo más eficiente posible, pero potenciando en primer lugar el reemplazo, mejorando la reparabilidad y el desmantelamiento desde la concepción de los productos, para que, en última instancia, se consiga desvincular el crecimiento económico del consumo finito de recursos.

En este modelo de Economía Circular se favorece la **sinergia** de las distintas industrias y actores, de manera que sea beneficiosa para ambas partes. Por ejemplo, una fábrica genera un flujo de residuos del que tiene que deshacerse, entonces, si vende, regala o incluso paga una pequeña parte a otra industria que acepta estos residuos para emplearlos como materia prima en su proceso productivo, ambas partes se benefician ya que la fábrica tiene unos costes asociados a los residuos menores y la industria recibe una materia prima más barata que la natural, y al mismo tiempo se favorece el medio ambiente al extraerse menos materias primas, generarse menos residuos y emitirse menos emisiones.

Este ejemplo puede aplicarse al caso del estudio de este trabajo, una planta de combustión de biomasa tiene que deshacerse de sus cenizas, que pueden utilizarse como materia prima en una hormigonera.

Para entender mejor el concepto de Economía Circular se puede comparar con el modelo de económico actual (**Figura 2**). El modelo actual es un **modelo lineal**, basado en “extraer-fabricar-consumir-eliminar”, un lema que se puede resumir en “De la cuna a la tumba”, al contrario del lema de la Economía Circular que es “De la cuna a la cuna” donde las materias primas entran en un bucle en el que su vida útil se alarga lo máximo posible.



*Figura 2. Comparativa del modelo de la economía lineal actual frente al modelo de la Economía Circular*

Este modelo lineal tuvo su auge con la primera y segunda revolución industrial y alcanzó el clímax con la invención de la **obsolescencia programada** en los años finales del siglo XX, fomentando el consumo para acelerar la economía de la época. En aquellos años la población global (en torno a los 3.000 M de personas) correspondía a menos de la mitad de la población actual (8.000 M de personas) y en la que no existían aún los problemas climáticos del planeta.

Este modelo lineal se ha quedado obsoleto pues acarrea un **consumo agresivo del medio** que está agotando las fuentes de suministro, tanto materiales como energéticas. Se extraen más materias primas de las que el planeta puede regenerar y se producen una gran cantidad de residuos que provocan los graves problemas ambientales que vive actualmente la Sociedad.

Además, como se está experimentando tras la crisis sanitaria del COVID 19 y las crisis energéticas, en este tipo de economía lineal hay una **fuerte dependencia** de la extracción de materias primas, de su transporte a lo largo de todo el mundo y de la concentración de la fabricación de los productos finales en áreas geográficas. Todo esto, en lugar tener un modelo de Economía Circular basado en la reutilización de las materias primas conlleva un riesgo asociado al suministro y a la subida de precios de estas, conforme se reduce su disponibilidad. No es un modelo sostenible, ni económica ni medioambientalmente.

Se hace por tanto necesario recorrer una **senda de transición**, que poco a poco se ha ido iniciando en los últimos años, para pasar de la economía lineal a la Economía Circular, ya no sólo por la crisis climática sino también por el bien del desarrollo de la humanidad.

## 2.2 Economía Circular en España

### 2.2.1 Situación del modelo de Economía Circular en España

Si bien la Economía Circular puede aportar grandes beneficios a la Sociedad, en España está todavía muy poco desarrollada. Según refleja la Fundación COTEC con su **Informe sobre Economía Circular en España de 2021** [7], España está estancada en la transición hacia una Economía Circular, pese a la puesta en marcha de diferentes políticas y estrategias en distintos niveles administrativos y empresas.

En este informe de COTEC se reclama una urgente transformación en medidas centradas en la reparabilidad y durabilidad de los productos, el reciclaje, la prevención del desperdicio, el ecodiseño o la eco-innovación. Este documento aporta datos que reflejan que aún España está lejos de ser circular. En este sentido, señala que [7]:

- En 2019 sólo un **10%** de los requerimientos totales de material estuvieron cubiertos por **material recuperado**. Se trata, no obstante, de una cifra cercana a la media de uso circular de materiales que registra la UE-27 (11,8%), aunque muy por debajo respecto a otros territorios como Países Bajos (30%) o Francia (20%).
- La **tasa de reciclado** en España es del **35%**, lejos del objetivo del 50% que fue marcado por la Comisión Europea para el pasado 2020. Esta cifra sitúa al país por debajo de la media de la UE-27 (48%) y lejos del nuevo objetivo para el año 2025, en el que los países de la Unión Europea tendrían que reciclar el 55% de los residuos municipales generados.
- Respecto al tratamiento de residuos, en España el **depósito de residuos en vertedero** en 2019 fue del **54%**, una cifra alejada del objetivo fijado por la UE de no superar el 10% para el año 2035.

### 2.2.2 PERTE de Economía Circular de 2022

Para mejorar los datos de 2021, el Gobierno de España aprobó, el pasado 8 de marzo de 2022, el PERTE (Proyectos Estratégicos para la Recuperación y Transformación Económica) de Economía Circular, PERTE-EC [8].

Este plan está destinado a acelerar la transición hacia un sistema productivo más eficiente y sostenible en el uso de materias primas que pretende dar cumplimiento a los objetivos contenidos en la **Estrategia Española de Economía Circular** para el año 2030 y posicionar a España como referente internacional en la gestión, reciclaje y reutilización de residuos.

Con el PERTE-EC, se busca incrementar la competitividad de los sectores industriales y las empresas asegurando una mayor autonomía estratégica del país en un contexto de alta incertidumbre internacional. Para ello, se apuesta tres objetivos sectoriales para el avance de la Economía Circular en la industria española:

1. **Mejorar el ecodiseño de los productos** de forma que se prolongue o mejore la vida útil de los mismos, así como su reciclabilidad, o se incremente la incorporación de materias primas secundarias en su fabricación, y se reduzca la generación de residuos.
2. **Mejorar la gestión de fin de vida útil** de los productos y de los residuos asociados, mediante el fomento de plantas de tratamiento que incrementen las tasas de preparación para la reutilización, reciclado y valorización, de forma que se disminuya su vertido y, en especial, que se avance hacia la recuperación de materias primas fundamentales.
3. Incorporar o **incrementar** la digitalización vinculada a los objetivos anteriores dirigida a la **trazabilidad de los residuos** y la introducción de equipos.

Para dar un orden de magnitud, el presupuesto total de este PERTE es de **492 M€**, estando distribuido de la siguiente manera:

- **Línea de acción 1.** Actuaciones en sectores clave para la Economía Circular: textil y moda, plástico y renovables: 300 M€.
- **Línea de acción 2.** Actuación transversal en la industria dirigida a la empresa: 192 M€.

A mayores, se movilizarán recursos superiores a los 1.200 M€ entre inversión pública y privada que se desarrollarán desde 2022 y hasta 2026. Por esta razón, se espera que la **Economía Circular** en España vaya estando **cada vez más presente** en los próximos años.

### 2.2.3 Referencias a la Economía Circular dentro de las normas UNE

Recientemente la Asociación Española de Normalización (UNE) ha publicado un documento titulado “*Estudio de la contribución de las normas técnicas a la Economía Circular*” [7] en el que otorga una relevancia muy grande a la Economía Circular y por ello detalla todos aquellos puntos de un conjunto muy numeroso de normas UNE en los que aparecen referencias al uso de residuos aplicando la Economía Circular.

En la presentación pública del documento (23 de marzo de 2022), se decía textualmente [10]:

*Los estándares recogidos buscan, entre otros objetivos, identificar los requisitos para que los residuos puedan ser reutilizados en los procesos de producción, evaluar la durabilidad y la reciclabilidad de los mismos, o determinar las sustancias peligrosas que puedan dificultar la implementación de medidas circulares. Asimismo, establecen un marco de actuación común para definir los principios y las técnicas aplicables en Economía Circular y evitar el greenwashing. Según un informe de la Comisión Europea publicado el año pasado, el 42% de las empresas de la UE que se anuncian en internet con publicidad sostenible caen en esta mala práctica.*

A título de ejemplo se puede decir que, en relación con el objetivo de este trabajo, las siguientes normas hacen referencia a la utilización de cenizas en la formulación de cemento o de hormigón [9]:

- **UNE 80307:2001, Cementos para usos especiales.** Contempla el uso de residuos (cenizas volantes o escorias de alto horno) como materia prima. Aplicable a: Diseño, Producción, Uso, reutilización, durabilidad, Reciclado, recuperación, biodegradación, Materias primas secundarias, Ámbito general.
- **UNE-EN 206:2013+A1:2018, Hormigón. Especificaciones, prestaciones, producción y conformidad.** Incluye los requisitos para los constituyentes del hormigón, entre los que se contemplan residuos y/o subproductos como: ... cenizas volantes conformes con la norma UNE-EN 450-1... .
- **UNE EN 13139, Áridos para morteros.** Contempla el uso de residuos/subproductos (escorias de alto horno y cenizas volantes pulverizadas) como áridos artificiales y establece requisitos para estos.
- **UNE-EN 450:2006, Parte 1 y Parte 2, Cenizas volantes para hormigón.** ... Incluye requisitos genéricos de durabilidad. Previene la presencia de sustancias peligrosas en las cenizas, lo que facilita la implementación de medidas de Economía Circular. La norma contempla requisitos para el uso del agua requerida para las cenizas volantes y también contempla su procesado para reducir la demanda de agua.

## 2.3 La descarbonización de la construcción

### 2.3.1 Impacto ambiental del sector de la construcción

El sector de la construcción tiene una reconocida importancia económica y social. Las infraestructuras son sinónimo del desarrollo de la sociedad. Sin embargo, este sector acarrea un gran impacto ambiental.

A **nivel europeo** el sector de la edificación supone más del 36% de las emisiones de CO<sub>2</sub> y el **40% de la energía final empleada**. Además, según la Comisión de la Unión Europea, el sector de la construcción es responsable de 1/2 de las materias primas extraídas, 1/2 de la energía consumida, 1/3 del agua consumida y **1/3 de los residuos generados** de toda la Unión Europea. [11]

Además, la construcción es **una de las industrias menos digitalizadas** lo que hace muy difícil el seguimiento de las buenas prácticas para el medioambiente como la trazabilidad de los materiales empleados o el correcto reciclaje o reemplazo de materiales.

En **España**, en torno al **40% de los materiales que se extraen** se utilizan en el sector de la construcción, siendo más de la mitad de ellos áridos. Por ello es importante tener un control de su extracción, para que no se genere un impacto ambiental irreparable en la biodiversidad de las canteras.

Para dar un orden de magnitud, los **residuos** generados en el sector de la construcción equivalen a la producción de **una tonelada por habitante y año en España**. Por estos motivos, ya se han iniciado sendas hacia la descarbonización de este sector, como la hoja de ruta del Green Building Council España.

### 2.3.2 Hoja de ruta del Green Building Council España para la descarbonización de la construcción

La **descarbonización** es el proceso de reducción de emisiones de los denominados Gases de Efecto Invernadero (GEI), como el metano CH<sub>4</sub> y el CO<sub>2</sub>, a la atmósfera. Su objetivo es lograr una economía global con bajas emisiones de GEI que consiga la neutralidad climática. [12]

Según el Informe País del Green Building Council España (GBCe) publicado en 2021, el sector de la edificación es responsable a nivel estatal del 30,1% del consumo de energía final y del 25,1% de las emisiones. [11]

Además, teniendo en cuenta tanto la senda de crecimiento de nueva construcción como las intervenciones de rehabilitación y cambio de instalaciones previstas, el escenario tendencial de emisiones de gases de efecto invernadero globales del sector residencial en España para los próximos años sigue creciendo en gran medida.

Para lograr la neutralidad ambiental urge impulsar la sostenibilidad en la construcción para acelerar la transición ecológica del sector y hacer compatible la economía con los objetivos de reducción de gases de efecto invernadero para 2030 y 2050. Según estos objetivos se pretende alcanzar en **2030 la neutralidad de carbono de los nuevos edificios y la reducción del 50% de los existentes**, y para el 2050, la neutralidad en carbono en todo el ciclo de vida de todo el parque de viviendas actual.

Para lograr estos objetivos, el GBCe ha presentado el pasado febrero de 2022 la “**Hoja de Ruta Building Life**”. Esta hoja de ruta propone como principal objetivo la transformación progresiva del sector para alcanzar la completa descarbonización de la edificación en 2050, acelerando la transición ecológica de este sector y haciéndola compatible con la economía. El documento sirve como **herramienta común** para motivar y convencer a las empresas para que sean conscientes de que la inversión en este ámbito es esencial para convertirse en referencia en su sector

En esta línea, más de 230 entidades han tomado conciencia de ello para revertir esta situación, realizando un gran esfuerzo durante el último año, con el objetivo de recoger un conjunto de hitos y acciones claves para alcanzar las **cero emisiones netas**.

En esta hoja de ruta se introduce el concepto del “**carbono embebido**” de los edificios, correspondiente a las **emisiones de CO<sub>2</sub> emitidas en la producción de materiales**, la construcción, la rehabilitación y la demolición de los edificios. El carbono embebido supone más del 50% de las emisiones acumuladas por el sector durante los próximos 30 años. Por este motivo, es clave **limitarlo para reducir la huella de carbono** y para ello, es necesario actuar en todo el ciclo de vida de los edificios, desde la producción de los materiales que lo componen hasta la gestión en su fin de vida con su correcto desmantelamiento para facilitar el reciclaje.

### 2.3.3 Novedades en el Código Estructural Español

El Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana (MITMA) presentó en enero de 2022, el nuevo Código Estructural (CE), que entró en vigor el 10 de noviembre de 2021, con la reglamentación sobre estructuras de hormigón y de acero [13]

Este nuevo marco reglamentario tiene por objeto definir las exigencias que deben cumplir las estructuras de hormigón, las de acero y las mixtas de hormigón-acero para satisfacer los requisitos de seguridad estructural y seguridad en caso de incendio, además de la **protección del medio ambiente y la utilización eficiente de recursos naturales**, proporcionando procedimientos que permiten demostrar su cumplimiento con suficientes garantías técnicas. Al respecto, destaca la novedad del **índice de contribución a la sostenibilidad de las estructuras** (ICES) y la inclusión de los Distintivos de Sostenibilidad Oficialmente Reconocidos (DSOR).

Este Código CE regula nuevos ámbitos que no contemplaba la reglamentación anterior como la gestión de las estructuras existentes durante su vida útil. Además, evalúa la sostenibilidad de las estructuras considerando las características prestacionales, ambientales, sociales y económicas que aportan los agentes que participan en su proyecto y ejecución. Los **parámetros** utilizados incluyen las **emisiones de gases de efecto invernadero, el reciclado de materiales**, el consumo de energía o agua, la utilización de energías renovables, control de emisiones y ruidos, mejora ambiental, entre otros, y se valora el compromiso de dichos agentes más allá del mínimo exigido por la legislación vigente.

La **Plataforma Tecnológica Española del Hormigón (PTEH)** tiene como principal objetivo para este año 2022 la difusión de las novedades del Código Estructural y especialmente las novedades en el ámbito de la sostenibilidad. Adicionalmente, la PTEH va a trabajar en el diseño de edificios de hormigón neutros en carbono, elaborando una guía de diseño junto con la Asociación Sostenibilidad y Arquitectura (ASA) [14].

## 2.4 Iniciativas de descarbonización de la construcción en España

### 2.4.1 Proyecto de investigación: Hormigón autocompactante a partir de cenizas de la combustión de biomasa de olivo

En 2012 se publicó un artículo científico muy acorde con la temática de este trabajo. Los investigadores del departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Granada generaron un hormigón autocompactante a partir de las cenizas procedentes de la combustión en caldera de pellets fabricados con restos de poda de olivo como **sustituto del filler** o polvo mineral [15] (**Figura 3**).

Los resultados, publicados en la revista *Construction and Building Materials*, muestran que este hormigón presenta una resistencia a compresión ligeramente superior a los del hormigón tradicional, y superiores

al mínimo establecido por la normativa. Tras la investigación la autora principal del trabajo, la profesora Montserrat Zamorano, concluye que: "...la **incorporación de cenizas de biomasa es factible**, si bien es necesario realizar un estudio a mayor escala y con un alcance más amplio para garantizar la fabricación de hormigón de alta calidad...".



*Figura 3. Ensayo del cono de Abrams para medir la consistencia del hormigón experimental con cenizas de biomasa como sustituto de filler en la composición del hormigón*

#### 2.4.2 Proyecto de construcción de un carril bici con áridos reciclados

El **hormigón H-ECO** es un estándar del grupo HeidelbergCement Hispania, que persigue alcanzar la neutralidad carbónica de la industria cementera y eliminar la mayor parte de los impactos medioambientales negativos asociados al sector de la construcción [16].

Este material, como afirma la compañía, posee la **menor huella de carbono** posible y la **mayor circularidad del mercado**, lo que contribuye a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y a mejorar la valorización de los residuos producidos por otras actividades industriales en el entorno de la obra.

En el hormigón H-ECO se ha **sustituido gran parte de su árido natural** (extraído de canteras) por materiales procedentes de fuentes secundarias, **principalmente de áridos siderúrgicos**. Estos áridos son producidos en el proceso de valorización de las escorias negras de acerías de horno eléctrico, que se amontonan como residuos industriales en la provincia de Vizcaya.

En el año 2021, se empleó en la provincia vizcaína este material ecológico para dos proyectos a gran escala. El primero, para el **pavimento arquitectónico del carril bici (Figura 4)** del polígono industrial de Ibarzaharra (Sestao) con un total de 1.900 m<sup>3</sup> empleados de este material ecológico. El segundo, para el proyecto urbanístico de la regeneración urbana de la isla artificial Zorrotzaurre ubicada en la Ría de Bilbao, que contó con un total 4.100 m<sup>3</sup> de H-ECO.

Además, se trata de un producto totalmente reciclable, pues tras su vida útil puede demolerse y ser utilizado como árido en la elaboración de nuevos hormigones.



*Figura 4. Dosificación del hormigón sostenible H-ECO para el carril bici en Sestao (Parte superior) y carril bici terminado (Parte inferior)*

A través de estas dos iniciativas se resalta el interés de nuestro país por avanzar hacia un modelo Economía Circular. Sin embargo, en la Economía Circular no basta sólo con darle una segunda vida a los residuos, también es importante **medir su beneficio ecológico** para poder asegurarse de que la aportación de los residuos a una aplicación determinada es positiva para el medioambiente. Para conseguir evaluar estos beneficios ambientales se pueden usar metodologías normalizadas como el **Análisis de Ciclo de Vida** que se explica en el capítulo siguiente.

# CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA DEL ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA

## 3.1 Introducción

En este capítulo se introduce la metodología del Análisis de Ciclo de Vida (ACV) y sus tipos. Seguidamente, se presenta el marco normativo que regula esta metodología de evaluación ambiental.

A continuación, se describen las distintas fases, definidas por las normas ISO vigentes, que han de seguirse para la correcta elaboración de un ACV y los requisitos necesarios para completar cada una de estas fases.

Por último, se introduce el software SimaPro de cálculo de ACV que se utiliza para el estudio ambiental del hormigón con cenizas de biomasa de este Trabajo Fin de Máster.

## 3.2 Análisis de Ciclo de Vida

Todas las actividades o procesos de la actividad humana provocan **impactos medioambientales** (positivos y/o negativos), suponen consumo de recursos, emiten sustancias al medio ambiente y generan otras modificaciones (positivas y/o negativas) en el medio ambiente.

La creciente conciencia con respecto a la importancia de la protección ambiental, y los posibles impactos asociados con los nuevos productos obtenidos, tanto manufacturados como consumidos, han aumentado el interés por el desarrollo de métodos para comprender mejor y tratar esos impactos. Una de las técnicas desarrolladas en este sentido es el Análisis del Ciclo de Vida.

### 3.2.1 Definición

El **Análisis de Ciclo de Vida (ACV)** es una herramienta de gestión medioambiental cuya finalidad es cuantificar y analizar de forma objetiva, metódica, sistemática y científica, el impacto ambiental originado por un proceso/producto desde la extracción de materias primas hasta el uso y fin de vida del producto [17] [18].

El ciclo de vida completo de un nuevo producto considera su historia, desde su origen como materia prima hasta el fin de su vida útil, en el que se convierte en residuo o subproducto. Para evaluar su impacto, deben tenerse en cuenta todas las fases intermedias, tales como transporte, preparación y manufacturación, uso, etc., como se ilustra en la **Figura 5**.

La complejidad del ACV requiere de una **metodología**, motivo por el cual se implantó una normativa para estandarizar y de la utilización de bases de datos de inventarios públicos.

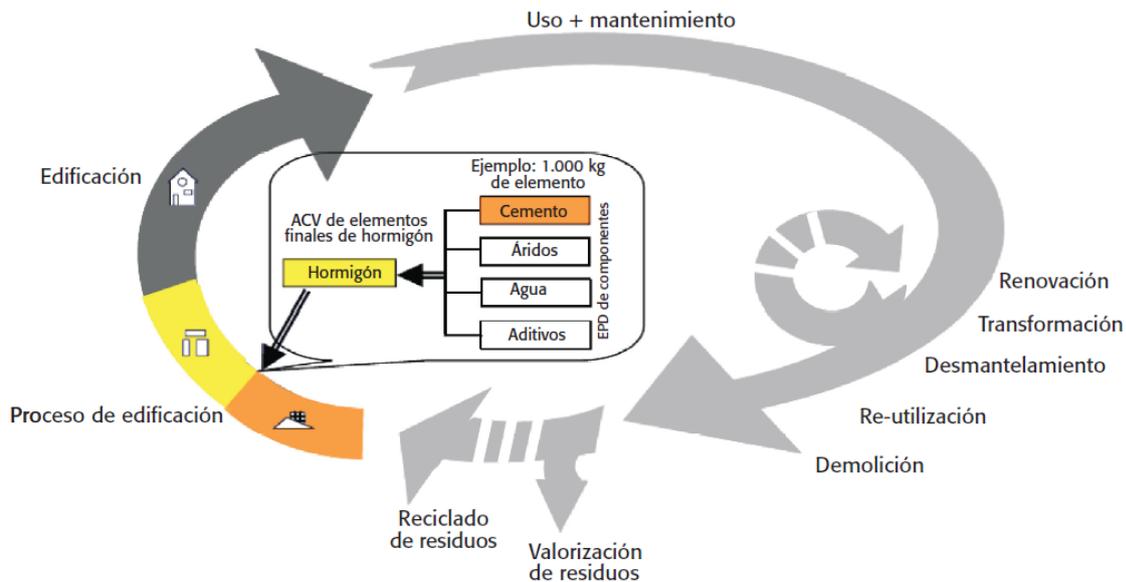


Figura 5. Ejemplo del ciclo de vida completo de un elemento hecho de hormigón [19]

El ACV que puede ser utilizado para comparar o analizar productos o servicios existentes con otros o con normativas, permitiendo ayudar a:

- **Identificar las áreas** de potenciales para **mejorar el desempeño ambiental** de productos en las distintas etapas de su ciclo de vida.
- **Aportar información** para la **planificación estratégica**, ayudando a la identificación de las prioridades y el rediseños de cara a reducir su impacto en el medio ambiente.
- **Seleccionar los indicadores** de desempeño ambiental pertinentes para poder hacer campañas de marketing de un producto con un **etiquetado o la declaración ambientales** de un producto.

### 3.2.2 Tipos de ACV

Existen diferentes tipos de ACV dependiendo del enfoque y de la aplicación que se le vaya a dar. A continuación, se describen de manera esquematizada diferentes clasificaciones [20]:

- **Descriptivo:** con carácter solo informativo (Por ejemplo: para marketing, diseño de un nuevo producto, etc.).
- **Comparativo:** comparación entre productos o con un estándar entre las versiones antigua y nueva, para conseguir una ecoetiqueta o simplemente para la mejora del producto.
- **De predicción:** para ayudar en la decisión de un cambio de materias primas o de fuentes de suministro, para apoyar la definición de nuevas estrategias de producto, etc.

- ❖ **Atribucional:** describe el comportamiento ambiental de un producto a lo largo de su ciclo de vida.
- ❖ **Consecuencial:** describe los efectos que pueden provocar cambios en el ciclo de vida del producto.

En función del alcance del estudio caben diferenciar:

- ACV **“from gate to gate”** o “de la puerta a la puerta”: incluye únicamente las etapas de producción.
- ACV **“from cradle to gate”** o “de la cuna a la puerta”: incluye únicamente las etapas de extracción, procesado y transporte de materias primas y fabricación del producto (hasta la puerta de la fábrica).
- ACV **“from cradle to grave”** o “de la cuna a la tumba”: incluye todas las etapas del ciclo de vida del producto, desde la extracción de materias primas hasta la gestión de los residuos de fin de vida.
- ACV **“from cradle to cradle”** o “de la cuna a la cuna”: incluye todas las etapas del ciclo de vida del producto, desde la extracción de materias primas hasta su reintroducción en el mismo proceso productivo o en otro diferentes. Por ejemplo, incluye el proceso de reciclaje y los pasos intermedios hasta que puede ser reutilizado de nuevo en un proceso productivo.

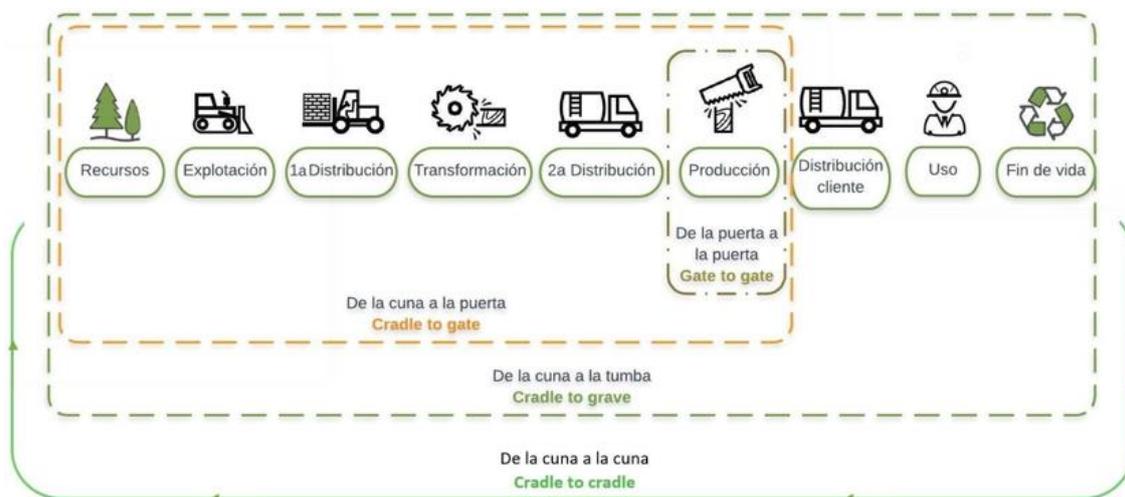


Figura 6. Tipos de ACV en función de los límites del ACV [20]

### 3.3 Marco Normativo

El método del Análisis de Ciclo de Vida se originó a  **finales de la década de los sesenta y principios de la década de los sesenta**, debido principalmente a la crisis del petróleo y la escasez de energía, cuando distintas compañías de los Estados Unidos y Europa utilizaron esta herramienta para cuantificar el consumo energético de sus procesos productivos asociados a sus productos [21].

Aunque inicialmente los estudios de Análisis del Ciclo de Vida integraban principalmente la materia prima y sus desechos debido a su efecto directo en el consumo de energía, a partir de la década de los setenta se empiezan a incorporar nuevos aspectos en el análisis, como el  **impacto generado en el cambio climático y otras cuestiones ambientales**. Durante esta década y la siguiente se desarrollan procedimientos y se pretende su normalización.

En el año **1997** la Organización Internacional de Estandarización (ISO) publicó la familia de  **normas ISO 14000 para la gestión ambiental**. Las normas incluyen guías, herramientas y metodologías destinadas principalmente al uso por compañías y organizaciones con el objetivo de que puedan identificar, controlar y mejorar su impacto ambiental. Entre ellas se incluye la  **ISO 14040**, con su segunda edición publicada en 2006, que presenta los  **principios generales y estructura** de un estudio de  **Evaluación del Ciclo de Vida**, constituyendo la normativa vigente actualmente.

Las normas vigentes en la actualidad y con alcance internacional son:

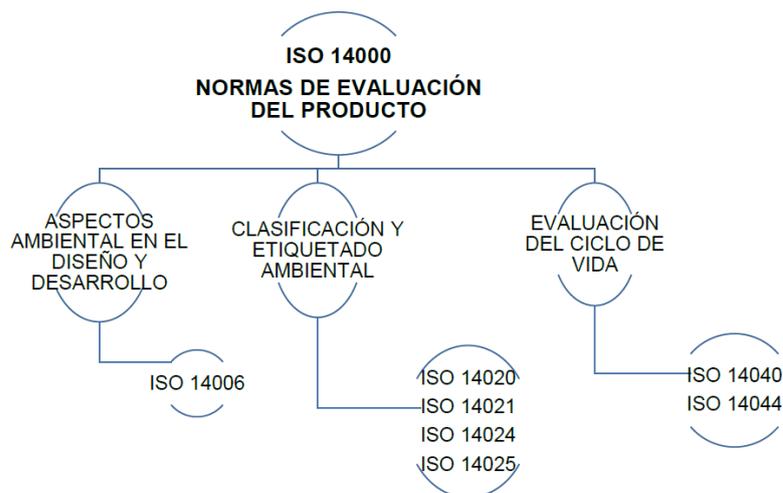
- **Norma UNE-EN ISO 14040** Gestión Ambiental. Análisis del Ciclo de Vida. **Principios y marco de referencia** (ISO 14040:2006).
- **Norma UNE-EN ISO 14044** Gestión Ambiental. Análisis del Ciclo de Vida. **Requisitos y Directrices** (ISO 14044:2006).

En un principio se redactaron, adicionalmente, normas para las distintas de las fases de un ACV:

- Norma UNE-EN ISO 14041 Gestión Ambiental. Análisis del Ciclo de Vida. Definición del objetivo y alcance y el análisis de inventario. (ISO 14041:1999).
- Norma UNE-EN ISO 14042 Gestión Ambiental. Análisis del Ciclo de Vida. Evaluación de impacto del ciclo de vida. (ISO 14042:2001).
- Norma UNE-EN ISO 14043 Gestión Ambiental. Análisis del Ciclo de Vida. Interpretación del ciclo de vida. (ISO 14042:2000).

Estas normas quedaron anuladas en 2006 y no se volvieron a renovar. Actualmente **sólo están vigentes las normas 14040 y 14044**.

A título informativo, en el siguiente esquema se pueden ver las principales normas de evaluación del producto en gestión ambiental: [22]



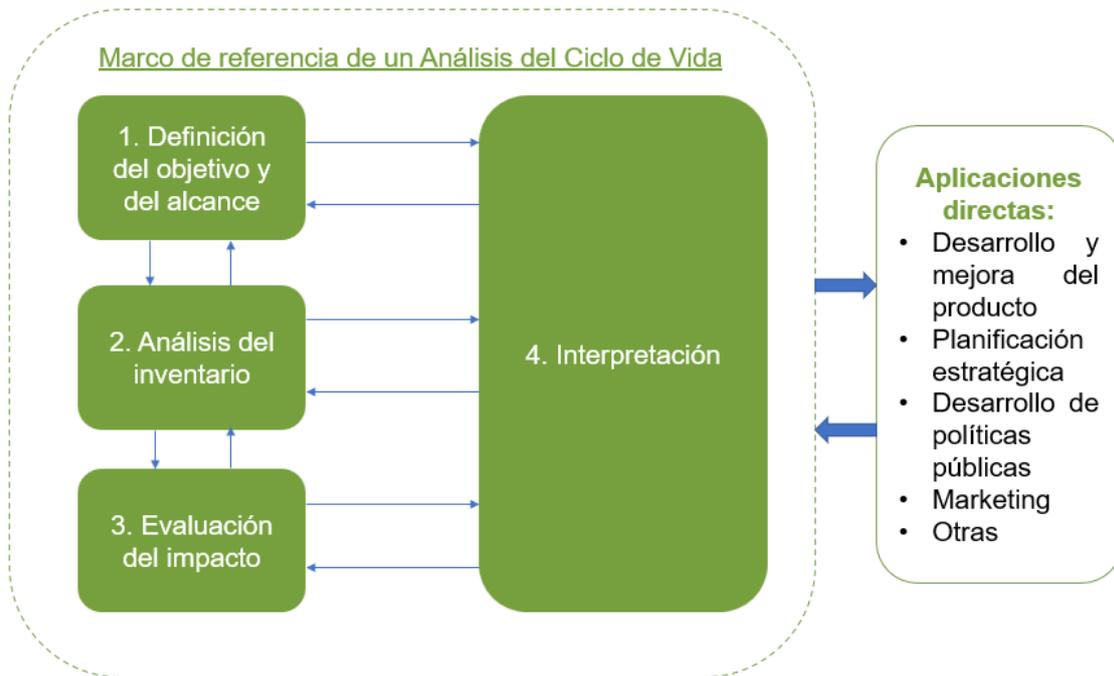
*Figura 7. Esquema de las Normas ISO de Gestión Ambiental del producto [22]*

Estas normas no incluyen especificaciones ni recomendaciones para definir las técnicas a utilizar en cada fase del estudio de un ACV, por lo que se define únicamente como una herramienta de guía sin considerar aspectos concretos restrictivos usuales en una norma.

### 3.4 Fases del Análisis de Ciclo de Vida

Las normas UNE-EN ISO 14040 y 14044 definen **cuatro fases diferenciadas**, pero, a la vez relacionadas entre sí, que deben llevarse a cabo en cualquier ACV (**Figura 8**).

1. Fase de **definición del objetivo y el alcance**.
2. Fase de **análisis del inventario**.
3. Fase de **evaluación del impacto ambiental**.
4. Fase de **interpretación**.



**Figura 8.** Fases de un ACV [Elaboración propia]

### 3.4.1 Fase de definición del objetivo y alcance

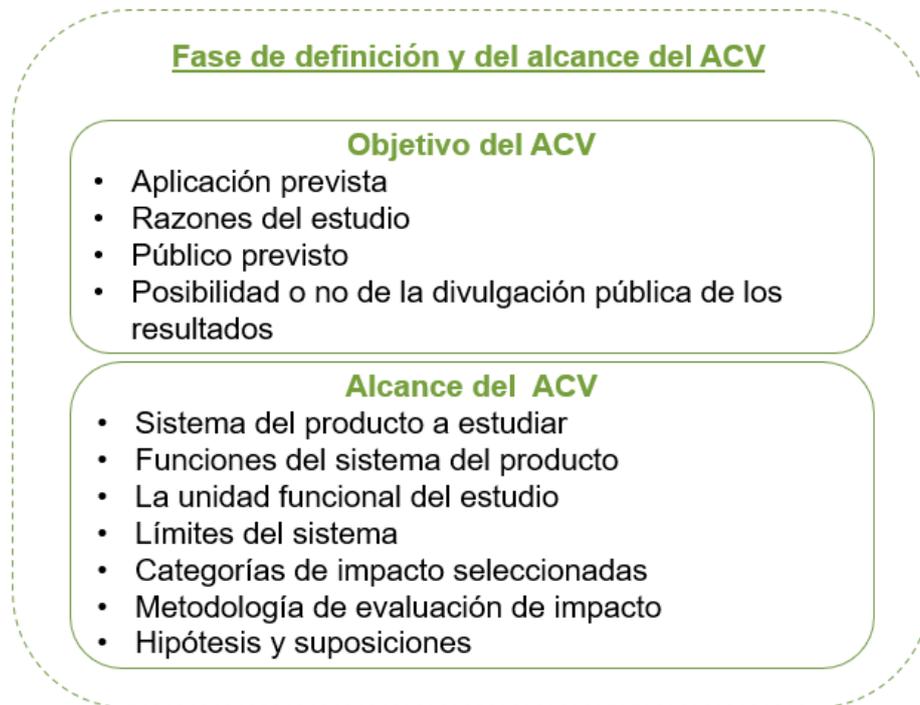
En esta primera fase se requiere **especificar** de la forma más detallada posible **el objetivo del estudio**, las razones que lo fundamentan, la aplicación prevista y la profundidad o alcance del análisis.

Esta primera etapa sirve para organizar la totalidad del estudio y como índice para la expresión de los resultados y conclusiones. Según la norma, se debe especificar también la audiencia o a la que se dirige el estudio, puesto que en función del público se tiene que profundizar más o menos en los distintos aspectos.

El **alcance del análisis** debe estar suficientemente bien definido para asegurar que la amplitud, profundidad y el nivel de detalle del estudio sean compatibles y suficientes para alcanzar el objetivo establecido.

La **unidad funcional** del estudio corresponde a la unidad de referencia de todas las entradas y salidas del sistema en el ACV. Por ejemplo, 1 tonelada de cemento o 1 m<sup>3</sup> de hormigón. En la definición del alcance se incluye el sistema del producto a estudiar, la unidad funcional, los límites del sistema, las categorías de impacto seleccionadas y la metodología de evaluación de impacto.

En la **Figura 9** se puede ver un resumen de los distintos aspectos relacionados con el objetivo y el alcance del ACV, a incluir en esta fase:



**Figura 9.** Fase de definición del objetivo y del alcance del ACV [Elaboración propia]

### 3.4.2 Fase de análisis del inventario (ICV)

La fase de análisis del inventario del ciclo de vida (ICV) **recopila y cuantifica la información sobre las entradas y salidas del sistema** del producto estudiado (Figura 10).



**Figura 10.** Esquema del análisis de inventario del ACV de un producto [Elaboración propia]

Es una **fase compleja**, a medida que se recopilan los datos y se aprende más sobre el sistema, se pueden identificar nuevos requisitos o limitaciones, que requieran cambios en los procedimientos de recopilación de datos, de manera que aún se puedan cumplir los objetivos del estudio.

Las limitaciones prácticas en la recopilación de datos deben tenerse en cuenta en el alcance y documentarse en el informe del estudio. Existen diferentes bases de datos disponibles que presentan variaciones en el consumo de materias primas de un mismo producto, proceso o tecnología valorada,

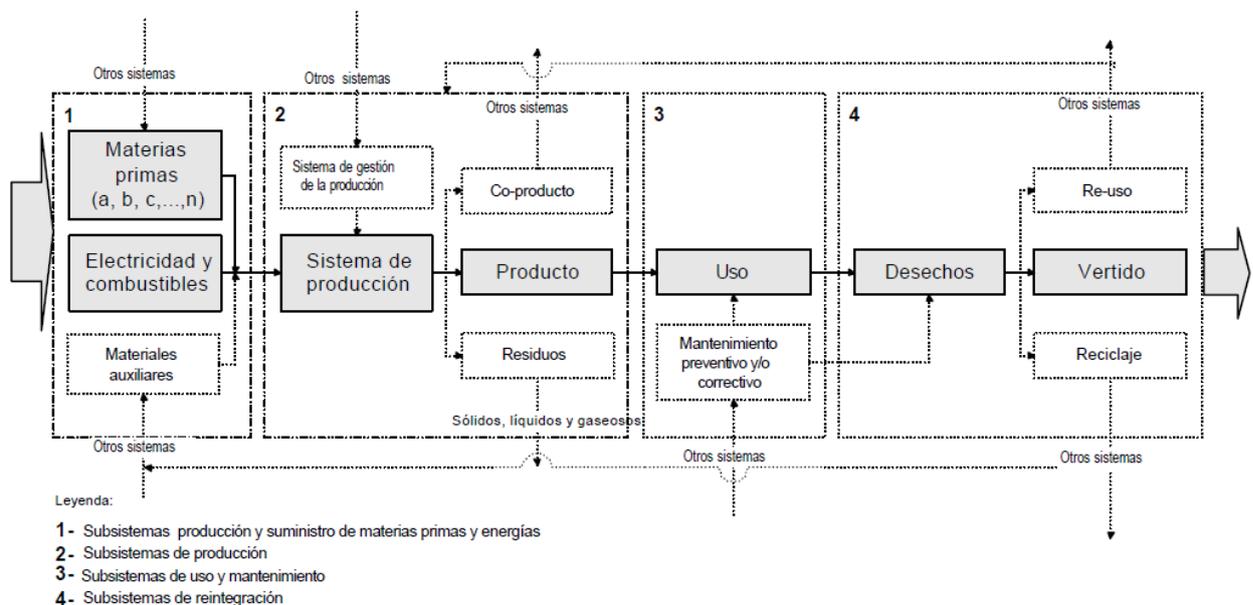
como por ejemplo el combustible que utiliza la tecnología empleada en un proceso productivo o las emisiones atmosféricas asociadas a este proceso. **Una correcta documentación** de esta tarea **asegura la calidad de los resultados** puesto que los datos obtenidos en esta fase son el punto de partida para la posterior Evaluación de Impacto.

