



Escuela de Caminos

Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos
UPC BARCELONATECH

Evaluación Ambiental y Económica de la Gestión de Residuos de Construcción y Demolición con una Perspectiva de Economía Circular

Trabajo realizado por:

Claribel Melissa Lara Mercedes

Dirigido por:

**Santiago Gassó Domingo, Xavier Roca Ramón y
Luis Alberto López**

Máster en:

Ingeniería Ambiental

Barcelona, 28 de septiembre del 2020

Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental

TRABAJO FINAL DE MASTER

Evaluación Ambiental y Económica de la Gestión de Residuos de Construcción y Demolición con una Perspectiva de Economía Circular

CLARIBEL MELISSA LARA MERCEDES

Universitat Politècnica de Catalunya

Programa de Máster en Ingeniería Ambiental

Evaluación Ambiental y Económica de la Gestión de Residuos de Construcción y Demolición con una Perspectiva de Economía Circular

CLARIBEL MELISSA LARA MERCEDES

Universidad Politécnica de Cataluña

**Tutores del TFM: Santiago Gassó Domingo y Xavier Roca Ramón
Tutor externo del TFM: Luis Alberto López**

Barcelona, septiembre 2020

**Trabajo de Fin de Máster presentado para obtener el título de
Máster en Ingeniería Ambiental por la Universitat Politècnica
de Catalunya**

Dedico esta tesis a mis padres, a mi esposo y a mis amigos

Índice de Contenido

1	Introducción.....	14
1.1	Objetivos	16
2	Estado del Arte	16
2.1	Aspectos generales de los Residuos de Construcción y Demolición (RCD)	16
2.2	Problemática/ beneficios de la gestión de los Residuos de la Construcción y Demolición	17
2.3	Gestión de Residuos de Construcción y Demolición en Cataluña	18
2.4	Economía Lineal, Economía Circular	20
2.5	Legislación, Planes y Programas aplicables	25
2.6	Conclusiones de Estado del Arte.....	26
3	Metodología.....	28
4	Aplicación de la metodología.....	29
4.1	Etapa 1. Definición de las Alternativas.....	29
4.1.1	Materiales, Mezclas y Escenarios.....	29
4.1.2	Delimitación del alcance.....	32
4.2	Etapa 2. Evaluación de las alternativas.....	32
4.2.1	Etapa 2a. Evaluación Medio Ambiental. Análisis de Ciclo de Vida	32
4.2.1.1	Objetivo y Definición del Alcance.....	33
4.2.1.2	Análisis del Inventario de Ciclo de Vida	35
4.2.1.2.1	Agregados Naturales Finos y Gruesos (Producción de Arena Cut-off, U y Producción de Grava Triturada Cut-off, U).....	35
4.2.1.2.2	Agregados Reciclados Gruesos	36
4.2.1.2.3	Otros procesos considerados.....	38
4.2.1.2.4	Transporte.....	39
4.2.1.3	Inventario de Ciclo de Vida	46
4.2.1.4	Resultados y discusión	48
4.2.1.4.1	Agregado Natural y Reciclado.....	48
4.2.1.4.2	Economía Lineal.....	51
4.2.1.4.3	Economía Circular.....	53
4.2.1.5	Interpretación de la Evaluación de Ciclo de Vida.....	58
4.2.1.5.1	Agregados Naturales (Grava Triturada), Agregados Reciclados – Planta Fija y Agregados Reciclados – Planta Móvil.....	58
4.2.1.5.2	Escenarios de Hormigón Estructural y de Hormigón No Estructural.....	60
4.2.1.6	Análisis de Incertidumbre	62
4.2.1.6.1	Objetivo y Definición del Alcance	62
4.2.1.6.2	Evaluación de Incertidumbre. Método de Monte Carlo.	62
4.2.1.6.3	Resultados y discusión.....	64
4.2.2	Etapa 2b. Análisis Económico.....	70
4.2.2.1	Objetivo y Definición del Alcance.....	70
4.2.2.2	Metodología y datos.....	71
4.2.2.3	Resultados y discusión	72
4.2.2.4	Interpretación de la Evaluación Económica.....	77
5	Conclusiones	79
6	Bibliografía.....	82
7	Anexos.....	87

Índice de Tablas

Tabla 1. Normativa Estatal vigente en materia de Residuos de Construcción y Demolición	25
Tabla 2. Normativa Catalana vigente en materia de Residuos de Construcción y Demolición	26
Tabla 3. Composición Típica del Cemento Ordinario Portland	30
Tabla 4. Propiedades de los agregados gruesos naturales y reciclados utilizados en el hormigón de 30 MPa	30
Tabla 5. Propiedades de los agregados gruesos naturales y reciclados utilizados en el hormigón de 16 MPa	30
Tabla 6. Composición Típica del Cemento Portland ASTM C 150 Tipo I.....	30
Tabla 7. Descripción de alternativas según la proporción de la sustitución de agregado, el lugar de clasificación y de reciclaje de los áridos	31
Tabla 8. Composición hormigones 30 MPa y 16 MPa, según alternativa.....	31
Tabla 9. Impactos evaluados mediante CML-IA Baseline.....	33
Tabla 10. Entidades ligadas al sector de fabricación de hormigón consultadas.....	35
Tabla 11. Procesos Ecoinvent V3 adicionales considerados para la producción de Agregado Reciclado Grueso - Planta Fija.....	37
Tabla 12. Procesos Ecoinvent V3 adicionales considerados para la producción de Agregado Reciclado Grueso en Planta Móvil.....	38
Tabla 13. Otros procesos considerados en el Inventario de Ciclo de Vida	39
Tabla 14. Radios de distancias empleados para calcular la distancia promedio a utilizar en el ACV	39
Tabla 15. Distancias empleadas en nuestro estudio	40
Tabla 16. Localización de las Plantas de Fabricación de Cemento de la Comunidad Autónoma de Cataluña.....	42
Tabla 17. Cálculo de distancia para Plantas Productoras de Cemento localizadas dentro del radio de 75 km.....	42
Tabla 18. Cálculo de distancia para Plantas Productoras de Áridos Naturales localizadas dentro del radio de 40 km.....	43
Tabla 19. Cálculo de distancia para Plantas Productoras de Áridos Reciclados localizadas dentro del radio de 30 km.....	44
Tabla 20. Cálculo de distancia desde los Vertederos de Materiales de Construcción y Demolición y Municipales hasta el Sitio de Obra y la Planta de Reciclaje	45
Tabla 21. Cálculo de distancia desde Plantas de Productoras de Áridos Naturales y Cemento hasta Vertederos Municipales.....	46
Tabla 22. Inventario de Ciclo de Vida	47
Tabla 23. Concepción del estudio en SIMPAPRO según los escenarios establecidos.....	48
Tabla 24. Resultado de la caracterización y comparación de los diferentes agregados gruesos del estudio	59
Tabla 25. Resultado de la caracterización de los diferentes escenarios del estudio	60
Tabla 26. Matriz Pedigree	63
Tabla 27. Resultados para 1m ³ de hormigón preparado en planta según el escenario de estudio	72
Tabla 28. Precios utilizados del BEDEC para cálculo de precio de Agregado Reciclado - Planta Móvil	74
Tabla 29. Precios utilizados del BEDEC para cálculo del precio de Mezclado de Hormigón en Planta de 60 m ³ /h	75
Tabla 30. Costo de aplicación de economía lineal y circular, para 1m ³ de hormigón.....	76
Tabla 31. Precio por m ³ de hormigón incluyendo costos de aplicación de escenario de economía y circular.....	77
Tabla 32. Resumen de valores de costo económico por escenario.....	77