También es posible recopilar los datos personalmente a través de la investigación de los procesos y el registro de las entradas y salidas de material y energía implicadas. La base de datos obtenida puede ofrecer valores más precisos, aunque resulten más difíciles de obtener y en consecuencia contemplen menos variables.

Sin duda alguna, la falta de datos o el criterio de elección de las aproximaciones suponen un problema en la elaboración y comparación de distintos ACV, así como en la fiabilidad y calidad de los resultados. No obstante, también es verdad que **no existe un consenso oficial** por parte de órganos competentes **que regularice** los valores a considerar o proporcione **bases de datos de inventario unificadas** en base a los parámetros variables de cada país o emplazamiento, por lo que los estudios siempre tienen un margen de subjetividad.

Además de los datos cuantificados, con el fin de dar una visión global del producto o proceso, se recomienda que la fase de inventario incluya:

- **Diagramas de flujo sobre el sistema de estudio (Figura 11).**
- **Descripción detallada de cada unidad de proceso.**
- Listado de las **unidades de medida** de cada parámetro.
- Listado de **fuentes documentales**.



**Figura 11.** Flujo genérico del ciclo de vida de un producto [19]

### 3.4.3 Fase de evaluación del impacto ambiental (EICV)

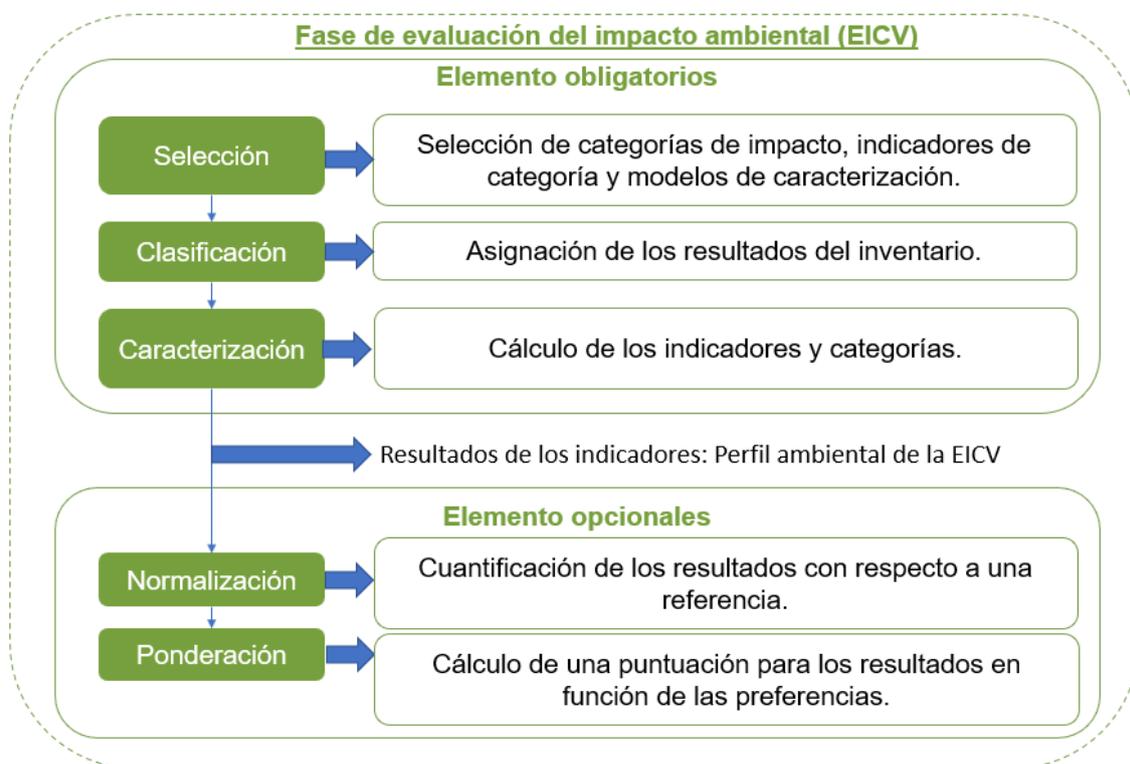
La fase de evaluación de impacto de un ACV tiene como propósito **evaluar cuán significativos son los impactos ambientales** potenciales utilizando los resultados del ICV.

Este proceso implica la **asociación de los datos de inventario con** las categorías de **impactos ambientales específicos** y los indicadores de estos impactos. El nivel de detalle, la selección de los impactos evaluados y la metodología utilizada ya se deben haber definido en la primera fase.

La evaluación del impacto puede incluir un **proceso iterativo de revisión del objetivo y del alcance del estudio** de ACV para determinar si se han cumplido los objetivos de este, o para modificar el objetivo y el alcance si la evaluación indica que no se pueden alcanzar.

Cuestiones tales como la elección, el modelado y la evaluación de categorías de impacto pueden introducir subjetividad en la fase de la EICV. Por lo tanto, es importante asegurarse de que las suposiciones y **aproximaciones están claramente descritas**.

Las etapas que forman la fase evaluación del impacto se recogen en la **Figura 12**:



**Figura 12.** Elementos de la fase EICV [Elaboración propia]

- **Selección:** Selección de categorías de impacto, indicadores de categoría y modelos de caracterización. Esta etapa depende del objetivo y del alcance definidos para el estudio. En esta etapa pueden definirse nuevos factores de cálculo que permitan alcanzar el objetivo del estudio. [23]
- **Clasificación:** Consiste en el agrupamiento de las cargas ambientales de cada elemento debidas al consumo de recursos y a la generación de emisiones y residuos, y su asignación con el impacto potencial asociado a cada una de ellas.
- **Caracterización:** Cálculo de resultados mediante los indicadores de categoría que cuantifican los impactos ambientales. Así se evalúa la importancia de los flujos individuales relacionados a

un flujo básico específico, (por ejemplo, las emisiones de CO<sub>2</sub>), en relación con un factor (por ejemplo, el potencial del calentamiento global por efecto invernadero).

- **Normalización** (opcional): En esta fase se hace una cuantificación de los resultados del indicador de categoría de impacto con respecto a una información de referencia. Se indica la proporción de los resultados respecto a una cierta área o un cierto periodo, por ejemplo, las emisiones de CO<sub>2</sub> respecto a la media global.
- **Ponderación** (opcional): Aquí se calcula una puntuación final de los resultados obtenidos de caracterización o normalización. Esta ponderación se hace respecto a las preferencias sociales de las diversas categorías de impacto, por ejemplo, el peso asignado socialmente al calentamiento global, comparado con la pérdida de biodiversidad o la reducción de la capa de ozono de la estratosfera. Este paso es el más controvertido y debatido debido a la necesidad de un juicio de valor.

#### 3.4.4 Fase de análisis de interpretación

Esta última fase del ACV **recopila los resultados obtenidos** en las fases anteriores con el objetivo de **emitir una conclusión**. Principalmente deberá proporcionar resultados coherentes con el objetivo y alcance definidos, que lleguen a conclusiones, expliquen las limitaciones y proporcionen recomendaciones.

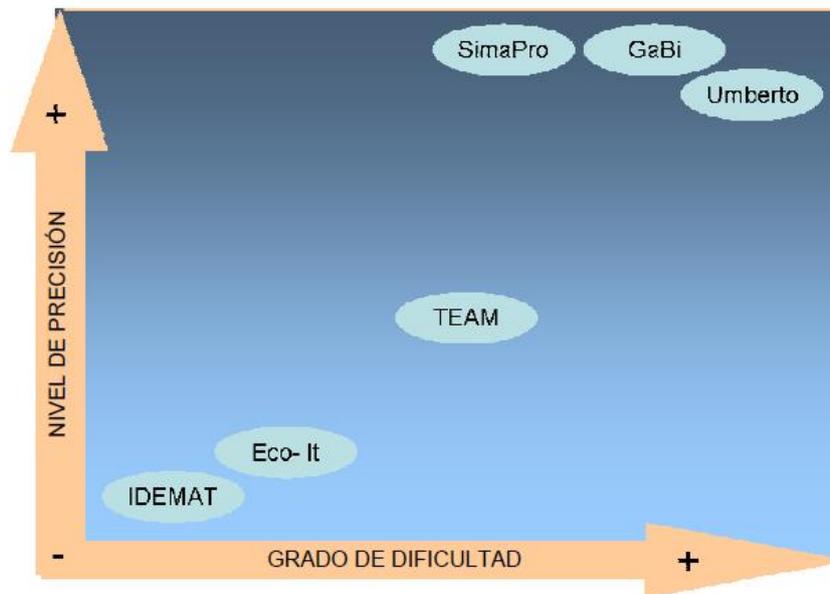
La fase de interpretación puede involucrar un proceso iterativo de revisión y de actualización del alcance de un ACV, así como de la naturaleza y de la calidad de los datos recopilados de modo que sean coherentes con el objetivo definido. Del mismo modo los resultados deberán garantizar la fiabilidad del estudio teniendo en cuenta las limitaciones del sistema definidas anteriormente, así como las incertidumbres derivadas de los cálculos.

### 3.5 Soporte informático aplicado al ACV: SimaPro 7.2

Los pasos operativos para que se lleve a cabo el Análisis de Ciclo de Vida de un sistema o producto, incluyen el **manejo de gran cantidad de datos de inventarios**, seguidos de diversas operaciones de **cálculos que se aplican a los factores de caracterización**, índices de categoría, etc., como se ha indicado en apartados anteriores.

Estos aspectos son más viables con el soporte de sistemas informáticos que faciliten las tareas a realizar.

Entre los distintos softwares informáticos disponibles para el ACV, **destaca el programa SimaPro** por su precisión y facilidad de manejo como puede apreciarse en la comparativa de la **Figura 13**:



**Figura 13.** Comparación de distintas herramientas de software ACV en función de su dificultad y grado de precisión [24]

El programa **SimaPro** (PRé Consultans) es una herramienta muy potente que permite **elaborar y analizar el ciclo de vida de un producto** teniendo en cuenta todos las entradas (inputs) y las salidas (outputs) de los todos los procesos presentes en el ciclo de vida del producto. Es una de las herramientas **más utilizadas en todo el mundo** para comparación de productos y procesos. Los impactos ambientales se calculan **según** lo indicado en la **norma ISO 14040**.



**Figura 14.** Logo del software Simapro

Permite realizar ACV completos empleando **distintos métodos de evaluación de impactos** según diferentes caracterizaciones, normalizaciones y ponderaciones tales como *Ecoindicador-99*, *IMPACT 2002*, *ReCiPe*, *IPCC*, *Greenhouse Gas Protocole* o *Ecological footprint*.

Además, posee múltiples **bases de datos totalmente documentadas** con sus fuentes, incluso con descripciones cualitativas, y que incluyen gran variedad de indicadores ambientales como la biblioteca *Ecoinvent*.

Esta herramienta es fácilmente **adaptable a las necesidades del usuario** ya que permite modificar o incluir datos de productos o procesos según las necesidades del estudio a realizar (**Figura 15**).

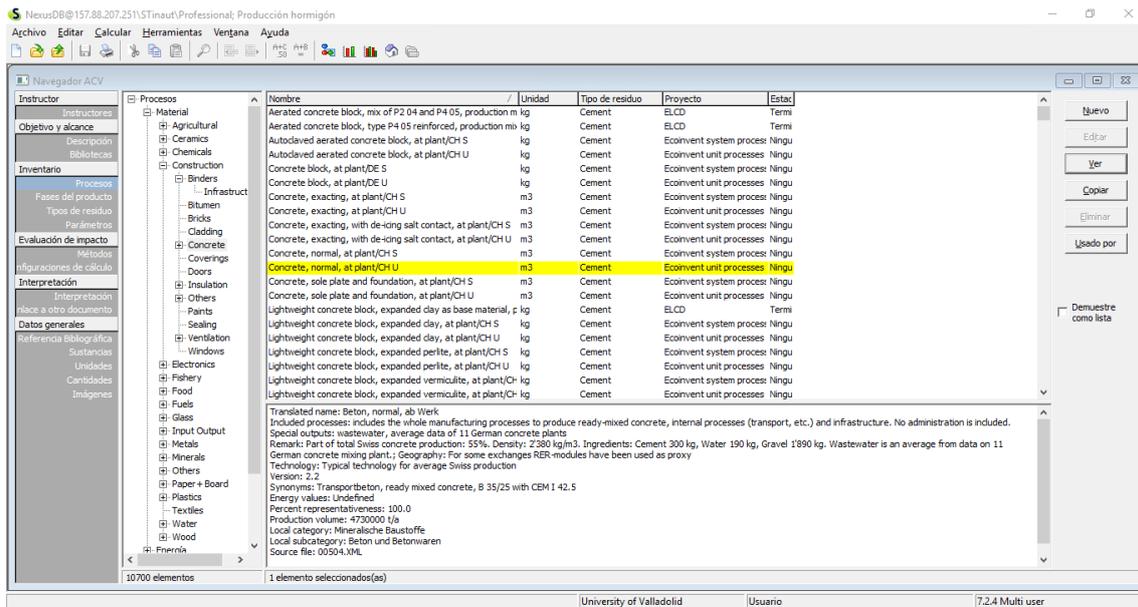


Figura 15. Selección de datos en SimaPro

Los resultados permiten identificar las etapas del proceso sometido a estudio que tienen mayores impactos ambientales y comparar diferentes productos, por lo que es una herramienta muy empleada en **Ecodiseño**, en los departamentos de I+D de las empresas para la toma de decisiones en la mejora ambiental de sus productos y procesos.

El programa muestra **gráficos con los impactos ambientales** y su contribución en cada una de las etapas definidas en el proceso, así como los datos numéricos totales. Estos gráficos pueden obtenerse simultáneamente de dos o varios productos para facilitar su comparación y la interpretación de resultados.

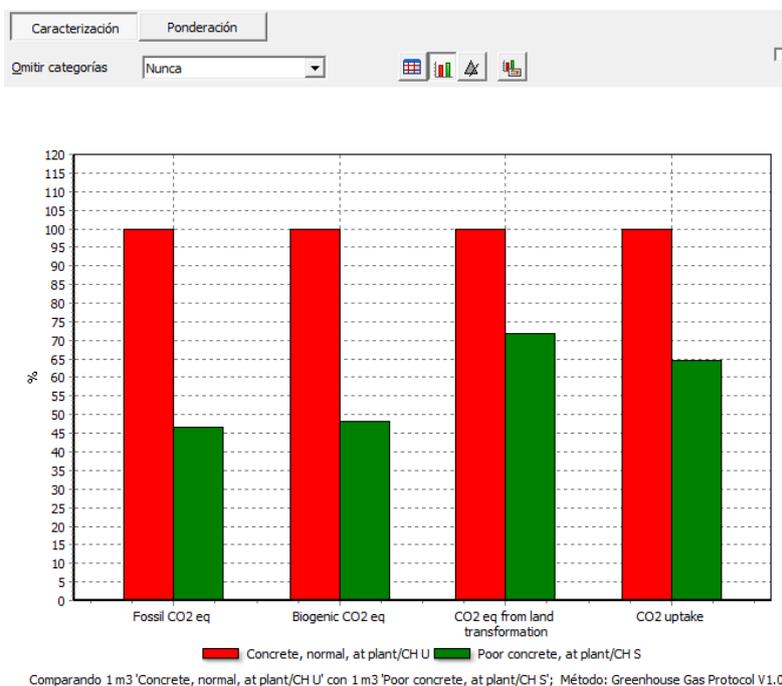
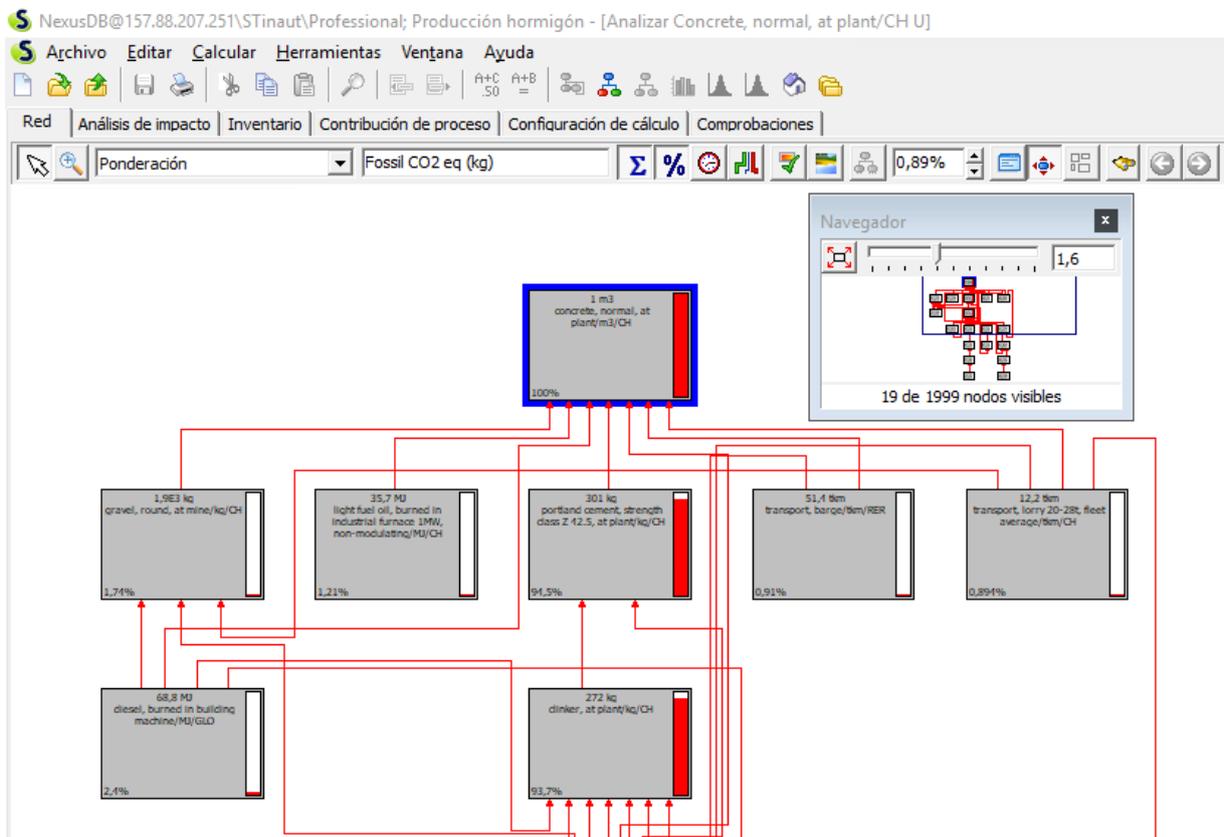


Figura 16. Ejemplo de comparativa entre dos tipos de hormigón mediante el método del protocolo de gases de efecto invernadero (Emisiones de CO<sub>2</sub> equivalentes)

También es posible mostrar la **red de trazabilidad de los recursos utilizados**, presentes en las bases de datos con el impacto que representa cada uno de estos (barra roja en **Figura 17**), permitiendo un mejor seguimiento de los resultados, facilitando con ello la interpretación de estos.



**Figura 17.** Ejemplo de la red de trazabilidad de los recursos empleados para la producción de 1 m<sup>3</sup> de hormigón.

Con la ayuda del programa SimaPro se ha podido realizar el ACV para el estudio ambiental del hormigón con cenizas biomasa que se busca como objetivo respetando las directrices de las normas ISO vigentes. En el Capítulo 7 de este documento se puede ver el desarrollo de los ACV realizados para este estudio.

# CAPÍTULO 4. LA BIOMASA COMO RECURSO ENERGÉTICO

En este capítulo se presenta el concepto de biomasa, así como las tecnologías que permiten su aprovechamiento energético. También se describen las características generales de las plantas de combustión de biomasa y los sistemas de retención de cenizas. A continuación, se describe el método del análisis inmediato para la caracterización de la biomasa y el cálculo del balance de cenizas generadas en una planta de combustión. Por último, se presentan las características de la planta de biomasa de Cubillos de Sil, cuyas cenizas se van a emplear como componente de hormigones en este trabajo.

## 4.1 Concepto de biomasa

Se entiende por **biomasa** cualquier tipo de **materia orgánica** que haya tenido su origen inmediato como consecuencia de un proceso biológico. La biomasa primaria la constituyen productos **vegetales** elaborados a partir del proceso de **fotosíntesis** que realizan las plantas empleando la radiación solar como fuente de energía y el  $\text{CO}_2$  y  $\text{H}_2\text{O}$  como materias primas (además de otras sustancias minerales) liberando oxígeno [25].

Además, dentro del concepto de biomasa también entran los productos generados por el metabolismo heterótrofo del hombre o de animales (transformando los productos vegetales), y los productos resultantes de la transformación de los anteriores (incluyendo residuos de tipo animal, industrial, doméstico y vertidos), de acuerdo con la **Figura 18**:

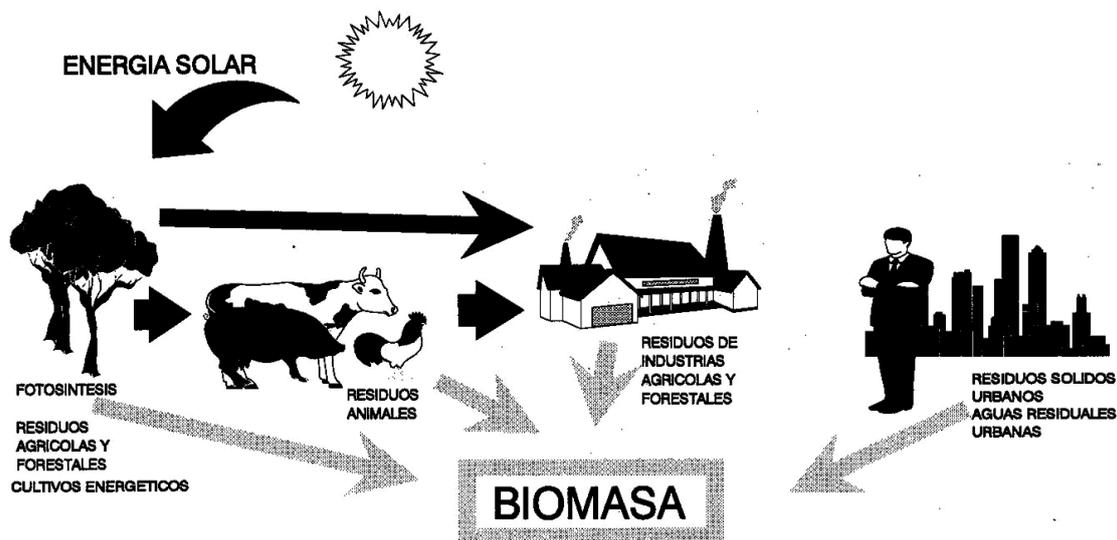


Figura 18. Diferentes orígenes de la biomasa [26]

Aunque la definición es muy general, sólo se va a considerar la biomasa desde el **punto de vista energético**, considerando la **biomasa como un recurso energético renovable, que actúa como un medio portador de la energía solar que las plantas captan**. En la mayor parte de los casos, el aprovechamiento energético de los diferentes tipos de biomasa se produce por combustión, liberando el  $\text{CO}_2$  capturado inicialmente y la energía solar del proceso de fotosíntesis.

Atendiendo a sus **características físicas**, la biomasa se puede clasificar en [26]:

- **Sólida**
  - **Biomasa lignocelulósica:** materia sólida constituida por lignocelulosa y con pequeño o medio contenido en humedad. Frecuentemente este tipo se conoce simplemente por biomasa.
  - **Residuos sólidos urbanos**, considerando sólo la fracción orgánica o degradable.
- **Líquida**
  - **Residuos líquidos:** purines, aguas residuales. **Biocombustibles:** combustibles líquidos obtenidos o transformados a partir de aceites, alcoholes, biomasa lignocelulósica o fracción degradable de residuos.
- **Gaseosa**
  - **Biogás:** gas obtenido por fermentación anaerobia de biomasa o de la fracción degradable de residuos
  - **Gas de gasificación:** obtenido por un proceso termoquímico a partir de biomasa lignocelulósica

Cada uno de los tipos de biomasa tiene propiedades físicas, químicas y energéticas distintas, que impone tecnologías de aprovechamiento o de transformación diferentes, como se indica en la **Tabla 1** [26]:

- **Procesos Termoquímicos** (biomasa seca)
- **Procesos Químicos y Biológicos** (biomasa húmeda, hidratos de carbono y aceites)
- **Extracción directa** (oleaginosas)

*Tabla 1. Tecnologías de aprovechamiento o adecuación dependiendo del tipo de biomasa [26]*

TIPO DE BIOMASA	TECNOLOGÍA DE ADECUACIÓN						
	Termoquímicos			Químicos y Biológicos			Extracción Directa
	Combustión	Gasificación	Pirólisis	Digestión anaerobia	Hidrólisis y/o fermentación	Transesterificación	Aceites de oleaginosas
RESIDUOS FORESTALES	<u>X</u>	<u>X</u>	X				
RESIDUOS AGRÍCOLAS	<u>X</u>	<u>X</u>	X		<u>X</u>		
CULTIVOS ENERGÉTICOS	<u>X</u>	<u>X</u>	X	<u>X</u>	<u>X</u>	<u>X</u>	X
RESIDUOS GANADEROS				<u>X</u>			
INDUSTRIAS AGROFORESTAL Y ALIMENTARIA	<u>X</u>	<u>X</u>		<u>X</u>	<u>X</u>	<u>X</u>	
URBANA	Fracción seca			Fracción húmeda		Aceites usados	

En este trabajo de fin de máster se considera únicamente la **biomasa lignocelulósica**, que constituye un combustible renovable para centrales de generación eléctrica por **combustión**.

En el proceso de combustión, la energía química de la biomasa se convierte en energía térmica de los gases de combustión, la cual se transfiere a un fluido de trabajo (vapor de agua, aceite térmico), cuya expansión en una turbina permite obtener energía mecánica y posteriormente eléctrica. Los gases de combustión se evacúan a la atmósfera a través de una chimenea.

## 4.2 Tecnologías de aprovechamiento termoquímico de la biomasa

Los procesos termoquímicos se basan en someter a la biomasa a la acción de altas temperaturas, en condiciones variables de **oxidación** (reacciones químicas irreversibles).

Dependiendo de la **cantidad de oxígeno** con que se lleve a cabo el calentamiento, existen tres categorías de procesos [26]:

- Con exceso de oxígeno: **COMBUSTIÓN**
- Cantidades limitadas de oxígeno: **GASIFICACIÓN**
- En ausencia de oxígeno: **PIRÓLISIS**.

La biomasa que resulta más idónea para los procesos termoquímicos es la de **bajo contenido de humedad y alto en lignocelulosa** (madera, paja, cáscaras, etc.). Cuando el contenido en humedad es importante, en general hay que realizar previamente un proceso de secado al aire o con gases calientes, hasta alcanzar valores en torno al 15% en base húmeda.

Desde el punto de vista de la utilización en centrales de generación de energía eléctrica, el proceso más importante es el de combustión. El proceso de gasificación también presenta interés, pero requiere instalaciones más complejas y está menos desarrollado. Seguidamente se comentan las características más importantes para estos dos tipos de aprovechamiento.

### 4.2.1 Combustión

Es el sistema más antiguo y elemental de recuperación energética de la biomasa, basado en la combustión directa con exceso de aire. Las variables que afectan principalmente a este proceso son [26]:

- **Proporción de oxígeno** en el gas de entrada, con excesos de aire entre el 20 y 40 %
- **Temperatura de combustión**, que se desarrolla entre 600 y 1300°C.
- **Características del combustible**, físicas, químicas y térmicas

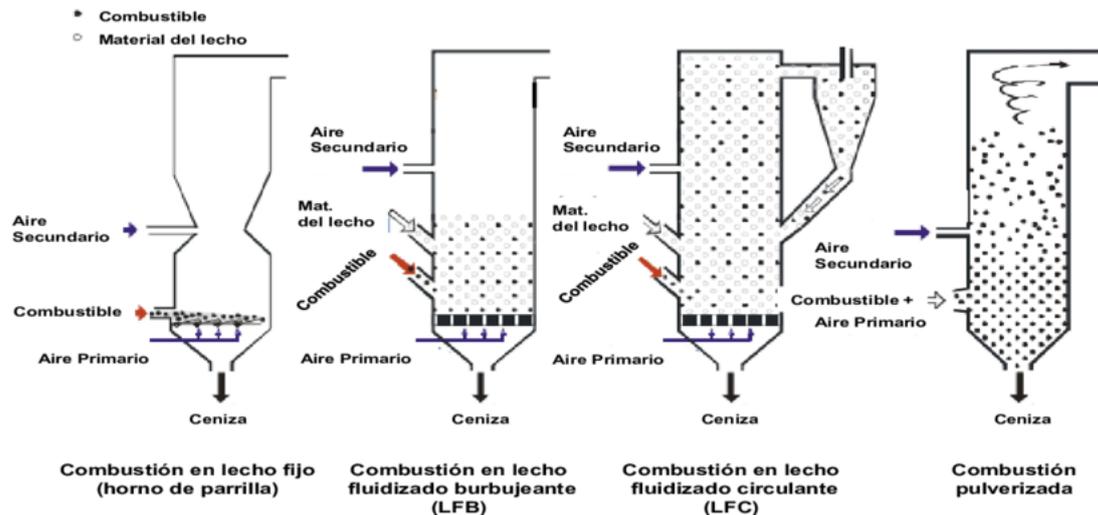
En general se aplica a biomasa combustible de tipo sólido: residuos forestales, agrícolas, R.S.U., con o sin **combustible de apoyo**. El uso final de la energía obtenida puede ser simplemente como energía térmica o bien su transformación a energía eléctrica, como en el caso de las centrales eléctricas de biomasa.

La **biomasa lignocelulósica** para combustión (y gasificación) tiene unas características específicas en comparación con otros combustibles sólidos como el carbón [26]:

- **Análisis elemental**: C ~ 50%, H ~ 6%, O ~ 40%, N ~ 0,1%, S ~ 0%. El contenido en **cenizas** de las biomásas lignocelulósicas leñosas suele ser pequeño (< 5%), si bien es mayor en otras biomásas como la cáscara o la paja de cereales (trigo, arroz), hasta 15-20%.
- **Contenido de metales alcalinos corrosivos**: Na, K.
- **Poder calorífico superior**: ~ 20 MJ/kg en base seca, excepto para cáscara de cereales ~ 15 MJ/kg.
- **Elevado contenido en volátiles**, que requiere una importante proporción de aire secundario.

El tipo de equipo de combustión tiene un efecto relevante en el comportamiento de las cenizas resultantes, puesto que la combustión se puede realizar en condiciones diferentes. Entre los equipos de combustión de biomasa que existen, se pueden diferenciar (**Figura 19**):

- Combustión en lecho fijo o horno de parrilla
- Combustión en lecho fluidizado burbujeante (LFB)
- Combustión en lecho fluidizado circulante (LFC)
- Combustión pulverizada



*Figura 19. Tipos de equipos de combustión de biomasa [27]*

Los sistemas de **combustión de lecho fijo** incluyen hornos de parrilla y estufas de alimentación inferior. El aire primario pasa a través de un lecho fijo, en el que se produce el secado, la gasificación y la combustión del carbono fijo (apartado 4.5.1). Los gases combustibles producidos se queman después de la adición de aire secundario, normalmente en una zona de combustión separada del lecho de combustible.

En un horno de **lecho fluidizado**, el combustible de biomasa se quema en una suspensión mezclada de gas y material de lecho sólido en la que el aire de combustión entra desde abajo. Dependiendo de la velocidad de fluidización, se puede distinguir entre la combustión en lecho fluidizado burbujeante (LFB) y en lecho fluidizado circulante (LFC).

La combustión de **combustible pulverizado** es adecuada para los combustibles disponibles en forma de partículas pequeñas (diámetro medio inferior a 2 mm). Se inyecta una mezcla de combustible y aire de combustión primario en la cámara de combustión. La combustión tiene lugar mientras el combustible está en suspensión y la combustión del gas se consigue tras la adición de aire secundario. Existen variaciones de estas tecnologías. Ejemplos de ello son los sistemas de combustión con fogones esparcidos y los quemadores ciclónicos.

#### 4.2.2 Gasificación

La reacción de la biomasa con el oxidante se realiza en condiciones de **defecto de oxígeno**, con producción de monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>, no deseado), hidrógeno (H<sub>2</sub>), vapor de agua (H<sub>2</sub>O, no deseado) y metano (CH<sub>4</sub>). La gasificación convierte el combustible sólido en una mezcla de gases combustibles, de composición y poder calorífico variable en función de la composición de la biomasa, el agente de gasificación y la relación estequiométrica entre ambos.

Típicamente la cantidad de oxígeno es 2,5 veces menor que la estequiométrica (calculada para combustión completa). La **gasificación es siempre una primera etapa**, para obtener una mezcla de gases combustibles, **cuya combustión se completa en un segundo dispositivo**: MCIA, cámara de combustión, generador de vapor, en el que se introduce aire adicional para ello.

Los gasificadores responden a varios tipos (Figura 20):

- Lecho móvil (fijo) contracorriente
- Lecho móvil (fijo) en paralelo
- Lecho fluidizado
- Transporte

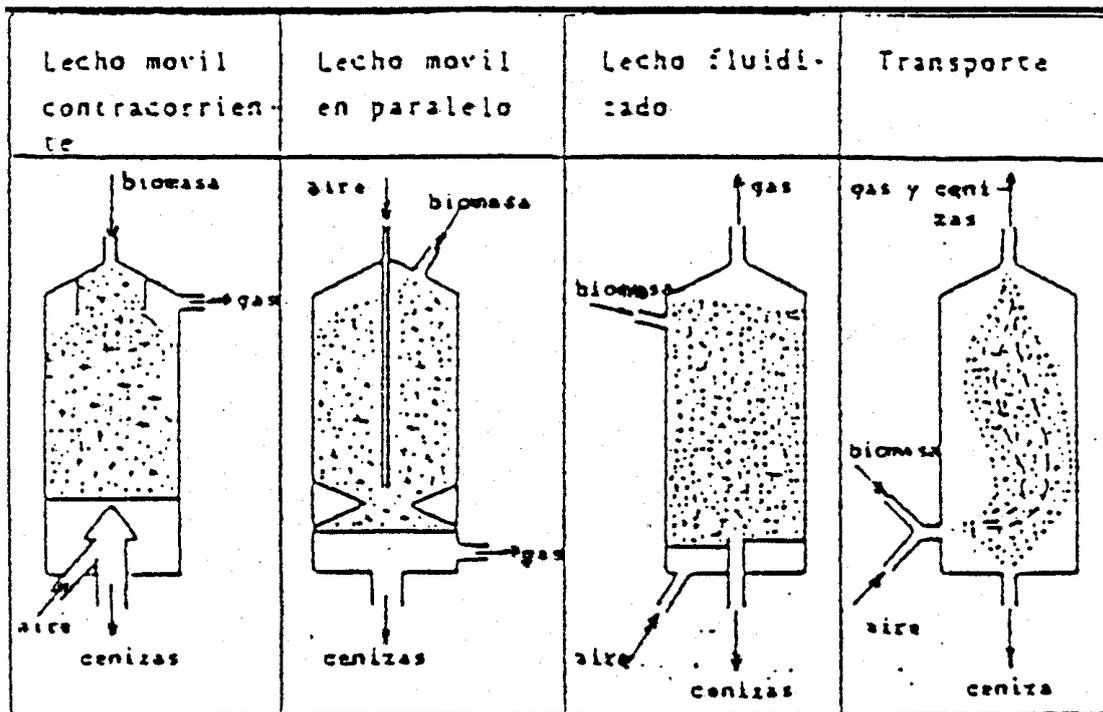


Figura 20. Tipos de gasificadores de biomasa [26]

Los gasificadores de lecho fluidizado también se pueden utilizar para realizar el proceso de combustión completa de la biomasa, aportando un exceso de la cantidad de aire de reacción sobre la proporción estequiométrica.

Las centrales de gasificación de biomasa están menos desarrolladas que las de combustión, que son las que se consideran en este trabajo y se describen en el apartado siguiente.

### 4.3 Características generales de las plantas de combustión de biomasa

En la **Figura 21** se puede ver un esquema genérico de una instalación de combustión de biomasa, donde el efecto térmico generado en el hogar se transfiere al fluido de trabajo a través de la caldera de recuperación [26]:

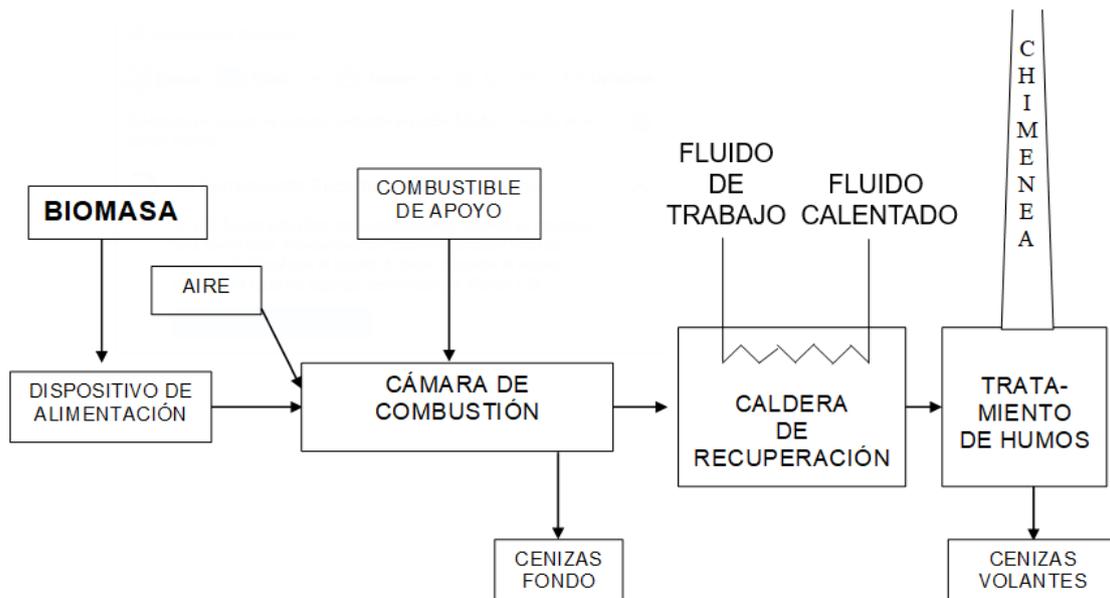


Figura 21. Esquema genérico de una planta de combustión de biomasa [26]

El combustible suele estar en forma de **pellets** para las calderas utilizadas en el sector doméstico y terciario. Las **astillas** son más utilizadas en aplicaciones industriales o grandes calefacciones de distrito.

Se pueden identificar en la **Figura 21** las distintas partes que componen una planta de biomasa [26]:

- **Sistema de almacenamiento de biomasa.** Como en el caso de otras grandes centrales de combustible sólido, el combustible se almacena en cantidades importantes en el exterior de la planta. En caso de la biomasa, dado el carácter estacional de su producción y la necesidad de reducir la humedad por secado, esto es especialmente importante. Además, se deben tomar precauciones para evitar la autoinflamación de las acumulaciones de biomasa, debido al aumento de temperatura provocado por algunas reacciones y fermentaciones que sucede de forma espontánea.
- **Dispositivo de alimentación de biomasa.** Habitualmente la biomasa que se utiliza en centrales es de tipo astillas para la madera o en forma de pacas para biomasa agrícola como la paja. La alimentación de biomasa a la cámara de combustión se realiza mediante dispositivos que permitan mantener la estanqueidad de dichos gases, como los tornillos sin fin, las válvulas rotativas o las válvulas de compuerta.
- **Cámara de combustión.** Es el lugar donde se produce la transformación termoquímica de la biomasa: secado, desvolatilización, combustión homogénea de volátiles y combustión heterogénea de carbón vegetal (biomasa desvolatilizada). Tiene por elementos fundamentales:
  - **Hogar:** En su interior tiene lugar el proceso.
  - **Parrilla:** Elemento que soporta el combustible mientras se quema permitiendo la salida de las cenizas hasta el cenicero. La parrilla es una parte fundamental y característica de cada tecnología. En calderas pequeñas suele ser fija, mientras que en calderas más grandes domésticas e industriales suele ser móvil con la finalidad de prevenir atascos en el sistema.
  - **Entradas de aire:** Aire primario para la combustión en el hogar y aire secundario, tras la salida del gas del hogar de combustión, para reducir el porcentaje de inquemados.
  - **Sistema de encendido:** Es un sistema que permite iniciar el proceso de combustión de la biomasa.

- **Combustible de apoyo.** Para garantizar la estabilidad del proceso de combustión y en las fases de arranque y de parada del proceso de combustión en el hogar, se puede introducir un combustible de apoyo, de características adecuadas para esta finalidad (gasóleo, gas natural).
- **Ceniceros y extracción de cenizas:** Las cenizas de fondo recogidas en el cenicero debajo de la parrilla y las cenizas volantes separadas y recogidas en ceniceros adicionales se extraen posteriormente mediante sistemas automáticos habitualmente basados en tornillo sin fin.
- **Intercambiador:** Es el lugar donde se transmite la entalpía que portan los gases quemados al fluido caloportador de la caldera. Suele ocupar un volumen semejante al del propio sistema de combustión. Son intercambiadores tubos-carcasa con paso del gas por los tubos y sistemas rascadores de partículas para mantener el nivel de eficiencia. Se procura la presencia de elementos que incrementen la turbulencia para mantener buenos rendimientos de la caldera a baja carga.
- **Sistema de extracción de gases:** Se disponen sistemas de extracción mediante ventiladores en la chimenea de extracción. La variación del régimen del extractor permite regular el grado de carga de la caldera.
- **Sistema de control:** El sistema de control se basa en control del exceso de aire con el que trabaja la caldera para lo cual se cuenta con sonda lambda tras la salida del intercambiador. Lo más común es que en función de esta medida se actúe sobre el caudal del aire mediante extractores de velocidad variable y/o válvulas que estrangulan la admisión de aire.

## 4.4 Cenizas generadas en las plantas de combustión de biomasa

### 4.4.1 Generación y retención de cenizas en las plantas de biomasa

Como sucede con todos los combustibles sólidos, en la combustión de biomasa aparecen residuos sólidos (**cenizas**) formados por materias inorgánicas y por inquemados, parte de los cuales son arrastrados por el flujo de gases de combustión (**cenizas volantes**, las partículas más pequeñas), mientras que otra parte queda en la parte inferior del hogar de combustión (**cenizas de fondo**, constituidas por partículas de mayor tamaño). Debido a la limitación en la concentración de partículas emitidas por la chimenea de una central, las cenizas volantes deben ser retenidas mediante dispositivos adecuados.

Las **cenizas de fondo** se recogen en el **cenicero** situado en la parte inferior del hogar. Este cenicero suele ser una tolva metálica simple o múltiple, revestida de material refractario a la cual van cayendo las cenizas que por su mayor densidad no son arrastradas por los humos. Estas se solidifican y enfrían, acumulándose durante un cierto tiempo, de donde son extraídas mediante dispositivos adecuados.

Las cenizas volantes se retienen mediante los dispositivos que se describen en el apartado 4.4.2.

Tanto las cenizas volantes como las cenizas de fondo constituyen residuos de las centrales de combustión que es necesario gestionar adecuadamente.

Como se ha indicado, un posible destino de estas cenizas es utilizarlas en la fabricación de cemento y de hormigón, como se detalla en capítulos posteriores.

Todos los combustibles utilizados producen cenizas salvo los combustibles gaseosos como el gas natural. El combustible más desfavorable desde este punto de vista es el carbón, mientras que la **biomasa** tiene un comportamiento intermedio, dependiendo del tipo de biomasa, su estado físico, el tipo de hogar de combustión, y la presencia de determinadas sustancias inorgánicas propias de la biomasa o añadidas (arena y otros).

#### 4.4.2 Sistemas de retención de las cenizas volantes

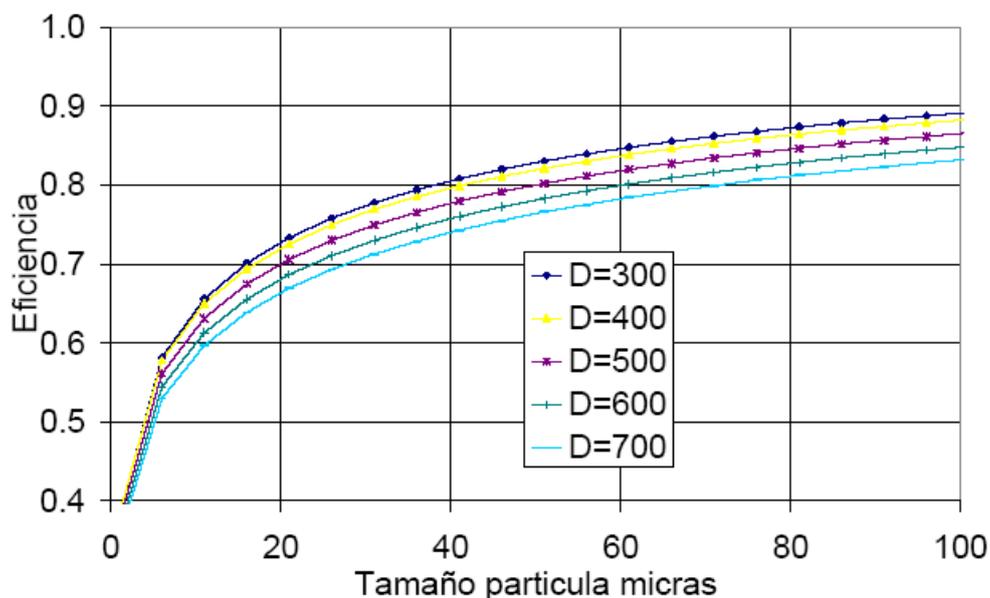
Para la retención de las **cenizas volantes**, se utilizan básicamente dos tipos de sistemas para separar las cenizas volantes de los gases de combustión, a fin de cumplir los límites de emisiones de partículas en la chimenea [28]:

- **Ciclones**
- **Cámaras de sedimentación**
- **Filtros de mangas**
- **Precipitadores electrostáticos**

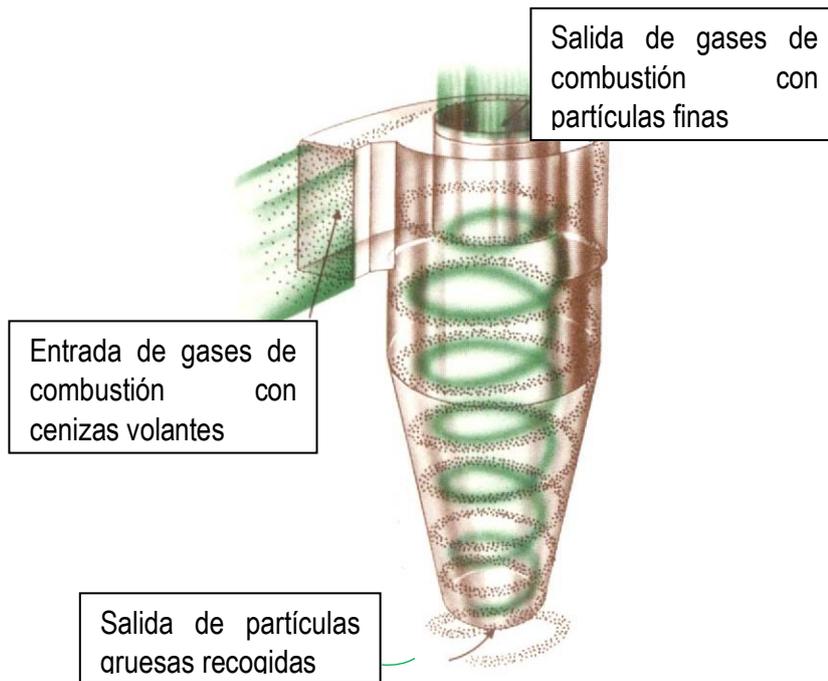
Para los límites actuales (límite genérico  $50 \text{ mg/m}^3\text{N}$ ), los ciclones no son capaces, por sí solos, de retener suficientemente las partículas, si bien puede existir en instalaciones antiguas o bien en combinación con los precipitadores.

##### 4.4.2.1 Ciclones

Los **ciclones** separan las partículas del flujo de gases por efecto de la fuerza centrífuga, al acelerar el fluido induciendo en el mismo una rotación. Las partículas se lanzan hacia la periferia, resbalando hacia abajo sobre la pared interior, mientras que el gas depurado se extrae por un orificio próximo al eje de rotación. Debido a este principio de funcionamiento, hay un **límite del tamaño mínimo de partícula** que queda retenido en cada elemento del ciclón. Además, el funcionamiento correcto sólo puede garantizarse para las velocidades de paso de los gases correspondientes a las condiciones de diseño como se ilustra en la **Figura 22** [26].



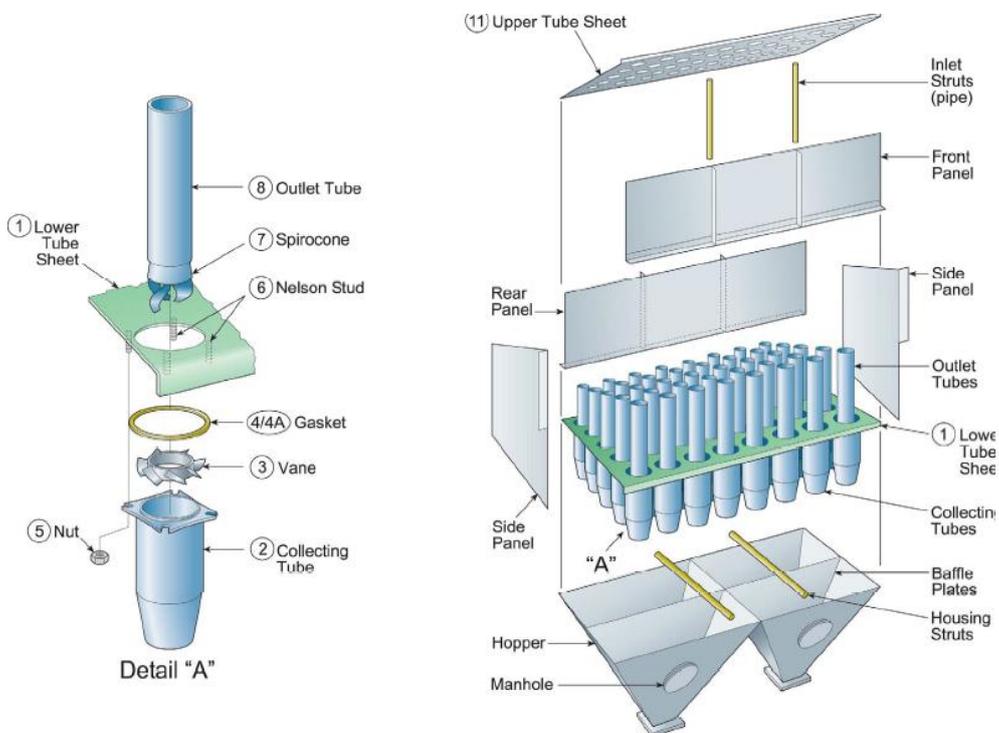
**Figura 22.** Curvas de eficiencia de retención de las partículas en función del tamaño de estas y de la velocidad de paso de los gases de combustión [26].



**Figura 23.** Esquema ilustrativo del funcionamiento de recogida de partículas gruesas de un ciclón mediante la inducción de una velocidad de rotación [27]

El ciclón induce una velocidad de rotación a los gases sucios a su entrada que hace que las partículas de ceniza se precipiten contra las paredes por el efecto de la fuerza centrífuga, tal como se puede ver en la **Figura 23**.

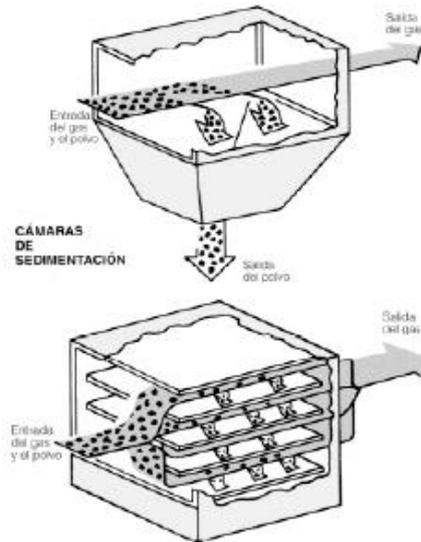
Cuando el flujo de gases es elevado y las partículas que se quieren retener son pequeñas, se recurre a colocar los elementos ciclónicos en paralelo, formando un **ciclón múltiple o multiciclón** (Figura 24).



**Figura 24.** Esquema de las partes que componen un ciclón parte (izquierda) y esquema de un ciclón múltiple o multiciclón (derecho) para los casos con flujo de gases elevado y partículas a retener pequeñas

#### 4.4.2.2 Cámaras de sedimentación

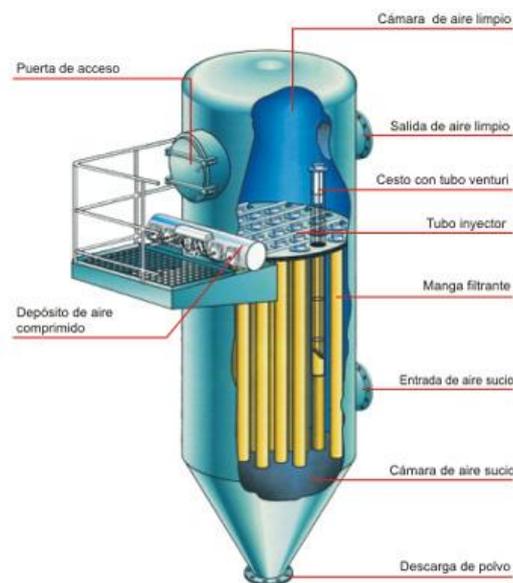
Las cámaras de sedimentación emplean la fuerza de la gravedad para separar las partículas más gruesas. El gas residual entra en una cámara en la que disminuye su velocidad pudiendo sedimentar las partículas más gruesas y densas en una tolva de recolección. Se usan usualmente como paso previo a otros sistemas para eliminar la fracción más gruesa del material en suspensión. Se utilizan para la captura de partículas de diámetro mayor de 10  $\mu\text{m}$ , aunque sólo retienen de manera efectiva partículas de más de 50  $\mu\text{m}$ .



**Figura 25.** Esquema del funcionamiento de una cámara de sedimentación

#### 4.4.2.3 Filtros de mangas

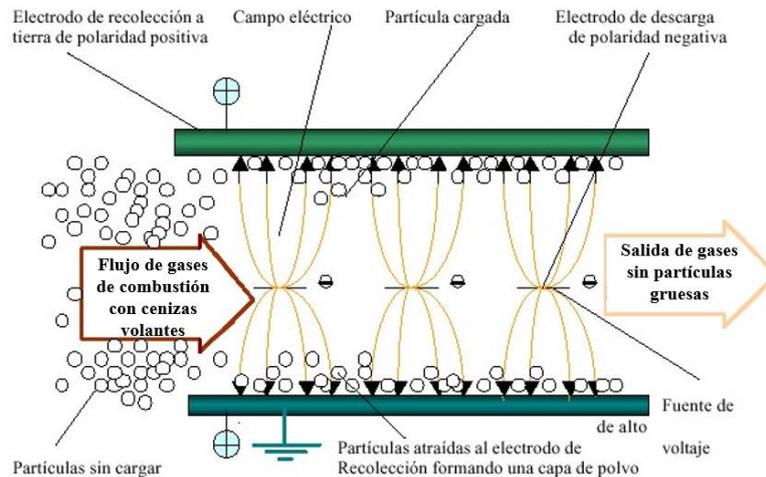
La separación del sólido se efectúa haciendo pasar el aire con partículas en suspensión mediante un ventilador a través de la tela que forma la bolsa, de esa forma las partículas quedan retenidas entre los intersticios de la tela formando una torta filtrante. De esta manera la torta va engrosando con lo que aumenta la pérdida de carga del sistema (colmatación). Para evitar disminuciones en el caudal se procede a efectuar una limpieza periódica de las bolsas.



**Figura 26.** Esquema de las partes de un filtro de mangas

#### 4.4.2.4 Precipitadores electrostáticos

Los **precipitadores electrostáticos** o filtros eléctricos tienen una disposición formada por un cuerpo en el que se disponen **electrodos de efecto corona** y **electrodos de precipitación**. Sobre estos últimos se depositan las cenizas volantes, por lo que se equipan dispositivos para extraer de ellos la ceniza adherida (**Figura 27**).



**Figura 27.** Esquema del funcionamiento de retención de partículas de un precipitador electrostático

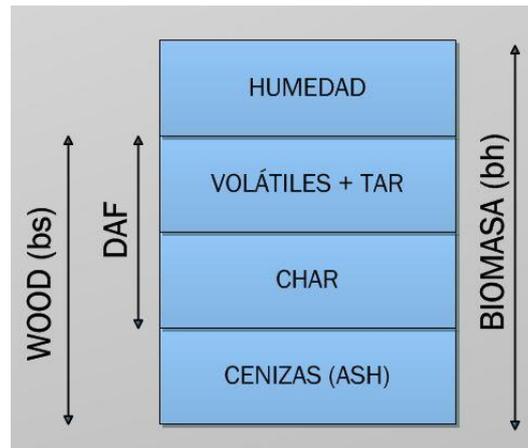


**Figura 28.** Partes de un precipitador electrostático

## 4.5 Aspectos cuantitativos sobre las cenizas de combustión de biomasa

### 4.5.1 Caracterización de la biomasa mediante el análisis inmediato

Cuando se trabaja con combustibles sólidos, como es el caso de la biomasa, es frecuente considerar la caracterización de esta mediante el análisis inmediato, de acuerdo a la **Figura 29**.



**Figura 29.** Esquema del análisis inmediato de la biomasa [29]

En esta figura se pueden los cuatro componentes del **análisis inmediato** de la biomasa: humedad, volátiles (a veces separados entre ligeros y pesados-tar), el carbono fijo (conocido como char), y las cenizas (componente inorgánica-ash).

La fracción de humedad se determina a partir de la pérdida de peso tras un calentamiento a 105°C. Un posterior calentamiento en ausencia de oxígeno a temperaturas elevadas (550°C u 815°C) permite determinar la pérdida de peso que corresponde a los volátiles ligeros y pesados. La pérdida de peso asociada a la combustión posterior en atmósfera de oxígeno permite determinar el carbono fijo. El resto de materia inorgánica que queda después de dicha combustión corresponde a las cenizas.

Esta es una técnica de laboratorio y en una combustión en un sistema real, las cenizas que se obtienen pueden contener las cenizas correspondientes a la composición intrínseca de la biomasa, pero, además, pueden contener material inerte que acompañe a la biomasa (arena, por ejemplo) o bien añadido al proceso de combustión (inertes en calderas de lecho fluidizado), así como restos de biomasa inquemada.

La fracción más importante de la biomasa para este trabajo es la **fracción de cenizas  $Y_{ash}$**  que existe en la biomasa, que va asociada a la cantidad de cenizas que se introduce en la cámara de combustión, cómo se ve en el apartado 4.5.2.

Las proporciones de cada uno de los componente del análisis inmediato deben referirse a las correspondientes bases de referencia [29]:

- **Base húmeda:** tiene en cuenta todo aquello que forma parte de la biomasa. Incluye por tanto la humedad y las cenizas.
- **Base seca (wood):** no tiene en cuenta la humedad presente en la biomasa, pero sí su contenido en cenizas.
- **Base daf (“dry-ash free”):** sólo tiene en cuenta los compuestos útiles desde un punto de vista energético. No considera, por tanto, la presencia de humedad ni de cenizas en la biomasa.

En la **Figura 30** se ha vuelto a reproducir el contenido de la **Figura 29**, incluyendo a la derecha de esta las fracciones que corresponden a las tres bases consideradas, resaltando también que en cada una de ellas la suma de las fracciones es siempre la unidad.

	Base húmeda	Base seca	Base DAF
HUMEDAD	$Y_{hum,bh}$		
VOLÁTILES + TAR	$Y_{v,bh}$	$Y_{v,bs}$	$Y_{v,daf}$
CHAR	$Y_{char,bh}$	$Y_{char,bs}$	$Y_{char,daf}$
CENIZAS (ASH)	$Y_{ash,bh}$	$Y_{ash,bs}$	
<b>Total</b>	1.0	1.0	1.0

Figura 30. Bases de cálculo para la biomasa [29]

Las tres bases están relacionadas entre sí. Una determinada fracción másica de uno de los componentes del análisis inmediato (volátiles, carbono fijo, cenizas) “ $X_{bh}$ ” expresada en tanto por uno y en base húmeda, puede expresarse en base seca o daf utilizando las siguientes relaciones, en las que “ $Y_{hum}$ ” es la fracción de humedad presente en la biomasa húmeda:

$$X_{bs} = X_{bh} \frac{1}{1 - Y_{hum}} \quad (1)$$

$$X_{daf} = X_{bh} \frac{1}{1 - Y_{hum} - Y_{ash}} \quad (2)$$

Esto permite convertir la fracción de cenizas base húmeda  $Y_{ash,bh}$  en la correspondiente fracción en base seca  $Y_{ash,bs}$ .

Además de este análisis inmediato, la biomasa se caracteriza por el **análisis elemental** de la misma, que proporciona las cantidades de los elementos mayoritarios (C, H, O, N) y los minoritarios (Cl, N), así como los metales (Na, K, P, etc.).

A su vez, sobre las cenizas se puede también realizar el análisis elemental para obtener la composición de estas, predominante en compuestos inorgánicos, si bien en cenizas de dispositivos de combustión reales también puede haber compuestos orgánicos asociados a la biomasa parcialmente quemada.

En el **Anexo 1** se puede encontrar los resultados experimentales del análisis inmediato, análisis elemental de biomasa y análisis elemental de cenizas realizados para distintos tipos de biomasa utilizados en la central de biomasa sobre la que este trabajo se aplica. Estas fichas se emplean para el cálculo de cenizas de la planta de biomasa de Cubillos de Sil en el Capítulo 5.

#### 4.5.2 Balance de ceniza entre cenizas de fondo y volantes

El **balance de ceniza** en una caldera que quema biomasa se puede establecer partiendo de la cantidad de ceniza que entra al hogar como parte del combustible  $\dot{m}_{cen}$ . Aplicando la nomenclatura de fracciones presentada anteriormente, se puede escribir esta cantidad de cenizas como:

$$\dot{m}_{cen} = Y_{ash,bh} \cdot \dot{m}_{bms,bh} = Y_{ash,bs} \cdot \dot{m}_{bms,bs} \quad (3)$$

Donde  $\dot{m}_{bms,bh}$  es la cantidad de biomasa que entra a la cámara de combustión en base húmeda o en base seca ( $\dot{m}_{bms,bs}$ ) y la fracción  $Y_{ash,bh}$  corresponde al porcentaje de ceniza en base húmeda o en base seca ( $Y_{ash,bs}$ ).

La cantidad de ceniza que se queda en el **fondo del hogar** es:

$$\dot{m}_{cen,hog} = f_{hogar} \cdot \dot{m}_{cen} \quad (4)$$

en donde  $f_{hogar}$  es una constante que depende del tipo de hogar y de la granulometría del combustible, y que toma los siguientes valores de referencia [30]:

$f_{hogar} = 0,7$  para hogar con parrillas

$f_{hogar} = 0,3$  para hogar con carbón pulverizado

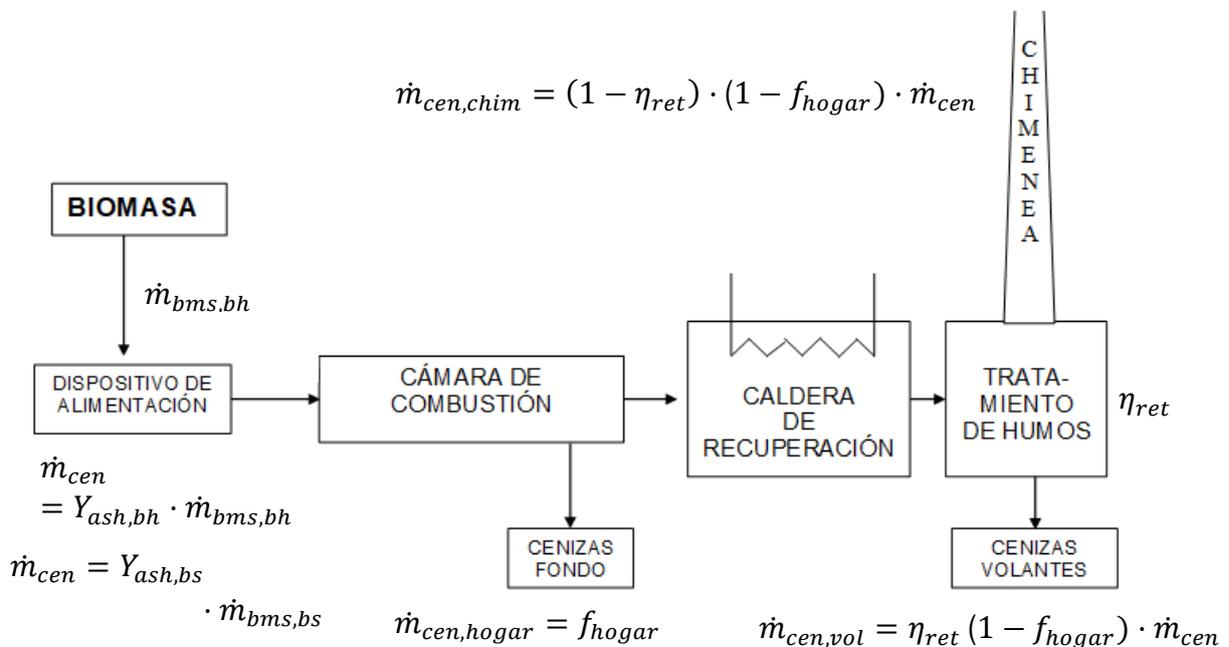
$f_{hogar} = 0,5$  para hogar ciclónico con evacuación de escoria fundida.

La cantidad de **cenizas volantes** que se retiene en los **filtros** es la cantidad:

$$\dot{m}_{cen,vol} = \eta_{ret} \cdot (1 - f_{hogar}) \cdot \dot{m}_{cen} \quad (5)$$

en donde  $\eta_{ret}$  es el rendimiento de retención de partículas y tiene un valor de 0,97 a 0,99 para filtros de mangas y electrostáticos.

Este balance se recoge en la **Figura 31**.



**Figura 31.** Balance de cenizas generadas a una central de combustión de biomasa

Más adelante, se utiliza este balance para el cálculo de cenizas de la planta de biomasa de Cubillos del Sil.

## 4.6 Planta de biomasa de Cubillos de Sil

Para este estudio sobre la circularidad de las cenizas de la combustión de la biomasa, se ha escogido una de las plantas de generación de eléctrica del grupo empresarial Forestalia, dedicada a las energías renovables (eólica, fotovoltaica y biomasa). Concretamente, la planta de generación eléctrica de Cubillos del Sil pertenece a la empresa Fuerzas Energéticas del Sur de Europa I S.L., vinculada al grupo empresarial Forestalia.



*Figura 32. Planta de eléctrica de biomasa de Forestalia en Cubillos de Sil [31]*

Esta planta está situada en la provincia de León, en la Comarca del Bierzo, próxima al embalse de Bárcena, en el polígono industrial de Cubillos del Sil (**Figura 26**). En esta zona se encuentra también la antigua central térmica de carbón de Compostilla II, que cesó su actividad en el año 2020 como consecuencia del acuerdo de la UE de eliminar el carbón como combustible de las centrales térmicas. El objetivo de esta nueva planta de biomasa ha sido el de coger el relevo del abastecimiento energético de la zona., sustituyendo de forma parcial a la central térmica de carbón de Compostilla II.

La planta de biomasa forestal de Cubillos es una de las mayores de la Península Ibérica y del Sur de Europa. Sus instalaciones ocupan 100.000 m<sup>2</sup> y puede generar una potencia eléctrica nominal bruta de 49,5 MWe. Este valor de potencia es el equivalente al consumo energético de 50.000 hogares. El aporte de agua bruta para la refrigeración del condensador en el proceso de generación de energía se realiza desde una toma de agua del embalse de Bárcena, que se sitúa a 1,2 km de la instalación [32].



**Figura 33.** Vista aérea de la disposición de los distintos sistemas de la planta de eléctrica de biomasa de Forestalia en Cubillos de Sil. En la parte inferior de la imagen se ven las pilas de almacenamiento de biomasa de larga duración. [31]

El proyecto de construcción de la planta se inició en 2018 y se finalizó en enero de 2020, pero debido a la crisis sanitaria del CO-VID19 su puesta en marcha se vio retrasada. En el mes de octubre de 2021 la planta alcanzó su plena operatividad.

La inversión de esta planta supuso unos 120 M€ y su gestión, durante los 15 primeros años, correrá a cargo de la compañía Acciona Industrial.

#### 4.6.1 Características de la planta térmica y consumo de biomasa

El proceso de combustión de biomasa se realiza en una **caldera de tipo parrilla vibrante**, que extrae la energía calorífica del combustible aportado y la cede a un fluido que circula por su interior: agua que se convierte en vapor. El vapor generado al pasar por la caldera en el proceso se transporta hasta el turbogenerador donde la energía térmica de ese vapor se transforma en energía mecánica en la turbina de expansión y a continuación en energía eléctrica, con una potencia nominal eléctrica bruta de 49,5 MWe en condiciones de diseño.

La planta está dotada de un sistema de control que permite la operación de todos los sistemas y equipos de forma segura y eficiente en todos los modos de funcionamiento. Este sistema de control permite la centralización en la sala de control de toda la información disponible de todos los equipos y sistemas de la planta, como la planta de tratamiento de agua, almacén de biomasa agroforestal (paja y astillas), etc.

Esta instalación industrial se abastece única y exclusivamente de **biomasa agroforestal**, procedente en buena parte de trabajos de limpieza de bosques para la prevención de incendios, así como de biomasa residual herbácea (paja de cereal) procedente de explotaciones agrícolas en la zona. en la subaste del proyecto de enero de 2016, de la que deriva la planta, descarta la posibilidad de que se utilicen residuos urbanos, industriales o peligrosos [33].

Se estima un consumo de unas **280 kt/año** de biomasa agroforestal. Este combustible de alimentación a la caldera está compuesto por [34]:

- **70% Biomasa leñosa (forestal)**: chopos, pinos, robles, castaños y encinas. También se puede incorporar biomasa cultivada para tal fin, si fuera necesario por la escasez de la biomasa residual, procedente de cultivos de eucalipto de la provincia de Palencia.
- **30% Biomasa herbácea (paja)**: procedente de cultivos cerealísticos de la zona, que beneficia a más de 500 agricultores del Bierzo.

En el documento de SOMACYL donde se incluye diversa información sobre la tramitación ambiental de la planta que se realizó en 2017, se dan los valores de la potencia eléctrica bruta, 49,5 MWeI, así como de la potencia térmica ( $N_f$ ) con la que se alimenta en forma de biomasa, 130 MWt. Con estos dos valores de las potencias eléctrica y térmica se puede estimar el rendimiento bruto de la central como 38%.

También, se puede calcular el poder calorífico medio de la biomasa de alimentación a la planta, considerando que:

$$H_c = \frac{N_f}{\dot{m}_f} = \frac{130 \text{ MW}}{280.000 \text{ t/año}} = 4,01 \text{ kWh/kg} = 14,6 \text{ MJ/kg}$$

Este último valor del poder calorífico resulta aceptable para el tipo de biomasa utilizado.

La biomasa forestal se puede suministrar a la planta en forma de troncos, ramas, fardos, etc. (**Figura 34**) o directamente en forma de astillas. La biomasa no astillada previamente se tritura mediante una trituradora de cuchillas para troncos o bien por medio de una trituradora de martillos para fardos. La biomasa triturada se alimenta a la cámara de combustión mediante cintas transportadoras (**Figura 35**). La biomasa forestal triturada se almacena en un silo con una capacidad equivalente a tres días de funcionamiento de la planta.



**Figura 34.** Vista aérea de la zona de almacenamiento de corta duración de biomasa forestal y de los dispositivos de manejo y alimentación de biomasa [31].



**Figura 35.** Vista de las cintas de alimentación de biomasa forestal hacia la caldera de la planta de Forestalia [30].

Por su parte, la paja se suministra en forma de pacas. Los sistemas de manejo de las pacas (**Figura 36**) incluyen dispositivos de pesado y de **medida de la humedad de la paja**.



**Figura 36.** Dispositivos para mover las balas de paja agrícola previo a su introducción en la caldera de la planta de Forestalia en Cubillos de Sil [30].

Por la tecnología de la caldera instalada y el porcentaje de mezcla de las biomazas residuales utilizadas como combustible, a la salida del sistema del hogar de combustión, las cenizas de fondo no forman escorias fundidas, sino que son extraídas del cenicero en forma de un árido similar a la arena. Por otra parte, las cenizas volantes se recogen en los filtros de los humos y son similares en su forma física al carbón vegetal molido.

En la **Figura 37** se puede ver una imagen de la parte inferior de la caldera, con una serie de tapas de registro para **acceso al cenicero de fondo** de la cámara de combustión.



*Figura 37. Parte inferior de la cámara de combustión de la caldera de biomasa de Forestalia en Cubillos de Sil, con los registros de acceso al cenicero de fondo [30].*

En el siguiente capítulo se presentan las propiedades de las cenizas generadas en esta planta y se calcula las cantidades tanto de cenizas de hogar como cenizas volantes de la planta de biomasa de Cubillos del Sil.

#### 4.6.2 Emisiones gaseosas de la planta y normativa asociada a las mismas

En el documento de la información sobre la **autorización ambiental** [33] redactado por SOMACYL (Sociedad pública de infraestructuras y medioambiente de Castilla y León) y por Forestalia, se indica que la normativa de aplicación para garantizar la **calidad del aire** es la siguiente:

- 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)
- Real Decreto 815/2013, de 18 de octubre, por el que se aprueba el reglamento de emisiones industriales y desarrollo de la Ley 16/2002, de 1 de julio, de prevención y control integrados de la contaminación
- Ley 34/2007 de 15 de noviembre de Calidad del aire y de protección atmosférica
- Real Decreto 430/2004, de 12 de marzo, por el que se establecen nuevas normas sobre limitación de emisiones a la atmósfera
- Orden MAM/248/2009, de 3 de febrero, por la que se establece el procedimiento y el modelo de notificación de emisiones y transferencias de contaminantes en la comunidad de Castilla y León

Sin embargo, como la terminación de la planta fue posterior a 2020, esta planta cumple con la normativa de valores límite de emisiones de 2021 de la Comisión Europea. Esta nueva normativa supone una reducción muy importante de los valores de emisión permitidos para todos los contaminantes atmosféricos, considerados anteriormente y además establece límites para el HCl y el NH<sub>3</sub>.

La planta es una de las de mejor eficiencia de las instaladas actualmente en España y cuenta con tecnología puntera en la reducción de emisiones con su Sistema Catalítico Reducción (SCR), que convierte los óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>) en nitrógeno molecular (N<sub>2</sub>) y agua (H<sub>2</sub>O), mediante el empleo de un catalizador y un reductor gaseoso.

Además, se incluye un sistema de eliminación de partículas en los gases de la chimenea mediante **filtros de mangas**, que retienen las cenizas volantes. Estos filtros permiten retener el 99,95% de las partículas menores de 10 micras (PM10) y el **99,65%** de las partículas menores de 2,5 micras (PM2,5).

En la **Tabla 2** se recogen las cifras de las emisiones producidas por la planta, medidas en condiciones estándares:[30]

**Tabla 2.** Emisiones de la Planta de biomasa de Cubillos de Sil

	<b>NORMATIVA VIGENTE (2021)</b>	<b>GARANTÍAS DE VALORES MÁXIMOS DE LAS EMISIONES DE LA PLANTA</b>	<b>EMISIONES</b> (Considerando funcionamiento real de la planta)
	<i>Media anual</i>	<i>Media horaria</i>	<i>Media anual</i>
<b>TIPO DE EMISIONES</b>	mg/Nm <sup>3</sup>	mg/Nm <sup>3</sup>	mg/Nm <sup>3</sup>
<b>NOx</b>	50-140	140	<117
<b>SOx</b>	10-50	50	<42
<b>CO (valor indicativo)</b>	30-160	100	<84
<b>Partículas</b>	2-5	5	<4,2
<b>HCl</b>	1-5	5	<4,2
<b>NH<sub>3</sub></b>	3-10	3	<2,5

# CAPÍTULO 5. PROPIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS DE LAS CENIZAS DE BIOMASA

En este capítulo se presentan los factores que influyen en las características de las cenizas de biomasa, sus propiedades físicas y su composición química. A continuación, se hace una estimación de la cantidad de cenizas que se generan en la planta de biomasa de Cubillos de Sil y se presentan sus análisis físicos y químicos.

## 5.1 Factores influyentes en las características de las cenizas

En la combustión de biomasa en una central de combustión, aparecen siempre cenizas (parte inorgánica del biocombustible) como residuo del proceso de combustión en dos recintos diferentes de la instalación. Así, en la parte inferior del hogar, denominado cenicero, aparecen **cenizas de fondo** o escorias, constituidas por la parte inorgánica de la biomasa usada como combustible y pudiendo contener restos de materia orgánica inquemada, que dependerá de la tecnología utilizada y de las condiciones de operación. Por otro lado, en el flujo de gases que se evacúa a través de la chimenea aparecen las **cenizas volantes**, consecuencia de la limpieza de los humos de la instalación para cumplir la legislación vigente en emisiones de partículas a la atmósfera, constituidas por partículas sólidas que por su pequeño tamaño son arrastradas por la corriente de aire de combustión (comburente) al separarlas del resto de los gases que se emiten al exterior de la cámara de combustión. El factor primario que influye principalmente en las características de las cenizas es el tipo de biomasa del que proviene. No obstante, se pueden nombrar por lo menos 9 factores que también influyen en sus características: [35]

1. El **tipo de entrantes** o la mezcla de entrantes. Por ejemplo: la especie del árbol o de cultivo agrícola de procedencia, la proporción de corteza del árbol, el tipo de especie de biomasa, la presencia de materia inorgánica que puede acompañar a la biomasa (tierra del suelo al recogerla), etc.
2. El tipo de **pre-tratamiento aplicado a estos entrantes**: Triturado, tamizado, extracción o no de hierros en el caso de madera reciclada y la adición de aditivos en el caso de la biomasa agrícola.
3. El tipo de **proceso térmico**: Puede ser una combustión térmica o una pirólisis, proceso de descomposición química a través del calentamiento a altas temperaturas en ausencia de oxígeno.
4. El tipo de **equipo de combustión**: Lecho fluidizado, horno de parrilla o de lecho fijo, o de horno pulverizado.
5. El **tamaño de la instalación** y la **temperatura de combustión**.
6. El método de **tratamiento de los gases de combustión**: Uso de filtros a la salida, ciclones o precipitadores electrostáticos para la recogida de las cenizas volantes. Para el caso de las instalaciones de combustión de biomasa en parrilla, para la limpieza de los humos se suelen utilizar multiciclones ya que suelen cumplir con las emisiones que exige la legislación actual.
7. El método de **recuperación de las cenizas**: mezcla o no de las cenizas de hogar con las cenizas volantes.

8. Funcionamiento correcto o, por el contrario, fuera del punto de diseño de la instalación.
9. **Técnicas de postratamiento:** A veces se mezclan con otros componentes químicos para extraer los componentes que puedan producir reacciones no deseadas. Otra técnica muy común es su trituración y tamizado para obtener una granulometría favorable para su posterior valorización.

Esto explica las dificultades recurrentes a la hora de calificar con precisión las cenizas de biomasa: para utilizar la información sobre la composición de las cenizas, es imprescindible disponer de un mínimo de información sobre las condiciones de su producción. Por ejemplo, las cenizas volantes de una planta de lecho fijo tendrán una composición diferente a las cenizas volantes de un equipo de combustión de lecho fluidizado.

A continuación, se hace hincapié en algunos de los factores presentados, de acuerdo con lo planteado por [35].

#### 5.1.1 Influencia del tipo de entrantes o de la mezcla de entrantes

Los materiales leñosos, como la madera y sus subproductos, tienen un **contenido de cenizas** relativamente bajo: entre el 0,5 y el 1,5% o hasta el 2,5% sobre base seca, este valor puede ser mucho mayor para cortezas y hojas.

La biomasa agrícola, como la paja, tiene un contenido de cenizas mucho mayor: entre el 2 y el 12% sobre base seca.

Además, cómo se menciona más adelante, según el tipo de biomasa introducida en el horno se obtienen cenizas con distintas composiciones químicas, (**Tabla 3** y **Tabla 4**).