Índice de Figuras

Figura 1. Producción de RCD en la Comunidad Autónoma de Cataluña.	18
Figura 2. Esquema de modelo de Gestión de Residuos de Construcción y Demolición en Cataluña.....	19
Figura 3. Metodología de desarrollo del trabajo	28
Figura 4. Localización del Sitio de Obra en Barcelona.....	32
Figura 5. Límites del escenario de Economía Lineal para la fabricación de hormigón estructural y no estructural	34
Figura 6. Límites del sistema de Economía Circular para la fabricación de hormigón estructural.....	34
Figura 7. Límites del sistema de Economía Circular para la fabricación de hormigón no estructural.....	34
Figura 8. Localización de las Plantas Productoras de Hormigón Preparado de Barcelona dentro del radio de 10 km.....	41
Figura 9. Localización de las Plantas Productoras de Cemento de Barcelona dentro del radio de 75 km.	42
Figura 10. Localización de las Plantas Productoras de Áridos Naturales de Barcelona dentro del radio de 40 km.....	43
Figura 11. Localización de las Plantas Productoras de Áridos Naturales de Barcelona dentro del radio de 40 km.....	44
Figura 12. Resultados de la caracterización del proceso de producción de 1 kg de Agregado Natural	48
Figura 13. Resultados de la caracterización del proceso de producción de 1 kg de Agregado Reciclado de Hormigón en una Planta Fija.....	49
Figura 14. Resultados de la caracterización del proceso de producción de 1 kg de Agregado Reciclado de Hormigón en una Planta Móvil	51
Figura 15. Resultados de la caracterización del escenario HE 100% AN.....	51
Figura 16. Resultados de la caracterización del escenario HNE 100% AN	52
Figura 17. Resultados de la caracterización del escenario HE 20% ARH – PM.....	53
Figura 18. Resultados de la caracterización del escenario HE 20% ARH – PF.....	54
Figura 19. Resultados de la caracterización del escenario HE 30% ARH – PM.....	55
Figura 20. Resultados de la caracterización del escenario HE 30% ARH – PF.....	56
Figura 21. Resultados de la caracterización del escenario HNE 100% ARH – PM.....	57
Figura 22. Resultados de la caracterización del escenario HNE 100% ARH – PF	58
Figura 23. Resultados de la comparación de los diferentes tipos de agregados del estudio.....	59
Figura 24. Resultados de la comparación de los escenarios de Hormigón Estructural	60
Figura 25. Resultados de la comparación de los escenarios de Hormigón No Estructural	61
Figura 26. Resultado de Monte Carlo de la comparación entre la Producción de Agregado Reciclado en Planta Móvil y en Planta Fija	64
Figura 27. Resultado de Monte Carlo de la comparación entre la Producción de Agregado Reciclado en Planta Fija y Agregado Natural	65
Figura 28. Resultado de Monte Carlo de la comparación entre la Producción de Agregado Natural y Agregado Reciclado en Planta Móvil.....	65
Figura 29. Resultados de la comparación de escenarios de HE 100% AN y HE 20% ARH - PF (Extracto Figura 22)	66
Figura 30. Resultado de Monte Carlo de la comparación entre escenarios HE 100% AN y HE 20% ARH - PF	67
Figura 31. Resultados de la comparación de escenarios HE 20% ARH - PF y HE 20% ARH - PM (Extracto Figura 22)	67
Figura 32. Resultado de Monte Carlo de la comparación entre los escenarios HE 20% ARH - PF y HE 20% ARH - PM	68
Figura 33. Resultados de la comparación de los escenarios de HE 100% AN y HE 20% ARH - PM (Extracto Figura 22)	68

Figura 34. Resultado de Monte Carlo de la comparación entre los escenarios HE 100% AN y HE 20% ARH - CES - RES	69
Figura 35. Resultados de la comparación de los escenarios de HNE 100% ARH - PF y HNE 100% ARH – PM (Extracto Figura 22).....	69
Figura 36. Resultado de Monte Carlo de la comparación entre HE 100% ARH - CES- RES y HE 100% ARH - CFS – PR	70

Índice de Anexos

Anexo 1. Citaciones artículo Zhou & Chen, 2017 (Scopus, 2020).....	88
Anexo 2. Localización de las Plantas Productoras de Hormigón Preparado de la Comunidad Autónoma de Cataluña.....	90
Anexo 3. Localización de las Plantas Productoras de Agregados Naturales de la Comunidad Autónoma de Cataluña.....	91
Anexo 4. Localización de las Plantas de Tratamientos de Residuo de Construcción y Demolición de la Comunidad Autónoma de Cataluña.....	92
Anexo 5. Procesos de Ecoinvent V3 modificados.....	96
Anexo 6. Cálculo de precio (€/tkm) de Camión para transporte según su capacidad.....	96
Anexo 7. Cotización equipos reciclaje móviles.....	97
Anexo 8. Precios obtenidos mediante consulta del BEDEC 2020 (versión 2020-1).....	98

Resumen

La implementación desde la Revolución Industrial, de los principios de la Economía Lineal de *extraer, transformar y desechar*, ha traído como consecuencia daños ambientales que ya no resultan invisibles y que van en detrimento de la salud de los seres que habitan el planeta. Es por esto por lo que los gobiernos impulsan el cambio hacia la Economía Circular, que, bajo los principios de *reducción, reutilización y reciclaje*, promete impactar de manera positiva al medio ambiente e incluso a la economía, mediante la generación de nuevas actividades productivas en torno a su aplicación.

El sector de la Construcción es el mayor consumidor de recursos naturales y el mayor productor de residuos, representado 1/3 del total de residuos generados por la Unión Europea. Es por ello que ha sido denominado como “flujo de residuos prioritario” y su importancia ha impulsado a los Estados a presentar iniciativas para su aprovechamiento, por medio de estrategias de Economía Circular.

En este trabajo, el cual circunscribe su alcance territorial a la provincia de Barcelona, se realiza una Evaluación Ambiental (EA) y Económica (EE) de la aplicación de la Economía Circular (EC) a los Residuos de Construcción y Demolición (RCD), mediante la introducción de agregados gruesos reciclados a partir de residuos de hormigón (ARH), producidos mediante el uso de una Planta Fija (PF) o mediante el traslado de una Planta Móvil (PM) al sitio de producción del residuo, en la fabricación de hormigones estructurales y no estructurales. Se plantean 4 escenarios de EC para hormigón estructural: con sustitución de los agregados naturales por agregados reciclados en proporciones de 20 y 30%, y con proveniencia de Planta Fija o Planta Móvil (*HE 20% ARH – PF*, *HE 20% ARH – PM*, *HE 30% ARH – PF* y *HE 30% ARH – PM*). Para el caso de los hormigones no estructurales, los escenarios son 2, y las sustituciones alcanzan el 100% de los agregados naturales (*HNE 100% ARH – PF* y *HNE 100% ARH – PM*). Estos resultados son comparados con los de los escenarios de Economía Lineal: uno para el hormigón estructural, con 100% de agregados gruesos naturales (*HE 100% AN*) y uno para el hormigón no estructural, igualmente con 100% de agregados naturales (*HNE 100% AN*), para los cuales también realizamos la Evaluación Ambiental y Economía, y se establece la mejor alternativa según el criterio económico y medio - ambiental, para los agregados gruesos, el hormigón estructural y el hormigón no estructural.

La Evaluación Ambiental (EA) es realizada mediante la implementación del método de Análisis de Ciclo de Vida (ACV) por medio de la herramienta SIMAPRO, en su versión PhD, Released 9.0.0.49. La Evaluación Económica es realizada mediante el Cálculo de Costo de Licitación, a partir de la base de datos del ITEC, el BEDEC, en su versión de 2020-1.

Respecto al criterio medio ambiental, según los resultados de la EA, el *Agregado Reciclado – Planta Móvil*, no presenta, en ninguna ocasión los mayores impactos por categorías del estudio. En cambio, el *Agregado Reciclado – Planta Fija* presenta mayores valores en 6 categorías: *Agotamiento Abiótico (combustibles fósiles) (AAF)*, *Calentamiento Global (GWP)*, *Reducción de la Capa de Ozono (ODP)*, *Toxicidad Humana (TOH)*, *Oxidación Fotoquímica (OFO)*, *Acidificación (ACI)* y *Eutrofización (EUT)* y, el *Agregado Natural (AN)* los presenta en 5 categorías: *Agotamiento Abiótico (AAB)*, *Ecotoxicidad en Agua Dulce (EAD)*, *Ecotoxicidad en Aguas Marinas (EAM)* y *Ecotoxicidad Terrestre (ETE)*.

En el caso de los escenarios de hormigón estructural, el hormigón *HE 30% ARH – PM* presenta los menores valores de impacto para 10 de las 11 categorías del estudio, a excepción de Eutrofización en la cual supera únicamente al *HE 20% ARH - PF*. El hormigón convencional *HE 100% AN*, presenta el liderazgo respecto a los impactos producidos para 8 de 11 categorías. Para los hormigones no estructurales, el *HNE 100% ARH – PM* no presenta los mayores valores en ninguna de las categoría de impacto del estudio, mientras *El HNE 100% ARH – PM* los presenta en la mayor cantidad, 6 categorías de impacto.

Se realiza una Evaluación de Incertidumbre a los resultados de la Evaluación Ambiental, mediante la aplicación del método Monte Carlo incluido en el programa SIMAPRO, a partir de la cual se establece el grado de confiabilidad y certitud de las afirmaciones realizadas.

Respecto al criterio económico, el Agregado Reciclado - Planta Móvil presenta menor costo de producción, mientras, el Agregado Natural resulta el más costoso. En cuanto a los escenarios planteados, la producción de hormigones convencionales, o sea, que son fabricados con 100 % de Agregados Naturales, en su versión estructural y no estructural, resultan los más costosos, mientras, los menos costosos son los que presentan mayor sustitución de Agregado Reciclado – Planta Móvil, o sea, *HE 30% ARH – PM* y *HNE 100% ARH – PM*. Finalmente, si al coste de producción añadimos el coste de aplicación de la economía, para el caso de los hormigones estructurales, el más favorable resulta el *HE 20%ARH – PM*, mientras el menos favorable resulta el hormigón convencional. Para el caso de los hormigones no estructurales, el más favorable resulta el *HNE 100% ARH- PM* y el menos favorable, el hormigón convencional.