#### 5.1.2 Influencia del acondicionamiento aplicado a los entrantes

El tamaño de las astillas quemadas influye en la efectividad de la combustión, formándose mayor número de inquemados cuando el tamaño de los entrantes es mayor.

Además de la trituración y el tamizado, en el caso de la biomasa agrícola hay que tener en cuenta que tienen un alto contenido de sílice, cloro y potasio. Por ello, se pueden añadir componentes químicos como el carbonato cálcico ( $\text{CaCO}_3$ ) para evitar la formación de ácido clorhídrico o ácido sulfúrico durante la combustión y evitar así el prematuro desgaste o corrosión del sistema de combustión. Estos aditivos afectan directamente a la composición de las cenizas, fundamentalmente a las recogidas en el cenicero de la instalación (escorias).

En el caso de los pellets, se les añade aglutinantes naturales para conseguir su forma compacta y que cumplan la Norma UNE que exige unas características mínimas de friabilidad, como pueden ser el almidón o la melaza, que también afectan a la composición de la ceniza.

#### 5.1.3 Influencia del equipo de combustión

Los **equipos de combustión** (parrilla, lecho fluidizado, horno pulverizador) tienen análogamente una incidencia no solamente en el reparto másico de las cenizas sino también en la calidad y tamaño de estas.

Se puede observar que las cenizas volantes de los lechos fluidizados están menos concentradas en oligoelementos, también llamados bioelementos (Hg, Cd, Cr, Ni, Pb, Zn), que las cenizas volantes de los hornos de parrilla. Del mismo modo, los análisis del comportamiento de lixiviación son más favorables para las cenizas volantes procedentes de lechos fluidizados [35].

En cambio, en plantas de producción de energía donde se emplea la tecnología de combustión directa mediante un sistema de parrilla se produce un mayor número de cenizas de cenicero, alrededor de un 80% y de volantes tan solo un 20% (Michelsen et al. 1998).

Otro factor que puede influir es el **tipo de parrilla (fija o móvil)** y del material de la parrilla de combustión, pues en el caso de las parrillas cromadas, están pueden llegar a liberar cromo en las cenizas cuando la temperatura de combustión es muy elevada o si se generan puntos calientes en la misma [35].

Los diferentes tipos de **tratamiento térmico** también influyen en la producción del tipo de residuos. La pirólisis da lugar a un residuo carbonoso denominado biochar (10-30% de la masa seca del material de partida).

El **tamaño de la instalación** también es importante. Durante la combustión el nitrógeno del combustible se oxida en compuestos gaseosos (NO<sub>x</sub> y N<sub>2</sub>O), un horno con una capacidad mayor permite una combustión mejor lo que se traduce en menos C, Cl y N en las cenizas.

Así, en una instalación más grande el combustible inquemado es menor que en las instalaciones pequeñas, lo que influye en las posteriores valorizaciones que se le puedan dar estos residuos.

## 5.2 Propiedades físicas de las cenizas

### 5.2.1 Cenizas de hogar

Las **cenizas de hogar** o de fondo comprenden la **fracción de ceniza** que queda **retenida en el cenicero** de la caldera, en la cámara inferior y en la cámara de combustión primaria. A menudo, se mezcla con impurezas minerales contenidas en el combustible de biomasa, como arena, piedras y barro o con material inerte que se introduce para facilitar la fluidización del lecho en las plantas de combustión de este tipo.

Estas impurezas pueden ser minerales, especialmente en instalaciones de combustión de lecho fijo, y dar lugar a la formación de bloques de escorias (debido a una disminución del punto de fusión de la escoria) y a la presencia de partículas de ceniza sinterizadas en la ceniza de fondo. Se ha podido comprobar que esta situación se produce cuando en la composición de la escoria hay un exceso de K (potasio), pudiéndose corregir con la adición de carbonato cálcico (CaCO<sub>3</sub>) junto con la alimentación de la biomasa.

Las cenizas de hogar están formadas por partículas altamente porosas y textura rugosa. El tamaño de sus partículas es variable en función del tipo de horno, oscilando su **tamaño entre 0-3 cm** [36].

Su densidad se encuentra entre los valores de **1.420 a 2.700 kg/m<sup>3</sup>**. [37]

Suelen presentar una capacidad de adsorción de líquido de entre el 10 y el 46% y su coeficiente de friabilidad se encuentra comprendido entre el 28 y 34% [36].

Los residuos de la combustión generan **problemas** de ensuciamiento y corrosión de las partes internas de la caldera y conductos de humos, con la consiguiente pérdida de rendimiento de la instalación [38]. Por ello, es necesario instalar sistemas para su extracción y evacuación y para su disposición final (vertederos u otras aplicaciones).

## 5.2.2 Cenizas volantes

Las **cenizas volantes** están formadas por **partículas finas de biomasa** que contienen bastante materia inorgánica, ya que son arrastradas fuera del hogar, por la turbulencia de los gases de combustión, antes de quemarse totalmente, pudiendo ser separadas, a la salida por la chimenea de la caldera, del resto de los gases mediante filtros de humos de distintos tipos, como los indicados en capítulo anterior.

Las cenizas volantes son materiales mucho más finos y de menor densidad que las cenizas del hogar, con la mayor parte de sus partículas **por debajo de 75  $\mu\text{m}$**  (aproximadamente el 70%). Las partículas de mayor tamaño ( $\phi < 1 \text{ mm}$ ) proceden de material inquemado. [39] Su densidad se encuentra en el intervalo de **2.100 a 2.600  $\text{kg/m}^3$**  [39].

## 5.3 Composición química de las cenizas

La **composición química** de las cenizas es muy variable y no puede predecirse con exactitud, siendo función tanto de las características de cada tipo de biocombustible como de las variaciones de carga de la caldera o de las condiciones en que se realice la combustión en cada momento.

Los dos factores principales a tener en cuenta en las cenizas son: su **punto de fusión y su agresividad química** a los materiales de la caldera y de los conductos de humos. También hay que tener en cuenta el impacto ambiental que pueden producir determinadas sustancias de los gases, tales como los óxidos de azufre.

La importancia del **punto de fusión de la ceniza** radica en la posibilidad de formación de aglomeraciones de ceniza fundida en la parrilla, taponando la entrada de aire de combustión. Este punto de fusión está relacionado principalmente con la cantidad de silicio (Si) y potasio (K) (cuando aumenta la cantidad de Si, aumenta el punto de fusión y cuando aumenta el contenido de K disminuye su punto de fusión).

Los elementos mayoritarios que forman las cenizas son: Al, Si, K, Na, Ca, Mg, Fe, P, Ti. Como se observa en la **Tabla 3**, existe una clara diferencia entre la composición química de los diferentes tipos de **cenizas volantes**: mientras que las procedentes de maderas tienen carácter básico (alto contenido en cal, CaO), otras como las procedentes de los cereales tienen carácter ácido (alto contenido en sílice,  $\text{SiO}_2$ ) [36].

**Tabla 3.** Análisis químico de los porcentajes (%) de los componentes de las cenizas volantes de incineración de diferentes tipos de biomasa [36]

	PF*	$\text{SiO}_2$	Cl	$\text{SO}_3$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{P}_2\text{O}_5$	CaO	MgO	(Na,K) $_2$ O
Haya	38,1	7,2	-	-	3,0	0,9	3,1	78,0	2,8	2,2
Olmo	45,2	6,8	-	-	1,8	0,5	2,2	76,6	5,6	4,8
Encina	31,6	8,1	-	-	1,6	0,5	6,5	56,9	4,1	16,1
Grano de cereal	10,7	75,6	-	-	1,9	0,6	4,9	7,7	2,9	5,2
Cebada	14,1	61,9	-	-	1,3	0,5	5,1	9,1	2,7	18,5
Maiz	15,6	66,6	-	-	3,4	2,7	3,7	9,8	3,9	8,4
Orujillo	9,9	21,7	3,8	1,4	5,7	3,3	4,4	17	6,6	21,1
Mezcla orujillo-poda de olivar	14,7	7,0	4,5	1,8	1,2	1,5	2,3	5,8	6,1	46,3
Corteza de eucalipto	22,5	23,7	1,36	0,8	3,3	1,6	1,1	28,6	3,2	5,3
Lignina	41,4	3,2	0,06	0,3	0,3	0,3	1,1	44,8	5,6	3,3

La columna PF\* es la pérdida de peso en porcentaje por calcinación de las cenizas. Destaca la gran diferencia entre la lignina que pierde un 41,4% de su masa frente al orujillo que apenas llega al 10%. Normalmente la temperatura que alcanza el material en la parrilla no es muy elevada y la ceniza contiene una cantidad importante de material orgánico inquemado, por lo que suelen presentar una elevada pérdida por calcinación.

Algunas cenizas, como las del orujillo son ricas en sales alcalinas ( $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ), que puede ser un inconveniente por problemas de corrosión sobre los materiales de la cámara de combustión. Como se muestra en la tabla 1, las cenizas de algunos tipos de biomasa agrícola son más ricas en cloro (Cl) y azufre (S) que las de biomasa leñosa. Estos elementos son un verdadero problema para la combustión de este tipo de biomasa y son el origen de la producción de ácido clorhídrico y ácido sulfúrico, muy corrosivos para los equipos de combustión, intercambiadores de calor y tubos de humos que componen el equipo, cuyo problema se puede ver incrementado si se emiten los humos por debajo de su temperatura de rocío.

La Tabla 4 presenta los resultados químicos de las **cenizas de fondo** de dos tipos de biomasa agrícola, en la que también se aprecia una gran variabilidad en la composición de estas y también diferencias significativas respecto a las cenizas volantes del mismo material en la Tabla 3 [36]:

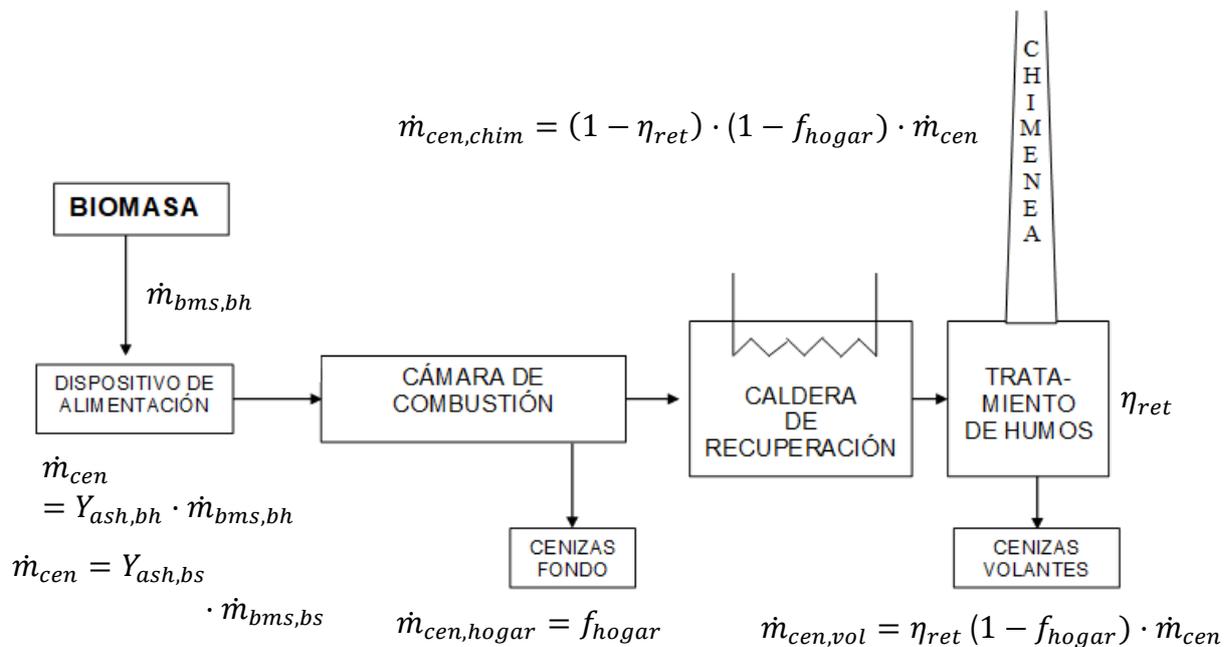
**Tabla 4.** Análisis químico de los porcentajes (%) de los componentes de las cenizas de fondo de incineración de diferentes tipo de biomasa [36]

	PF	$\text{SiO}_2$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{P}_2\text{O}_5$	CaO	MgO	(Na,K) $_2$ O
Orujillo	0,55	44	12,1	9,0	0,97	11,0	7,0	13,6
Mezcla orujillo-poda de olivar	15,5	17,7	1,97	2,2	3,99	18,1	9,2	24,1

## 5.4 Cenizas de la planta de Cubillos del Sil

### 5.4.1 Estimación de las cantidades de ceniza

En este apartado se procede a estimar la cantidad de cenizas que genera la planta de biomasa de Cubillos de Sil a partir de su consumo anual de biomasa. El procedimiento para el cálculo es el explicado en el apartado 4.5.2 del capítulo 4 siguiendo el balance másico de la **Figura 31**, que se reproduce a continuación para mayor facilidad de consulta como **Figura 38**.



**Figura 38.** Balance de cenizas generadas a una central de combustión de biomasa

Para poder hacer los cálculos es necesario calcular el flujo de cenizas asociadas a la alimentación de la planta  $\dot{m}_{cen}$  y, para ello, hay que estimar la fracción correspondiente a las cenizas de la biomasa de alimentación  $Y_{ash,bh}$ .

Como se indicaba en el capítulo 4, el combustible de la planta es una mezcla de biomasa herbácea (paja de cereal) y biomasa forestal de distintos árboles (astillas de madera de eucalipto y de limpieza del monte) por lo que se debe estimar una fracción de cenizas media a partir de las correspondientes a cada tipo de biomasa. La proporción de las mezclas de biomasa se modifican a lo largo del año, dependiendo de la disponibilidad de cada tipo en cada estación anual.

Se ha empleado la base de datos online *Phyllis2* [40] como referencia para obtener los valores de las fracciones de cenizas de los diferentes tipos de biomasa empleados en la planta de Cubillos de Sil. Las fichas con los análisis completos de cada tipo de biomasa se encuentran en el **Anexo 1** y los número de ficha corresponden a los indicados al lado del tipo de biomasa.

Los valores sacados de estas fichas se presentan en la **Tabla 5**:

**Tabla 5.** Valores de las fracciones de cenizas de los distintos tipos de biomasa que se emplea en la planta de Cubillos de Sil.

Biomasa forestal	
Tipos de biomasa	Fracción de cenizas $Y_{ash,bh}$
Chopo (#700)	1,16 %
Pino (#3154)	0,58 %
Roble (#2148)	0,30 %
Castaño (#683)	2,54 %
Encina (#2852)	2,34 %
Eucalipto (#3120)	0,72 %
Media de la biomasa forestal	1,27 %
Biomasa herbácea	
Paja (#3542)	3,17 %

Con estos valores podemos calcular la fracción de cenizas media de la alimentación de biomasa de la planta sabiendo que siempre el 70% es biomasa forestal y el 30% biomasa herbácea, como se indica en el Capítulo 4:

$$Y_{ash,bh\ medio} = 1,27 \% \cdot 0,7 + 3,17 \cdot 0,3 = 1,84 \%$$

Con este valor y con el consumo anual de biomasa en la planta térmica se puede calcular la cantidad de cenizas generadas:

$$\dot{m}_{cen} = Y_{ash,bh} \cdot \dot{m}_{bms,bh} = 1,84 \% \cdot 280.000 \frac{t\ biomasa}{año} = 5.159 \frac{t\ cenizas}{año}$$

En el **Anexo 4** se estima la fracción de cenizas  $f_{hogar}$  que quedan en el cenicero de la cámara de combustión de la planta, de manera que esta fracción sea compatible con la concentración de partículas en la chimenea de gases de la Planta de Cubillos de Sil presentada en el capítulo 4 en la **Tabla 2**. Este valor ha resultado ser de 0,6.

Para calcular la cantidad de cenizas de fondo se va a considerar este valor de 0,6, del mismo orden al presentado en el capítulo 4 para calderas con parrilla. De esta manera las cenizas de fondo anuales se obtienen como:

$$\dot{m}_{cen,hog} = f_{hogar} \cdot \dot{m}_{cen} = 0,6 \cdot 5.159 \frac{t\ cenizas}{año} = 3.095,4 \frac{t\ cenizas\ de\ hogar}{año}$$

Para el cálculo de las cenizas volantes se considera el rendimiento de retención del filtro de los humos de 99,65% de las partículas, así se obtiene la cantidad anual de las cenizas volantes retenidas en el filtro de la planta:

$$\begin{aligned} \dot{m}_{cen,vol} &= \eta_{ret} \cdot (1 - f_{hogar}) \cdot \dot{m}_{cen} = 0,9965 \cdot (1 - 0,6) \cdot 5.159 \frac{t\ de\ cenizas}{año} \\ &= 2.056,37 \frac{t\ cenizas\ volantes}{año} \end{aligned}$$

De la misma forma, para las cenizas se pueden calcular también las partículas que salen por la chimenea con los gases de combustión tras pasar los filtros:

$$\begin{aligned} \dot{m}_{cen,chim} &= (1 - \eta_{ret}) \cdot (1 - f_{hogar}) \cdot \dot{m}_{cen} = (1 - 0,9965) \cdot (1 - 0,6) \cdot 5.159 \frac{t\ de\ cenizas}{año} \\ &= 7,22 \frac{t\ partículas\ emitidas}{año} \end{aligned}$$

Las cuales representan un 0,12% de las cenizas totales generadas, por lo que es un valor muy bajo.

#### 5.4.2 Aspecto y granulometría

En la **Figura 39** se pueden ver los dos tipos de cenizas producto de la combustión de biomasa en la planta de Cubillos de Sil:

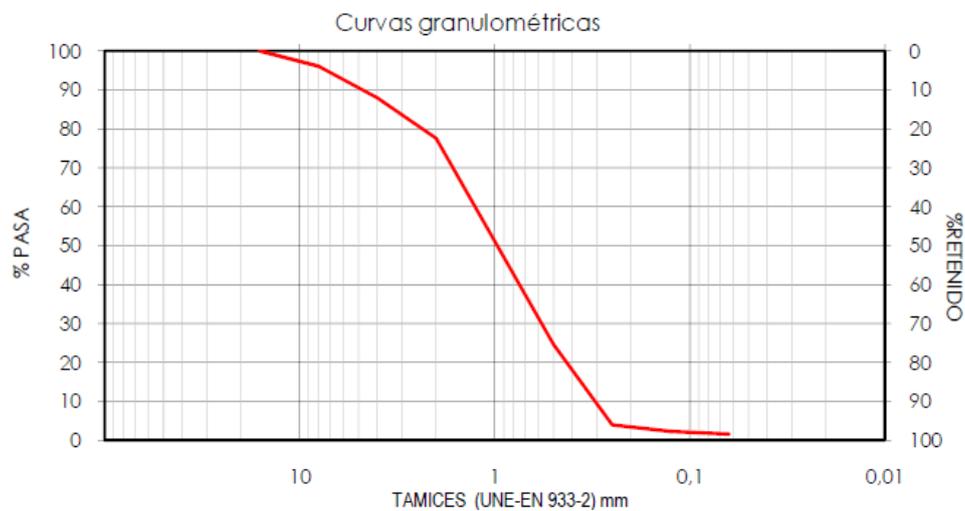


**Figura 39.** Comparación visual de ambos tipos de cenizas de la planta de Cubillos del Sil analizadas en el laboratorio de Cartif (Parte superior), muestra de cenizas de fondo (Parte central) y muestra de cenizas de hogar (Parte inferior)

La distribución **granulométrica** es el estudio experimental del tamaño de los granos de un material que se hace pasar por una serie de tamices de distintos tamaños de apertura. La curva de la granulometría muestra que porcentaje del material pasa por los tamices y que porcentaje queda retenido. Con este ensayo se determina las **propiedades geométricas** de un material.

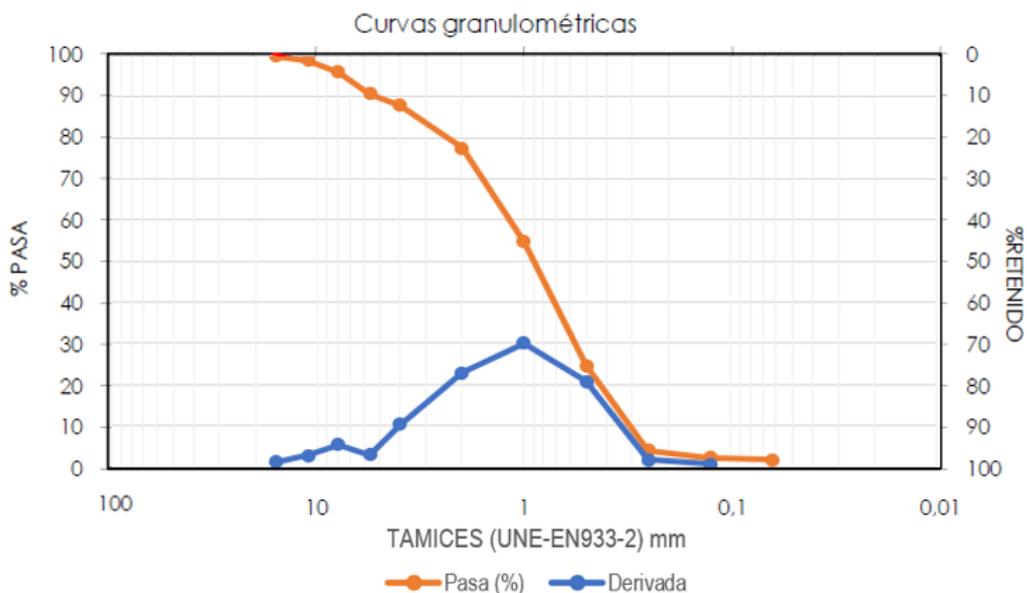
A través de la fundación Cartif se ha conseguido **el informe de las cenizas de hogar** del laboratorio de una empresa constructora interesada en su posible aplicación para firme de carreteras. En dicho informe aparecen los resultados de los ensayos para determinar las propiedades geométricas, físicas y mecánicas de las cenizas de hogar de la planta de Cubillos de Sil. Dicho informe aparece en el **Anexo 2**.

En la **Figura 39** se puede ver la curva de granulometría de las cenizas de hogar que aparece en el informe del laboratorio de la constructora:



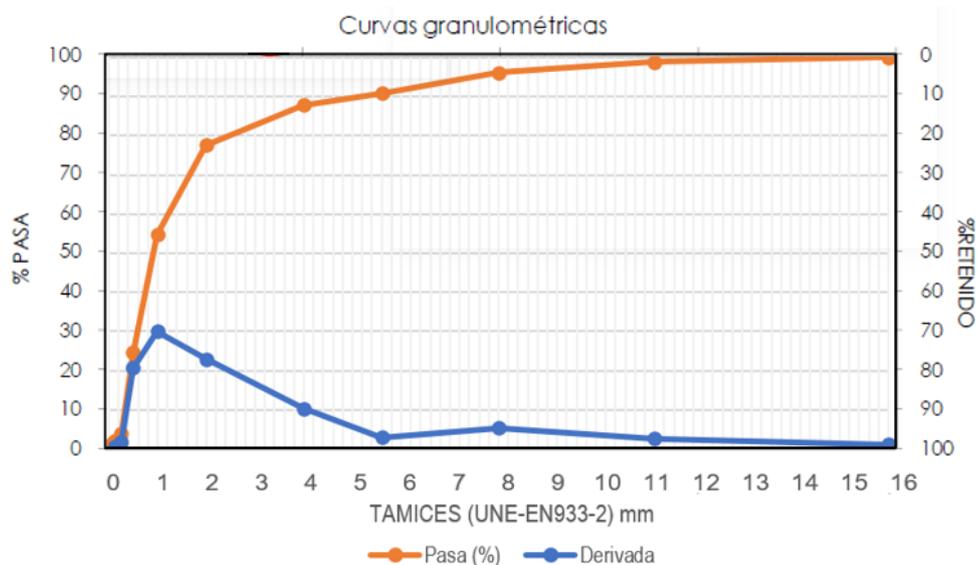
**Figura 40.** Curva de granulometría de las cenizas de hogar de la planta de Cubillos de Sil [Anexo 2]

A partir de los valores de la curva se ha vuelto a representar a través de la herramienta Excel para poder obtener su derivada. En la **Figura 41** se puede ver representada la curva logarítmica de la granulometría de las cenizas con su derivada en azul. Gracias a esta derivada se puede ver que el tamaño medio ( $\phi$ ) más probable de las cenizas está **en torno a 1 mm**.



**Figura 41.** Curva logarítmica de granulometría de las cenizas de hogar con su derivada para ver el tamaño de cenizas más probable

Con la misma información, se puede volver a representar la curva en escala numérica e invirtiendo los valores para ver más claramente la distribución del tamaño de las cenizas (**Figura 42**):



**Figura 42.** Curva de granulometría de las cenizas de hogar con su derivada para ver mejor la distribución de tamaños

Se puede ver más claramente en esta nueva representación que el tamaño medio de las cenizas está comprendido en su **mayoría entre 0,5 y 4 mm**.

En este informe de laboratorio también aparece el análisis **equivalente de Arena** de las cenizas de fondo, medido según la norma UNE-EN 933-8:2012:

**Tabla 6.** Resultados experimentales del ensayo de equivalente de arena de las cenizas de hogar de la planta de Cubillos de Sil

Probeta n°		1	2
Masa de la submuestra (g)		119,8	120,2
Altura del floculado (mm)	$h_1$	142	142
Altura del sedimento (mm)	$h_2$	112	112
Equivalente de Arena individual (%)	$SE_i = 100 \cdot h_2 / h_1$	78,9	78,9
Equivalente de Arena (%) Media	$SE_4$	<b>79</b>	

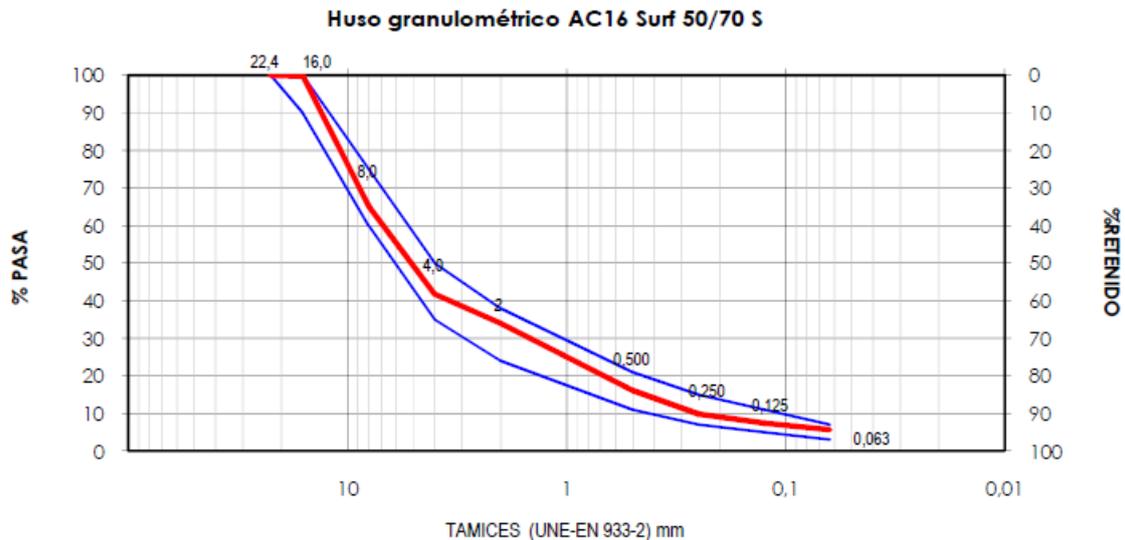
En la **Tabla 6** se puede ver que el equivalente de arena es del **79%**. Según el pliego español de carreteras PG-3 (Orden FOM/2523/2014, del 12 de diciembre del 2014) se exige que el equivalente de arena de un árido deberá ser superior a 55 ( $SE_4 > 55$ ) para poder ser empleado en hormigones asfálticos tipo AC. Con lo cual estas cenizas **cumplen con la normativa** necesaria para poder incorporarse al **pavimento de hormigón** de un carril bici, que es la aplicación que se estudia en este Trabajo Fin de Máster.

Por último, en este informe se ha estudiado también la **compatibilidad de las cenizas de hogar con los áridos** para hacer hormigón de una gravera situada en Cubillas de Santa Marta (Valladolid). En este ensayo se han dosificado áridos de distintos tamaños y se han mezclado con un 15% de cenizas de biomasa. En la **Tabla 7** se pueden ver los resultados del ensayo de granulometría de esta mezcla y en la **Figura 43** se puede ver representada la curva de granulometría resultante de la combinación de las granulometrías de las cenizas, de los áridos y del filler de aportación.

**Tabla 7.** Resultados del ensayo de dosificación de los áridos de acopios mezclados con cenizas de hogar de la planta de Cubillos de Sil

	%pasa						Huso AC16 Surf 50/70 S	
	Arido 0/10 escoria de biomasa	Arena 0/5 sílicea Cubillas	Árido 5/11 síliceo Cubillas	Árido 11/16 síliceo Cubillas	Filler Aportación	Curva combinada	inf.	sup.
	<b>15,0</b>	<b>28,0</b>	<b>40,0</b>	<b>14,0</b>		<b>3,0</b>	<b>100%</b>	
<b>45,0</b>								
<b>31,5</b>								
<b>22,4</b>				100,0	100,0	<b>100,0%</b>	100	100
<b>16,0</b>	100,0	100,0	100,0	98,5	100,0	<b>99,8%</b>	90	100
<b>8,0</b>	96,1	99,8	49,4	0,7	100,0	<b>65,2%</b>	60	75
<b>4,0</b>	87,9	89,3	1,2	0,5	100,0	<b>41,8%</b>	35	50
<b>2,0</b>	77,6	67,3	1,2	0,5	100,0	<b>34,0%</b>	24	38
<b>0,500</b>	24,6	31,9	1,2	0,5	100,0	<b>16,2%</b>	11	21
<b>0,250</b>	3,9	20,5	1,2	0,4	100,0	<b>9,8%</b>	7	15
<b>0,063</b>	1,6	8,8	1,1	0,4	83,7	<b>5,7%</b>	3	7

Se puede ver a través de estos resultados que las cenizas tienen una granulometría muy similar a la de la arena sílicea de Cubilla de Santa Marta.



**Figura 43.** Curva combinada de la mezcla de los áridos con cenizas de hogar de la planta de Cubillos de Sil

Esta curva combinada permite ver que la introducción de un **15% de cenizas de biomasa** en sustitución de los áridos de acopio para un hormigón no origina cambios bruscos en la granulometría de la mezcla de áridos, por lo que una **sustitución parcial de cenizas es factible**. En este trabajo se aspira a una sustitución del 20% y, teniendo esta curva como referencia, se puede ver que puede ser también una proporción viable.

### 5.4.3 Análisis químico de las cenizas

De nuevo, a través de la Fundación Cartif se ha conseguido el análisis químico de las **cenizas volantes** realizado en el laboratorio de la misma (LAE). El informe completo se puede encontrar en el **Anexo 3.A** y a continuación se muestran los resultados obtenidos en dicho análisis.

En la **Tabla 8** se puede ver que las cenizas volantes tienen una humedad total al 5% de la masa en base húmeda (s.r. según recibida) y un contenido en carbono orgánico del 3,5% en masa en base seca (b.s.c). También se muestran las cantidades de los elementos químicos minoritarios presentes en la composición de las cenizas, con unos valores relativamente bajos.

**Tabla 8.** Tabla de resultados del análisis químico de las cenizas volantes de la planta de Cubillos de Sil con la humedad total y el contenido en carbono orgánico

RESULTADOS				
Parámetro	Método/Norma	Valor	Incertidumbre	Unidades
Humedad total	UNE-EN ISO 18134-1:2016	< 5,0	--	% m/m s.r.
Contenido en carbono orgánico	Procedimiento interno según UNE-EN ISO 16948:2015 Método instrumental	3,5	--	% m/m b.s.c
ELEMENTOS MINORITARIOS				
Arsénico (As)	UNE-EN ISO 16968:2015 Método de digestión ácida por microondas y determinación por ICP-OES	< 0,75	--	mg/kg b.s.c
Cadmio (Cd)		> 2,00	--	mg/kg b.s.c
Cromo (Cr)		> 12,5	--	mg/kg b.s.c
Cobre (Cu)		> 12,5	--	mg/kg b.s.c
Mercurio (Hg)		< 0,075	--	mg/kg b.s.c
Níquel (Ni)		> 12,5	--	mg/kg b.s.c
Plomo (Pb)		> 12,5	--	mg/kg b.s.c
Zinc (Zn)		> 125,0	--	mg/kg b.s.c
Talio(Tl)		8,29	--	mg/kg b.s.c
Vanadio(V)		44,1	--	mg/kg b.s.c

En la **Tabla 9** se muestra los resultados del análisis de la composición inorgánica de las cenizas volantes. Destacan los valores del óxido de calcio o cal (CaO), del óxido de potasio (K<sub>2</sub>O) y del óxido de silicio o sílice (SiO<sub>2</sub>). Esto está acorde con lo presentado en el apartado Composición química de las cenizas 5.3 puesto que al ser cenizas de una mezcla de maderas forestales y paja de cereal tiene un alto contenido en cal y en sílice.

**Tabla 9.** Resultados del análisis de la composición inorgánica de las cenizas volantes de la planta de Cubillos de Sil.

RESULTADOS				
Parámetro	Método/Norma	Valor	Incertidumbre	Unidades
COMPOSICIÓN INORGÁNICA DE CENIZAS				
Na <sub>2</sub> O *	UNE-EN ISO 16967:2015	0,81	--	% m/m b.s.c.
MgO *		7,12	--	% m/m b.s.c.
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> *		4,02	--	% m/m b.s.c.
SiO <sub>2</sub> *		11,13	--	% m/m b.s.c.
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> *		4,00	--	% m/m b.s.c.
SO <sub>3</sub> *		7,30	--	% m/m b.s.c.
K <sub>2</sub> O *		18,30	--	% m/m b.s.c.
CaO *		43,10	--	% m/m b.s.c.
TiO <sub>2</sub> *		0,30	--	% m/m b.s.c.
MnO *		0,20	--	% m/m b.s.c.
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> *		2,54	--	% m/m b.s.c.
CuO *		0,03	--	% m/m b.s.c.
ZnO *		0,23	--	% m/m b.s.c.
SrO *		0,15	--	% m/m b.s.c.
BaO *		0,04	--	% m/m b.s.c.
PbO *		< 0,01	--	% m/m b.s.c.
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> *		< 0,01	--	% m/m b.s.c.
ZrO <sub>2</sub> *		< 0,01	--	% m/m b.s.c.
Rb <sub>2</sub> O *		0,03	--	% m/m b.s.c.
As <sub>2</sub> O <sub>3</sub> *		< 0,01	--	% m/m b.s.c.
Cl *		0,68	--	% m/m b.s.c.
NiO *		< 0,01	--	% m/m b.s.c.
WO <sub>3</sub> *		0,05	--	% m/m b.s.c.
Co <sub>3</sub> O <sub>4</sub> *	< 0,01	--	% m/m b.s.c.	

Para el análisis químico de las **cenizas de hogar**, al no disponer de un informe de laboratorio, se ha hecho una estimación a través de las fichas de análisis de cenizas disponibles en la base de datos Phyllis2. Las fichas, que complementan las de biomasa utilizadas para el apartado 5.4.1, para la estimación de las cantidades de ceniza, se encuentran también en el **Anexo 1**.

A través de esta estimación (**Tabla 10**) se puede dar un orden de magnitud de la composición química de las cenizas de hogar que se generan en la planta de Cubillos de Sil. Los números que aparecen a continuación de los nombres del tipo de biomasa corresponden con los números de las fichas del **Anexo 1**. De la misma forma que en las cenizas volantes, los valores más destacables son los de la cal (CaO), la sílice (SiO<sub>2</sub>) y el óxido de potasio (K<sub>2</sub>O).

**Tabla 10.** Estimación del análisis de composición química de las cenizas de hogar de la planta de Cubillos de Sil a través de los valores encontrados en la base de datos Phyllis2.

	unidad	Chopo (#288)	Pino (#3154)	Roble (#91)	Eucalipto (#699)	Media de biomasa forestal	Paja (#424)	Media biomasa de alimentación (70% forestal y 30% paja)
<b>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub></b>	wt% (ash)	14,81	4,81	7,5	29,11	14,06	6,42	<b>11,77</b>
<b>SiO<sub>2</sub></b>	wt% (ash)	9,22	23,53	2,3	17,83	13,22	35,3	<b>19,84</b>
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	wt% (ash)	3,26	5,1	0,9	7,87	4,28	0,35	<b>3,10</b>
<b>CaO</b>	wt% (ash)	47,28	33,58	65	26,52	43,10	4,1	<b>31,40</b>
<b>MgO</b>	wt% (ash)	11,58	5,14	8,3	7,25	8,07	1,96	<b>6,24</b>
<b>Na<sub>2</sub>O</b>	wt% (ash)	0,1	0,19	0,8	4,98	1,52	0,08	<b>1,09</b>
<b>K<sub>2</sub>O</b>	wt% (ash)	24,37	12,05	9,9	7,2	13,38	11,2	<b>12,73</b>
<b>SO<sub>3</sub></b>	wt% (ash)	-	1,62	2,2	-	1,91	1,12	<b>1,67</b>
<b>TiO<sub>2</sub></b>	wt% (ash)	-	0,06	0,1	-	0,08	-	<b>0,06</b>
<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	wt% (ash)	-	2,14	0,5	-	1,32	0,25	<b>1,00</b>

Para la encina y el castaño no se han encontrado datos del análisis de cenizas.

Cabe destacar que esta estimación es en base a análisis de laboratorio con muestras de biomasa pura, esto quiere decir que el análisis de las cenizas de hogar que se generan en la planta de biomasa de Cubillos de Sil puede variar debido al contenido en inertes (por ejemplo, arena o tierra del suelo) y en otros elementos que se juntan con la biomasa de extracción como elementos metálicos u otros residuos.

## 5.5 Valorización de las cenizas

En los últimos años, ha disminuido drásticamente el número y la producción de las centrales térmicas de producción de energía eléctrica con carbón en nuestro país y, por el contrario, ha aumentado el número de centrales de producción de energía a partir de la combustión de la biomasa. Las cenizas de las centrales de carbón ya estaban siendo utilizadas, en su mayoría, en las plantas de producción de cemento, por lo que se estaba cumpliendo con su reutilización al ser convertidas en un subproducto del sector cementero.

Una de las consecuencias que ha provocado esta apuesta por una energía más limpia es que ha aumentado considerablemente la cantidad de cenizas de biomasa generadas, provocando un **aumento del volumen** de la deposición **de estos residuos** en vertederos ya que su baja fusibilidad no permite que se empleen en el sector cementero. No obstante, estos residuos, procedentes de la combustión de diferentes tipos de biomasa, están considerados como residuos no peligrosos, según la Ley 22/2011 de residuos y suelos contaminados [41].

Principalmente, estos residuos (cenizas de fondo y volantes) son **empleados como biofertilizantes** debido a su alto contenido en fósforo (P) y potasio (K). No obstante, muchas toneladas de residuos no encuentran una salida comercial, por lo que, dada su **elevada disponibilidad**, resulta interesante plantearse un estudio de viabilidad de valorización de este tipo de residuos en la construcción.

La **industria de la construcción** puede absorber diferentes tipos de residuos. Estos residuos pueden entrar como materias primas (hablamos entonces de valorización material) o como combustibles alternativos (lo que se denomina valorización energética).

Cabe destacar que las cenizas de carbón están sido incluidas en las normas europeas EN 450 [42] y 197-1 [43]. No obstante, todavía **no existe normativa específica** que regule el uso de estos residuos de biomasa ni su posible empleo en distintos materiales de construcción, a pesar de su creciente disponibilidad.

En el siguiente capítulo se hablará de la viabilidad de la valorización de este residuo como componente parcial en la fabricación de hormigones.

# CAPÍTULO 6. USO DE LAS CENIZAS DE BIOMASA EN LA FORMULACIÓN DE HORMIGONES ECO-EFICIENTES

En este capítulo se presentan los aspectos generales de los hormigones convencionales, las principales características de los mismos, las implicaciones que suponen la introducción de cenizas de biomasa en los hormigones eco-eficientes y los porcentajes posibles de aporte de las cenizas como sustituto parcial de sus componentes.

## 6.1 Hormigones convencionales

El **hormigón** es una mezcla dosificada de cemento, agua, arena y grava (a estos dos últimos componentes se les denomina áridos). Las proporciones en la mezcla de estos materiales dependen de las propiedades físicas requeridas al hormigón.

El hormigón es el material de construcción por excelencia en estos tiempos. En efecto, hoy en día resulta casi imposible encontrar una construcción en la que no esté presente en alguna parte de la misma; desde tuberías, traviesas de ferrocarril y pavimentos de carreteras, hasta las grandes obras de la ingeniería civil como los puentes, los túneles o las presas, el hormigón juega un papel muy importante en la sociedad.

En España, la producción de hormigón preparado alcanzó los 6,7 Mm<sup>3</sup> en el tercer trimestre de 2021; 575.000 m<sup>3</sup> más que el mismo periodo del año anterior (un 9,4% más), según el Informe trimestral de producción de hormigón de la Asociación Nacional Española de Fabricantes de Hormigón Preparado (ANEFHOP). La demanda cada año se incrementa [44].

Entre las **ventajas** que presenta el hormigón como material de construcción frente a otro tipo de soluciones constructivas se pueden citar [45]:

- ✓ **Común:** las materias primas que lo componen son comunes y están disponibles en cantidades significativas por lo que lo hacen un material de fácil acceso y precio reducido.
- ✓ **Posibilidad de formas:** se puede adaptar para conseguir las formas arquitectónicas deseadas gracias su carácter reológico.
- ✓ **Durabilidad:** es un material durable, mantiene sus propiedades durante largos periodos de tiempo y su mantenimiento es mínimo, además de presentar una buena resistencia al fuego.
- ✓ **Seguridad:** es un material más seguro que otros, por su elevada resistencia a la compresión.
- ✓ **Reciclable:** Al llegar al final de su vida útil se puede triturar y reutilizarse en la construcción de carreteras u otras aplicaciones.

Con todo ello, tampoco es que sea un material perfecto pues presenta sus limitaciones, entre las **desventajas**, se destacan:

- × **Grandes cantidades:** necesita ser de grandes dimensiones para soportar el peso de las grandes edificaciones, lo que incrementa su coste.

- × **No es óptimo en todas las formas:** su aplicación en diseños modernos con formas diversas reduce su capacidad para soportar movimientos sísmicos, salvo que se soporte sobre una plataforma antisísmica.
- × **Peso:** Es un material muy pesado y voluminoso respecto a otros materiales, como por ejemplo el acero.

Con todo, parece lógico que un material formado por agua, cemento y áridos, aun correctamente dosificado, pueda presentar limitaciones en determinadas situaciones, que se acentúan ante una exigencia cada vez mayor del uso del hormigón en nuevos retos tecnológicos. Esto implica que deban introducirse ciertas modificaciones en su constitución o en su tecnología, básicamente a través de la incorporación de otros materiales que permitan mejorar las propiedades del hormigón en la dirección deseada.

Así, el empleo de cenizas volantes, fibras, microsilíce, superplastificantes, aireantes, entre otros productos, es cada vez más habitual en determinadas aplicaciones, siendo una tendencia de futuro clara para obtener un material más competitivo.

No obstante, el modo en que se utilizan estas sustancias para la formulación de hormigones modificados se basa, en general, en las indicaciones del fabricante o de alguna normativa y en el buen criterio y experiencia de la persona que prepara la mezcla. La no existencia de procedimientos generales implica que resulte imprescindible un buen conocimiento del hormigón y de la influencia de tales materiales en la dosificación y en las propiedades resultantes de cara a el diseño de cualquier mezcla de estas características con éxito.

A continuación, se describen las características más relevantes de los componentes principales del hormigón convencional.

### 6.1.1 Cemento

El **cemento** (o cemento Portland) es un material que reacciona químicamente con el agua dando lugar a una pasta que fragua y se endurece con el tiempo. El cemento se considera el material **base de construcción por excelencia** por sus buenas prestaciones, ya que se utiliza como aglomerante para la preparación de los materiales como el mortero y el hormigón, por su capacidad de conformar una masa sólida y duradera.

Debido a su versatilidad, la producción de cemento en países desarrollados es muy alta. En **2021, España** tuvo una producción de **14,9 Mt de cemento**. [46]

Esta producción tiene un **alto impacto medioambiental**, hasta el punto de que la fabricación del cemento Portland es responsable de aproximadamente el **8% de las emisiones de CO<sub>2</sub> en el mundo** [47], contribuyendo de manera acusada al calentamiento global.

El proceso de producción del cemento Portland se puede dividir en tres fases: preparación de las materias primas (caliza y arcilla), producción del clinker y preparación del cemento. En la **Figura 44**, se puede observar un esquema del proceso de fabricación [48]:

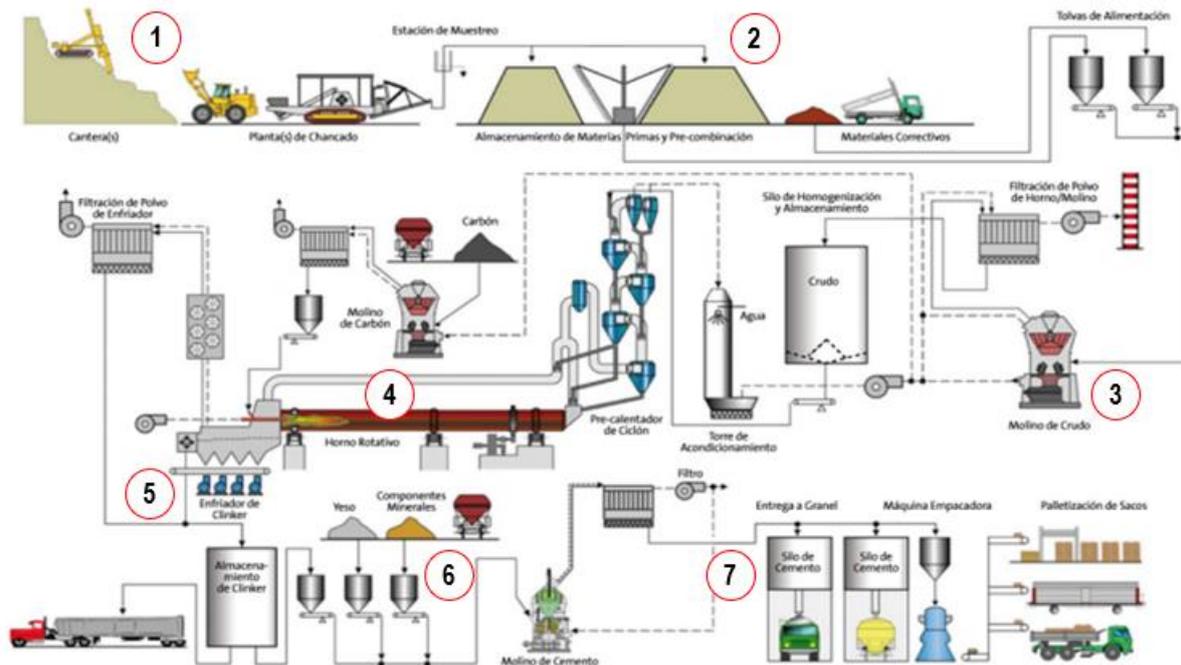


Figura 44. Esquema del proceso de producción del cemento de Portland [48]

- 1 Explotación de las materias primas de canteras.
- 2 Almacenamiento y dosificación de las materias primas.
- 3 Homogenización, en esta etapa se realiza la molienda de materias primas (crudo) y se homogeniza.
- 4 Clinkerización, que se realiza mediante un tratamiento térmico en hornos rotatorios hasta alcanzar la temperatura suficiente para provocar la fusión del material (1.350-1.450° C).
- 5 Enfriamiento del clinker, para poder estabilizar las fases cristalinas formadas en el horno de alta temperatura.
- 6 Adiciones y molienda, previamente a la molienda se añade yeso al clinker, en proporción del 3-5% que actúa como regulador de fraguado. Además del yeso, suelen adicionarse puzolanas naturales, como las cenizas volantes entre otras, para la obtención de cementos con propiedades especiales.
- 7 Empaque y distribución.

Por su proceso de fabricación y debido a las emisiones de CO<sub>2</sub> que se generan en el mismo, el cemento es el componente del hormigón que presenta mayor impacto ambiental, con gran diferencia respecto al resto de componentes.

Estas **emisiones** se producen debido a: Consumo de energía y b: Generadas en el proceso [49]:

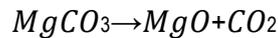
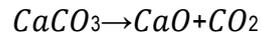
**a) Consumo de energía**

1. Transporte de materias primas.
2. Quema de combustibles fósiles para el calentamiento del horno.
3. Molienda del Clinker para la producción de cemento.

**b) Generadas en el proceso.**

4. Descomposición de carbonato cálcico y carbonato de magnesio en sus óxidos y CO<sub>2</sub>.

De estas fuentes de emisiones mencionadas, el 60% se corresponden a las emisiones de CO<sub>2</sub> que se producen en la **descomposición del carbonato cálcico y carbonato de magnesio** para obtener óxido de calcio y magnesio respectivamente (proceso de clinkerización):



Por otro lado, existe una emisión importante de CO<sub>2</sub> que proviene indirectamente del consumo de combustibles fósiles para conseguir las altas temperaturas necesarias en horno de clinkerización.

### 6.1.2 Áridos

Los **áridos** principales que componen el hormigón son la grava y la arena. Estos áridos deben poseer por lo menos la misma resistencia y durabilidad que se exija al hormigón. El árido cuyo tamaño sea **superior a 5 mm** se llama **árido grueso o grava**, mientras que el **inferior a 5 mm** se llama **árido fino o arena**. [50]

Los áridos que se emplean en hormigones se obtienen mezclando tres o cuatro grupos de distintos tamaños para alcanzar una granulometría óptima. El árido que tiene mayor responsabilidad en el conjunto es la arena. Tres factores intervienen en una granulometría adecuada: **el tamaño máximo del árido, la compactidad y el contenido de granos finos**.

En una mezcla de áridos una compactidad elevada es aquella que deja pocos huecos, esto se consigue con mezclas pobres en arenas y gran proporción de áridos gruesos, precisando poca agua de amasado. La dificultad es conseguir compactar el hormigón, pero si se dispone de medios suficientes para ello el resultado son hormigones muy resistentes.

Si, por el contrario, se tiene una **gran proporción de granos finos**, estos hacen la mezcla más trabajable, pero precisan más agua de amasado y de cemento, constituyendo los **morteros**.

Los áridos habitualmente **se extraen de canteras, graveras o**, incluso, de **lechos fluviales**. Los impactos asociados a estas actividades de extracción y posterior transporte hasta la planta de fabricación de hormigón se deben tener en cuenta para evaluar el impacto total del hormigón.

### 6.1.3 Agua de amasado

El **agua de amasado** interviene en las **reacciones de hidratación del cemento**. La cantidad de esta debe ser **la estricta necesaria**, pues la sobrante que no interviene en la hidratación del cemento se evaporará y creará huecos en el hormigón disminuyendo la resistencia de este. Sin embargo, una reducción excesiva de agua originaría una mezcla seca, poco manejable y muy difícil de colocar en obra. Por ello es un dato muy importante fijar adecuadamente la cantidad de agua. Durante el fraguado y primer endurecimiento del hormigón se añade agua para evitar la desecación y mejorar la hidratación del cemento. [50]

Las características del agua para el hormigón deben ser evaluadas para que no produzca reacciones adversas en la mezcla, es por ello por lo que se debe realizar análisis físico-químicos para garantizar su calidad. Habitualmente **se emplea como indicador la potabilidad del agua**.

## 6.2 Comportamiento y características del hormigón convencional

En la **preparación del hormigón**, el cemento que lo compone se hidrata en contacto con el agua, iniciándose diversas reacciones químicas de hidratación que lo convierten en una pasta maleable con buenas propiedades adherentes, añadiéndose los áridos de forma homogénea. En el transcurso de unas horas, se produce el fraguado y endurecimiento progresivo de la mezcla, obteniéndose un material de

consistencia pétreo. La **densidad del hormigón** fraguado se encuentra **en torno a 2.190 kg/m<sup>3</sup>**, de los cuales, aproximadamente, **150 kg son de cemento, 1.930 kg de áridos y 110 kg de agua**.

### 6.2.1 Resistencia mecánica

La **principal característica estructural del hormigón** es resistir muy bien los **esfuerzos de compresión**. La resistencia a compresión del hormigón ordinario puede ir de **115 a 50 MPa**. Se pueden obtener también hormigones especiales de alta resistencia que alcanzan hasta 200 MPa.

La resistencia del hormigón a compresión **se obtiene en ensayos de rotura** por compresión de probetas cilíndricas normalizadas realizados **a los 28 días de edad** y fabricadas con las mismas mezclas puestas en obra. La Instrucción española (EHE) recomienda utilizar la siguiente serie de resistencias características a compresión a 28 días (medidas en N/mm<sup>2</sup>): 20; 25; 30; 35; 40; 45 y 50. Por ello, las plantas de fabricación de hormigón suministran habitualmente hormigones que garantizan estas resistencias. [51]

Sin embargo, tanto su **resistencia a tracción** como al esfuerzo cortante es **relativamente baja**, del orden de un décimo de la resistencia a compresión y, generalmente, poco significativas en el cálculo global.

Para superar este inconveniente, el **hormigón se arma introduciendo barras de acero**, conocido como hormigón armado, permitiendo soportar los esfuerzos cortantes y de tracción con las barras de acero. Esto es posible dado que el hormigón se dilata y contrae en magnitudes semejantes al acero, pues tienen parecido coeficiente de dilatación térmico, por lo que resulta muy útil su uso simultáneo en obras de construcción.

### 6.2.2 Fraguado y endurecimiento

Como se ha indicado, el proceso de **fraguado y endurecimiento** es el **resultado de reacciones químicas de hidratación** entre los componentes **del cemento**.

La **fase inicial** de hidratación se llama **fraguado** y se caracteriza por el **paso de la pasta del estado fluido al estado sólido**. Esto se observa de forma sencilla por simple presión con un dedo sobre la superficie del hormigón.

Posteriormente continúan las reacciones de hidratación, alcanzando a todos los constituyentes del cemento, que provocan el endurecimiento de la masa y que se caracteriza por un **progresivo desarrollo de resistencias mecánicas** [52].

El hecho de que pueda regularse la velocidad con que el cemento amasado pierde su fluidez y se endurece, lo hace un producto muy útil en construcción. Una reacción rápida de hidratación y endurecimiento dificultaría su transporte y una cómoda puesta en obra rellenando todos los huecos en los encofrados. Una reacción lenta aplazaría de forma importante el desarrollo de resistencias mecánicas.

Cuando se fabrica el cemento se puede controlar la velocidad del fraguado y del endurecimiento modificando la cantidad de yeso que se añade al clinker de cemento. En la planta de hormigón, donde se mezcla la pasta de cemento y agua con los áridos, también se pueden añadir productos que regulan el tiempo de fraguado [52].

En condiciones normales un hormigón convencional **comienza a fraguar entre 30 y 45 minutos** después de que ha quedado en reposo en los moldes y **termina el fraguado trascurridas sobre 10 ó 12 horas**. Después comienza el **endurecimiento** que lleva un **ritmo rápido** en **los primeros días hasta llegar al primer mes**, para después aumentar más lentamente hasta llegar al año donde prácticamente se estabiliza [53].

En la **Tabla 11** se observa la evolución de la resistencia a compresión de un hormigón tomando como unidad la resistencia a 28 días, siendo cifras orientativas [53]:

*Tabla 11. Evolución de la resistencia a compresión de un hormigón normal con el paso de los días*

<b>Evolución de la resistencia a compresión de un hormigón normal</b>					
Edad del hormigón en días	3	7	28	90	360
Resistencia a compresión	0,40	0,65	1,00	1,20	1,35

### 6.2.3 Consistencia del hormigón fresco

La **consistencia** es la mayor o menor **facilidad** que tiene el hormigón fresco **para deformarse** y consiguientemente para **ocupar todos los huecos del molde** o encofrado. Influyen en ella distintos factores, especialmente la cantidad de agua de amasado, pero también el tamaño máximo del árido, la forma de los áridos y su granulometría [50].

La consistencia **se fija antes de la puesta en obra**, analizando cual es la más adecuada para la colocación según los medios que se dispone de compactación. Se trata de un parámetro fundamental en el hormigón fresco.

Entre los ensayos que existen para determinar la consistencia, el más empleado es *el cono de Abrams*. Consiste en llenar con hormigón fresco un molde troncocónico de 30 cm de altura. La pérdida de altura que se produce cuando se retira el molde, es la medida que define la consistencia [50].

### 6.2.4 Durabilidad

La **durabilidad** del hormigón se define en la Instrucción española EHE como la **capacidad para comportarse satisfactoriamente frente a las acciones físicas y químicas agresivas** a lo largo de la vida útil de la estructura protegiendo también las armaduras y elementos metálicos embebidos en su interior.<sup>23</sup>

Para garantizar la durabilidad del hormigón y la protección de las armaduras frente a la corrosión es importante realizar un hormigón con una permeabilidad reducida, realizando una mezcla con una relación agua/cemento baja, una compactación idónea, un peso en cemento adecuado y la hidratación suficiente de este añadiendo agua de curado para completarlo. De esta forma se consigue que haya los menos poros posibles y una red capilar interna poco comunicada y así se reducen los ataques al hormigón [51].

## 6.3 Introducción de cenizas de biomasa en la formulación de hormigones eco-eficientes

### 6.3.1 Hormigones eco-eficientes

Generalmente, se considera un **hormigón eco-eficiente** como aquel que **usa al menos un material de residuo o reciclado** como uno de sus componentes. Debido al gran impacto medioambiental de la fabricación del hormigón, muchas investigaciones se han enfocado en el reciclaje de residuos incorporándolos en materiales base-cemento, entre ellos las cenizas volantes procedentes de las centrales térmicas, tanto de carbón, cuando operaban, como las actuales de biomasa que se implantan en este momento para sustituir a las de carbón.

En el Capítulo 5 ya se ha considerado con detalle las cenizas generadas en estas centrales de combustión de biomasa. En la **Figura 45** se muestra una comparación entre el cemento y cenizas volantes.



*Figura 45. Comparación visual entre cemento (izquierda) y cenizas volantes (derecha)*

Estas cenizas de biomasa pueden ser utilizadas en la **formulación de hormigones eco-eficientes** de dos formas posibles:

- Como **sustituto parcial del cemento**, típicamente del orden del 10%.
- Como **sustituto parcial de los áridos** que componen el hormigón, típicamente del orden del 20%.

Siendo posibles la combinación de ambas alternativas.

De esta manera, se reintroducen en el sistema productivo estos residuos, aplicando la filosofía de la **Economía Circular**. Esto permite reducir directamente la extracción y el uso de materias primas, el depósito de las cenizas en un vertedero y parte de los gases de efecto invernadero emitidos (GEI) durante el ciclo de fabricación del hormigón. Como se evalúa cuantitativamente mediante la metodología de Análisis de Ciclo de Vida en el Capítulo 7.

### 6.3.2 Consideraciones medioambientales de los hormigones eco-eficientes

Las ventajas medioambientales y económicas resultantes de emplear los residuos de combustión de biomasa en el proceso de fabricación de cementos y/o hormigones son varias [54]:

1. **Circularidad**. Se utilizan residuos destinados a su eliminación en vertedero, que se convierten en recursos.

2. **Ahorro en instalaciones de tratamiento de residuos.** Se abre una vía complementaria para la gestión global de estos residuos, reduciéndose las inversiones necesarias para su tratamiento al aprovechar instalaciones ya existentes, como son las fábricas de cemento. Por tanto, se produce un ahorro de espacio en las instalaciones de tratamiento de residuos.
3. **Ahorro de recursos naturales.** Se disminuye el uso de materias primas en la fabricación de cemento, al sustituir parte de estas por residuos que tienen características similares en su composición
4. **Reducción de emisiones de gases de efecto invernadero.** Las cenizas de biomasa y los residuos en general, al haber alcanzado el final de su ciclo de vida, entran el proceso con balance de emisiones nulo. Al sustituir el cemento y los áridos por cenizas de biomasa se están evitando las emisiones asociadas a la producción de estos. Por tanto, se mitigan las emisiones de CO<sub>2</sub> y se reducen las emisiones de otros gases de efecto invernadero.
5. **No se genera ningún residuo al final del proceso de valorización.** La combustión de la biomasa genera cenizas de fondo (escorias) y cenizas volátiles, pero éstas se pueden incorporar al clinker o a la composición de los áridos de forma permanente e irreversible, manteniendo garantías ambientales. En función de la tecnología de combustión de las calderas de biomasa varía su granulometría, estas cenizas pueden incorporarse directamente (granulometría similar a la de un árido) o pueden necesitar un proceso de molienda previo (ceniza escorificada), pero aun así ese proceso sería mucho menos contaminante que la cadena de emisiones que arrastran el cemento y los áridos durante su ciclo de vida hasta la hormigonera. También se ha de valorar el ennoblecimiento económico del residuo al pasar de tener un valor negativo (coste de su gestión y deposición en vertedero) a convertirse en un recurso (valor de materia prima) que repercute en una mayor viabilidad económica de los procesos que lo generan y que lo usan mediante su reciclado (win to win).

Estas propiedades económico-ambientales son las que **justifican el interés de la utilización de las cenizas de biomasa** (reciclado) en los hormigones eco-eficientes.

### 6.3.3 Resultados de estudios sobre la viabilidad del uso de cenizas de biomasa en la formulación de hormigones

Se ha realizado una revisión de distintos estudios a fin de establecer la viabilidad del uso de las cenizas de biomasa como componente de hormigones. Actualmente, los estudios de laboratorio sobre la utilización de este tipo de residuo manejan como referencia las Normas existentes para los materiales de construcción, donde se especifican las propiedades finales que deben cumplir.

Cómo se explica en el Capítulo 5, el desempeño de las cenizas depende en gran medida de sus propiedades físico-mecánicas. Respecto a las propiedades mineralógicas y químicas, estas dependen de la composición del tipo de biomasa de la que provienen, así como de la tecnología de combustión de la caldera de procedencia en el proceso de quema.

Se presenta a continuación una síntesis de referencias a los resultados experimentales de estudios realizados para explorar la potencial utilización de estas cenizas (de fondo y volantes) en cementos y hormigones.

El empleo de cenizas puede modificar la matriz base-cemento en distintos aspectos, como pueden ser su reacción de hidratación, el desarrollo de sus resistencias mecánicas y la estructura porosa, entre otros. No hay consenso generalizado porque los estudios se han realizado con distintos tipos de cenizas, pero como características generales se puede indicar las siguientes:

- Las investigaciones realizadas indican que la utilización de cenizas de biomasa es eficaz en el desarrollo de la resistencia del hormigón y en la **reducción de su permeabilidad**. El comportamiento depende del nivel de SiO<sub>2</sub> de las cenizas, así como de otros componentes de la ceniza de la biomasa.
- Las probetas de pasta de cemento que contienen cenizas de biomasa en un 10% y un 20%, presentan valores de **resistencia a compresión (R<sub>c</sub>)** a 2 días de curado ligeramente inferiores a las probetas con 100% cemento de Portland. Pero con el tiempo de hidratación, las pastas desarrolladas, presentan un desarrollo idóneo y óptimo de los valores de R<sub>c</sub> que permiten su empleo en materiales de construcción base-cemento [55].
- Las matrices que contienen hasta un 20% de ceniza de biomasa, tienen valores de **resistencia a compresión** de 17,5 y 36,2 MPa a los 2 y 28 días, respectivamente, que cumplen con las especificaciones de un cemento de clase resistente 32,5 N/mm<sup>2</sup> [55].
- En algunos estudios las mezclas que incorporaban entre 10 y 20% de cenizas de biomasa volantes expusieron una resistencia mecánica en torno al 90-95% respecto al convencional después de un año de curado [56]. La ceniza de biomasa es idónea para ser empleada como sustituto parcial de una matriz de cemento Portland tradicional, al presentar una **actividad puzolánica** óptima para ello [55].
- En cuanto a la microestructura, la adición de cenizas en los materiales de base-cemento promueve una **mejor durabilidad ante agentes externos agresivos**. Esta incorporación mejora el comportamiento del material en términos de resistencia al deslizamiento, a la abrasión y al impacto, que son propiedades mecánicas que considerar para la aplicación en pavimentos. La adherencia del acero a las matrices cementantes eco-eficientes es similar a la adherencia del cemento de referencia [55].
- Los **ensayos de lixiviación** de iones tóxicos y peligrosos por parte de estas matrices se mantiene por debajo del límite más exigente establecido por la normativa para el agua de consumo humano. El pH de la fase acuosa no se ve modificado por la presencia de las cenizas [57].

En cuanto a otros aspectos que es preciso tener en cuenta porque pueden afectar a las **características mecánicas** de los hormigones que contienen cenizas de biomasa, se pueden citar los siguientes:

- El uso de hormigones eco-eficientes está limitado a elementos de baja y media la resistencia, **excluyéndose la elaboración de los elementos portantes** [59] y sustituyendo de forma parcial alguno de los componentes (cemento o áridos) de forma que las propiedades no se vean afectadas.
- Tras observar el **agua requerida** para la consistencia de pastas de cemento con distintos contenidos de ceniza de biomasa, se ha observado que **la cantidad de agua demandada aumenta** con el nivel de cemento reemplazado por ceniza volante de biomasa. Esto se debe a la forma irregular, la porosidad y el contenido orgánico de las cenizas volantes de biomasa favorece la absorción del agua en la mezcla [56].

Esto puede observarse también en la **Tabla 12** realizada con ensayos de distintos porcentajes de sustitución [58] del cemento de morteros por cenizas de fondo o de hogar, **aumentando el porcentaje de absorción de agua del material a los 28 días** de envejecimiento (28 d) y a los 108 días (108 d). También se puede ver en esta tabla que aumenta el porcentaje de expansión con la cantidad de cenizas introducidas.

Cabe destacar también en esta **Tabla 12** el **descenso de la resistencia de compresión** a los 28 días y sobre todo a los 108 días de envejecimiento al aumentar el porcentaje de sustitución del

cemento por cenizas de fondo o de hogar. Estos ensayos muestran que para **sustituciones pequeñas de cemento (5-10%)** los valores son similares a los de referencia (82-74 MPa a los 28 d) pero para **sustituciones mayores (20-30%)** se tienen unos valores de resistencia **mucho más bajos** (66-57 MPa a los 28 d) al valor de control o de referencia del hormigón convencional (78 MPa a los 28 d).

**Tabla 12.** Caracterización de morteros con diferentes porcentajes de cenizas de fondo o de hogar como sustitutas del cemento [38]

Material (mortero)		Absorción 28 d (%)	R. Compresión 28 d (MPa)	Expansión 28 d (%)	Absorción 180 d (%)	R. Compresión 180 d (MPa)
Control		1,5	78	0,010	1,1	83
% cenizas de fondo	5	1,2	82	0,013	7,1	56
	10	1,9	74	0,016	7,4	49
	20	5,3	66	0,031	10,1	38
	30	6,9	57	0,049	10,3	37

- Al **augmentar la cantidad de agua**, la mezcla resultante disminuye la densidad, lo que resulta en una mezcla de menor calidad. Al reducirse la calidad esto da lugar a unos valores de resistencias a compresión y a flexión más bajos, con una mayor permeabilidad y una reducción en la resistencia a la intemperie, un aumento en la diferencia de volumen entre la mezcla húmeda seca lo que provoca un aumento en tendencia a la contracción y al agrietamiento [56].
- Con el fin de obtener una mezcla con una **trabajabilidad** satisfactoria, sin reducir la calidad de esta, se recomiendan usar complemento superplastificantes (en torno al 1% en peso) para mezclas con sustituciones del 10% del cemento [56].
- El **tiempo de fraguado** se retrasó al aumentar el contenido de cenizas volantes de biomasa en las mezclas [14]. Aun así, las mezclas elaboradas con 10 y 20% de cenizas de cenicero empleadas cumplen con los requisitos de estabilidad de volumen y tiempo de principio de fraguado establecidos por la norma europea UNE EN 197-1.
- Los valores de contenido en **sulfatos solubles** que suelen presentar las cenizas de fondo suelen ser inferiores al límite que establece la Instrucción EHE-08 para los áridos utilizados en hormigón. Sin embargo, el contenido de cloruros solubles puede oscilar entre 0,15% y 0,35%, valor muy superior al límite establecido para hormigón armado en la Instrucción (0,05%), aspecto fundamental a controlar en la utilización de las cenizas en la fabricación de hormigones armados.

Generalmente, la mayor preocupación con las cenizas de biomasa es el **contenido en cloruros solubles**, provenientes del cloruro potásico de los fertilizantes que se utilizan en los cultivos agrícolas, que luego, en la combustión, se transforma en HCl y con el vapor de agua forman ácido clorhídrico. La presencia de cloruros puede ser perjudicial para el armado de acero. En la central térmica utilizada en el caso de este Trabajo de Fin de Máster, se producirán solamente cenizas mayoritariamente de biomasa forestal (85-90%), la cual no contiene cloro por no ser un cultivo agrícola, y una pequeña parte de cultivo agrícola (paja de cereal) (10-15%), por lo que las cantidades de cloruros van a ser muy bajas, no afectando al comportamiento de los hormigones eco-eficientes.

## 6.4 Porcentajes de sustitución de cenizas posibles en el hormigón

Para presentar los porcentajes de sustitución de cenizas posibles, hay que diferenciar entre la ceniza de fondo o escoria y la ceniza volante y si estas sustituyen al cemento o a los áridos en la mezcla.

### 6.4.1 Utilización de la ceniza de fondo o escoria

Algunos estudios han evaluado la posibilidad de producir hormigones con cenizas de fondo de biomasa como **sustitución de los áridos naturales**. Sustituciones hasta un 20% de arena por cenizas de fondo no producen disminuciones importantes en las propiedades mecánicas del hormigón, especialmente a edades avanzadas [60].



**Figura 46.** Esquema ilustrativo de la composición de un hormigón convencional [Elaboración propia]



**Figura 47.** Esquema ilustrativo de un hormigón eco-eficiente con un 20% de sustitución de áridos por cenizas de hogar [Elaboración propia]

### 6.4.2 Utilización de la ceniza volante

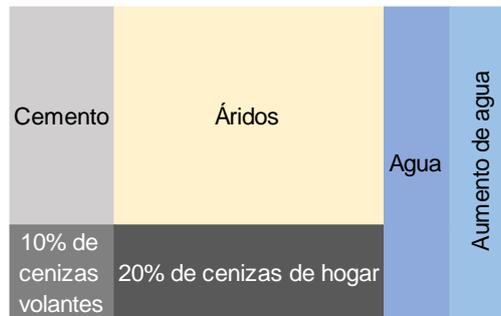
Se encuentran estudios que han evaluado la posibilidad de utilización de cenizas volantes en hormigón, como sustitución de un porcentaje de cemento. **Se ha podido ver como con sustituciones de hasta un 10% de cemento** por cenizas volantes no producen disminuciones en las propiedades mecánicas del hormigón, aunque para porcentajes mayores (por encima del 30%) sí se producen descenso significativo, que solamente se pueden permitir en algunos de los usos del hormigón [60].



**Figura 48.** Esquema ilustrativo de un hormigón eco-eficiente con un 10% de sustitución de cemento por cenizas volantes [Elaboración propia]

### 6.4.3 Valores escogidos en este estudio

En vista de las valoraciones expuestas en los apartados anteriores, se ha escogido una sustitución combinada del 10% del cemento, por cenizas volantes, y del 20% de los áridos, por cenizas de fondo o escoria (**Figura 49**). Este tipo de Ecohormigón será el que se tomará como base para realizar el Análisis de Ciclo de Vida (ACV) de los hormigones eco-eficientes que se producirían comparándolo con el de los hormigones convencionales. Dicho análisis se describe en el capítulo 7.



**Figura 49.** Esquema ilustrativo del hormigón eco-eficiente escogido para el estudio del ACV con un 20% de sustitución de áridos por cenizas de hogar y un 10% de sustitución del cemento por cenizas volantes [Elaboración propia]

# CAPÍTULO 7. VALORACIÓN MEDIANTE EL SOFTWARE SIMAPRO DEL ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA DE UN HORMIGÓN CON CENIZAS DE BIOMASA

En este capítulo se aplica la metodología del Análisis del Ciclo de Vida (ACV) para el cálculo de emisiones de CO<sub>2</sub> equivalentes del hormigón convencional y de un hormigón eco-eficiente con cenizas de biomasa, utilizando como unidad funcional de referencia un metro cúbico de hormigón.

La metodología del ACV sigue la estructura de fases definida en las normas ISO 14040 y 14042, tal como se ha descrito en el Capítulo 3, utilizando como soporte informático el programa SimaPro 7.2.

Posteriormente se realiza la comparación ambiental del uso del hormigón eco-eficiente frente al convencional en el pavimento de un carril bici de 8 kilómetros, y se realizan diversas proyecciones técnico-económicas del uso del uso de hormigones eco-eficientes

## 7.1 Estudio ACV de hormigón convencional

### 7.1.1 Definición del objetivo y alcance del ACV

El **objetivo** de este ACV es el cálculo de las emisiones de CO<sub>2</sub> equivalentes que se generan en la fabricación del hormigón convencional.

La **unidad funcional** que se considera para el ACV es 1 m<sup>3</sup> de hormigón preparado a granel. Se considera un hormigón con una densidad estándar de 2.190 kg/m<sup>3</sup>, estando 1m<sup>3</sup> de hormigón preparado, antes del fraguado, compuesto por (**Figura 50**):

- 150 kg de cemento
- 1.930 kg de grava y arena
- 110 kg de agua



*Figura 50. Esquema ilustrativo de la composición de un hormigón convencional*

El **alcance** del ACV comprende desde la extracción de las materias primas hasta la salida del hormigón en la planta de elaboración, modelo “de la cuna a la puerta” (“cradle to gate”). Los límites del sistema estudiado se ilustran en el mapa de proceso de la **Figura 51**, elaborada en este trabajo.

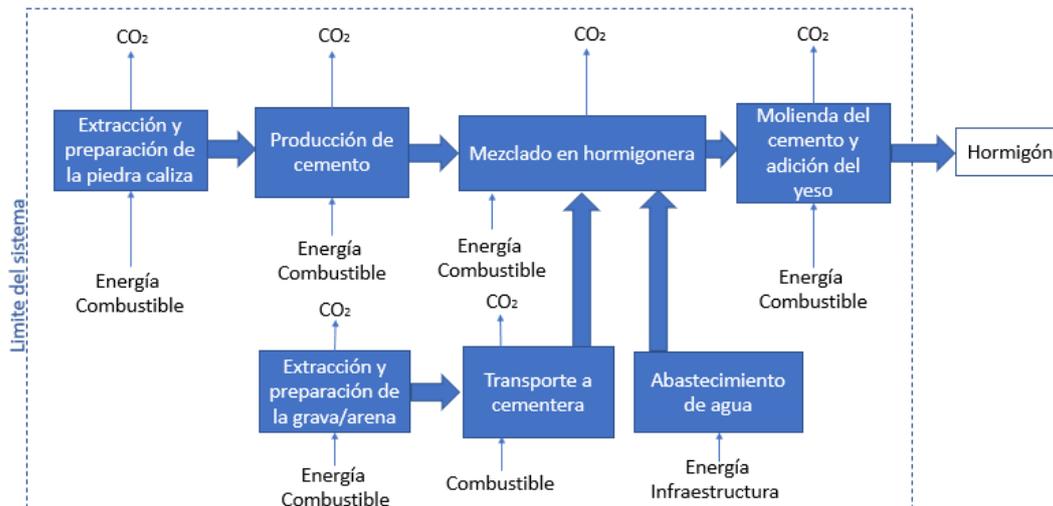


Figura 51. Mapa del proceso de la producción del hormigón convencional [Elaboración propia]

Para realizar el ACV se han considerado los componentes principales del hormigón que se han indicado, introduciéndose una **simplificación** al no considerar los aditivos plastificantes suplementarios, al variar mucho sus proporciones entre proveedores, y porque en realidad representan una parte muy pequeña (1%) en la composición del hormigón.

En cuanto al transporte de los componentes hasta la planta de hormigonado se considera que los impactos de este transporte de materias primas van a ser sensiblemente equivalentes a los correspondientes para el transporte de las materias primas de los hormigones ecoeficientes, constituyendo otra **simplificación** aceptable en la metodología ACV. En cambio, sí se ha considerado el transporte de las materias primas a la planta de fabricación de cemento.

### 7.1.2 Análisis del inventario de datos (ICV) empleado en el ACV

Los datos escogidos para este estudio provienen de la base de datos *Ecoinvent* [61] disponible en el software de SimaPro 7.2. Los conjuntos de datos de *Ecoinvent* contienen información sobre multitud de procesos industriales y agrícolas que, midiendo los recursos naturales extraídos del medio ambiente, modelan las emisiones liberadas al agua, al suelo y al aire, los productos demandados de otros procesos (electricidad) y, también, los productos, coproductos y residuos producidos.

Los datos han sido seleccionados de esta base de datos en función de su porcentaje de representatividad. Estos datos han sido:

- **Cemento:** Para el cálculo de la aportación de emisiones de CO<sub>2</sub> del cemento en el ciclo de vida de hormigón se ha escogido el material “Portland calcareous cement, at plant/CH U” de la base Ecoinvent.

En esta selección se incluyen las **emisiones** debidas a:

1. **Extracción, triturado y molienda de la piedra caliza.** Incluyendo el uso del suelo de la mina, la maquinaria y el transporte a la cementera, entre otros, como se puede leer en la **Figura 52**:

Limestone, crushed, for mill/CH S	kg	no definido	Ecoinvent system processes
Limestone, crushed, for mill/CH U	kg	no definido	Ecoinvent unit processes

Translated name: Kalkstein, gebrochen für mahlen  
 Included processes: Includes the processes: primary crushing, washing, and transportation by conveyor belt. One part of the total heating energy for "production" and "administration" is included. Equipment included in the infrastructure: 1 crusher, 1 sieve and 1 small silo.  
 Remark: Infrastructure data are estimated based on a tour and sketches of the process. The value of the infrastructure is normalized with a annual production capacity of about 145'000 tons of product per year. The estimated lifespan of the machines is 25 years. Assumed size partition of dust emissions for crushing, screening and transport processes: 50% >10µm (PM10), 45% between 10 µm and 2.5 µm, 5%<2.5 µm. The module can also be used for limestone as screened ballast or as gravel for road bed construction. 50% of the electricity consumption is covered by the grid and 50% by a hydropower plant nearby. The infrastructure for electricity transportation from power plant to KFN is not included.  
 CAS number: 001317-65-3; Formula: CaCO<sub>3</sub>; Geography: data are from only one company in Switzerland (KFN), for some exchanges RER-modules have been used as proxy  
 Technology: The company works on a technically high level; heavy machines (excl. building machines) are operated electrically; air is recirculated in closed loop to avoid dust emissions

Figura 52. Descripción en SimaPro de los procesos que abarca la piedra caliza empleada para la producción de cemento

2. **Proceso de clinkerización.** Este proceso abarca las emisiones del procesamiento del crudo en planta de cementera, las de combustión para el calentamiento del horno y conseguir así el calcinamiento de la piedra caliza, las emisiones producto de la reacción de los componentes de la mezcla que forman el clinker y el enfriamiento de este para su almacenamiento.

Clinker, at plant/CH U	kg	no definido	Ecoinvent unit processes
Concentrated lithium brine (6.7 % Li), at plant/GLO S	kg	no definido	Ecoinvent system processes

Translated name: Klinker, ab Werk  
 Included processes: includes the whole manufacturing process to produce clinker (raw material provision, grinding and mixing; rotary kiln process), internal processes (transport, etc.) and for the infrastructure only the rotary kiln (material consumption) is taken into account. No administration is included. Waste (as secondary fuel and raw material) enter the system without environmental burdens from upstream processes. Only its transports to the cement plant and its burning emissions are included.  
 Remark: Special inputs (Not taken into account as they enter the system burdenfree) are waste materials which are used as fuel (e.g. dried sludge, used oil, etc.) and as secondary raw materials (e.g. pyrite ash, building bulky goods, sludges, moulding sand, etc.). The weight of the secondary raw materials and the energy of the secondary fuels have been assessed according to specifications of the 8 cement factories in CH for 1997. The thermal value of secondary fuel (waste) is 1.22 MJ/kg clinker. The corresponding CO<sub>2</sub>-emission is 0.1047 kg/kg clinker. The amount of CO<sub>2</sub> regenerative from waste is 0.0151 and the amount of CO<sub>2</sub> fossil from waste is 0.0896 kg/kg clinker.; Geography: For some exchanges RER-modules have been used as proxy  
 Technology: typical technology for Swiss production  
 Version: 2.2  
 Synonyms: Klinker, Drehrohrofen, Zement, clinker, rotary kiln, cement  
 Energy values: Undefined  
 Percent representativeness: 100.0

Figura 53. Descripción en SimaPro de los procesos que abarca el clinker empleado para la producción de cemento

3. **Molienda final para obtener cemento:** recuperación del clinker del almacén, adición de yeso y molienda hasta obtener un polvo fino, y transporte al almacén.