En base a los criterios explicados anteriormente, en el territorio de Barcelona, este trabajo ha establecido que, para los hormigones estructurales, el mejor escenario es *HE 30% ARH - PM* y para los no estructurales, *HNE 100% ARH - P.M.*

Abstract

The implementation since the Industrial Revolution of the principles of the Linear Economy of *extracting*, *transforming* and *disposing*, has resulted in environmental damage that is no longer invisible and that is detrimental to the health of the beings that inhabit the planet. That is why governments promote the change towards the Circular Economy, which, under the principles of *reduction*, *reuse* and *recycling*, promises to positively impact the environment and even the economy, through the generation of new productive activities around its application.

The Construction sector is the largest consumer of natural resources and the largest producer of waste, representing 1/3 of the total waste generated by the European Union. That is why it has been called a “priority waste stream” and its importance has prompted the States to present initiatives for its use, through Circular Economy strategies.

In this work, which circumscribes its territorial scope to the province of Barcelona, an Environmental (EA) and Economic (EE) Assessment of the application of the Circular Economy (EC) to Construction and Demolition Waste (RCD) is carried out, by introducing recycled coarse aggregates from concrete waste (ARH), produced by using a fixed plant (PF) or by moving a mobile plant (PM) to the waste production site, in the manufacture of structural and non-structural concretes. 4 EC scenarios are proposed for structural concrete: with replacement of natural aggregates by recycled aggregates in proportions of 20 and 30%, and with origin from a fixed plant or mobile plant (*HE 20% ARH - PF*, *HE 20% ARH - PM*, *HE 30% ARH-PF* and *HE 30% ARH-PM*). In the case of non-structural concretes, the scenarios are 2, and the substitutions reach 100% of the natural aggregates (*HNE 100% ARH - PF* and *HNE 100% ARH - PM*). These results are compared with those of the Linear Economy scenarios: one for structural concrete, with 100% natural coarse aggregates (*HE 100% AN*) and one for non-structural concrete, also with 100% natural aggregates (*HNE 100 % AN*), for which we also carry out the Environmental and Economic Assessment, and the best alternative is established according to the economic and environmental criteria, for coarse aggregates, structural concrete and non-structural concrete.

The Environmental Assessment (EA) is performed through the implementation of the Life Cycle Analysis (LCA) method through the SIMAPRO tool, in its PhD version, Released 9.0.0.49. The Economic Evaluation is carried out by means of the Bid Cost Calculation, from the ITEC database, the BEDEC, in its version of 2020-1.

Regarding the environmental criteria, according to the results of the EA, the *Recycled Aggregate - Mobile Plant* does not, on any occasion, present the greatest impacts by categories of the study. On the other hand, *Recycled Aggregate - Fixed Plant* presents higher values in 6 categories: *Abiotic Depletion (fossil fuels) (AAF)*, *Global Warming (GWP)*, *Ozone Layer Reduction (ODP)*, *Human Toxicity (TOH)*, *Photochemical Oxidation (OFO)*, *Acidification (ACI)* and *Eutrophication (EUT)* and, *Natural Aggregate (AN)* presents them in 5 categories: *Abiotic Depletion (AAB)*, *Ecotoxicity in Fresh Water (EAD)*, *Ecotoxicity in Marine Waters (EAM)* and *Ecotoxicity Terrestrial (ETE)*.

In the case of the structural concrete scenarios, the *HE 30% ARH - PM* concrete presents the lowest impact values for 10 of the 11 categories of the study, with the exception of Eutrophication in which it only exceeds *HE 20% ARH - PF*. Conventional concrete *HE 100% AN*, presents the leadership regarding the impacts produced for 8 of 11 categories. For non-structural concretes, the *HNE 100% ARH - PM* does not present the highest values in any of the impact categories of the study, while the *HNE 100% ARH - PM* presents them in the highest quantity, 6 impact categories.

An Uncertainty Assessment is performed on the results of the Environmental Assessment, by applying the Monte Carlo method included in the SIMAPRO program, from which the degree of reliability and certainty of the statements made is established.

Regarding the economic criteria, the *Recycled Aggregate - Mobile Plant* has the lowest production cost, while the *Natural Aggregate* is the most expensive. Regarding the scenarios proposed, the production of conventional concrete, that is, that they are manufactured with 100% *Natural Aggregates*, in their structural and non-structural versions, are the most expensive, while the least expensive are the ones that present the greatest replacement. *Recycled Aggregate - Mobile Plant*, that is, *HE 30% ARH - PM* and *HNE 100% ARH - PM*. Finally, if we add to the production cost the cost of applying the economy, in the case of structural concretes, the most favorable is *HE 20% ARH - PM*, while the least favorable is conventional concrete. In the case of non-structural concretes, the most favorable is *HNE 100% ARH-PM* and the least favorable, conventional concrete.

Based on the criteria explained above, in the territory of Barcelona, this work has established that, for structural concretes, the best scenario is *HE 30% ARH - PM* and for non-structural ones, *HNE 100% ARH - P.M.*

Agradecimientos

Agradezco primero a Dios por la oportunidad de poder realizar este máster y por todas las demás gracias recibidas durante este período de estudio.

A mi esposo, por su apoyo incondicional, por su compañía, su soporte y ánimo siempre que fue necesario.

A mis padres y hermanos, por su apoyo y su presencia aún en la distancia.

A mis profesores por su tiempo y enseñanzas, en especial a mi tutor, Prof. Santiago Gassó, por su disposición desde el primer momento en dirigir mi trabajo final y por su acompañamiento oportuno durante su elaboración.

A mi tutor, Prof. Xavier Roca Ramón, por sus orientaciones, recomendaciones y disponibilidad.

A mi tutor externo, Luis Alberto López, por todo su tiempo, sus aclaraciones y recomendaciones, por su paciencia y delicadeza para ayudarme a desarrollar este trabajo.

A la profesora Violeta Vargas, por su tiempo y soporte para el uso de la herramienta SIMAPRO.

Al ing. Thibault de Certaines y a Grecia Furniel, por colaborar con la revisión de mi trabajo y por tomarse el tiempo de interpretar y ayudarme a expresar de manera comprensible las ideas que necesitaban ser afinadas para una mejor comunicación del trabajo realizado.

A mis amigas por su apoyo y compañía, por sus visitas a Barcelona, por su tiempo, por el ánimo.

A todos mis amigos, que colaboraron de diferentes maneras a la culminación de este proyecto.

A mis compañeros de máster que formaron parte de mi desarrollo durante estos dos años, a los que se convirtieron en amigos: gracias por las enseñanzas, gracias por las vivencias.

1 Introducción

El desarrollo económico de los países en base al modelo de Economía Lineal y el crecimiento de la población están ampliamente ligados al consumo de materias primas naturales y a la producción de residuos. Siendo que la industria de la construcción es uno de los principales sectores de generación de bienes económicos a nivel mundial, representando para la Unión Europea 18 millones de empleos directos y 9% del PIB (European Construction Industry Federation, 2018), participa de manera importante de los impactos asociados a este desarrollo económico.

El hormigón, principal insumo del sector construcción, es el producto creado por el hombre más utilizado en el mundo y el segundo más usado después del agua. Está compuesto principalmente por una mezcla de grava, arena, cemento, y agua, pudiendo también contener otras sustancias o aditivos según las prestaciones para las cuales ha sido concebido. Anualmente, para la fabricación de hormigón se consumen en todo el mundo 1.6 billones de toneladas de cemento Portland, 1 billón de toneladas de agua y 10 billones de toneladas de arena, lo que convierte a la industria del concreto en la mayor consumidora de recursos naturales del mundo (Allen et al., 2017).

Como componente del hormigón, los áridos representan el 75% del hormigón respecto a su peso (Ostrowski et al., 2020). La alta demanda y el proceso de explotación de la grava y de la arena, recursos naturales no renovables a los cuales les corresponde un 50% y 25% de la composición del hormigón, respectivamente, implica la degradación de espacios naturales como son ríos, playas, fondos oceánicos y canteras (Koç & Christiansen, 2019). En cuanto al cemento, su proceso de producción es responsable del 7% de las emisiones de dióxido de carbono mundial, debido principalmente al consumo de energía por las altas temperaturas requeridas para la obtención del Clinker, así como a la incineración de materias primas necesarias para su fabricación (Oh et al., 2014).

El sector de la construcción es señalado como el sector económico que genera el mayor flujo de residuos. Según los datos presentados por Eurostat, en el 2016 en la Unión Europea se generaron 2,261 millones de toneladas de residuos, de los cuales 791 millones corresponden al sector de la Construcción y Demolición (Eurostat, 2016), con un 35% del total. Los demás sectores económicos: Minería y Extracción (28%), Manufactura (11%), Energía (3%), Otras Actividades (15%) y Doméstico (8%), no superan, de manera individual, los residuos del sector Construcción.