Portland calcareous cement, at plant/CH U	kg	Cement	Ecoinvent unit processes
Portland cement (CEM I), CEMBUREAU technology mix, CEMBI	kg	Cement	ELCD

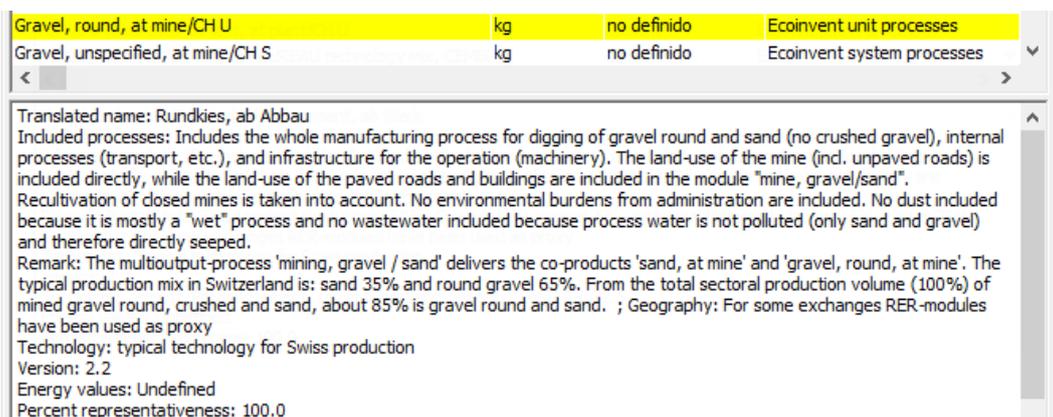
Translated name: Portlandkalksteinzement, ab Werk  
 Included processes: includes the manufacturing processes mixing and grinding, internal processes (transport, etc.) and infrastructure (specific machines and plant). No administration and no packing is included. Special inputs: additional milling substances for example dust from the cement rotary kiln, fly ash, silica dust, limestone; these are not balanced as they are wastes to which no burdens are allocated within ecoinvent.  
 Remark: Part of total Swiss cement production: 50%. Composition: gypsum 5%, additional milling substances 16%, clinker 79%;  
 Geography: For some exchanges RER-modules have been used as proxy  
 Technology: Typical technology for Swiss production  
 Version: 2.2  
 Synonyms: Zement, Portlandzement, cement, portland cement, CEM II A-L 32.5  
 Energy values: Undefined  
 Percent representativeness: 100.0

Figura 54. Selección del cemento en SimaPro que engloba el procesamiento descrito de la piedra caliza y el procesamiento mencionado del clinker

El conjunto de los valores anteriores correspondientes a las tres fases principales de fabricación del cemento **incluye** los impactos asociados a la **maquinaria de la planta**.

- **Áridos:** Para el cálculo de la aportación de emisiones de CO<sub>2</sub> de los áridos en el ciclo de vida de hormigón se ha escogido el material “Gravel, round, at mine/CH U” de la base Ecoinvent.

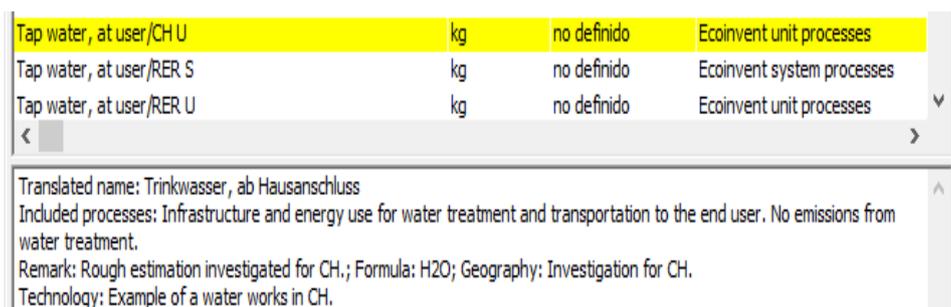
En esta selección se incluyen las emisiones debidas a todo el proceso de la excavación de grava redonda y arena, los transportes internos y la maquinaria para la explotación. Como se puede leer en la **Figura 55**:



**Figura 55.** Descripción en SimaPro de los procesos que abarca la grava empleada en la fabricación del hormigón convencional

- **Agua:** Para el cálculo de la aportación de emisiones de CO<sub>2</sub> del agua en el ciclo de vida de hormigón se ha escogido el material “Tapwater, at user/CH U” de la base Ecoinvent.

En esta selección se incluyen las emisiones medias debidas a la infraestructura y la energía empleada para el transporte de esta hasta el consumidor. Se ha escogido este dato al ser el más parecido al agua que se emplea en la fabricación ellos hormigones y que necesita pasar los análisis de potabilidad exigidos, como se explica en el Capítulo 6.



**Figura 56.** Descripción en SimaPro de los procesos que abarca el agua empleada en la fabricación del hormigón convencional

- **Maquinaria e infraestructura de la planta de hormigón:** Para el cálculo de la aportación de emisiones de CO<sub>2</sub> correspondientes a la planta hormigonera se ha escogido el material “Concrete mixing plant/CH/I U” de la base Ecoinvent.

En esta selección se incluye la maquinaria y la infraestructura empleada en una planta de fabricación de hormigón con un orden de magnitud de, aproximadamente, unas 100.000 toneladas anuales de hormigón.

Para el impacto asociado de la maquinaria y la infraestructura se ha introducido como dato de entrada en SimaPro un valor de  $2,5 \times 10^{-6}$  por cada metro cúbico de hormigón producido. Este valor se ha obtenido como resultado de comparar el impacto total del hormigón estándar que proporciona SimaPro con el impacto del hormigón obtenido como suma de los impactos de los componentes por separado. El interés de realizar el ACV con los componentes por separado es poder realizar posteriormente las sustituciones adecuadas de cada componente, cuando se introduzcan las cenizas.

Como referencia esto supone del orden del 8% de las emisiones de CO<sub>2</sub> equivalentes del hormigón.

Concrete mixing plant/CH/I U	p	no definido	Ecoinvent unit processes
<p>Translated name: Betonmischwerk          Included processes: includes the area of the infrastructure (buildings, roads, etc.) and the machines used for the ready-mixed concrete production          Remark: The lifespan of the infrastructure and the land occupation is assumed to be 50 years. The average yearly production is about 100'000 t/a; Geography: For some exchanges RER-modules have been used as proxy          Technology: The data of the infrastructure corresponds to high level of technology</p>			

**Figura 57.** Descripción en SimaPro de lo que incluye los consumos de la infraestructura de una planta hormigonera

### 7.1.3 Evaluación del impacto ambiental (EICV) de 1 m<sup>3</sup> de hormigón convencional

El método seleccionado para el cálculo de emisiones CO<sub>2</sub> equivalentes ha sido el “**Greenhouse Gas Protocol**” [62].

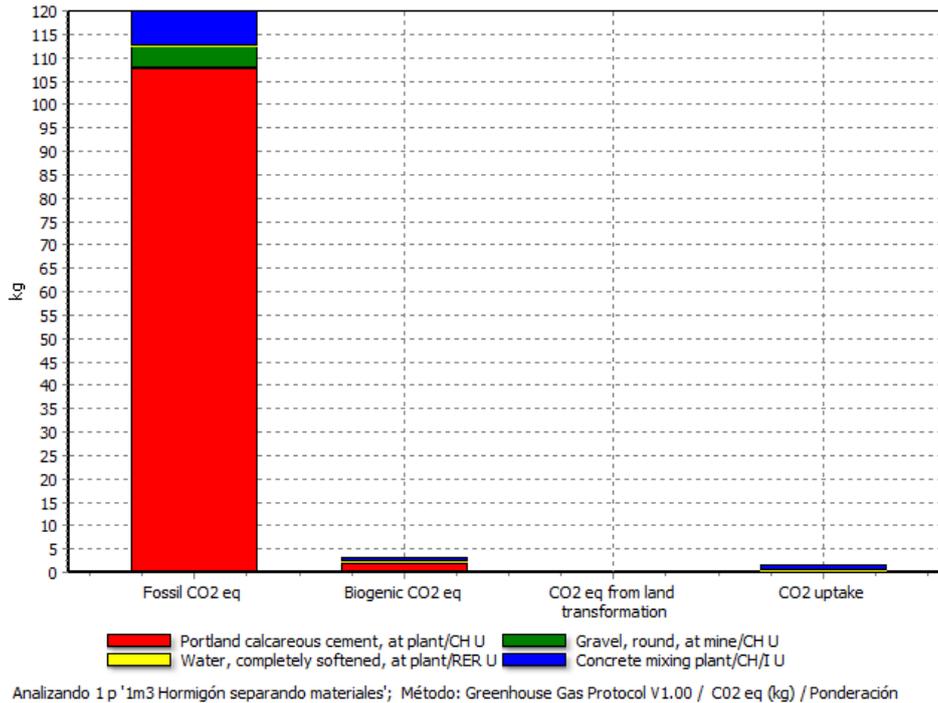
Este método cuenta utiliza los mismos factores de caracterización por sustancia que emplea el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) para la medida del impacto del cambio climático.

Se hace una distinción entre:

1. **Carbono de origen fósil:** Carbono procedente de combustibles fósiles.
2. **Carbono biogénico:** Carbono procedente de fuentes biogénicas como plantas y árboles.
3. **Carbono procedente de la transformación de la tierra:** impactos directos.
4. **Carbono absorbido:** El CO<sub>2</sub> que se almacena en las plantas y los árboles a medida que crecen.

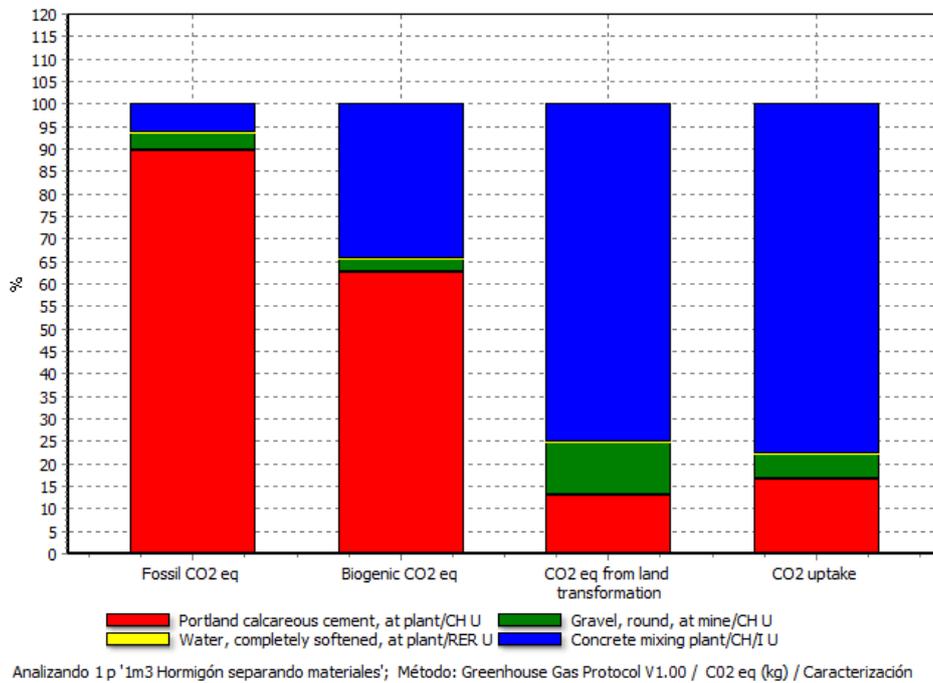
Entrando en el programa SimaPro con los datos de inventario descritos y aplicando el método de *Greenhouse Gas Protocol* se han obtenido las siguientes gráficas para el hormigón convencional, considerando la unidad funcional de 1m<sup>3</sup>.

Así, en la **Figura 58** puede verse como la cantidad de cada uno de los cuatro tipos de emisiones de CO<sub>2</sub> es muy variable en cantidad absoluta en cada uno de los componentes del hormigón convencional más las asociadas a la planta de elaboración.



**Figura 58.** Distintos tipos de emisiones absolutas de CO<sub>2</sub> en cada componente de 1 m<sup>3</sup> de hormigón convencional incluyendo la planta de elaboración, calculados con SimaPro.

Como complemento de lo anterior, en la **Figura 59** se pueden ver las aportaciones porcentuales de cada tipo de emisión de CO<sub>2</sub> en los distintos componentes del hormigón, más la contribución de la planta de elaboración del hormigón.



**Figura 59.** Aportaciones porcentuales de los distintos tipos de emisiones de CO<sub>2</sub> en cada componente del hormigón convencional incluyendo la planta

#### 7.1.4 Análisis de los resultados del ACV de 1m<sup>3</sup> de hormigón convencional

A partir de los resultados obtenidos en forma gráfica con el programa SimaPro se ha elaborado la **Tabla 13**, con los valores absolutos de las emisiones de cada uno de los tipos de CO<sub>2</sub> considerados, para la elaboración de 1 m<sup>3</sup> de hormigón convencional.

**Tabla 13.** Resultados del cálculo con SimaPro de las emisiones de CO<sub>2</sub> emitidas en la preparación de 1 m<sup>3</sup> de hormigón convencional

Categoría de impacto	Unidad	1 m <sup>3</sup> de hormigón convencional	%
CO <sub>2</sub> equivalente Fuentes fósiles	kg	120	96,2
CO <sub>2</sub> equivalente Fuentes biogénicas	kg	3,16	2,5
CO <sub>2</sub> absorbido	kg	1,54	1,2
CO <sub>2</sub> equivalente Transformación de la tierra	kg	0,00156	0,00132
<b>Total</b>	kg	<b>124,7</b>	<b>100</b>

Como se muestra en la en la **Tabla 13**, la producción de 1 m<sup>3</sup> de hormigón convencional supone la emisión a la atmósfera de **un total de 124,7 kg de emisiones de CO<sub>2</sub> equivalente**.

Estos 124,7 kg de CO<sub>2</sub> emitidos corresponden a: 110 kg asociados al **cemento** (88,2%), 9,96 kg corresponden al uso de la **infraestructura de la planta hormigonera** (8,0%), 4,8 kg corresponden a los **áridos** (3,8%), y 0,0244 kg corresponden al **agua** (0,02%).

Con estos resultados se ha elaborado la **Tabla 14**, en la que se comparan los valores correspondientes a las masas y porcentajes de cada componente del hormigón convencional, y de las correspondientes emisiones de CO<sub>2</sub> equivalente.

**Tabla 14.** Componentes del hormigón convencional y emisiones asociadas de CO<sub>2</sub> equivalente emitidas en la preparación de 1 m<sup>3</sup>

Componentes del hormigón convencional	Unidad	Masa del componente por 1 m <sup>3</sup>	%	Unidad	Emis. CO <sub>2</sub> equivalente por 1 m <sup>3</sup>	%
Cemento	kg	150	6,8%	kg	110	88,2%
Áridos	kg	1.930	88,1%	kg	4,8	3,8%
Agua	kg	110	5,0%	kg	0,0244	0,02%
Planta elaboración	-	-	-	kg	9,96	8,0%
<b>Total</b>	kg	2.190	100,0%	kg	<b>124,8</b>	100,0%

Combinando los resultados anteriores se puede ver que la **aportación en emisiones de CO<sub>2</sub> más importante es la del cemento**, que a su vez provienen casi en su totalidad de emisiones por combustión de fuentes fósiles, la cual también es la de mayor impacto entre las cuatro categorías de emisiones. Esto se debe a que se emplea carbón bituminoso para calentar el horno rotatorio donde se produce la clinkerización. Esto sugeriría que, si se lograra sustituir parte del cemento por cenizas de biomasa, se lograría un descenso de las emisiones en la misma proporción.

El segundo componente que más influye en las emisiones de CO<sub>2</sub> equivalente del hormigón son los **áridos**, si bien a mucha menor escala. También puede estar justificado actuar sobre estos, introduciendo cenizas en sustitución parcial de los mismos, para reducir las emisiones de CO<sub>2</sub>.

El tercer componente del hormigón, el **agua**, tiene un efecto generador de emisiones mucho menor.

Finalmente, el efecto generador de emisiones de la **planta de elaboración del hormigón** es significativo (8% de las emisiones totales), aunque la introducción de cenizas en la composición del hormigón no va a acarrear reducciones de las emisiones absolutas (del orden de 10 kg por m<sup>3</sup> de hormigón preparado).

A continuación, se realiza de forma análoga el Análisis de Ciclo de Vida del hormigón eco-eficiente, a fin de compararlo con los valores obtenidos para el convencional.

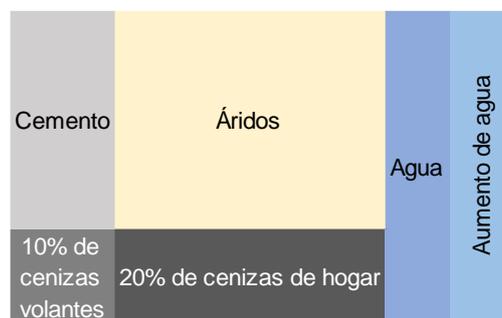
## 7.2 Estudio ACV de hormigón eco-eficiente (con cenizas de biomasa)

### 7.2.1 Definición del objetivo y alcance del ACV

El **objetivo** de este estudio de ACV es el cálculo de las emisiones de CO<sub>2</sub> equivalentes que se generan en la fabricación del hormigón eco-eficiente, descrito en el Capítulo 6, que presenta **sustituciones parciales de los componentes del hormigón**, tanto en el **cemento** como en los **áridos**, por cenizas de biomasa de la planta de generación eléctrica de Cubillos de Sil.

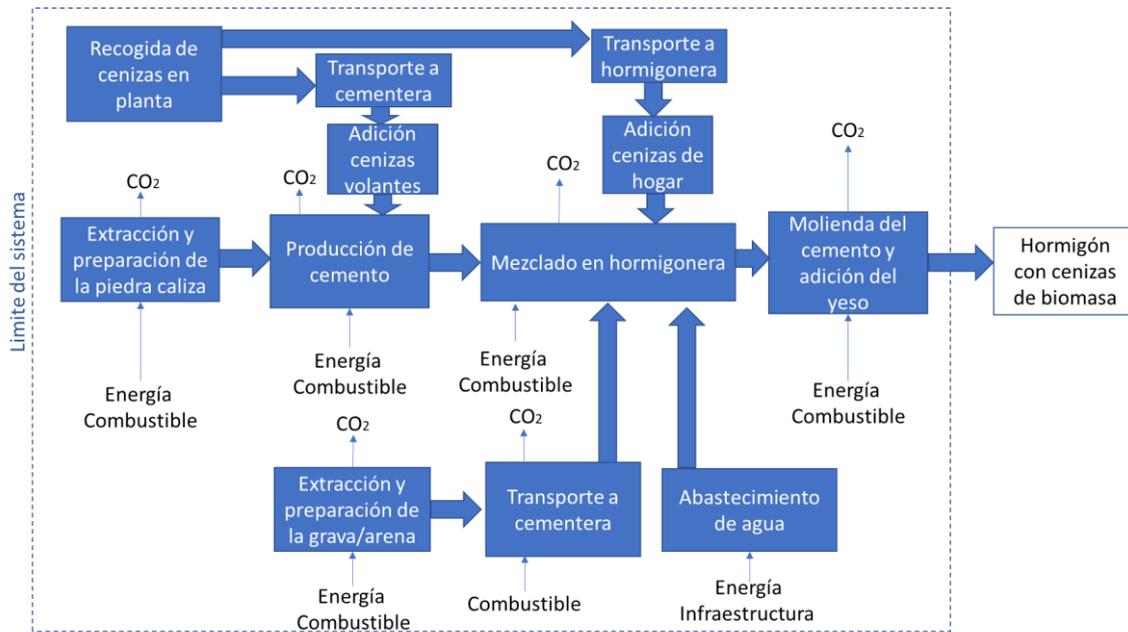
La **unidad funcional** considerada en el estudio de ACV es 1 m<sup>3</sup> de hormigón ecoeficiente preparado a granel. Se considera que 1m<sup>3</sup> de hormigón-ecoeficiente fresco está compuesto por (**Figura 60**):

- 135 kg de cemento
- 15 kg de cenizas volantes (10% de 150 kg de cemento, cantidad convencional)
- 1544 kg de grava y arena
- 386 kg de cenizas de hogar (20% de 1930 kg de grava y arena, cantidad convencional)
- 150 kg de agua (aumento de 40 kg)



**Figura 60.** Esquema ilustrativo de la composición de un hormigón eco-eficiente

De nuevo, el **alcance** de este ACV comprende desde la extracción de las materias primas hasta la salida del hormigón en la planta de producción, modelo “de la cuna a la puerta” (“cradle to gate”), como se muestra en el mapa de procesos de la **Figura 61**:



**Figura 61.** Mapa del proceso de la producción del hormigón eco-eficiente con cenizas de biomasa [Elaboración propia]

Para poder realizar este ACV se han adoptado las siguientes **simplificaciones**:

- En la fabricación del hormigón se tienen en cuenta los materiales principales: agua, arena y cemento. No entran dentro del estudio los aditivos plastificantes suplementarios.
- Las cenizas se consideran en el ACV como residuos, por lo que no acarrearán cargas medioambientales procedentes de los procesos ambientales en su ciclo de vida anterior (según norma ISO 14040/42).
- Se ha considerado que el transporte de las cenizas volantes hasta la cementera y de las cenizas de hogar hasta la planta de hormigonado se compensa con el transporte evitado al vertedero y el impacto ambiental del almacenamiento evitado de estos residuos.
- Análogamente al caso del hormigón convencional, el impacto del transporte de los componentes hasta la planta de hormigones eco-eficientes va a ser sensiblemente equivalente al transporte de las materias primas de los hormigones convencionales.

### 7.2.2 Análisis del inventario (ICV) empleado en el ACV

El **inventario** de datos de ciclo de vida empleado en este ACV es el mismo que el empleado para el ACV del hormigón convencional. Lo que cambia es la cantidad que se aporta de cemento y de áridos, que se reduce, y de agua, que se aumenta.

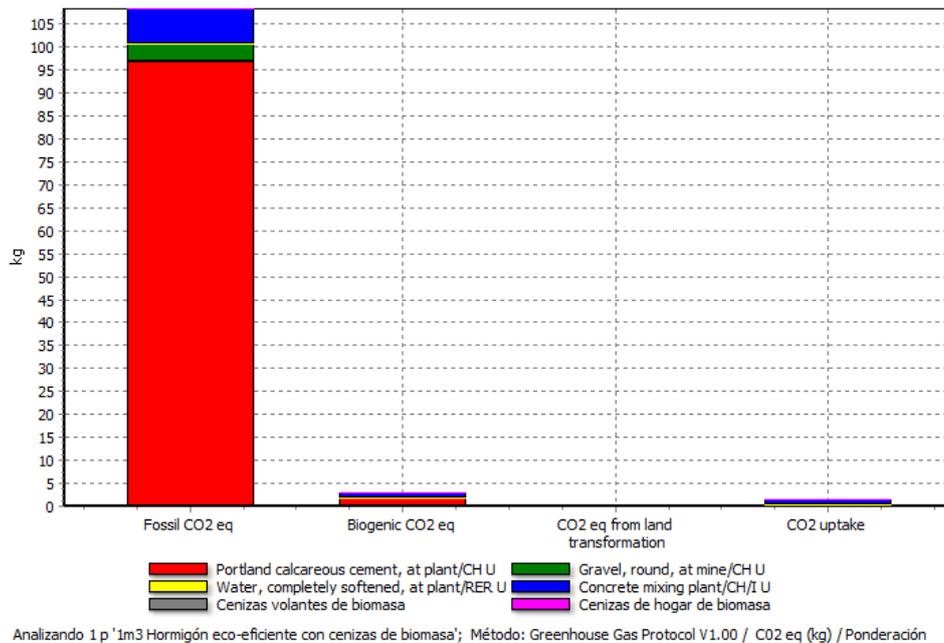
Como se han indicado al hablar de las simplificaciones, las cenizas de biomasa, volantes y de hogar, se han introducido en el ACV con un impacto ambiental nulo.

### 7.2.3 Evaluación del impacto ambiental (EICV) de 1m<sup>3</sup> de hormigón eco-eficiente

El método seleccionado para el cálculo de emisiones CO<sub>2</sub> ha sido el mismo que para el ACV del hormigón convencional, el “*Greenhouse Gas Protocol*”:

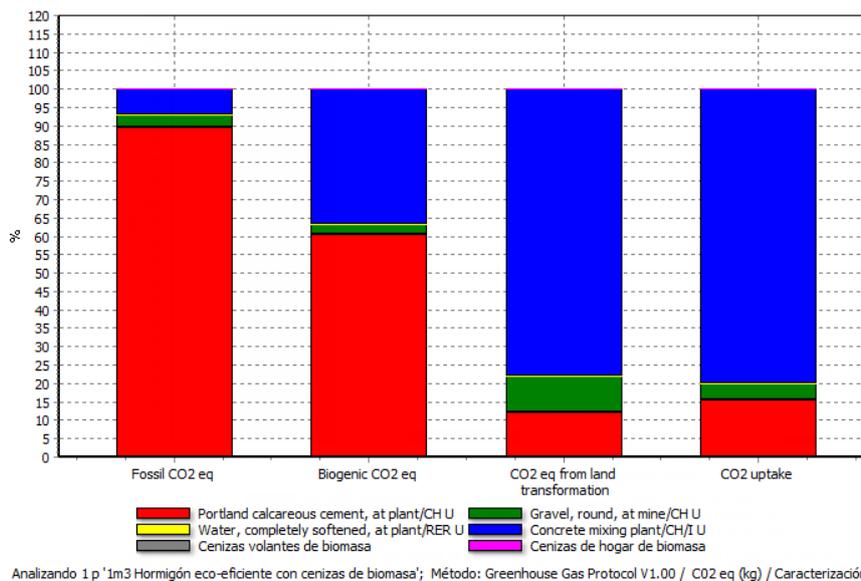
Entrando en el programa SimaPro con los datos de inventario descritos y aplicando el método mencionado se han obtenido las siguientes figuras.

En la **Figura 62** pueden verse las cantidades de cada uno de los cuatro tipos de emisiones de CO<sub>2</sub> que se indicaron en el Apartado 7.1.3, Como en el caso del hormigón convencional, estas cantidades resultan muy variables en cada uno de los componentes del hormigón eco-eficiente más la contribución de la planta de elaboración.



**Figura 62.** Distintos tipos de emisiones absolutas de CO<sub>2</sub> en cada componente de 1 m<sup>3</sup> de hormigón eco-eficiente incluyendo la planta de elaboración, calculados con SimaPro.

En la **Figura 63** se pueden ver las aportaciones porcentuales de cada tipo de emisión de CO<sub>2</sub> en los distintos componentes del hormigón, más la contribución de la planta de elaboración del hormigón.



**Figura 63.** Aportaciones porcentuales de los distintos tipos de emisiones de CO<sub>2</sub> en cada componente del hormigón eco-eficiente, incluyendo la planta

## 7.2.4 Análisis de los resultados del ACV de 1m<sup>3</sup> de hormigón eco-eficiente

A través de los gráficos obtenidos con el programa SimaPro se ha elaborado la **Tabla 15**.

**Tabla 15.** Resultados del cálculo con SimaPro de las emisiones de CO<sub>2</sub> emitidas en la preparación 1 m<sup>3</sup> de hormigón eco-eficiente con cenizas de biomasa

Categoría de impacto	Unidad	1 m <sup>3</sup> de hormigón ecoeficiente con cenizas de biomasa	%
CO <sub>2</sub> equivalente Fuentes fósiles	kg	108	96,0
CO <sub>2</sub> equivalente Fuentes biogénicas	kg	2,94	2,6
CO <sub>2</sub> absorbido	kg	1,5	1,33
CO <sub>2</sub> equivalente Transformación de la tierra	kg	0,0015	0,0013
<b>Total</b>	kg	<b>112,4</b>	100

Como se muestra en la **Tabla 15**, en la producción de 1 m<sup>3</sup> de hormigón eco-eficiente se emite a la atmósfera un **total de 112,4 kg de emisiones CO<sub>2</sub> equivalentes**.

Estos 112,4 kg de CO<sub>2</sub> emitidos corresponden a: 98,6 kg asociados al **cemento** (87,7%), 9,96 kg corresponden al uso de la **infraestructura de la planta hormigonera** (8,9%), 3,84 kg corresponden a los **áridos** (3,4%), 0,0333 kg corresponden al **agua** (0,03%) y 0 kg a las **cenizas de biomasa**.

Con estos resultados se ha elaborado la **Tabla 16**, en la que se comparan los valores correspondientes a las masas y porcentajes de cada componente del hormigón eco-eficiente, en el que parte del cemento (10%) se sustituye por cenizas volantes, y parte de los áridos (20%) se sustituye por cenizas de hogar), y se aumenta la cantidad de agua necesaria (36%). Además, se indican las correspondientes emisiones de CO<sub>2</sub> equivalente asociadas a cada componente y a la propia planta de elaboración de hormigón.

**Tabla 16.** Componentes del hormigón eco-eficiente y emisiones asociadas de CO<sub>2</sub> equivalente emitidas en la preparación de 1 m<sup>3</sup>

Componentes del hormigón eco-eficiente	Unidad	Masa del componente por 1 m <sup>3</sup>	%	Unidad	Emis. CO <sub>2</sub> equivalente por 1 m <sup>3</sup>	%
Cemento	kg	135	6,1%	kg	98,6	87,7%
Cenizas volantes	kg	15	0,7%	kg	0	0,0%
Áridos	kg	1.544	69,2%	kg	3,84	3,4%
Cenizas de hogar	kg	386	17,3%	kg	0	0,0%
Agua	kg	150	6,7%	kg	0,0333	0,03%
Planta elaboración	-	-	-	kg	9,96	8,9%
<b>Total</b>	kg	2.230	100,0%	kg	<b>112,4</b>	100,0%

Comparando estos resultados con el ACV de 1m<sup>3</sup> de hormigón convencional se puede ver que hay una **reducción de 12,4 kg de CO<sub>2</sub>** por cada **m<sup>3</sup> de hormigón eco-eficiente** (9,9% ~ 10%) solamente habiendo introducido el residuo de las cenizas en su composición.

Esto puede parecer una reducción baja de emisiones, pero si se consideran las cantidades que se manejan en cualquier tipo de construcción se puede producir un ahorro importante en términos absolutos.

### 7.2.5 Consideración de otras alternativas para introducir las cenizas de biomasa por separado en hormigones eco-eficientes

Con el fin de evaluar otras alternativas para introducir las cenizas de biomasa en la formulación del cemento o del hormigón, se han planteado otros dos estudios generales de ACV en los que se sustituye una parte de un solo componente. En el **hormigón eco-eficiente tipo C** se sustituye sólo parte del cemento (manteniendo la composición estándar de los áridos). En el **hormigón eco-eficiente tipo A** se sustituye sólo parte de los áridos (manteniendo el cemento estándar). Se plantea para los máximos porcentajes de sustitución admisibles, puesto que con estos se conseguirá el mayor ahorro de emisiones de CO<sub>2</sub>. Los porcentajes de sustitución de todas las alternativas consideradas se recogen en la **Tabla 17**:

*Tabla 17. Tabla con los porcentajes de sustitución de cenizas de biomasa de las cuatro alternativas planteadas.*

Tipo de hormigón Tipo sustitución de cenizas biomasa	Convencional	Tipo C	Tipo A	Eco-eficiente (C+A)
Sustitución cemento	0%	10%	0%	10%
Sustitución árido	0%	0%	20%	20%

Siguiendo los mismos pasos que se han hecho para el cálculo de emisiones del hormigón convencional y del hormigón eco-eficiente, se obtienen los resultados presentados en la **Tabla 18** para las otras dos alternativas:

*Tabla 18. Resumen de los resultados del cálculo de emisiones de CO<sub>2</sub> equivalentes para cada una de las alternativas*

Tipo de hormigón	$\frac{kg\ CO_2\ equivalentes}{m^3\ hormigón}$	Valor absoluto de kg de CO <sub>2</sub> ahorrados	% reducción respecto al convencional	Opción más interesante
Convencional	124,7	ref	ref	-
Tipo A	123,7	1,0	0,8	+
Tipo C	113,4	11,3	9,06	++
Eco-eficiente (C+A)	112,4	12,3	9,86	+++

Gracias a este análisis se puede apreciar que la **sustitución parcial más efectiva** es la del **cemento por cenizas volantes (Tipo C)**, frente al pequeño ahorro que supone sustituir sólo los áridos (Tipo A).

Por otro lado, queda claro que la opción más interesante en cuanto a ahorro de emisiones es la del hormigón eco-eficiente, planteada en el apartado 7.2. Por este motivo, esta opción es la que se va a considerar en la aplicación planteada en el siguiente apartado, en la que se realiza una comparación del impacto ambiental asociado a un carril bici construido con hormigón convencional frente a otro construido con hormigón eco-eficiente.

## 7.3 Aplicación de hormigón eco-eficiente para un carril bici y comparación con hormigón convencional

### 7.3.1 Definición del objetivo y alcance del estudio ACV comparativo

En la aplicación planteada en este apartado para el pavimento de un carril bici utilizando hormigón eco-eficiente, el **objetivo** es evaluar la reducción absoluta de emisiones de CO<sub>2</sub> equivalentes frente al uso del hormigón convencional.

La **unidad funcional** de este ACV comparativo es el volumen necesario de hormigón para pavimentar un carril bici que se va a construir próximamente en Ponferrada. Este carril bici va a ser de 8km de longitud y aproximadamente 2,5 m de ancho.

Se ha asumido una capacidad de soporte de la explanada media y una monocapa de 16 cm de profundidad como viene en la Guía Técnica del Instituto Español del cemento y sus aplicaciones (IECA) para los carriles bici con pavimentos de hormigón [63]. Se ha considerado que el volumen del hormigón fresco que se tiene que verter para construir este pavimento es de:

$$8.000 \text{ m de longitud} \cdot 2,5 \text{ m de ancho} \cdot 0,16 \text{ m de espesor} = 3.200 \text{ m}^3$$

Por ello, la unidad funcional corresponde a 3.200 m<sup>3</sup> de hormigón. Se evalúan en primer lugar las emisiones correspondientes al uso del hormigón convencional y a continuación las correspondientes al hormigón eco-eficiente, comparándose entonces las dos alternativas.

El **alcance** del ACV comprende desde la extracción de las materias primas hasta la salida del hormigón en la planta de producción, modelo “de la cuna a la puerta” (“cradle to gate”).

En este ACV comparativo se incluyen las **simplificaciones** asumidas en los dos ACV anteriores y se añade otra más. No se tiene en cuenta el transporte asociado desde la planta hormigonera hasta el lugar de puesta en obra al suponerse que sería el mismo para ambos casos.

### 7.3.2 Análisis del inventario de datos empleado en el ACV

El inventario empleado para este ACV comparativo es el mismo que se ha empleado para los dos ACV presentados anteriormente.

*Tabla 19. Cantidades de materiales utilizadas para construir el carril bici con cada uno de los dos hormigones*

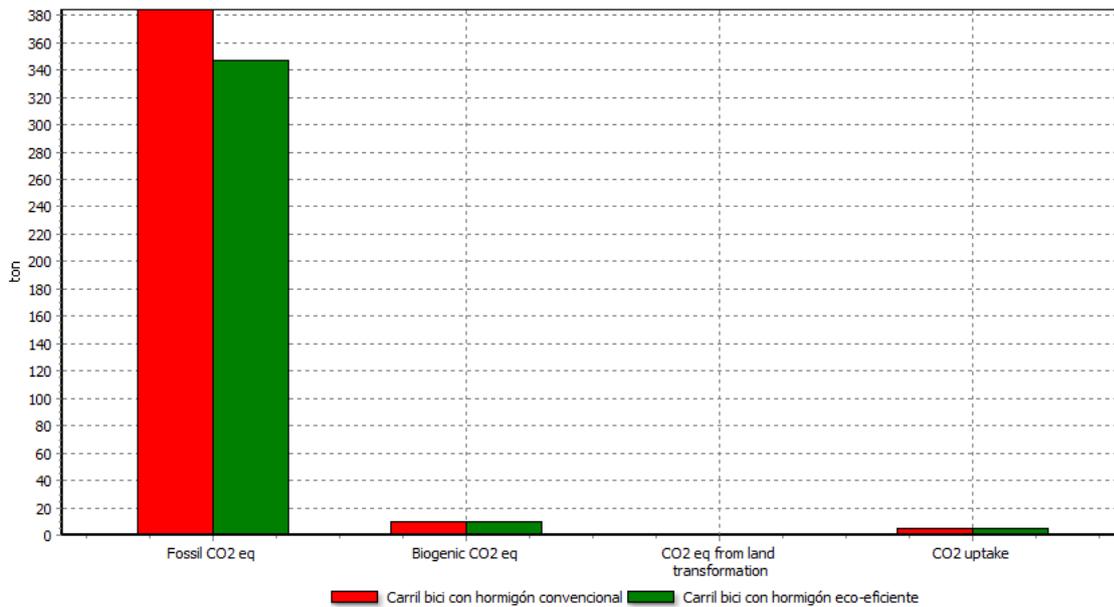
Tipo de hormigón Componente	Convencional (kg)	Eco-eficiente (kg)
<b>Cemento</b>	480.000	432.000
<b>Cenizas volantes</b>	0	48.000
<b>Áridos</b>	6.176.000	4.940.800
<b>Cenizas de hogar</b>	0	1.235.200
<b>Agua</b>	352.000	480.000

A través de la **Tabla 19** se puede ver que las cantidades de cenizas necesarias para el carril bici con hormigón eco-eficiente serían de 48 toneladas de cenizas volantes (incorporadas en sustitución del 10% del cemento) y de 1.235 toneladas de cenizas de fondo (incorporadas en sustitución del 20% de los áridos del hormigón).

### 7.3.3 Comparación del impacto ambiental del pavimento de un carril bici de hormigón convencional frente a uno de hormigón eco-eficiente

El método seleccionado para el cálculo de emisiones CO<sub>2</sub> ha sido el mismo que para los dos ACVs previos, el “Greenhouse Gas Protocol”:

Entrando en el programa SimaPro con los datos de inventario descritos y aplicando el método mencionado, se han obtenido la **Figura 64** que compara los resultados de las dos alternativas para el pavimentado de un carril bici, hormigón convencional (rojo) y hormigón eco-eficiente (verde).



Comparando 1 p 'Carril bici con hormigón convencional' con 1 p 'Carril bici con hormigón eco-eficiente'; Método: Greenhouse Gas Protocol V1.00 / CO<sub>2</sub> eq (kg) / Ponderación

**Figura 64.** Comparación de las emisiones de CO<sub>2</sub> generadas en la producción del pavimento para el carril bici con hormigón convencional frente al hormigón eco-eficiente

### 7.3.4 Análisis de los resultados de la comparativa

A partir de los resultados de los gráficos obtenidos con el programa SimaPro se puede elaborar la **Tabla 20**.

**Tabla 20.** Comparación de los resultados de emisiones de CO<sub>2</sub> generadas en la producción del pavimento para el carril bici con hormigón convencional frente al hormigón eco-eficiente.

Categoría de impacto	Unidad	1 m <sup>3</sup> de hormigón convencional	1 m <sup>3</sup> de hormigón eco-eficiente
CO <sub>2</sub> equivalente Fuentes fósiles	kg	384.000	347.000
CO <sub>2</sub> equivalente Fuentes biogénicas	kg	10.100	9.420
CO <sub>2</sub> absorbido	kg	4.940	4810
CO <sub>2</sub> equivalente Transformación de la tierra	kg	4,98	4,8
<b>Total</b>	kg	<b>399.000</b>	<b>361.000</b>

Comparando los resultados que aparecen en la **Figura 64** y en la **Tabla 20** puede apreciar que se consigue un **ahorro de 38 toneladas de emisiones de CO<sub>2</sub>** (9,52%) equivalentes al hacer el pavimento del carril bici con el hormigón eco-eficiente que incluye sustituciones parciales del cemento y los áridos por cenizas de biomasa.