Los residuos de construcción y demolición (RCD) resultan una fuente evidente y continua de agregados para la fabricación de nuevo concreto ya que, mediante el uso de agregados reciclados a partir de estos, es posible lograr concreto con propiedades mecánicas similares a los fabricados con materias primas primarias (Evangelista & De Brito, 2007). En base a lo anterior, en la búsqueda de lograr el aprovechamiento de los residuos y disminuir la degradación del medio ambiente, a nivel europeo, la Directiva 2008/98/CE, llamada también *Directiva Marco de Residuos*, y su modificación mediante la Directiva 2018/85, establecen como objetivo la valorización del 70% de los RCD no peligrosos (en peso) producidos en la UE. Sin embargo, en el 2016, el porcentaje de reciclaje de materiales había alcanzado solo un 37%, frente a un 47% que fue directamente dispuesto a vertederos (Eurostat, 2016; Parlamento Europeo, 2008, 2018).

En la búsqueda de implementar acciones para minimizar o eliminar los impactos al medio ambiente y a la salud humana asociados a la depredación de los recursos naturales, al procesamiento de los insumos del sector, así como a la gestión del gran volumen de RCD producidos, todos ligados al desarrollo de las economías, surge la Economía Circular, que, basándose en el Principio de las 3R (*Reducción, Reutilización y Reciclaje*), estrategias de las 3Rs, y otras estrategias aplicadas al ciclo de vida completo de productos y

servicios, dispone en su aplicación a los RCD evitar las fugas de materiales valiosos, mejorando el aprovechamiento de los recursos naturales extraídos y proporcionando beneficios económicos y ambientales, en torno a la explotación de los residuos.

Es por lo anterior que los países han venido incluyendo en sus legislaciones políticas de gestión de residuos con la finalidad de minimizar y reciclar, e incentivar el uso de los RCD como iniciativas de aplicación de la Economía Circular. En España, los primeros pasos datan del 2008 con la publicación Real Decreto 105/2008, de 1^o de febrero, por el que se regula la producción y gestión de los residuos de construcción y demolición. Respecto a los planes de implementación de estas regulaciones, el primero, el Plan Nacional Integrado de Residuos 2008-2015 (PNIR), data del 2009, siendo actualizado cada período hasta el actual PEMAR 2016-2022 (Ministerio de Agricultura Alimentación y Medio Ambiente, 2016).

Existen estudios cuyos resultados permiten afirmar que las operaciones de valorización de RCD, principalmente la de reciclaje, producen beneficios respecto a la depredación del medio ambiente (López Gayarre et al., 2016; Suárez, 2015) y al vertido de los residuos. Sin embargo, las actividades necesarias para su aprovechamiento producen impactos ambientales y económicos que deben ser considerados, tales como: altos consumos de energía, emisiones de CO₂ y otros compuestos contaminantes que afectan al medio ambiente y la salud humana (López Gayarre et al., 2016; Marinković et al., 2010) e, inversiones económicas a cargo de los procesos e instalaciones a utilizar.

Lo anterior, nos permite establecer que los impactos ambientales y económicos del hormigón se produce en las diferentes etapas del ciclo de vida de los elementos construidos a partir de este; desde la fabricación de los materiales empleados hasta la recuperación de materiales realizada a partir de los RCD (Ghisellini et al., 2015; López Ruiz et al., 2020; Suárez Silgado et al., 2018).

Estos impactos ambientales son determinados mediante la aplicación del método de Análisis de Ciclo de Vida, que permite evaluar todas las etapas de la vida de un producto y establecer sus punto de atención. Por otra parte, los impactos económicos del método de obtención de los agregados y de su uso en el hormigón son determinado por medio de un Análisis de Costos de las mismas etapas. La obtención de los resultados de ambos análisis permite concluir las acciones necesarias para alcanzar mejoras que, junto al desarrollo de nuevas tecnologías y la mejora en la eficiencia de los equipos de reciclaje darían un mayor valor a los agregados y mejorarían la competitividad de los materiales reciclados provenientes del hormigón frente a los materiales de origen natural (López Gayarre, 2008).

Este trabajo pretende evaluar ambiental y económicamente la producción de hormigón a partir de áridos gruesos reciclados de RCD, específicamente de residuos de hormigón, mediante la utilización de Planta Fija y Planta Móvil, en aplicación de la Economía Circular. Evalúa 4 escenarios de Economía Circular para Hormigón Estructural (*HE 20% ARH - PF*, *HE 20% ARH - PM*, *HE 30% ARH-PF* and *HE 30% ARH-PM*), y 2 escenarios de Economía Circular para Hormigón No Estructural (*HNE 100% ARH - PF* y *HNE 100% ARH - PM*). Estos se comparan con 1 escenario de Economía Lineal para Hormigón Estructural (*HE 100% AN*) y 1 para Hormigón No Estructural (*HNE 100% AN*), respectivamente. Se ha realizado de igual forma la evaluación de los agregados gruesos naturales y reciclados, como materiales componentes a introducir en las mezclas. La evaluación ha sido realizada para la provincia de Barcelona, por ser la capital de la comunidad autónoma con mayor producción de RCD (Asociación Española de Reciclaje de Residuos de Construcción y Demolición, 2017), e incluye el análisis de la incertidumbre de los datos utilizados para la Evaluación Ambiental.

1.1 Objetivos

❖ Objetivo General

El objetivo del presente trabajo es evaluar los impactos ambientales y económicos de la implementación del concepto de Economía Circular (EC) en el campo de los Residuos de Construcción y Demolición (RCD). La evaluación será realizada a un conjunto de escenarios de fabricación de hormigón estructural y no estructural, a los cuales se incorporan materiales reciclados en diferentes proporciones, correspondiendo estos materiales a agregados gruesos provenientes de la demolición de estructuras o elementos de concreto que han llegado a su fin de vida. Se evalúan alternativas de clasificación (clasificación en el sitio de producción de los desechos y fuera de este) y producción (Planta Fija o Planta Móvil), siendo los resultados obtenidos para cada escenario posteriormente comparados para el establecimiento tanto, del más impactante por categoría ambiental del estudio, como el más impactante y favorable a nivel económico.

❖ Objetivos Específicos

Realizar la evaluación ambiental y económica del proceso de obtención de Agregados Naturales Gruesos y de los procesos de obtención de Agregados Reciclados Gruesos mediante el procesamiento de los Residuos de Construcción y Demolición (RCD) en Planta Fija y en Planta Móvil, y su comparación para el establecimiento del más impactante y favorable a nivel ambiental y económico.

Realizar la evaluación ambiental y económica del proceso de fabricación de Hormigón Estructural considerando la utilización de Agregados Naturales Gruesos en una proporción de 100%, en aplicación del concepto de Economía Lineal, así como de la fabricación considerando su sustitución por la utilización de diferentes proporciones (20% y 30%) de Agregados Reciclados Gruesos de Planta Móvil y Planta Fija, en aplicación del concepto de Economía Circular, y su comparación para el establecimiento del más impactante y favorable a nivel ambiental y económico.

Realizar la evaluación ambiental y económica del proceso de fabricación de Hormigón No Estructural considerando la utilización de Agregados Naturales Gruesos en una proporción de 100%, en aplicación del concepto de Economía Lineal, así como de la fabricación considerando su sustitución por la utilización de 100% de Agregados Reciclados Gruesos de Planta Móvil y Planta Fija, en aplicación del concepto de Economía Circular, y su comparación para el establecimiento del más impactante por categoría ambiental, así como el más impactante y favorable a nivel ambiental y económico.

Realizar un Análisis de Incertidumbre de los resultados obtenidos mediante la Evaluación Ambiental, para establecer el grado de probabilidad de ocurrencia de estos.

2 Estado del Arte

2.1 Aspectos generales de los Residuos de Construcción y Demolición (RCD)

Los *Residuos de Construcción y Demolición (RCD)* son los residuos sólidos generados por el sector de la construcción. Proviene de las diferentes etapas de los procesos de construcción de estructuras, incluyendo la fabricación inicial de los materiales a utilizar, pero principalmente de los procesos de demolición o de desconstrucción selectiva de las estructuras que han llegado a su fin de vida.

Los RCD están compuestos por hormigón, ladrillos, tejas, cerámicos, vidrio, madera, plásticos, metales, mezclas bituminosas, alquitrán de hulla y otros productos alquitranados, yeso, materiales de excavación y, materiales de aislamiento y de construcción contenedores de amianto, según han sido descompuestos en la

Lista Europea de Residuos (Ministerio de Medio Ambiente, 2002). El contenido de hormigón puede representar entre un 20% (Cortina Ramírez, 2007) y un 70% (Oh et al., 2014) de la composición total.

Los RCD representan del 30%- 40% de los residuos sólidos producidos a nivel mundial (Jin et al., 2019), razón por la cual han sido declarados por la Comisión Europea como “flujo de residuos prioritarios” en 1996 (Comisión Europea, 1996), como “área prioritaria” en el 2015 (Comisión Europea, 2015) y como “cadena de valor clave” en el 2020 (Comisión Europea, 2020). Basados en su volumen, los RCD constituyen la más grande fuente de residuos en Europa (Comisión Europea, 2018).

2.2 Problemática/ beneficios de la gestión de los Residuos de la Construcción y Demolición

Según la Comisión Europea, (2020), del total de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) al sector de la construcción les son adjudicables entre el 5% y el 12%, consume el 50% de los materiales extraídos y es responsables de más de 35% de los residuos generados a nivel europeo. Lo anterior, como establecido anteriormente en la *Introducción*, nos permite establecer que el impacto del sector se produce en las diferentes etapas del ciclo de vida de los elementos construidos (Ghisellini et al., 2015; López Ruiz et al., 2020; Suárez Silgado et al., 2018).

Como fue establecido en el párrafo anterior, los RCD representan una tercera parte de los residuos de la Unión Europea, por lo cual resulta imperante lograr su buena gestión. En base a los objetivos y medidas establecidas por el Protocolo de Gestión de Residuos de Construcción y Demolición en la Unión Europea (Comisión Europea, 2016) se pueden establecer las áreas de problemática asociada a la gestión de los RCD como las siguientes:

- Mala identificación de los residuos,
- Mala separación en el origen,
- Recogida ineficiente,
- Problemas de logística, como son la mala trazabilidad de los flujos de los residuos, transporte inadecuado, recogida selectiva ineficiente,
- Problemas en el procesamiento, que denota inadecuada selección del material de relleno, problemas de limpieza y de procesamiento del material de reutilización y proceso ineficiente de aprobación o rechazo del material aceptado en las instalaciones de reciclaje,
- Falta de garantía de la calidad de los productos y de adecuación de los lugares de producción, y
- Condiciones marco y política a ajustar e implementar para la restricción de los vertidos, regulación de la gestión de los RCD, aplicación de la normativa sobre construcción y demolición y mejorar la percepción, concientización y aceptación por parte del público de los materiales obtenidos.

Por otra parte, entre los beneficios que derivan de la correcta gestión de los Residuos de Construcción y Demolición (RCD) podemos establecer:

- Preservación de espacios naturales,
- Minimización del consumo de recursos naturales,
- Utilización de materiales que, de ser considerado como desechos, se perderían en los vertederos,
- Mejoría del estado ambiental respecto a la contaminación que produciría estos desechos,
- Aumento de la vida útil de los vertederos,
- Creación de empleos en torno a las actividades de recuperación, reciclaje y aplicación de la Economía Circular, y
- Ahorro económico por empleo de materiales reciclados.

Sin embargo, para lograr estos beneficios, tanto el tratamiento en planta de reciclaje como el vertido de desechos en los vertederos debe ser gravado económicamente de manera tal que la separación en el sitio

de generación del desecho, así como la reutilización, siempre que sea posible, de estos materiales separados en la misma construcción, resulte interesante para los contratistas. En adición, las autoridades deben proponer incentivos económicos para promover el uso materiales reciclados y ayudar al cambio de la mentalidad frente a estos (Ulubeyli et al., 2017).

2.3 Gestión de Residuos de Construcción y Demolición en Cataluña

En el territorio español, en 2015, se generaron 14,862,442 toneladas de RCD de forma controlada, de las cuales se reciclaron 9,881,590 toneladas, equivalentes a un 66% de los residuos producidos. Los años anteriores, desde el 2011 al 2014, los porcentaje de reciclaje fueron de 68%, 70%, 65% y 65%, respectivamente (Asociación Española de Reciclaje de Residuos de Construcción y Demolición, 2017), un poco por debajo del objetivo establecido por la Directiva 2008/98/EC de 70% de recuperación y reciclaje de los residuos producidos al 2020 (López Ruiz et al., 2020; Parlamento Europeo, 2008).

Para el caso de Cataluña, la cual al 2015 figura como la primera comunidad autónoma respecto a la producción de RCD (Asociación Española de Reciclaje de Residuos de Construcción y Demolición, 2017), la generación controlada de RCD al 2018 alcanza un total de 4,300,000 toneladas, con una tasa de reciclaje de un 53% Figura 1. Para los años anteriores, del 2011 los porcentajes van desde un 41 a un 54%.

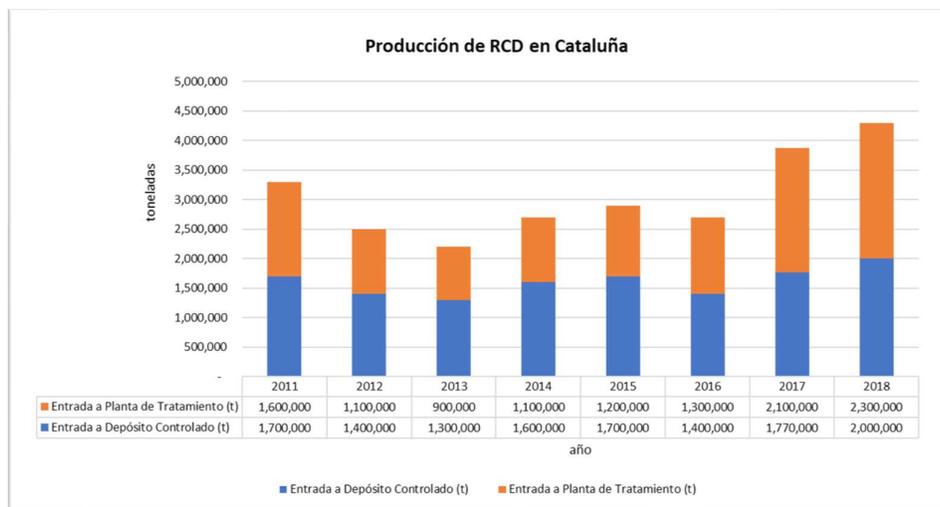


Figura 1. Producción de RCD en la Comunidad Autónoma de Cataluña. Fuente: Elaboración Propia a partir de la Memoria de la Agencia de Residuos de Cataluña 2018.

La administración de los residuos producidos y gestionados dentro de la Comunidad Autónoma de Cataluña es llevada a cabo por la Agencia de Residuos de Cataluña (ARC), antigua Junta de Residuos. Esta entidad tiene como funciones principales:

- La promoción de la reducción de residuos y su peligrosidad,
- El fomento de la recogida selectiva,
- La valorización de los residuos,
- La disposición de los desperdicios,
- La recuperación de los espacios degradados por la disposición incontrolada de desechos o por contaminación.

Según el Programa General de Prevención y Gestión de Residuos y Recursos de Catalunya 2020 (PRECAT20), la gestión de los RCD producidos en la comunidad autónoma de Cataluña es realizada en base al modelo presentado en la Figura 2, y contempla acciones realizables según el tipo de residuos a

gestionar. Según el esquema, existen las etapas de *Generación*, *Separación en Origen*, *Transferencia y Selección* y *Valorización y Disposición Controlada* y los residuos generados por las *Actividades de Construcción y Demolición* pueden ser *Inertes*, *Peligrosos* y *No Peligrosos*.

Para el caso de los residuos Inertes y No Peligrosos, las vías de gestión contemplan: 1) transporte hasta la *Planta de Transferencia* o *Planta de Selección y Transferencia* desde donde se realizará posteriormente el 2) transporte a la *Planta de Reciclaje Ex Situ* situada en una *Planta de Valorización*, lugar en el que serán sometidos a los procesos necesarios para obtener el material reciclado que finalmente 3) será reintegrado a las *Actividades de Construcción y Demolición* y 4) el rechazo del proceso será dispuesto en un *Depósito Controlado*. En el caso especial de los residuos Inertes, estos pueden ser sometidos al *Reciclaje In Situ en Planta Móvil* y ser reutilizados inmediatamente en el lugar en donde son generados. Para el caso de los residuos Peligroso, la única vía de gestión posible es el 1) transporte para la realización del *Tratamiento y Eliminación de Residuos Peligrosos*, luego de los cual son dispuestos en un *Depósito Controlado*.