## 7.4 Proyecciones técnico-económicas sobre el uso de cenizas de biomasa

### Estimaciones a nivel nacional del uso del hormigón eco-eficiente

Con los planteamientos generales de las emisiones de CO<sub>2</sub> asociadas a un metro cúbico de hormigón convencional y un metro cúbico de hormigón eco-eficiente, se pueden obtener unos resultados estimados a partir de la **demanda nacional de hormigón**.

Según la Asociación Nacional Española de Fabricantes de Hormigón Preparado (ANEFHOP), en 2021 la industria del hormigón en España tuvo una producción de alrededor de **25 millones de metros cúbicos de hormigón convencional** [64].

Aplicando los resultados de CO<sub>2</sub> obtenidos con el planteamiento de 1 m<sup>3</sup> de hormigón convencional, se puede considerar que los 25 millones de m<sup>3</sup> producidos en 2021 emitieron una cantidad estimada de:

$$25 \text{ M} \frac{\text{m}^3 \text{ hormigón}}{\text{año}} \cdot 124,7 \frac{\text{kg de CO}_2 \text{ equivalente}}{\text{m}^3 \text{ hormigón convencional}} = 3.117 \text{ M} \frac{\text{kg CO}_2 \text{ equivalente}}{\text{año}}$$

Si esta cantidad de hormigón fuese fabricada con la sustitución parcial de sus componentes por cenizas de biomasa, con la opción del hormigón eco-eficiente, se lograrían ahorrar un total de:

$$\begin{aligned} 25 \text{ M} \frac{\text{m}^3 \text{ hormigón}}{\text{año}} \cdot 12,3 \frac{\text{kg ahorrados de CO}_2 \text{ equivalente}}{\text{m}^3 \text{ hormigón eco - eficiente}} \\ = 307,5 \text{ M} \frac{\text{kg ahorrados de CO}_2 \text{ equivalente}}{\text{año}} \end{aligned}$$

Es decir, se lograría un ahorro de 307,5 millones de kg de emisiones de CO<sub>2</sub> (9,86%) equivalente al incluir las cenizas de biomasa en la composición del cemento y del hormigón siguiendo los porcentajes planteados en este estudio.

Como se ha planteado, cada metro cúbico de hormigón eco-eficiente requiere 401 kg de cenizas de biomasa. Esta proporción trasladada a la producción anual nacional de hormigón correspondería a un total anual de 10.025 M de toneladas de cenizas necesarias.

Según el Ministerio de Fomento, considerando la capacidad de consumo de biomasa del **año 2014**, se estimó un total de **120.000 toneladas de cenizas** de biomasa al año [65], de los cuales aproximadamente un **65% corresponde a cenizas volantes** y un **35% a cenizas de fondo**. Por lo que no se tendría la capacidad de cubrir la demanda de hormigón española con hormigón eco-eficiente, aunque es posible que debido al incremento en los últimos años del número de plantas de biomasa se pueda contar con una cifra más elevada.

Si bien es verdad que se puede calcular el volumen de hormigón que podría absorber esta cantidad total de cenizas de biomasa que se producen cada año:

$$\begin{aligned} 120.000 \frac{\text{t cenizas}}{\text{año}} \cdot 0,65 &= 78.000 \frac{\text{t cenizas volantes}}{\text{año}} \\ 120.000 \frac{\text{t cenizas}}{\text{año}} \cdot 0,35 &= 42.000 \frac{\text{t cenizas de hogar}}{\text{año}} \end{aligned}$$

Sabiendo la cantidad de cenizas de cada tipo que se necesitan por cada metro cúbico de hormigón eco-eficiente (15 kg de cenizas volantes y 384 kg de cenizas de hogar) se pueden calcular el volumen de este material que se podría fabricar con la disponibilidad total de cenizas en España. Se va a calcular con cada tipo de cenizas para saber cuál de los dos tipos es el limitante:

$$78.000 \frac{t \text{ cenizas volantes}}{\text{año}} \cdot \frac{1}{15} \frac{m^3 \text{ de hormigón eco – eficiente}}{kg \text{ de cenizas volantes}}$$

$$= 5.200.000 \frac{m^3 \text{ hormigón eco – eficiente}}{\text{año}}$$

$$42.000 \frac{t \text{ cenizas volantes}}{\text{año}} \cdot \frac{1}{386} \frac{m^3 \text{ de hormigón eco – eficiente}}{kg \text{ de cenizas de hogar}}$$

$$= 108.808 \frac{m^3 \text{ hormigón eco – eficiente}}{\text{año}}$$

Se puede ver que el componente limitante son las cenizas de hogar. Sin embargo, a través de los análisis ACV realizados se ha demostrado que la sustitución de los áridos por cenizas hogar representa una reducción de las emisiones de CO<sub>2</sub> equivalentes muy baja (0,8%) frente a la reducción que acarrea la sustitución del cemento por cenizas volantes (9,06%). Por lo que se podría considerar producir **5.200.000 m<sup>3</sup> de hormigón eco-eficiente**, de los cuales **108.808 m<sup>3</sup>** podrían integrar **ambas cenizas**, y los **5.091.192 m<sup>3</sup> restantes** integrando **sólo las cenizas volantes** puesto que tendría un valor de reducción similar al que se consigue con el empleo de ambas cenizas (9,86%).

De esta manera se lograría **embeber todos los residuos de la combustión de biomasa** que se generan en España lográndose un ahorro en emisiones equivalente a:

$$108.808 \frac{m^3 \text{ convencional}}{\text{año}} \cdot 12,3 \frac{kg \text{ ahorrados de CO}_2 \text{ equivalente}}{m^3 \text{ hormigón eco – eficiente}}$$

$$= 1,34 \text{ M} \frac{kg \text{ ahorrados de CO}_2 \text{ equivalente}}{\text{año}}$$

$$5.091.192 \frac{m^3 \text{ convencional}}{\text{año}} \cdot 11,3 \frac{kg \text{ ahorrados de CO}_2 \text{ equivalente}}{m^3 \text{ hormigón sólo con cenizas volantes}}$$

$$= 57,53 \text{ M} \frac{kg \text{ ahorrados de CO}_2 \text{ equivalente}}{\text{año}}$$

Empleando todas las cenizas de biomasa que se producen en España cada año en la formulación de hormigones eco-eficientes se lograrían **un total de 58,87 M de kg ahorrados de CO<sub>2</sub> equivalente**.

Cabe destacar que en la normativa vigente sólo está permitido el uso de residuos en los hormigones no portantes. Se puede estimar que de los 25 M m<sup>3</sup> hormigón que se producen cada año en España, una quinta parte está destinada a hormigones no portantes, por lo que esta demanda estaría cubierta con los 5.200.000 m<sup>3</sup> de la alternativa eco-eficiente y, al mismo tiempo, se estarían evitando 120kt de residuos de combustión de biomasa.

Adicionalmente a las cantidades totales calculadas, es necesario realizar algunas estimaciones económicas asociadas.

#### Beneficios económicos del uso de cenizas en el carril bici de Ponferrada

En la Economía Circular no sólo es importante lograr un producto de menor impacto ambiental sino también que sea una solución **interesante a nivel económico**. Según Forestalia, en la planta de Cubillas del Sil se paga una media de **25 € por tonelada de cenizas depositada en el vertedero**.

En el caso de la **aplicación planteada para el carril bici**, se ha estimado una cantidad necesaria de cenizas de 1,283 toneladas, de las cuales 48 toneladas son cenizas volantes y 1235 toneladas cenizas de hogar. El coste de deposición de estos residuos de la planta equivale a 32.075 €. Si para la **planta de biomasa de Cubillas del Sil**, en lugar de depositar las cenizas en un vertedero, se lograra crear un

bucle de Economía Circular en el que se cediesen las cenizas a una planta hormigonera de la zona, se estarían **ahorrando los 32.075 €** y, al mismo tiempo, estarían favoreciendo la conservación del medio ambiente.

De la misma forma, por su lado la **hormigonera** estaría evitando consumir 48 toneladas de cemento, con un coste estimado de 172,4€/t cemento, lo que se traduce en un gasto de alrededor de los 8.300€. Así mismo, evitaría también consumir 1.235 toneladas de áridos, que tienen un coste estimado de **4,5 €/t áridos**, lo que corresponde a un gasto de 5.557€.

Esto quiere decir que la planta hormigonera lograría un **ahorro total de 13.857€** al producir el volumen necesario para la **aplicación del carril bici** si se optase por la alternativa del hormigón eco-eficiente.

Con este ejemplo queda demostrado el **interés ecológico y económico** que ofrece adaptar la economía actual a una Economía Circular en la que las industrias cooperan beneficiándose ambas partes y reduciendo al mismo tiempo su impacto en el planeta.

# CAPÍTULO 8. CONCLUSIONES Y SUGERENCIAS DE DESARROLLOS FUTUROS

## 8.1 Conclusiones

Durante el desarrollo de este Trabajo de Fin de Máster se han generado una serie de **conclusiones**, presentándose a continuación las más importantes, agrupadas en dos grupos, primero las conclusiones **generales** y luego las conclusiones **específicas**.

En cuanto a las **conclusiones generales** se pueden citar las siguientes:

- El modelo de la **Economía Circular** impulsa el uso de los recursos extraídos de la Naturaleza lo máximo posible, teniendo como objetivo disminuir las emisiones y la extracción de materias primas. En la actualidad este modelo ha adquirido una gran importancia y va a tener un gran desarrollo en los próximos años gracias a acciones políticas como el PERTE de Economía Circular.
- El **sector de la construcción** es uno de los más contaminantes, por el volumen de emisiones que genera, pero cuenta con un amplio margen de optimización mediante la aplicación de los conceptos de la Economía Circular para lograr los objetivos de la **descarbonización** del sector en 2030 y 2050.
- La **metodología del Análisis de Ciclo de Vida** (ACV) permite evaluar de forma estandarizada, rigurosa y completa los impactos ambientales asociados a distintas alternativas para poder compararlas y escoger la opción menos contaminante y así poder cumplir los objetivos de la Economía Circular (cero emisiones).
- Existen distintas **herramientas informáticas** que facilitan la evaluación ACV, entre las que se ha elegido para este trabajo la denominada **SimaPro 7.2**, accesible a través de una licencia de la Universidad de Valladolid.
- Dentro de las posibles alternativas para descarbonizar la construcción, los **hormigones eco-eficientes** tienen un gran potencial al considerarse diversos residuos en su formulación, lo cual disminuye su huella de carbono. Las características que deben cumplir dichos residuos están recogidas en distintas **normas UNE** y ya se están aplicando en los nuevos proyectos.
- Las indudables ventajas de la utilización de la biomasa para uso energético promueven el desarrollo de plantas de generación eléctrica y/o térmica y, por ello, la **producción de cenizas de biomasa como residuo** de dichas plantas.
- Las cenizas de las plantas de biomasa en sus dos formas, **cenizas de hogar y cenizas volantes**, presentan gran interés para su uso en la formulación de hormigones eco-eficientes, con sustitución parcial de los áridos y del cemento, así como Biofertilizantes.

En cuanto a las **conclusiones específicas** que se derivan de los aspectos concretos de este trabajo, se pueden citar:

- A partir del consumo de biomasa como combustible de la planta de Cubillos de Sil y de sus características de proceso se ha hecho un **balance de cálculo de la generación de cenizas** resultando un flujo de 3.611 t/año de cenizas de hogar y de 1.541 t/año de cenizas volantes, con un total de 6 t/año de partículas finas emitidas en los humos de salida a través de la chimenea.

- Mediante los resultados de los análisis físicos y químicos de las cenizas de la central térmica de Cubillos de Sil, se ha podido ver que las **cenizas son favorables para su uso en hormigones**, ya que cumplen las correspondientes normas exigidas.
- La aplicación de ACV a un **hormigón convencional** conduce a un valor de las **emisiones de CO<sub>2</sub> equivalentes de 124,7 kg/m<sup>3</sup>** de hormigón.
- Se han considerado **tres alternativas para la incorporación de las cenizas de biomasa** en la formulación de los hormigones eco-eficientes: sustitución sólo de **áridos** (20%), sustitución sólo **cimento** (10%) o **sustitución conjunta** (con los mismos porcentajes).
- Dado que el principal **ahorro de emisiones** se produce por la sustitución parcial del 10% de cemento, estas alternativas **se ordenan de esta forma**, en cuanto a ahorro de emisiones de CO<sub>2</sub> equivalentes: **Conjunta** (12,3 kg/m<sup>3</sup> de hormigón), **sólo cemento** (11 kg/m<sup>3</sup> de hormigón) y **sólo áridos** (1 kg/m<sup>3</sup> de hormigón).
- Los valores anteriores de ahorro de emisiones respecto al hormigón convencional se pueden presentar de **forma porcentual**, como la reducción de la huella de carbono alcanzada, resultando ser del **9,86% para la sustitución conjunta, 9,06% para la sustitución sólo de cemento y 0,8% para la sustitución sólo de áridos**.
- Se ha visto que los **hormigones eco-eficientes** requieren **más consumo de agua**, pero su impacto es mucho menor respecto al de los otros componentes representando un **0,03% de las emisiones**.
- En la aplicación realizada para el **pavimento de un carril bici**, de 8 km de longitud, se han comparado las cifras de las emisiones asociadas al uso de hormigón eco-eficiente frente al hormigón convencional y resulta **un ahorro de 38 t de emisiones de CO<sub>2</sub> equivalentes**.
- Desde el punto de vista económico, el **ahorro económico asociado por no enviar a vertedero las cenizas** como residuo es de 25 €/t que en el caso del carril bici es de **32.075 €** para la central de biomasa de Cubillos de Sil.
- De la misma forma, el **ahorro económico asociado por utilizar las cenizas volantes y de hogar como componente parcial** del hormigón para la hormigonera es de **13.857 €**, tomando como costes 172,4 €/t de cemento y 4,5 €/ t de áridos.
- Se ha estimado, con los **datos resultantes de los análisis ACV realizados**, la emisión de **3.117 kt de emisiones de CO<sub>2</sub> equivalentes al año** asociadas a la producción de la **demanda nacional** de hormigón convencional.
- Además, en caso de que **toda la demanda nacional** de hormigón convencional pudiera ser **sustituida por la alternativa del hormigón eco-eficiente**, se ha estimado que se podría conseguir un **ahorro de 307,5 kt/año de emisiones de CO<sub>2</sub> equivalentes**.
- También, con la **disponibilidad a nivel nacional de cenizas de biomasa**, 120 kt/año de cenizas, se ha calculado que se podrían **reutilizar todos estos residuos produciendo un total de 5,2 Mm<sup>3</sup> de hormigón eco-eficiente**, logrando un ahorro en emisiones de **58,87 kt/año** de emisiones de CO<sub>2</sub> equivalentes.

En cuanto a las **principales aportaciones del autor** de este Trabajo Fin de Master, hay que resaltar:

- El **análisis de la situación de la Economía Circular en España** en la actualidad y su proyección de desarrollo a corto plazo.
- La **síntesis de la normativa de Análisis de Ciclo de Vida** y elección de una herramienta informática para facilitar su aplicación.
- La **revisión realizada sobre las características físico-químicas de las cenizas de biomasa** y su compatibilidad como sustitutivos parciales de algunos componentes de los hormigones.
- La **utilización de la herramienta SimaPro 7.2** para la comparación de los tipos de hormigón convencional y eco-eficiente, considerando distintas alternativas en su formulación, desde el punto de vista de las emisiones de CO<sub>2</sub> equivalentes.

## 8.2 Sugerencias para desarrollos futuros

A continuación, se indican algunas líneas de trabajo futuro a fin de continuar los desarrollos llevados a cabo dentro del ámbito de este Trabajo Fin de Máster:

- Supervisar la próxima construcción del carril bici de Ponferrada con el hormigón eco-eficiente formulado de acuerdo con lo definido en este TFM.
- Realizar un **seguimiento del estado y evolución** con el paso del tiempo del **pavimento del carril bici con hormigón eco-eficiente**, siendo muy importante los hitos temporales de un año, dos años y cinco años desde su construcción.
- Evaluación del empleo de cenizas de biomasa en hormigones eco-eficientes para aplicaciones de mayor volumen.
- Realizar un seguimiento del uso de los dos tipos de cenizas de biomasa generados en las centrales térmicas de biomasa que se irán implantando en el país, para conocer su aplicación en otros usos como puede ser su empleo para la recuperación de suelos estériles (tecnosuelos o tecnosoles) o como Biofertilizantes.

## BIBLIOGRAFÍA

### Libros

- [25] Van Swaaij, Kersten y Palz. “*Biomass power for the world*”. Capítulo 1: *Overview of Energy from Biomass for nonexperts*. 2015.
- [27] Van Loo, S. and Koppejan, J. “*The Handbook of Biomass Combustion and Co-Firing*”. 2008.
- [30] Aguilar Rodríguez, M.. “Criterios de Diseño de Plantas Termoeléctricas”. Ed. Limusa. 1981.
- [38] Velázquez Martí, B. “*Aprovechamiento de la biomasa para uso energético*”. Reverté. 2018
- [49] A. León-Velez y V. Guillén-Mena. “*Energía contenida y emisiones de CO2 en el proceso de fabricación del cemento en Ecuador*”. 2020.
- [50] Jiménez Montoya P., García Meseguer A., Morán Cabré F. “*Hormigón Armado*” Tomo I. 1987.
- [52] Soria, F. (1972). “*Estudio de materiales: IV.-Conglomerantes Hidráulicos*”. Instituto Eduardo Torroja de la Construcción y del Cemento. 1972.

### Normas

- [17] UNE-EN ISO 14040: 2006. Gestión Ambiental. Análisis del Ciclo de Vida. Principios y marco de referencia.
- [18] UNE-EN ISO 14044: 2006. Gestión Ambiental. Análisis del Ciclo de Vida. Requisitos y Directrices.
- [41] BOE. Ley 22/2011, de 28 de julio, de residuos y suelos contaminados.
- [42] UNE-EN 450-1: 2013. Cenizas volantes para hormigón. Parte 1: Definiciones, especificaciones y criterios de conformidad.
- [43] UNE-EN 197-1: 2011. Cemento. Parte 1: Composición, especificaciones y criterios de conformidad de los cementos comunes.
- [51] Centro de publicaciones del Ministerio de Fomento de España. Leyes y decretos. *Normas Técnicas*. Instrucción de Hormigón Estructural. 1999.
- [59] Real Decreto 470/2021, Aprobación del Código Estructural. 2021.

### Guías técnicas

- [36] Ministerio de Fomento. Catálogo de residuos utilizables en construcción. Ficha técnica de las cenizas procedentes de la biomasa. 2014.
- [63] Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones (IECA). Guía Técnica, Carriles bici con pavimentos de hormigón. 2022.
- [65] Ministerio de Fomento. *Catálogo de residuos utilizables en construcción*. Ficha técnica de las cenizas procedentes de la biomasa. 2014.

### Tesis y proyectos

- [7] COTEC. Tercer Informe de la Economía Circular en España. 2021
- [9] La Asociación Española de Normalización, UNE. “*Estudio de la contribución de las normas técnicas a la Economía Circular*”. 2022.
- [11] GBCe. Informe País CBCe 2021, “*Estado de la edificación sostenible en España*”. 2021.

- [15] Zamorano, M. Construction and Building Materials. “*Effects of olive residue biomass fly ash as filler in self-compacting concrete*”. 702–709. 2012.
- [19] Cardim de Carvalho Filho, Arnaldo. “*Análisis del ciclo de vida de productos derivados del cemento – Aportaciones al análisis de los inventarios del ciclo de vida del cemento*”. Escuela Técnica superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Barcelona. 2001.
- [22] Alegre Cortasa, Isabel. “*Análisis y comparativa del ciclo de vida de diferentes soluciones constructivas*”. Grado en Arquitectura Técnica. Escola Politècnica Superior – Universitat de Lleida. 2017.
- [23] Roca Garcíandia, Mireia. “*Comparativa de Análisis de Ciclo de Vida de dos tipos de puente de carretera: puente de hormigón y puente metálico*”. Escuela Técnica superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Barcelona. 2014.
- [24] Observatorio Industrial del Sector Fabricantes de Automóviles y Camiones, FEDIT. “*Desarrollo de la metodología para la realización de análisis de ciclo de vida de automóviles y camiones*”. 2011.
- [29] Velasco Manrique, Jorge. “*Caracterización y simulación del lecho de una caldera de biomasa en contracorriente*”. Universidad de Valladolid, 2015.
- [33] Forestalia y SOMACYL. Contrato de autorización de una planta de 49,5 MWe a partir de biomasa en Cubillos del Sil. “*Incidencia mediambiental del proyecto*”. 2017
- [35] Boulday, D y Marcovecchio F. “*Valorización de las cenizas de la combustión de biomasa. Revisión de depósitos y procesos asociados*”. RECORD. 2016.
- [37] Maschio, S.; Tonello, G.; Piani, L.; Furlani, E.: “*Fly and bottom ashes from biomass combustion as cement replacing components in mortars production: Rheological behaviour of the pastes and materials compression strength*”. 2011.
- [39] RAJAMMA REJINI. Tesis Doctoral. “*Biomass fly ash incorporation in cement-based materials*”. Universidad de Aveiro. 2011.
- [55] Jiménez Serrano, Ivelisse. Tesis doctoral. “*Aplicación integral en construcción de materiales eco-eficientes con incorporación de cenizas de biomasa*”. Universidad Politécnica de Madrid. 2016.
- [56] Rajamma Rejini. Tesis Doctoral. “*Biomass fly ash incorporation in cement-based materials*”. Universidad de Aveiro. 2011.
- [57] Medina Martínez, José María. Tesis doctoral. “*Efecto de las cenizas de biomasa en la fabricación de eco-cementos binarios: Caracterización y prestaciones físico-mecánicas para su uso en ingeniería civil*”. 2019.
- [58] Maschio, S.; Tonello, G.; Piani, L.; Furlani, E.: “*Fly and bottom ashes from biomass combustion as cement replacing components in mortars production: Rheological behaviour of the pastes and materials compression strength*”. 2011.
- [60] M.J.R. Hinojosa, A.P. Galvin, F. Agrela, M. Perianes, A. Barbudo. “*Potential use of biomass bottom ash as alternative construction material: Conflictive chemical parameters according to technical regulations*”. 2014.

- [20] Lechón, Yolanda. Módulo 1. "Introducción al Análisis del Ciclo de Vida". Dpto. Energía, CIEMAT. Escuela de Organización Industrial de Madrid. 2011
- [21] A. H. Stromann. "Fundamentos metodológicos de la evaluación del ciclo de vida". Departamento de ingeniería de energía y procesos. Universidad Noruega de Ciencia y Tecnología. 2010.
- [26] Tinaut, F.V. Apuntes Tecnología Energética. "Lección 7: Energía de la biomasa". Máster de Ingeniería Industrial. Universidad de Valladolid, 2014
- [28] Tinaut, F.V. Apuntes "Centrales Térmicas, L4. Centrales de combustibles fósiles". Universidad de Valladolid, 2014.
- [45] Lorenzana Iban, Antolín. "Características del hormigón armado", Ingeniería de la construcción. Universidad de Valladolid. 2021.
- [53] Tejero Juez, Enrique. "Hormigón Armado". Colegio Oficial de Arquitectos de Aragón. 1988.

## Artículos

- [1] ES Eficiencia. *Proyecto de cogeneración con biomasa para el suministro de calor y energía eléctrica en Olmedo*. Junio, 2022.
- [2] HERALDO. *Forestalia invertirá 100 millones y creará 350 empleos con una planta de biomasa en Zuera*. Junio, 2022
- [3] GBCe. *GBCe presenta el primer informe sobre el estado de la edificación sostenible en España*. Diciembre, 2021
- [8] Gobierno de España. Plan de recuperación, Transformación y Resiliencia. *El Gobierno aprueba el PERTE de Economía Circular para acelerar la transición hacia un sistema productivo más eficiente y sostenible en el uso de materias primas*. Marzo, 2022.
- [10] Industria Química. *UNE publica un informe para impulsar la Economía Circular*. Marzo, 2022.
- [13] Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana. *Mitma presenta el Código Estructural con la reglamentación técnica en materia de estructuras de hormigón y de acero*. Enero, 2022.
- [14] Construible, Todo sobre construcción sostenible. *Entrevista a Aniceto Zaragoza, presidente de la Plataforma Tecnológica Española del Hormigón*. Marzo, 2022
- [44] Cic Construcción. *La producción de hormigón crece un 9,4% en el tercer trimestre de 2021 artículo sobre producción de hormigón en España*. 2020. <https://www.cicconstruccion.com/> (Consulta realizada el 2 de junio de 2022).
- [46] El Mercantil. *El consumo de cemento en España registra en 2021 el mejor dato de la última década*. 2022. <https://elmercantil.com/> (Consulta realizada el 2 de junio de 2022).
- [47] Revista AD. *Porqué es urgente abandonar el cemento en la arquitectura*. <https://www.revistaad.es> (Consulta realizada el 2 de junio de 2022).
- [48] Cementos ICQ. *Industria del cemento*. 2014. <http://cementosicq.blogspot.com/> (Consulta realizada el 3 de junio de 2022)
- [64] Mesones, Javier. *La industria del hormigón crece un 10% en 2021 y prevé un alza del 5% en 2022*. *El Economista*. Febrero, 2022

## Sitios web

- [4] Ministerio para la transición ecológica y el reto demográfico. <https://www.miteco.gob.es/es/> (consulta realizada el 21 de marzo de 2022)
- [5] Rivamadrid. Hacia la Economía Circular. <https://www.rivamadrid.es/> (Consulta realizada el 22 de marzo de 2022).
- [6] Ciudadanía Metropolitana. *Economía Circular, el cambio cultural* <http://ciudadaniametropolitana.org.ar/>. (Consulta realizada el 27 de junio de 2022).
- [12] Iberdrola. *Descarbonización, hacia una economía de baja en carbono*. <https://www.iberdrola.com/> (Consulta realizada el 27 de junio de 2022).
- [16] HansonHeilberg Cement Group. *Carril bici (Bidegorri) polígono Ibarzaharra*. <https://www.hanson.es/es>. (Consulta realizada el 27 de junio de 2022).
- [30] RETEMA, Revista Técnica de Medio Ambiente. Artículo: *Planta de generación eléctrica con biomasa de Forestalia en El Bierzo*. 2020. [www.retema.es](http://www.retema.es) (Consulta realizada el 03 de marzo de 2022)
- [32] Proyecto de planta de generación eléctrica a partir de biomasa agrícola y forestal en Cubillos del Sil (León). [www.somacyl.es](http://www.somacyl.es) (Consulta realizada el 03 de marzo de 2022)
- [34] Proyecto final de planta de generación eléctrica a partir de biomasa agroforestal en el polígono El Bayo. 2017. [www.forestalia.com](http://www.forestalia.com) (Consulta realizada el 02 de marzo de 2022)
- [40] Phyllis2. Base de datos para la composición físico-química de la biomasa. <https://phyllis.nl/> (Consulta realizada el 29 de junio de 2022).
- [61] *Ecoinvent* Base de datos para Análisis de Ciclo de Vida. <https://ecoinvent.org/> (consulta realizada el 8 de junio de 2022)
- [62] *Greenhouse Gas Protocol*. Método de cálculo de emisiones atmosféricas. <http://www.ghgprotocol.org/>. (consulta realizada el 8 de junio de 2022)

# ANEXOS

## Anexo 1: Fichas de caracterización de biomasa Phyllis2



### Phyllis2



#### wood, poplar (#700)

Permanent link: <https://phyllis.nl/Biomass/View/700>

#### General properties

ID-number	#700
Material	wood, poplar
Classification	ECN Phyllis classification > untreated wood > poplar > wood, poplar NTA 8003 classification > [100] hout > [110] vers hout > [120] loofhout > [122] zacht loofhout
Submitter organisation	ECN (Netherlands)
Literature	<a href="http://rredc.nrel.gov:80/biomass/doe/nrel/comp/alki/appendix.html">http://rredc.nrel.gov:80/biomass/doe/nrel/comp/alki/appendix.html</a> (1998). Link obsolete. Instead, try <a href="http://www.nrel.gov/rredc/biomass_resource.html">http://www.nrel.gov/rredc/biomass_resource.html</a>

#### Main biomass properties

Property	Unit	Value			Method	Remarks
		ar	dry	daf		
<b>Proximate analysis</b>						
Moisture content	wt%	4.80				
Ash content	wt%	1.16	1.22			
Volatile matter	wt%	80.99	85.07	86.12		
Fixed carbon	wt%	13.05	13.71	13.88	Calculated	
<b>Ultimate analysis (macroelements)</b>						
Carbon	wt%	47.05	49.42	50.03	Measured	
Hydrogen	wt%	5.71	6.00	6.07	Measured	
Oxygen	wt%	41.00	43.07	43.60	Calculated	
Nitrogen	wt%	0.22	0.23	0.23	Measured	
Sulphur	wt%	0.05	0.05	0.05	Measured	
Total (with halides)	wt%	100.00	100.00	100.00	Calculated	
<b>Halides</b>						
Chlorine (Cl)	mg/kg	95.2	100.0	101.2	Measured	
<b>Heating value</b>						
Net calorific value (LHV)	MJ/kg	17.20	18.19	18.41		
Gross calorific value (HHV)	MJ/kg	18.56	19.50	19.74		
HHVMilne	MJ/kg	18.63	19.57	19.81	Calculated	

#### Ash Properties

Property	Unit	Value	Method	Remarks
<b>Ash composition</b>				
P2O5	wt% (ash)		14.81	
SiO2	wt% (ash)		9.22	
Al2O3	wt% (ash)		3.26	
CaO	wt% (ash)		47.28	
MgO	wt% (ash)		11.58	
Na2O	wt% (ash)		0.10	
K2O	wt% (ash)		24.37	

#### Contact

Thousands of biomass items are available at the Phyllis2 database of biomass and waste: [phyllis.nl](https://phyllis.nl)



## Phyllis2



### Wood chips, whole tree, pine (#3154)

Permanent link: <https://phyllis.nl/Biomass/View/3154>

#### General properties

ID-number	#3154
Material	Wood chips, whole tree, pine
Alternative name	Pine
Description	Chips
Classification	CEN/TS 14961 classification > Solid biofuels > Woody biomass > Forest and plantation wood > Whole trees without roots > Coniferous ECN Phyllis classification > untreated wood > fir/pine/spruce > wood, pine NTA 8003 classification > [100] hout > [110] vers hout > [130] naaldhout > [131] naaldhout
Sample date	1996-01-01
Sample location	Finland
Sample lot size	0,2-1 m3
Country	Finland
Submitter	VTT
Submitter organisation	ECN (Netherlands)
Submission date	2008-09-01
Remarks	ash data, taken from original publication, added by ECN in 2012
Literature	C. Wilén, A. Moilanen and E. Kurkula: Biomass feedstock analyses, VTT publications 282, Espoo 1996.



### Main biomass properties

Property	Unit	Value			Method	Remarks
		ar	dry	daf		
<b>Proximate analysis</b>						
Moisture content	wt%	3.87				
Ash content at 550°C	wt%	0.58	0.60		CEN/TS 14775	
Volatile matter	wt%	76.90	80.00	80.48		
Fixed carbon	wt%	18.65	19.40	19.52	Calculated	
<b>Ultimate analysis (macroelements)</b>						
Carbon	wt%	49.80	51.80	52.11	CEN/TS 15104	
Hydrogen	wt%	5.86	6.10	6.14	CEN/TS 15104	
Oxygen	wt%	39.60	41.19	41.44		by difference
Nitrogen	wt%	0.29	0.30	0.30	CEN/TS 15104	
Sulphur	wt%	0.01	0.01	0.01	CEN/TS15289	
Total (with halides)	wt%	100.00	100.00	100.00	Calculated	
<b>Halides</b>						
Chlorine (Cl)	mg/kg	40.4	42.0	42.3		neutron activation
<b>Heating value</b>						
Net calorific value (LHV)	MJ/kg	18.71	19.56	19.68	CEN/TS 14918	
Gross calorific value (HHV)	MJ/kg	20.08	20.89	21.02		
HHV/Milne	MJ/kg	19.94	20.74	20.87	Calculated	
<b>Trace elements composition</b>						
Potassium (K)	mg/kg (dry)			983.0		neutron activation
Sodium (Na)	mg/kg (dry)			42.0		neutron activation
<b>Ash melting behaviour</b>						
<b>American standard method, measured in oxidizing conditions</b>						
IDT (initial deformation temperature)	°C			1 210	ASTM D 1857	Leco AF-600
SOT (softening or spherical temperature)	°C			1 225	ASTM D 1857	Leco AF-600
HT (hemispherical temperature)	°C			1 250	ASTM D 1857	Leco AF-600
FT (fluid temperature)	°C			1 275	ASTM D 1857	Leco AF-600
<b>American standard method, measured in reducing conditions</b>						
IDT (initial deformation temperature)	°C			1 230	ASTM D 1857	Leco AF-600
SOT (softening or spherical temperature)	°C			1 240	ASTM D 1857	Leco AF-600
HT (hemispherical temperature)	°C			1 245	ASTM D 1857	Leco AF-600
FT (fluid temperature)	°C			1 290	ASTM D 1857	Leco AF-600

### Physical Properties

Property	Unit	Value	Method	Remarks
<b>Commonly used properties</b>				
Bulk density (ar)	kg/m <sup>3</sup> (ar)		238	loose, not shaken



### Ash Properties

Property	Unit	Value	Method	Remarks
<b>Ash composition</b>				
SO3	wt% (ash)		1.62	
P2O5	wt% (ash)		4.81	
SiO2	wt% (ash)		23.53	
Fe2O3	wt% (ash)		2.14	
Al2O3	wt% (ash)		5.10	
CaO	wt% (ash)		33.58	
MgO	wt% (ash)		5.14	
Na2O	wt% (ash)		0.19	
K2O	wt% (ash)		12.05	
TiO2	wt% (ash)		0.06	

### Contact

Thousands of biomass items are available at the Phyllis2 database of biomass and waste: [phyllis.nl](http://phyllis.nl)

Do you have questions regarding biomass properties or application of biomass feedstock? Please contact us at [Secretariaat-BCT-STIP@tno.nl](mailto:Secretariaat-BCT-STIP@tno.nl)!



# Phyllis2



## wood, oak (#2148)

Permanent link: <https://phyllis.nl/Biomass/View/2148>

### General properties

ID-number	#2148
Material	wood, oak
Classification	ECN Phyllis classification > untreated wood > oak > wood, oak NTA 8003 classification > [100] hout > [110] vers hout > [120] loofhout > [125] hard loofhout
Submitter organisation	ECN (Netherlands)
Submission date	2001-04-20
Remarks	water content in sample as analysed
Literature	Jones, J.M.; Pourkashanian, M.; Ross, A.; Danos, L.; Bartle, K.D.; Williams, A.; Kubica, K.; Andersson, J.; Kerst, M.; Danihelka, P.: The combustion of coal and biomass in a fixed bed furnace. Proc. 5th Eur. Conf. on Industrial Furnaces & Boilers 2000, vol. 2, p.45-54.

### Main biomass properties

Property	Unit	Value			Method	Remarks
		ar	dry	daf		
<b>Proximate analysis</b>						
Moisture content	wt%	5.30				
Ash content	wt%	0.30	0.32			
Volatile matter	wt%	80.02	84.50	84.77		
Fixed carbon	wt%	14.38	15.18	15.23	Calculated	
<b>Ultimate analysis (macroelements)</b>						
Carbon	wt%	46.80	49.42	49.58	Measured	
Hydrogen	wt%	5.25	5.54	5.56	Measured	
Oxygen	wt%	41.51	43.83	43.97	Calculated	
Nitrogen	wt%	0.77	0.81	0.82	Measured	
Sulphur	wt%	0.08	0.08	0.08	Measured	
Total (with halides)	wt%	100.01	100.01	100.01	Calculated	
<b>Heating value</b>						
Net calorific value (LHV)	MJ/kg	15.92	16.95	17.01		
Gross calorific value (HHV)	MJ/kg	17.20	18.16	18.22		
HHVMilne	MJ/kg	17.83	18.82	18.89	Calculated	

### Contact

Thousands of biomass items are available at the Phyllis2 database of biomass and waste: [phyllis.nl](https://phyllis.nl)

Do you have questions regarding biomass properties or application of biomass feedstock? Please contact us at [Secretariaat-BCT-STIP@tno.nl](mailto:Secretariaat-BCT-STIP@tno.nl)!



# Phyllis2



## wood, oak (#91)

Permanent link: <https://phyllis.nl/Biomass/View/91>

### General properties

ID-number	#91
Material	wood, oak
Classification	ECN Phyllis classification > untreated wood > oak > wood, oak NTA 8003 classification > [100] hout > [110] vers hout > [120] loofhout > [125] hard loofhout
Ash type	laboratory
Submitter organisation	ECN (Netherlands)
Literature	Anonymous: Forestry waste firing of industrial boilers, Oldham (UK), FEC Consultants, ETSU-B--1178 (1990).

### Main biomass properties

Property	Unit	Value	Method	Remarks
<b>Ash melting behaviour</b>				
American standard method, measured in oxidizing conditions				
IDT (initial deformation temperature)	°C		1 360	
FT (fluid temperature)	°C		1 380	

### Ash Properties

Property	Unit	Value	Method	Remarks
<b>Ash composition</b>				
SO3	wt% (ash)		2.20	
P2O5	wt% (ash)		7.50	
SiO2	wt% (ash)		2.30	
Fe2O3	wt% (ash)		0.50	
Al2O3	wt% (ash)		0.90	
CaO	wt% (ash)		65.00	
MgO	wt% (ash)		8.30	
Na2O	wt% (ash)		0.80	
K2O	wt% (ash)		9.90	
TiO2	wt% (ash)		0.10	

### Contact

Thousands of biomass items are available at the Phyllis2 database of biomass and waste: [phyllis.nl](https://phyllis.nl)

Do you have questions regarding biomass properties or application of biomass feedstock? Please contact us at [Secretariaat-BCT-STIP@tno.nl](mailto:Secretariaat-BCT-STIP@tno.nl)!



# Phyllis2



## wood, chipped, >20 mm (#683)

Permanent link: <https://phyllis.nl/Biomass/View/683>

### General properties

ID-number	#683
Material	wood, chipped, >20 mm
Classification	ECN Phyllis classification > treated wood > particle board NTA 8003 classification > [100] hout > [150] verwerkt hout > [170] gevefd/verlijmd hout (B-hout) > [172] plaatmateriaal/verlijmd hout
Ash type	ISO 1171 (815 degC)
Submitter organisation	ECN (Netherlands)
Literature	ECN laboratories.

### Main biomass properties

Property	Unit	Value			Method	Remarks
		ar	dry	daf		
<b>Proximate analysis</b>						
Moisture content	wt%	12.40				
Ash content	wt%	2.54	2.90			
Volatile matter	wt%	67.19	76.70	78.99		
Fixed carbon	wt%	17.87	20.40	21.01	Calculated	
<b>Ultimate analysis (macroelements)</b>						
Carbon	wt%	44.33	50.60	52.11	Measured	
Hydrogen	wt%	5.17	5.90	6.08	Measured	
Oxygen	wt%	34.15	38.98	40.14	Calculated	
Nitrogen	wt%	1.31	1.50	1.54	Measured	
Sulphur	wt%	0.04	0.05	0.05	Measured	
Total (with halides)	wt%	100.00	100.00	100.00	Calculated	
<b>Halides</b>						
Chlorine (Cl)	mg/kg	613.2	700.0	720.9	Measured	
<b>Heating value</b>						
Net calorific value (LHV)	MJ/kg	15.83	18.41	18.96		
Gross calorific value (HHV)	MJ/kg	17.26	19.70	20.29		
HHVMilne	MJ/kg	17.66	20.16	20.76	Calculated	

### Contact

Thousands of biomass items are available at the Phyllis2 database of biomass and waste: [phyllis.nl](https://phyllis.nl)

Do you have questions regarding biomass properties or application of biomass feedstock? Please contact us at [Secretariaat-BCT-STIP@tno.nl](mailto:Secretariaat-BCT-STIP@tno.nl)!