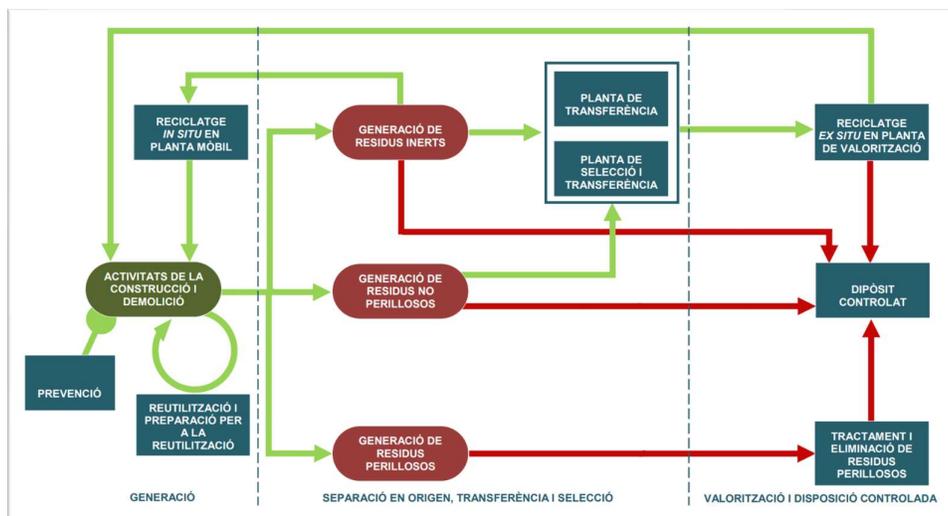


Figura 2. Esquema de modelo de Gestión de Residuos de Construcción y Demolición en Cataluña. Fuente: Agencia de Residuos de Cataluña, 2010

En el proceso de gestión de los RCD figuran como actores importantes los Gestores Autorizados, que son las empresa que se encargan, a cuenta de productor del residuos, de realizar el proceso de reciclaje ex situ, transporte hacia el depósito controlado o tratamiento, valorización y disposición de los residuos, según aplique.

En la Comunidad Autónoma de Cataluña existen 104 Gestores Autorizados de Residuos de Hormigón (170101) y de Mezclas de hormigón, ladrillos, tejas y materiales cerámicos, distintas de las especificadas en el código 170106 (170107). También se registran 72 Plantas de Reciclaje de RCD (Planta de Valorización) y 55 Vertederos de Escombros de Construcción y Demolición (Agencia de Residuos de Cataluña, 2020).

Para la optimización de la gestión de los Escombros y Residuos de la construcción, se ha establecido mediante Ley 8/2008, del 10 de julio, el Canon sobre la Deposición Controlada de Residuos de la Construcción, que grava con 3 euros por toneladas los residuos a disponer en instalaciones a los fines, denominadas Depósitos Controlados de Escombros. Este impuesto ecológico, a pagarse al momento de la deposición, se determina de manera directa mediante el pesado del material a ser vertido, o indirecta, a partir del cualquier dato con el que cuente la administración respecto al sujeto productor de los residuos.

Los recursos recaudados son aplicados al Fondo de Gestión de Residuos cuya Junta de Gobierno para los Residuos de la Construcción vela por la planificación, gestión y uso de estos en los correspondientes programas de gestión de residuos destinados al fomento de la prevención de la generación y operaciones de valorización de residuos, así como en la investigación de las posibles aplicaciones de los materiales recuperados.

2.4 Economía Lineal, Economía Circular

La Economía Lineal representa el modelo económico imperante desde la Revolución Industrial. Está basado en la explotación de recursos naturales para su transformación en productos utilizables por la población y, su desecho, al final de su vida útil o al fin de la necesidad de uso, por medio de su disposición en un vertedero. Sus principios básicos consisten en extraer, transformar y desechar. Como consecuencia de su implementación por casi 250 años, hemos impactado el medio ambiente provocando:

- Episodios de contaminación dada la imposibilidad del medio aéreo, acuático y terrestre de asumir las cargas contaminantes que le son impuestas,
- Acumulación de residuos sin uso posterior,
- Explotación de recursos naturales renovables por encima de su tasa de renovación, trayendo como consecuencia la pérdida de biodiversidad,
- Agotamiento de recursos no renovables y uso de recursos alternativos a los no renovables que generan impactos ambientales adicionales.

Como el ser humano depende en general del bienestar del medio ambiente y los efectos causados por el actual modelo ya no resultan invisibles, los gobiernos han comenzado a actuar en conjunto en búsqueda de cambiar el sistema hacia uno más sostenible, que permita reducir la acumulación de residuos mediante su aprovechamiento para la obtención de materia prima para nuevos procesos y de esta forma, mantener los recursos inicialmente explotados circulando en el medio el mayor tiempo posible. Estos son parte de los beneficios que supone el cambio hacia una Economía Circular, la cual busca, sobre todo, garantizar el crecimiento y desarrollo económico, pero disminuyendo sus efectos indeseados sobre el medio ambiente y la salud humana (Ministerio de Agricultura y Pesca Alimentación y Medio Ambiente (MAPAMA), 2018).

El término de Economía Circular aparece por primera vez en el 1989 en el libro de “Economía de los Recursos Naturales y del Medio Ambiente” de David Pearce y Robert K. Turner. Existen numerosas definiciones para el término. Según la Fundación Ellen MacArthur, la Economía Circular se define como *“un sistema industrial que es restaurador o regenerador por intención y diseño. Reemplaza el concepto de fin de vida útil con restauración, cambia hacia el uso de energía renovable, elimina el uso de químicos tóxicos que impiden la reutilización y tiene como objetivo eliminar el desperdicio a través del diseño superior de materiales, productos, sistemas y modelos comerciales”* (Ellen MacArthur Foundation, 2013). Según sus principios, se define como *“un ciclo de desarrollo continuo positivo que preserva y aumenta el capital natural, optimiza los rendimientos de los recursos y minimiza los riesgos del sistema, gestionando stocks finitos y flujos renovables”*. Además, funciona de manera efectiva a cualquier escala (Cerdá & Khalilova, 2016).

❖ Análisis Actual

Ante la necesidad imperante de materializar la transición hacia la Economía Circular, los países han venido dando pasos promocionando diferentes iniciativas para su aplicación. Dentro de las iniciativas de las que contemplan específicamente acciones respecto a los RCD se destacan:

Al nivel europeo:

- **COM (2014) 398 - Towards a circular economy: A zero waste programme for Europe** (Hacia una economía circular: Un programa de cero residuos para Europa),
- **COM (2014) 445 final - On resource efficiency opportunities in the building sector** (Oportunidades para un uso más eficiente de los recursos en el sector de la construcción)
- **COM (2015) 614 - Closing the loop: An EU action plan for the circular economy** (Cerrar el círculo: Un plan de acción de la UE para la economía circular),
- **EU Construction & Demolition Waste Management Protocol (2016)** (Protocolo de gestión de residuos de construcción y demolición en la UE),
- **Gypsum to Gypsum, from production to recycling: a circular economy for the European gypsum industry with the demolition and recycling industry (2013 - 2015)** (De la producción al reciclaje: Una economía circular para la industria europea del yeso en colaboración con la industria de la demolición y el reciclaje).
- **COM (2018) 29 - Monitoring framework for the circular economy** (Marco de seguimiento para la economía circular),

Y las más reciente:

- **COM (2019) 640 – European Green Deal**, (El Pacto Verde Europeo),
- **COM (2020) 18 - A new Circular Economy Action Plan: For a cleaner and more competitive Europe**, (Nuevo Plan de acción para la economía circular: Por una Europa más limpia y más competitiva).

Este último constituye la actualización del COM (2015) 614, que incluye las medidas para acelerar la transición hacia la Economía Circular según requerido en el Pacto Verde Europeo, aprovechando al máximo los beneficios de la transición y minimizando el impacto a las personas y empresas. Contempla nuevas medidas para la reducción de la producción de residuos y la garantía de la calidad de las materias primas de producción secundaria, entre las cuales se destacan:

- Revisión del Reglamento sobre los productos de construcción, para, entre otras modificaciones, introducir especificaciones sobre el contenido de materia prima reciclada en ciertos productos, asegurando a la vez el cumplimiento de sus funciones de diseño y seguridad.
- Revisión de los objetivos de recuperación de materiales a partir de RCD establecidos en la normativa de la Unión Europea.
- Análisis de la posibilidad de fijación de carbono en productos de construcción, así como la reducción de carbono asociado a los mismos.
- Promoción de la economía circular respecto a la posibilidad de mejora y adaptación de los edificios ya construidos.

A nivel español:

- **Estrategia Española de Economía Circular: España Circular 2030**, que promueve la transición de España hacia la Economía Circular y marca las pautas para facilitar el proceso. Está dirigida a seis sectores prioritarios, entre los que se encuentra el sector construcción. Presenta objetivos a cumplir para el año 2030 de los cuales pueden ser aplicados a los RCD (Ministerio de Agricultura y Pesca Alimentación y Medio Ambiente (MAPAMA), 2018):
 - Reducción de 30 % del consumo nacional de materiales en relación con el PIB, respecto al 2010

- Reducción de 15% de la generación de residuos respecto a la generación en 2010
- Reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) a una cantidad inferior a las 10 millones de toneladas de CO₂ equivalente.

A nivel catalán:

- **Impuls a l'Economia Verda i a l'Economia Circular - Competitivitat – Eficiència – Innovació (2015)** (Impulso a la Economía Verde y a la Economía Circular - Competitividad - Eficiencia – Innovación),
- **Programa General de Prevenció i Gestió de Residus i Recursos de Catalunya 2020 (PRECAT20)** Programa de Prevención y Gestión de Residuos y Recursos de Cataluña (PRECAT20).

Por otra parte, la comunidad científica ha abordado de manera enérgica el desarrollo del tema de la Economía circular. (Ghisellini et al., 2015) ha realizado una evaluación extensiva de literatura respecto a la aplicación de los principios de la Economía Circular a los RCD. Este estudio contempla la revisión de literatura, desde el 2004 hasta el 2014, para un total de 1031 artículos relativos a la Economía Circular, teniendo como uno de los focos principales los modelos de la EC y los principios de la EC de las 3Rs: Reducción, Reutilización y Reciclaje. Establece las raíces de la Economía Circular como la Economía Ambiental y la Ecología Industrial.

En ese mismo orden, (López Ruiz et al., 2020) ha realizado una evaluación de la literatura científica que contempla la Economía Circular en la industria de la Construcción y Demolición, encontrando inicialmente 236 artículos respecto al tema, y logrando seleccionar 53 que recogen específicamente la aplicaciones de la EC, el uso de los materiales obtenidos a partir de su aplicación, y las iniciativas existentes en el sector de los RCD respecto a los principios de la EC. Destaca que, para su caso de estudio, alrededor del 50% de la literatura ha sido publicada desde el 2017, por lo que categoriza el tema de la Economía Circular en los RCD como un tema “emergente”.

❖ **Aplicación de la Economía Circular a los Residuos de Construcción y Demolición**

Respecto a los RCD, la aplicación de la Economía Circular resulta un concepto sostenible, con el que se logra disminuir el uso de materia prima a partir de la explotación de recursos naturales (Mahpour, 2018) y eliminar los residuos provocados por el sector de la construcción al mantenerlos el mayor tiempo posible en la cadena constructiva, alargando su valor añadido como material de construcción y a la vez, garantizando su calidad (Smol et al., 2015).

Según el estudio realizado por (López Ruiz et al., 2020) se verifican 14 estrategias para la implementación de la Economía Circular a los RCD las cuales son aplicables a 5 etapas de su ciclo de vida:

- 1) **Etapa de Preconstrucción:** que contempla como estrategias la *Aplicación de Instrumentos Económicos*, el *Diseño para la Prevención de Residuos*, *Diseño para el Desensamblaje y la Deconstrucción* y el *Uso de Elementos Prefabricados* y los *Planes de Gestión de RCD*.
- 2) **Etapa de Construcción y renovación de edificaciones:** contempla como única estrategia *Planes de Gestión de los Residuos en el Sitio de Obra*.
- 3) **Etapa de Recolección y distribución:** que considera *Técnicas de Segregación y Colección y Transporte*.
- 4) **Etapa de Fin de vida:** Contempla *Deconstrucción selectiva* y *Auditorías previas a la deconstrucción/demolición*.
- 5) **Etapa de Recuperación y producción de materiales:** que presenta como estrategias el *Reuso*, *Reciclaje*, *Recuperación Energética* y *Relleno de espacios degradados*.

Para nuestro caso de estudio, que comprende esencialmente las últimas tres las etapas, las estrategias de Economía Circular aplicables son:

- Etapa *Recolección y distribución*: las *Técnicas de Segregación* son implementadas en los procesos de construcción y renovación y, en los procesos de Fin de Vida. Son útiles para mejorar los resultados a obtener en la *etapa de recuperación y producción de materiales*. Se recomienda, siempre que posible, realizarlas en el mismo lugar de producción de los residuos. Esto aplica a las materias primas, los productos terminados, los residuos de construcción y los rechazos del proceso de valorización de los RCD.
- Etapa *Fin de Vida*: que contempla la *Deconstrucción selectiva* y *Auditorías previas a la deconstrucción/demolición*. La primera pretende aumentar la calidad del material recuperado manteniendo los niveles de impacto de la actividad en valores aceptables. Mientras, la segunda tiene como objetivo minimizar los residuos mediante la planificación de las actividades a realizar, los volúmenes a recuperar y la destinación de los residuos.
- Etapa *Recuperación y producción de materiales*: contempla la *Reutilización*, *Reciclaje*, *Recuperación Energética* y *Relleno de espacios degradados*. Para los materiales de nuestro caso de estudio, los RCD a partir de hormigón, son aplicables:
 - La *Reutilización* como estrategia de aplicación parece la preferida, en términos ambientales y económicos. Consiste en la reincorporación a nuevos en procesos constructivos de materiales de previo uso o elementos que formaron parte de una estructura, en su estado de RCD tras realizar sobre los mismos procesos de reacondicionamiento, reparaciones, para llevarlo a condiciones operativas.
 - El *Reciclaje*, tiene como pretensión principal reducir el consumo de recursos naturales y reducir la disposición final de residuos en vertedero. Puede realizarse directamente en el sitio en donde se ha producido el residuo, mediante el uso de una **Planta de reciclaje Móvil** o, fuera de este, en una instalación o **Planta de reciclaje Fija**.

Las **Plantas de reciclaje Móviles** son equipos compactos dotados de sistemas de orugas o ruedas que les permiten desplazarse a requerimiento, inclusive en lugares accidentados, de manera autónoma o mediante el uso de un sistema auxiliar de arrastre. Por su distribución modular, permiten el acopio de los materiales reciclados según los requerimientos del proyecto, además de la disponibilidad inmediata del material luego de su procesamiento y, la eliminación de los costes y emisiones asociadas al transporte de los materiales desde la obra hasta la planta de reciclaje y viceversa. También, permiten tener mayor control de la calidad y pureza de los agregados, ya que el operador puede conocer claramente la procedencia del material introducido en esta para su reciclaje. Sin embargo, al contar con menos procesos (clasificación, limpieza, etc.) presentan como desventaja una mayor limitación en cuanto al tipo, tamaño y estado del material a tratar, más posibilidad de admisión de impurezas y un mayor costo por unidad de material obtenido respecto a las Plantas Fijas, ya que su tamaño reducido disminuye su capacidad de tratamiento por hora además del costo que adiciona su sistema de traslado. Generalmente cuentan con una sola línea de producción.

Las **Plantas de reciclaje Fijas** son equipos de mayor dimensión y capacidad de tratamiento que las plantas móviles, por lo que requieren una mayor inversión económica en maquinaria y en los terrenos que albergarán las instalaciones (que a veces pueden estar junto a los depósitos de residuos inertes). Pueden admitir materiales más heterogéneos, realizando la

separación en las distintas etapas manuales y mecánicas del proceso (control de admisión, pretratamiento, precibado, clasificación y limpieza, trituración primaria o secundaria y cribado), y funcionando como centro de selección y transferencias de los materiales que no puede tratar hasta su remisión a la instalación de tratamiento correspondiente. El producto final obtenido, un material más homogéneo, es vendido, y los beneficios percibidos constituyen los ingresos de la planta, junto a la tasa de admisión del residuo, que se paga al momento de la recepción de este por la planta. Pueden tener varias líneas de producción y generar diferentes productos (Cortina Ramírez, 2007).

El reciclaje de RCD como estrategia está ampliamente influenciado, entre otros factores, por: 1) el costo por vertido de residuo en vertedero y 2) las alta cargas económicas que soportan las compañías de reciclaje (Huang et al., 2018). Por lo anterior, se hace necesario el desarrollo y la aplicación de instrumentos económicos que graven el vertido e incentiven la construcción y operación de compañías de reciclaje.

- El *Relleno de espacios degradados*, que utiliza los RCD como sustituto de los agregados naturales para el acondicionamiento de lugares que han sido deteriorados por la intervención del hombre.

Por otra parte, (Mahpour, 2018) ha identificado 22 barreras para la aplicación de la Economía Circular a la gestión de los RCD entre las cuales establece como principales: 1) el uso de materiales con ciclos de reciclaje finitos, 2) desmantelamiento, clasificación, transporte y procesos de recuperación ineficiente, 3) falta de uniformidad de pensamiento respecto a la importancia del reutilización, reducción y reciclaje de RCD por parte de los responsables de toma de decisiones a nivel de agencia, interesados e individuales, 4) actual existencia de estrategias de disposición en vertederos e incineración y 5) incertidumbre frente al cambio de modelo económico. En el mismo estudio, a estas barreras se encuentran asociadas estrategias de superación, las cuales merecen principal atención el efectivo manejo general de los RCD y la implementación de la EC.

En el caso de que ninguna de las estrategias de aplicación de la Economía Circular anteriormente mencionadas sea viablemente aplicable a los RCD, o en el caso de los residuos producidos a partir de su ejecución, la opción aplicable es su disposición en vertedero.