# Phyllis2



## Eucalyptus (#3120)

Permanent link: <https://phyllis.nl/Biomass/View/3120>

### General properties

ID-number	#3120
Material	Eucalyptus
Classification	CEN/TS 14961 classification > Solid biofuels > Woody biomass > Forest and plantation wood ECN Phyllis classification > untreated wood > other hard wood > wood, eucalyptus NTA 8003 classification > [100] hout > [110] vers hout > [120] loofhout > [125] hard loofhout
Country	Portugal
Production date	2006-12-11
Submitter organisation	ECN (Netherlands)

### Main biomass properties

Property	Unit	Value			Method	Remarks
		ar	dry	daf		
<b>Proximate analysis</b>						
Moisture content	wt%	9.80			CEN/TS 14774-1,2,3	
Ash content at 550°C	wt%	0.72	0.80		CEN/TS 14775	
Volatile matter	wt%	77.57	86.00	86.69		
Fixed carbon	wt%	11.91	13.20	13.31	Calculated	
<b>Ultimate analysis (macroelements)</b>						
Carbon	wt%	44.02	48.80	49.19	CEN/TS 15104	
Hydrogen	wt%	5.41	6.00	6.05	CEN/TS 15104	
Nitrogen	wt%	0.15	0.17	0.17	CEN/TS 15104	
Sulphur	wt%	0.02	0.02	0.02	CEN/TS15289	
Total (with halides)	wt%	60.12	55.79	55.43	Calculated	
<b>Heating value</b>						
Net calorific value (LHV)	MJ/kg	16.28	18.31	18.46	CEN/TS 14918	
Gross calorific value (HHV)	MJ/kg	17.70	19.62	19.78		

### Contact

Thousands of biomass items are available at the Phyllis2 database of biomass and waste: [phyllis.nl](https://phyllis.nl)

Do you have questions regarding biomass properties or application of biomass feedstock? Please contact us at [Secretariaat-BCT-STIP@tno.nl](mailto:Secretariaat-BCT-STIP@tno.nl)!



# Phyllis2



## wood, eucalyptus (#699)

Permanent link: <https://phyllis.nl/Biomass/View/699>

### General properties

ID-number	#699
Material	wood, eucalyptus
Classification	ECN Phyllis classification > untreated wood > other hard wood > wood, eucalyptus NTA 8003 classification > [100] hout > [110] vers hout > [120] loofhout > [125] hard loofhout
Submitter organisation	ECN (Netherlands)
Literature	<a href="http://rredc.nrel.gov:80/biomass/doe/nrel/comp/alki/appendix.html">http://rredc.nrel.gov:80/biomass/doe/nrel/comp/alki/appendix.html</a> (1998). Link obsolete. Instead, try <a href="http://www.nrel.gov/rredc/biomass_resource.html">http://www.nrel.gov/rredc/biomass_resource.html</a>

### Main biomass properties

Property	Unit	Value			Method	Remarks
		ar	dry	daf		
<b>Proximate analysis</b>						
Moisture content	wt%	9.34				
Ash content	wt%	0.48	0.53			
Volatile matter	wt%	78.52	86.61	87.07		
Fixed carbon	wt%	11.66	12.86	12.93	Calculated	
<b>Ultimate analysis (macroelements)</b>						
Carbon	wt%	44.89	49.51	49.78	Measured	
Hydrogen	wt%	5.21	5.75	5.78	Measured	
Oxygen	wt%	39.87	43.98	44.21	Calculated	
Nitrogen	wt%	0.13	0.14	0.14	Measured	
Sulphur	wt%	0.03	0.03	0.03	Measured	
Total (with halides)	wt%	100.00	100.00	100.00	Calculated	
<b>Halides</b>						
Chlorine (Cl)	mg/kg	500.0	551.5	554.4	Measured	
<b>Heating value</b>						
Net calorific value (LHV)	MJ/kg	16.06	17.96	18.06		
Gross calorific value (HHV)	MJ/kg	17.42	19.22	19.32		
HHVMilne	MJ/kg	17.39	19.18	19.28	Calculated	

### Ash Properties

Property	Unit	Value	Method	Remarks
<b>Ash composition</b>				
P2O5	wt% (ash)		29.11	
SiO2	wt% (ash)		17.83	
Al2O3	wt% (ash)		7.87	
CaO	wt% (ash)		26.52	
MgO	wt% (ash)		7.25	
Na2O	wt% (ash)		4.98	
K2O	wt% (ash)		7.20	

### Contact

Thousands of biomass items are available at the Phyllis2 database of biomass and waste: [phyllis.nl](https://phyllis.nl)



# Phyllis2



## wood, Pyrenean oak, branches <20 mm diameter (#2852)

Permanent link: <https://phyllis.nl/Biomass/View/2852>

### General properties

ID-number	#2852
Material	wood, Pyrenean oak, branches <20 mm diameter
Description	chips
Classification	ECN Phyllis classification > untreated wood > oak NTA 8003 classification > [100] hout > [110] vers hout > [120] loofhout > [126] hard loofhout met schors
Sample lot size	<63 mm
Ash type	CEN/TS 14775 (550°C)
Submitter organisation	ECN (Netherlands)
Submission date	2009-07-20
Remarks	C,H,N according to CEN/TS 15104; S acc CEN/TS 15289, O by diff.; moisture by CEN/TS 14774-2; heating value acc UNE 164001 EX; collection, sampling and preparation acc to CEN standards; for medium and larger branches see next records
Literature	M.T. Miranda, J.I. Arranz, S. Rojas, I. Montero: Energetic characterization of densified residues from Pyrenean oak forest. Fuel 88 (2009) 2106-2112.

### Main biomass properties

Property	Unit	Value			Method	Remarks
		ar	dry	daf		
<b>Proximate analysis</b>						
Moisture content	wt%	42.21				
Ash content	wt%	2.34	4.05			
Volatile matter	wt%	44.76	77.45	80.72		
Fixed carbon	wt%	10.69	18.50	19.28	Calculated	
<b>Ultimate analysis (macroelements)</b>						
Carbon	wt%	28.18	48.76	50.82	Measured	
Hydrogen	wt%	3.67	6.35	6.62	Measured	
Oxygen	wt%	21.92	37.93	39.53	Calculated	
Nitrogen	wt%	1.62	2.81	2.93	Measured	
Sulphur	wt% (dry)					
Total (with halides)	wt%	99.94	99.90	99.90	Calculated	
<b>Heating value</b>						
Net calorific value (LHV)	MJ/kg	9.26	17.81	18.57		
Gross calorific value (HHV)	MJ/kg	11.10	19.20	20.01		
HHVMilne	MJ/kg	11.60	20.07	20.92	Calculated	
<b>Biochemical analysis</b>						
<b>Cellulose, hemicellulose, lignin</b>						
Cellulose	wt% (dry)			39.69	van Soest	
Hemicellulose	wt% (dry)			9.81	van Soest	
Lignin	wt% (dry)			26.98	Measured	
<b>Other</b>						
Total ash + biochemical	wt% (dry)			80.53	Calculated	

### Physical Properties

Property	Unit	Value	Method	Remarks
<b>Commonly used properties</b>				
Bulk density (daf)	kg/m <sup>3</sup> (daf)		209	



# Phyllis2



## Straw (#3542)

Permanent link: <https://phyllis.nl/Biomass/View/3542>

### General properties

ID-number	#3542
Material	Straw
Classification	CEN/TS 14961 classification > Solid biofuels > Herbaceous biomass > Agriculture and Horticulture herb > Grasses > Straw parts ECN Phyllis classification > Biochar > Straw NTA 8003 classification > [800] samengestelde stromen > [803] brandstof na torrefactie
Producer	CENER
Submitter	Lydia Fryda
Submitter organisation	ECN (Netherlands)
Submission date	2015-10-13
Remarks	Material collected in the frame of the SECTOR project, for torrefaction trials



## Main biomass properties

Property	Unit	Value			Method	Remarks
		ar	dry	daf		
<b>Proximate analysis</b>						
Moisture content	wt%	3.90			EN 14774-1/2	
Ash content at 550°C	wt%	3.84	4.00		EN 14775	
Ash content at 815°C	wt%	3.17	3.30		EN 14775	
Volatile matter	wt%	75.92	79.00	82.29	EN 15148	
Fixed carbon	wt%	16.34	17.00	17.71	Calculated	
<b>Ultimate analysis (macroelements)</b>						
Carbon	wt%	44.21	46.00	47.92	EN 15104	
Hydrogen	wt%	6.04	6.28	6.54	EN 15104	
Oxygen	wt%	41.33	43.01	44.80	by difference	
Nitrogen	wt%	0.49	0.51	0.53	EN 15104	
Sulphur	wt%	0.09	0.09	0.09	BS EN ISO 16994	
Total (with halides)	wt%	100.00	100.00	100.00	Calculated	
<b>Halides</b>						
Bromine (Br)	mg/kg	0.0	0.0	0.0		
Chlorine (Cl)	mg/kg	1 023.5	1 065.0	1 109.4	BS EN 15289	
Fluorine (F)	mg/kg	0.0	0.0	0.0		
<b>Heating value</b>						
Gross calorific value (HHV)	MJ/kg	17.30	18.00	18.75	EN 14918	
HHVMilne	MJ/kg	17.98	18.71	19.49	Calculated	
<b>Trace elements composition</b>						
Aluminium (Al)	mg/kg (dry)			143.0	NEN 6966	
Boron (B)	mg/kg (dry)			2.7	NEN 6966	
Barium (Ba)	mg/kg (dry)			22.5	NEN 6966	
Calcium (Ca)	mg/kg (dry)			3 899.0	NEN 6966	
Cadmium (Cd)	mg/kg (dry)			0.0	NEN 6966	
Cobalt (Co)	mg/kg (dry)			15.0	NEN 6966	
Chromium (Cr)	mg/kg (dry)			1.7	NEN 6966	
Copper (Cu)	mg/kg (dry)			3.0	NEN 6966	
Iron (Fe)	mg/kg (dry)			100.0	NEN 6966	
Potassium (K)	mg/kg (dry)			8 668.0	NEN 6966	
Magnesium (Mg)	mg/kg (dry)			571.0	NEN 6966	
Manganese (Mn)	mg/kg (dry)			17.0	NEN 6966	
Sodium (Na)	mg/kg (dry)			162.0	NEN 6966	
Nickel (Ni)	mg/kg (dry)			1.5	NEN 6966	
Phosphorus (P)	mg/kg (dry)			558.0	NEN 6966	
Lead (Pb)	mg/kg (dry)			1.0	NEN 6966	
Silicon (Si)	mg/kg (dry)			6 734.0	NEN 6966	
Strontium (Sr)	mg/kg (dry)			26.0	NEN 6966	
Titanium (Ti)	mg/kg (dry)			3.6	NEN 6966	
Vanadium (V)	mg/kg (dry)			0.3	NEN 6966	
Tungsten (W)	mg/kg (dry)			13.0	NEN 6966	
Zinc (Zn)	mg/kg (dry)			6.6	NEN 6966	

## Contact

Thousands of biomass items are available at the Phyllis2 database of biomass and waste: [phyllis.nl](http://phyllis.nl)

Do you have questions regarding biomass properties or application of biomass feedstock? Please contact us at [Secretariaat-BCT-STIP@tno.nl](mailto:Secretariaat-BCT-STIP@tno.nl)!



# Phyllis2



## wheat straw (#424)

Permanent link: <https://phyllis.nl/Biomass/View/424>

### General properties

ID-number	#424
Material	wheat straw
Classification	ECN Phyllis classification > straw (stalk/cob/ear) > wheat > wheat straw NTA 8003 classification > [200] biomassa uit land- en tuinbouw > [220] stro > [223] tarwestro
Ash type	laboratory
Submitter organisation	ECN (Netherlands)
Literature	<a href="http://edv1.vt.tuwien.ac.at/AG_HOFBA/BIOBIB/Biobib.htm">http://edv1.vt.tuwien.ac.at/AG_HOFBA/BIOBIB/Biobib.htm</a> (1997).

### Main biomass properties

Property	Unit	Value			Method	Remarks
		ar	dry	daf		
<b>Proximate analysis</b>						
Ash content	wt%		5.04			
<b>Ultimate analysis (macroelements)</b>						
Carbon	wt%		46.02	48.46	Unknown	
Hydrogen	wt%		5.50	5.79	Unknown	
Oxygen	wt%		41.44	43.64	Calculated	
Nitrogen	wt%		1.65	1.74	Unknown	
Sulphur	wt%		0.10	0.11	Unknown	
Total (with halides)	wt%		100.00	100.00	Calculated	
<b>Halides</b>						
Chlorine (Cl)	mg/kg		2 500.0	2 632.7	Unknown	
<b>Heating value</b>						
Net calorific value (LHV)	MJ/kg		17.21	18.12		
Gross calorific value (HHV)	MJ/kg		18.42	19.39		
HHVMilne	MJ/kg		17.73	18.67	Calculated	
<b>Trace elements composition</b>						
Cadmium (Cd)	mg/kg (dry)			0.1	Unknown	
Copper (Cu)	mg/kg (dry)			3.5	Unknown	
Mercury (Hg)	mg/kg (dry)			0.0	Unknown	
Lead (Pb)	mg/kg (dry)			0.2	Unknown	
<b>Ash melting behaviour</b>						
American standard method, measured in oxidizing conditions						
IDT (initial deformation temperature)	°C			970		
SOT (softening or spherical temperature)	°C			1 020		
HT (hemispherical temperature)	°C			1 120		
FT (fluid temperature)	°C			1 180		



### Ash Properties

Property	Unit	Value	Method	Remarks
<b>Ash composition</b>				
CO2	wt% (ash)		1.90	
SO3	wt% (ash)		1.12	
Cl	wt% (ash)		1.96	
P2O5	wt% (ash)		6.42	
SiO2	wt% (ash)		35.30	
Fe2O3	wt% (ash)		0.25	
Al2O3	wt% (ash)		0.35	
CaO	wt% (ash)		4.10	
MgO	wt% (ash)		1.96	
Na2O	wt% (ash)		0.08	
K2O	wt% (ash)		11.20	
Pb	mg/kg (ash)		2.0	
Cd	mg/kg (ash)		0.1	
Cu	mg/kg (ash)		33.0	
Hg	mg/kg (ash)		0.0	

### Contact

Thousands of biomass items are available at the Phyllis2 database of biomass and waste: [phyllis.nl](http://phyllis.nl)

Do you have questions regarding biomass properties or application of biomass feedstock? Please contact us at [Secretariaat-BCT-STIP@tno.nl](mailto:Secretariaat-BCT-STIP@tno.nl)!

## Anexo 2: Análisis de granulometría de las cenizas de hogar de la planta de Cubillos de Sil

	<b>Laboratorio de Collosa</b> Polígono Industrial San Cristobal C/Aluminio, Nº17 47012-VALLADOLID <a href="mailto:laboratorio@collosa.es">laboratorio@collosa.es</a> Teléfono: 983 546 671	Nº de ensayo: 21/135AR
	Peticiónario: Construcciones y Obras Llorente S.A. (Collosa)	
Obra: ---		
Gravera: Cubillas de Sta Marta (Valladolid)		
Localización: FORESTALIA. Ponferrada		
Áridos: Árido 0/10 escoria de biomasa		
Ensayos realizados:		
1.- Portada.	pag.1	
2.- Granulometría de los áridos. Método del tamizado según la norma EN 933-1 :2012.	pag.2	
3.- Equivalente de Arena según la norma UNE-EN 933-8:2012.	pag.3	
4.- Dosificación de los áridos para encajar en mezcla asfáltica tipo:AC16 Surf 50/70 S.	pag.4	
Normativa aplicada: Artículo 540 del PG3-2014		
Fecha de toma: 26/05/2021	Fecha de informe: 28/05/2021	

Prohibida la reproducción total o parcial de este documento sin la aprobación del Laboratorio de COLLOSA.

La información de este documento será de carácter confidencial. Los resultados del informe sólo afectan al material sometido a ensayo.  
Inscripción con el nº de registro CYL-L-064 en el Registro General de Ensayos para el Control de la Calidad de la Edificación



**Laboratorio de Collosa**  
 C/Aluminio, Nº17 Pol. Ind. San Cristobal  
 47012 VALLADOLID  
 Teléfono: 983 546 671

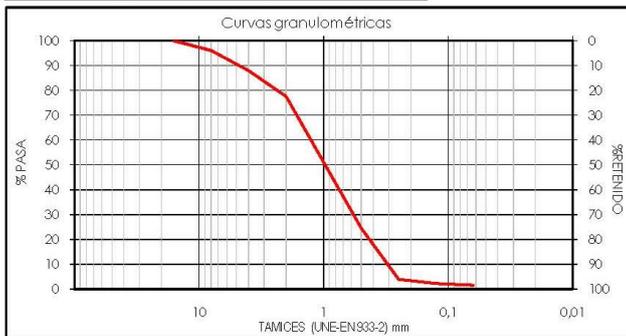
Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos.

Peticionario: Construcciones y Obras Llorente S.A. (Collosa)  
 Obra: ---  
 Gravera: Cubillas de Sta Marta (Valladolid)  
 Localización: FORESTALIA. Ponferrada  
 Denominación: Árido 0/10 (Escoria de biomasa)  
 Fecha de toma: 26/05/2021  
 Fecha de ensayo: 27/05/2021  
 Nº ensayos: 21/135AR

Granulometría de los áridos. Método del tamizado EN 933-1 :2012

Tamices(UNE)	Peso en grs.			%Retenido			%Pasa		
			21/135AR			21/135AR			21/135AR
			Árido 0/10 escoria de biomasa			Árido 0/10 escoria de biomasa			Árido 0/10 escoria de biomasa
45.0									
31,5									
25.0									
22.4									
16.0			0,0			0,0			100,0
11.2			11,6			1,2			98,8
8.0			39,1			3,9			96,1
5.6			91,6			9,2			90,8
4.0			120,0			12,1			87,9
2.0			222,6			22,4			77,6
1.0			449,6			45,3			54,7
0,500			748,0			75,4			24,6
0,250			953,3			96,1			3,9
0,125			970,0			97,8			2,2
0,063			976,1			98,4			1,6
Peso total:			991,8						

Nota: Antes de hacer el ensayo se realiza una verificación visual del estado de los tamices.



Observaciones:  
 Material heterogéneo con presencia de alambres y trozos de madera.

Tamaño	Denominación
—	Árido 0/10 escoria de biomasa
—	
—	
—	
—	Árido 11/16 silíceo Cubillas
	AG-T-11/16-S

Vº. Bº. Jefe de Laboratorio:

Vº. Bº. Técnico de Laboratorio:

Fdo: Carlos García Serrada

Fdo: Jesús T. Argüello Martín

La información de este documento será de carácter confidencial. Los resultados del informe sólo afectan al material sometido a ensayo inscripción con el nº de registro CYL-L-064 en el Registro General de Ensayos para el Control de la Calidad de la Edificación



Laboratorio de Collosa  
C/Aluminio, Nº17 Pol. Ind. San Cristobal  
47012 VALLADOLID  
Teléfono: 983 546 671

**Ensayos para determinar las propiedades mecánicas y físicas de los áridos.**

Peticionario: Construcciones y Obras Llorente S.A. (Collosa)  
Obra: ---  
Origen: FORESTALIA. Ponferrada  
Denominación: Arido 0/10 escoria de biomasa  
Fecha de Toma: 26/05/2021  
Fecha de Ensayo: 27/05/2021  
Nº ensayo: 21/135AR

**Equivalente de Arena según la norma UNE-EN 933-8:2012:**

Probeta nº		1	2
Masa de la submuestra (g)		119,8	120,2
Altura del floculado (mm)	$h_1$	142	142
Altura del sedimento (mm)	$h_2$	112	112
Equivalente de Arena individual (%)	$SE_i=100 \cdot h_2/h_1$	78,9	78,9
Equivalente de Arena (%) Media	$SE_4$	<b>79</b>	

**Según el PG3:**

*Orden FOM/2523/2014, del 12 de diciembre del 2014*

*Deberá ser superior a cincuenta y cinco ( $SE_4 > 55$ ) tanto para hormigones astálticos tipo AC, como para mezclas discontinuas tipo BBTM y drenantes tipo PA.*

**Observaciones:**

Material heterogéneo con presencia de alambres y trozos de madera.

Vº. Bº. Jefe de Laboratorio:

Fdo: Carlos García Serrada

Vº. Bº. Técnico de Laboratorio:

Fdo: Jesús T. Arguello Martín

La información de este documento será de carácter confidencial. Los resultados del informe sólo afectan al material sometido a ensayo  
Inscripción con el nº de registro CYL-L-064 en el Registro General de Ensayos para el Control de la Calidad de la Edificación



Laboratorio de Collosa  
 C/Aluminio, Nº17 Pol. Ind. San Cristóbal  
 47012 VALLADOLID  
 Teléfono: 983 546 671

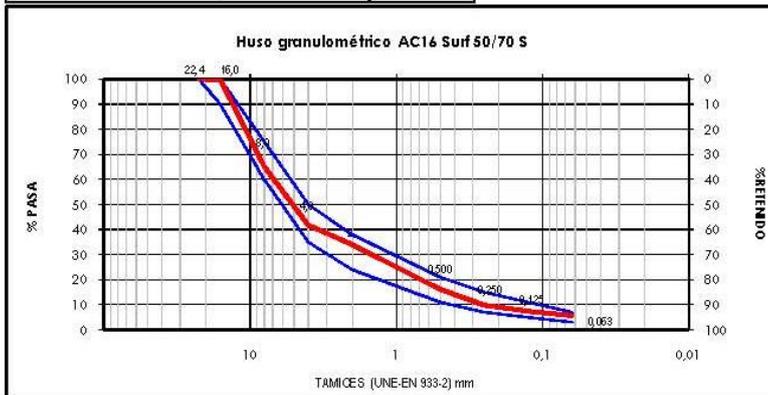
Peticionario: Construcciones y Obras Llorente S.A. (Collosa)  
 Obra: ---  
 Gravera: Cubillas de Sta Marta (Valladolid)  
 Aglomerado: AC16 Surf 50/70 S  
 Fecha de Toma: 26/05/2021  
 Fecha de Ensayo: 27/05/2021  
 Nº Ensayo: ---

### DOSIFICACIÓN DE LOS ARIDOS DE ACOPIOS

	%pasa						Huso AC16 Surf 50/70 S		
	Árido 0/10 escoria de biomasa	Arena 0/5 sílicea Cubillas	Árido 5/11 síliceo Cubillas	Árido 11/16 síliceo Cubillas	Filler Aportación	Curva combinada	Límites %		
	<b>15,0</b>	<b>28,0</b>	<b>40,0</b>	<b>14,0</b>		<b>3,0</b>	<b>100%</b>	inf.	sup.
<b>45,0</b>									
<b>31,5</b>									
<b>22,4</b>				100,0		100,0	<b>100,0%</b>	100	100
<b>16,0</b>	100,0	100,0	100,0	98,5		100,0	<b>99,8%</b>	90	100
<b>8,0</b>	96,1	99,8	49,4	0,7		100,0	<b>65,2%</b>	60	75
<b>4,0</b>	87,9	89,3	1,2	0,5		100,0	<b>41,8%</b>	35	50
<b>2,0</b>	77,6	67,3	1,2	0,5		100,0	<b>34,0%</b>	24	38
<b>0,500</b>	24,6	31,9	1,2	0,5		100,0	<b>16,2%</b>	11	21
<b>0,250</b>	3,9	20,5	1,2	0,4		100,0	<b>9,8%</b>	7	15
<b>0,063</b>	1,6	8,8	1,1	0,4		83,7	<b>5,7%</b>	3	7

% LIGANTE ÓPTIMO ( Sobre Árido):

% LIGANTE ÓPTIMO ( Sobre Mezcla):



Vº. Bº. Jefe de Laboratorio:

Vº Bº El Tecn. Laboratorio:

Fdo: Carlos García Serrada

Fdo: Jesús T. Argüello Martín

La información de este documento será de carácter confidencial. Los resultados del informe sólo afectan al material sometido a ensayo  
 inscripción con el nº de registro: CYL-L-064 en el Registro General de Ensayos para el Control de la Calidad de la Edificación.

## Anexo 3: Análisis químico de las cenizas volantes de la planta de Cubillos de Sil



### INFORME DE ENSAYO



Las actividades marcadas con \* no están amparadas en la acreditación ENAC.

Fundación CARTIF. Laboratorio de Análisis y Ensayos

lae@cartif.es

Nº IE-LAE-I-30025-

22 Página 1 de 3

DATOS CLIENTE				
Empresa				
Dirección				
Teléfono	Fax	email		
Contacto	Ref. pedido /SE			

DATOS DE LA MUESTRA						
Código Cliente ***		Código LAE	<i>M-LAE-I-30015/22</i>		Fecha de recepción	<b>19/02/2022</b>
Tipo de Muestra	<b>Cenizas</b>	Cantidad	<b>0,995 kg</b>	Envase:	<b>BOLSA DE PLÁSTICO</b>	Fecha inicio/ fin análisis <b>19/02/22</b> <b>11/03/22</b>
RESULTADOS						
Parámetro	Método/Norma	Valor	Incertidumbre	Unidades		
Humedad total	UNE-EN ISO 18134-1:2016	< 5,0	--	% m/m s.r.		
Contenido en carbono orgánico	Procedimiento interno según UNE-EN ISO 16948:2015 Método instrumental	3,5	--	% m/m b.s.c		
ELEMENTOS MINORITARIOS						
Arsénico (As)	UNE-EN ISO 16968:2015 Método de digestión ácida por microondas y determinación por ICP-OES	< 0,75	--	mg/kg b.s.c		
Cadmio (Cd)		> 2,00	--	mg/kg b.s.c		
Cromo (Cr)		> 12,5	--	mg/kg b.s.c		
Cobre (Cu)		> 12,5	--	mg/kg b.s.c		
Mercurio (Hg)		< 0,075	--	mg/kg b.s.c		
Níquel (Ni)		> 12,5	--	mg/kg b.s.c		
Plomo (Pb)		> 12,5	--	mg/kg b.s.c		
Zinc (Zn)		> 125,0	--	mg/kg b.s.c		
Talio (Tl)		8,29	--	mg/kg b.s.c		
Vanadio (V)		44,1	--	mg/kg b.s.c		



## INFORME DE ENSAYO



Las actividades marcadas con \* no están amparadas en la acreditación ENAC.

Fundación CARTIF. Laboratorio de Análisis y Ensayos

lae@cartif.es

Nº IE-LAE-I-30025-21

Página 2 de 3

DATOS DE LA MUESTRA						
Código Cliente ***		Código LAE	M-LAE-I-30015/22		Fecha de recepción	19/02/22
Tipo de Muestra	Cenizas	Cantidad	0,995 kg	Envase:	BOLSA DE PLÁSTICO	Fecha inicio/ fin análisis 19/02/22 11/03/22
RESULTADOS						
Parámetro	Método/Norma	Valor	Incertidumbre	Unidades		
COMPOSICIÓN INORGÁNICA DE CENIZAS						
Na <sub>2</sub> O *	UNE-EN ISO 16967:2015	0,81	--	% m/m b.s.c.		
MgO *		7,12	--	% m/m b.s.c.		
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> *		4,02	--	% m/m b.s.c.		
SiO <sub>2</sub> *		11,13	--	% m/m b.s.c.		
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> *		4,00	--	% m/m b.s.c.		
SO <sub>3</sub> *		7,30	--	% m/m b.s.c.		
K <sub>2</sub> O *		18,30	--	% m/m b.s.c.		
CaO *		43,10	--	% m/m b.s.c.		
TiO <sub>2</sub> *		0,30	--	% m/m b.s.c.		
MnO *		0,20	--	% m/m b.s.c.		
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> *		2,54	--	% m/m b.s.c.		
CuO *		0,03	--	% m/m b.s.c.		
ZnO *		0,23	--	% m/m b.s.c.		
SrO *		0,15	--	% m/m b.s.c.		
BaO *		0,04	--	% m/m b.s.c.		
PbO *		< 0,01	--	% m/m b.s.c.		
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> *		< 0,01	--	% m/m b.s.c.		
ZrO <sub>2</sub> *		< 0,01	--	% m/m b.s.c.		
Rb <sub>2</sub> O *		0,03	--	% m/m b.s.c.		
As <sub>2</sub> O <sub>3</sub> *		< 0,01	--	% m/m b.s.c.		
Cl *	0,68	--	% m/m b.s.c.			
NiO *	< 0,01	--	% m/m b.s.c.			
WO <sub>3</sub> *	0,05	--	% m/m b.s.c.			
Co <sub>3</sub> O <sub>4</sub> *	< 0,01	--	% m/m b.s.c.			



## INFORME DE ENSAYO



Nº 335/LE1276  
Las actividades marcadas con \* no están amparadas en la acreditación ENAC.

Fundación CARTIF. Laboratorio de Análisis y Ensayos

lae@cartif.es

Nº IE-LAE-I-30025-

22 Página 3 de 3

\*\*\* "Identificación aportada por el cliente" y el laboratorio no es responsable de dicha información. Los resultados obtenidos solo se aplican a las muestras analizadas como se recibieron.

### OBSERVACIONES

s.r. Según muestra recibida.

b.s.c. Base seca sobre cenizas.

\* UNE-EN ISO 18134-1. Atmósfera de secado: aire. Contenido en humedad total: **0,3%**

\* UNE-EN ISO 16968: Contenido en Arsénico (mg/Kg b.s.): **0,02mg/Kg**

Contenido en Cadmio (mg/Kg b.s.): **2,37mg/Kg**

Contenido en Cromo (mg/Kg b.s.): **46,3 mg/Kg**

Contenido en Cobre (mg/Kg b.s.): **91,9 mg/Kg**

Contenido en Níquel (mg/Kg b.s.): **15,8 mg/Kg**

Contenido en Plomo (mg/Kg b.s.): **13,2 mg/Kg**

Contenido en Zinc (mg/Kg b.s.): **892,4 mg/Kg**

Elaborado: Responsable de Análisis

Aprobado: Directora Técnica

Fdo.:

Fdo.:

Fecha: 11/03/2022

Fecha: 11/03/2022

La incertidumbre es la estimación que caracteriza el intervalo de valores en el que se sitúa, con una probabilidad del 95 %, el valor verdadero del parámetro medido. Los resultados presentados en este Informe de Ensayo sólo se refieren a las muestras ensayadas. Este Informe de Ensayo no puede ser reproducido más que en su totalidad, sin la autorización por escrito del Laboratorio de Análisis y Ensayos de la Fundación CARTIF.



**CARTIF**

Parque Tecnológico de Boecillo 205 | 47151 Boecillo · Valladolid · España | +34 983 546 504 · www.cartif.es

## Anexo 4: Estimación de la fracción de cenizas de hogar a partir de las emisiones de partículas en chimenea

El objetivo de este Anexo es estimar la fracción de cenizas  $f_{hog}$  que quedan en el cenicero de la cámara de combustión de la planta, de manera que esta fracción sea compatible con la concentración de partículas en la chimenea de gases, una vez tenido en cuenta el rendimiento de retención de los filtros de mangas que actúan sobre las cenizas volantes, de acuerdo con el planteamiento del apartado 5.4.1.

Para ello, se ha establecido de forma esquemática el siguiente proceso:

1. Se considera una composición equivalente de la biomasa con la que se alimenta la planta, obtenida a partir de un valor medio del análisis inmediato y del análisis elemental de dicha biomasa.
2. Con ello se calcula el valor estequiométrico de la relación biomasa/aire.
3. Se introduce un valor razonable del exceso de aire de combustión, y se calcula la composición de los gases de combustión.
4. A partir de dicha composición se puede calcular el peso molar correspondiente, lo que permite calcular la densidad en condiciones normales.
5. Se tiene en cuenta el flujo másico de cenizas volantes que salen de la cámara de combustión, que depende de la fracción entre cenizas de fondo y las totales, además de la fracción de cenizas del análisis inmediato y del gasto másico de biomasa.
6. Se plantea la expresión del gasto másico de partículas de cenizas volantes que no son retenidas por los filtros, considerando el rendimiento de retención de éstos.
7. Se plantea la expresión del gasto másico de gases de combustión para el valor del exceso de aire considerado, aunque no es necesario calcular su valor, por lo que se indica a continuación.
8. La concentración de partículas emitidas en los gases expulsados por la chimenea puede calcularse dividiendo el gasto másico de partículas (6) por el caudal de gases de combustión en condiciones normales (7, con la densidad de 4). Puede verse que el valor del gasto de biomasa aparece tanto en el flujo másico de partículas (numerador) como en el caudal de gases (denominador), por lo que dicho valor no interviene en los cálculos de la concentración de partículas.
9. Este valor se compara con el valor en media anual declarado por la planta, que es inferior a 4,2 mg/Nm<sup>3</sup>.
10. Se consideran distintos valores de la fracción de cenizas en hogar  $f_{hog}$  para ver qué rango de valores es compatible con los datos de entrada de la composición de la biomasa, el exceso de aire, el rendimiento de retención de los filtros, dado el valor declarado de la concentración de partículas emitidas.

Dado que los cálculos son relativamente complejos, ya que es preciso considerar con cuidado las distintas bases de la biomasa (húmeda, seca, daf), y que no constituyen el objeto de este TFM, se ha utilizado un programa de cálculo desarrollado por J. Velasco [29], cuyos valores de entrada para la composición de la biomasa y los resultados de interés se indican en la página siguiente.

En cada parte de dichos resultados, se indican con números los que corresponden a cada uno de los puntos del proceso anterior.

Adicionalmente, se tienen las siguientes expresiones de los gastos másicos y de la concentración de partículas en chimenea, referidas a la numeración de los puntos anteriores:

$$\dot{m}_{cen,chi} = (1 - \eta_{ret})(1 - f_{hog}) \cdot \dot{m}_{bms,bh} \cdot Y_{ash,bh} \quad 6$$

$$\dot{m}_{gas,chi} = \dot{m}_{bms,bh} \cdot (1 - Y_{ash,bh}) + \dot{m}_{air,chi} \quad 7$$

$$\dot{m}_{gas,chi} = \dot{m}_{bms,bh} \cdot \left[ (1 - Y_{ash,bh}) + \frac{1}{F_r \cdot F_e} \right] \quad 7$$

$$C_{cen,chi} = \frac{\dot{m}_{cen,chi} \left( \frac{kg}{s} \right)}{Q_{gas,chi} (Nm^3)} = \frac{(1-\eta_{ret})(1-f_{hog}) \cdot \dot{m}_{bms,bh} \cdot Y_{ash,bh}}{\left[ (1-Y_{ash,bh}) + \frac{1}{F_r \cdot F_e} \right] \cdot \frac{\dot{m}_{bms,bh}}{\rho_{gas,chi,CN}}} = \rho_{gas,chi,CN} \frac{(1-\eta_{ret})(1-f_{hog}) \cdot Y_{ash,bh}}{\left[ (1-Y_{ash,bh}) + \frac{1}{F_r \cdot F_e} \right]} \quad 8$$

La conclusión global que se puede obtener del procedimiento aplicado es **que la fracción de cenizas que quedan en el cenicero**, compatible con el rendimiento de retención de los filtros de mangas y con el valor de la concentración de partículas en la chimenea, resulta ser **del orden de  $f_{hog} = 60\%$**  tal como se ha resaltado en las tablas de resultados del estudio paramétrico realizado al variar la fracción de cenizas  $Y_{ash,bh}$  y el rendimiento de retención de los filtros de mangas  $\eta_{ret}$ .

**CÁLCULOS REALIZADOS PARA UNA COMPOSICIÓN MEDIA DE LA BIOMASA DE ENTRADA**

Análisis Inmediato bh		Análisis elemental base daf		Formula daf		Formula daf+ humedad	
Humedad	4,8%	C - %	50,0	1,00	C - n	1,00	
Volátiles	81,0%	H - %	6,1	1,46	H - m	1,59	
Carbono fijo	13,1%	O - %	43,6	0,65	O - p	0,72	
Cenizas	1,84%	N - %	0,23	0,00	N - q	0,00	
Total	101%	S - %	0,05	0,00	S - r	0,00	
		Total	100,0				

**Dosado Estequiométrico daf + humedad + cen**

5,586	0,1790	0,966
kg aire/kg (daf+hum+cen)	kg bms/kg air	Moles de aire por mol daf + hum + cen

**Dosado relativo (comb/aire) Fr** 0,70 143% Este valor se elige para que corresponda a un exceso de aire aceptable

**COMPOSICIÓN GASES COMBUSTION COMPLETA EN AIRE**

Comp. Resultado	Moles		Fracción molar	
	Gas+Cen	Gases	%Humedo	%Seco
CO2	1,00	1,0	12,8	14,2
H2O	0,80	0,8	10,2	
O2	0,44	0,4	5,7	6,3
N2	5,58	5,6	71,3	79,4
SO2	0,00	0,0	0,0	0,0
Cenizas	0,0059			
Totales	7,82	7,82	100,00	100,00
Peso molar (kg/kmol)			29,26	30,53

**Densidad gases en condiciones normale** 1,305 kg/Nm3

**Fracción fhog** 70,0%  
**Rend. Ret. Filtro** 99,60%

**Concentración partículas (kg/l)** 3,22E-06 **3,22 mg/Nm3**

$$\dot{m}_{cen,chi} = (1 - \eta_{ret})(1 - fhog) \cdot \dot{m}_{bms,bh} \cdot Y_{ash,bh}$$

$$C_{cen,chi} = \frac{\dot{m}_{cen,chi} \left(\frac{kg}{s}\right)}{Q_{gas,chi} (Nm^3)} = \rho_{gas,chi,CN} \cdot \frac{(1 - \eta_{ret})(1 - fhog) \cdot \dot{m}_{bms,bh} \cdot Y_{ash,bh}}{\left[(1 - Y_{ash,bh}) + \frac{1}{F_r \cdot F_e}\right]}$$

**Concentración partículas en chimenea (mg/Nm3)**

Rend. Ret. Filtro	Fracción fhog	3,22	0%	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%
0,900	267,94	241,15	214,35	187,56	160,77	133,97	107,18	80,38	53,59	26,79	0,00	0,00	0,00
0,920	214,35	192,92	171,48	150,05	128,61	107,18	85,74	64,31	42,87	21,44	0,00	0,00	0,00
0,940	160,77	144,69	128,61	112,54	96,46	80,38	64,31	48,23	32,15	16,08	0,00	0,00	0,00
0,960	107,18	96,46	85,74	75,02	64,31	53,59	42,87	32,15	21,44	10,72	0,00	0,00	0,00
0,980	53,59	48,23	42,87	37,51	32,15	26,79	21,44	16,08	10,72	5,36	0,00	0,00	0,00
0,990	26,79	24,11	21,44	18,76	16,08	13,40	10,72	8,04	5,36	2,68	0,00	0,00	0,00
0,995	13,40	12,06	10,72	9,38	8,04	6,70	5,36	4,02	2,68	1,34	0,00	0,00	0,00
0,996	10,72	9,65	8,57	7,50	6,43	5,36	4,29	3,22	2,14	1,07	0,00	0,00	0,00
0,997	8,04	7,23	6,43	5,63	4,82	4,02	3,22	2,41	1,61	0,80	0,00	0,00	0,00
0,998	5,36	4,82	4,29	3,75	3,22	2,68	2,14	1,61	1,07	0,54	0,00	0,00	0,00
0,999	2,68	2,41	2,14	1,88	1,61	1,34	1,07	0,80	0,54	0,27	0,00	0,00	0,00
1,000	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

**Concentración partículas en chimenea (mg/Nm3)**

Cenizas (%)	Fracción fhog	3,22	0%	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%
0,00%	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,20%	1,16	1,05	0,93	0,81	0,70	0,58	0,47	0,35	0,23	0,12	0,00	0,00	0,00
0,40%	2,33	2,09	1,86	1,63	1,40	1,16	0,93	0,70	0,47	0,23	0,00	0,00	0,00
0,60%	3,49	3,14	2,79	2,44	2,09	1,75	1,40	1,05	0,70	0,35	0,00	0,00	0,00
0,80%	4,65	4,19	3,72	3,26	2,79	2,33	1,86	1,40	0,93	0,47	0,00	0,00	0,00
1,00%	5,82	5,24	4,66	4,07	3,49	2,91	2,33	1,75	1,16	0,58	0,00	0,00	0,00
1,20%	6,98	6,29	5,59	4,89	4,19	3,49	2,79	2,10	1,40	0,70	0,00	0,00	0,00
1,40%	8,15	7,34	6,52	5,71	4,89	4,08	3,26	2,45	1,63	0,82	0,00	0,00	0,00
1,60%	9,32	8,39	7,45	6,52	5,59	4,66	3,73	2,80	1,86	0,93	0,00	0,00	0,00
1,80%	10,48	9,44	8,39	7,34	6,29	5,24	4,19	3,15	2,10	1,05	0,00	0,00	0,00
2,00%	11,65	10,49	9,32	8,16	6,99	5,83	4,66	3,50	2,33	1,17	0,00	0,00	0,00
2,20%	12,82	11,54	10,26	8,97	7,69	6,41	5,13	3,85	2,56	1,28	0,00	0,00	0,00
2,40%	13,99	12,59	11,19	9,79	8,39	6,99	5,60	4,20	2,80	1,40	0,00	0,00	0,00