❖ Alternativas de aprovechamiento de Residuos de Construcción y Demolición

La principal alternativa de aprovechamiento de los RCD es, por mucho, su uso como relleno de espacios degradados (Huang et al., 2018). Este uso se aplica de 2/3 del total materiales reciclados (López Gayarre, 2008). Para la proporción restante, 1/3 de los agregados reciclados producidos, corresponde a la aplicación en bases y subbases de carreteras, drenajes, arenas, gravas, explanadas y suelos (López Gayarre, 2008; López Ruiz et al., 2020). Sin embargo, según lo establecido por (Comisión Europea, 2016), el uso como relleno es el menos recomendado puesto que “mina los incentivos de la reutilización y el reciclaje en aplicaciones de valor superior”.

La elección entre usos posibles de los materiales producidos a partir de la aplicación de las estrategias de EC está altamente influenciado por: 1) la escasez de fuentes naturales de materiales, 2) la falta de confianza de los usuarios en los productos, 3) las limitaciones en cuanto a su proporción en las mezclas impuestas por las normas, 4) su costo frente al costo de los materiales naturales y 5) la falta de promoción e incentivos económicos para aumentar su uso (Asociación Española de Reciclaje de Residuos de Construcción y Demolición, 2017; Lockrey et al., 2016; López Gayarre, 2008).

2.5 Legislación, Planes y Programas aplicables

A nivel europeo, la Directiva 2008/98/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 19 de noviembre de 2008, llamada también *Directiva Marco de Residuos* constituye la base principal en la que se fundamentan las legislaciones de los Estados Miembros, de la que forma parte el Estado Español, para la gestión de los RCD. Dicha norma establece como objetivo respecto a los RCD, el reciclaje del 70% de los residuos producido al año 2020 (Parlamento Europeo, 2008). Su modificación más reciente, hecha mediante la Directiva 2018/851 del Parlamento Europeo, 30 de mayo de 2018, incluye la definición de RCD y amplía el alcance de los residuos para contemplar los procedentes de pequeñas construcciones o remodelaciones llevadas a cabo en los hogares (Parlamento Europeo, 2018).

A nivel español, según la ACR, a la fecha, la normativa estatal en materia de residuos está compuesta por 20 Leyes, 62 Reales Decretos, 29 Órdenes y 10 Resoluciones (entre vigentes y derogadas). De estos 121 documentos, hemos identificado 6, actualmente vigentes, y que contemplan específicamente los Residuos de Construcción y Demolición (Tabla 1).

NORMATIVA	OBJETO
Real Decreto 646/2020, de 7 de julio , por el que se regula la eliminación de residuos mediante depósito en vertedero	<ul style="list-style-type: none"> Garantizar la reducción de los residuos depositados en vertedero, que pueden ser reutilizables. Establecer medidas para combatir los efectos negativos sobre el medio ambiente y la salud humana durante la explotación de los vertederos y luego de su cierre. Desarrollar y aplicar la Ley 22/2011, de 28 de julio. Transponer la Directiva (UE) 2018/850 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 30 de mayo de 2018. Derogar el Real Decreto 1481/2001, de 27 de diciembre, por el que se regula la eliminación de residuos mediante depósito en vertedero (Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, 2020a).
Ley 22/2011, de 28 de julio , de residuos y suelos contaminados.	<ul style="list-style-type: none"> Establecer los medios jurídicos por los cuales se reglamentarán la producción y manejo de los residuos, las medidas para prever su generación y los efectos indeseados sobre los humanos y el medio ambiente de su generación y gestión. Reglamentar la gestión de los suelos contaminados. Transponer a la legislación española la Directiva 2008/98/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 19 de noviembre de 2008, conocida también como <i>Directiva marco de residuos</i>. Deroga la Ley 10/ 1998, del 21 de abril, de Residuos, llamada también la <i>Ley Básica de Residuos</i> (primera ley española sobre residuos en general). Ambas leyes aplican a todo tipo de residuos, excluyendo vertidos a las aguas, emisiones a la atmósfera y residuos peligrosos (Jefatura del Estado, 2016).
Real Decreto 105/2008, de 1 de febrero , por el que se regula la producción y gestión de los residuos de construcción y demolición.	<ul style="list-style-type: none"> Establecer los medios jurídicos por los cuales se reglamenta la producción y manejo de los residuos de construcción y demolición, con la finalidad de prevenir su generación y promover su reutilización y valorización en general, así como el tratamiento final de los que deban ser definitivamente eliminados (Ministerio de la Presidencia, 2008a).
Real Decreto 1247/2008, de 18 de julio , por el que se aprueba la instrucción de hormigón estructural (EHE-08).	<ul style="list-style-type: none"> Su Anejo 15. <i>Recomendaciones para la utilización de hormigón reciclado</i>, esta exclusivamente dedicado a los áridos gruesos provenientes de reciclado de hormigón (Ministerio de la Presidencia, 2008b).
Orden MAM/304/2002, de 8 de febrero , por la que se publican las operaciones de valorización y eliminación de residuos y la lista europea de residuos.	<ul style="list-style-type: none"> En el Anexo 1 se publican las operaciones de valorización y eliminación de residuos, según el tipo, y en el Anexo 2, la lista europea de residuos, en donde aparecen los RCD en el Capítulo 17 como <i>Residuos de la construcción y demolición (incluida la tierra excavada de zonas contaminadas)</i> (Ministerio de Medio Ambiente, 2002).
Resolución de 16 de noviembre de 2015 , de la Dirección General de Calidad y Evaluación Ambiental y Medio Natural, por la que se publica el Acuerdo del Consejo de Ministros de 6 de noviembre de 2015, por el que se aprueba el Plan Estatal Marco de Gestión de Residuos (PEMAR) 2016-2022.	<ul style="list-style-type: none"> Aprobar el PEMAR para el período 2016-2022 y establecer que las medidas previstas en este se llevarán a cabo sin generar costos adicionales para el Estado, por medio de usos de recursos existentes (Ministerio de Agricultura Alimentación y Medio Ambiente, 2015).

Tabla 1. Normativa Estatal vigente en materia de Residuos de Construcción y Demolición. Fuente: Elaboración Propia

A nivel catalán, en materia de residuos la legislación está compuesta por 2 Reales Decretos, 31 Leyes, 41 Decretos, 17 Órdenes y 4 Acuerdos (entre vigentes y derogadas). De estos 95 documentos, hemos identificado 8, actualmente vigentes, y que se abarcan específicamente a los Residuos de Construcción y Demolición (Tabla 2).

NORMATIVA	OBJETO
Real Decreto 210/2018 , de 6 de abril, por el que se aprueba el Programa de Prevención y Gestión de Residuos y Recursos de Cataluña (PRECAT20).	<ul style="list-style-type: none"> Definir la matriz a seguir para la prevención y manejo de los residuos en Cataluña, entre estos los Residuos de Construcción y Demolición (RCD), Establece los objetivos a alcanzar hasta el 2020 y los mecanismos para su consecución (Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente, 2018).
Decreto Legislativo 1/2009, de 21 de julio, por el que se aprueba el Texto refundido de la Ley reguladora de los residuos.	<ul style="list-style-type: none"> Regular el manejo de los residuos en el territorio de Cataluña, por medio de la unificación de las leyes Ley 6/1993, de 15 de julio, reguladora de los residuos, Ley 11/2000, de 13 de noviembre, reguladora de la incineración de residuos, Ley 15/2003, de 13 de junio y Ley 9/2008, de 10 de julio, ambas de modificación de la Ley 6/1993. Estas cuatro última siendo derogadas por el referido decreto (Comunidad Autónoma de Cataluña, 2009).
Ley 8/2008, de 10 de julio , de financiación de las infraestructuras de gestión de los residuos y de los cánones sobre la disposición del desperdicio de los residuos.	<ul style="list-style-type: none"> Mediante esta ley se regula el financiamiento de las instalaciones para el manejo de los residuos municipales, Establecer las normas que regulan el Fondo de Gestión de Residuos y los diferentes cánones para gravar la disposición y deposición de residuos municipales, industriales y de la construcción, también creados mediante esta ley. Derogar la Ley 16/2003, de 13 de junio, de financiación de las infraestructuras de tratamiento de residuos y del canon sobre la deposición de residuos. (Comunidad Autónoma de Cataluña, 2008).
DECRETO 152/2017, de 17 de octubre , sobre la clasificación, la codificación y las vías de gestión de los residuos en Cataluña.	<ul style="list-style-type: none"> Clasificar, codificar y determinar las vías de gestión de los residuos producidos o manejados en Cataluña. Derogar los Decreto 34/1996, de 9 de enero, por el cual se aprueba el Catálogo de Residuos de Cataluña y su modificación realizada mediante el Decreto 92/1999, de 6 de abril (Departamento de Territorio y Sostenibilidad, 2017).
Decreto 197/2016, de 23 de febrero , sobre la comunicación previa en materia de residuos y sobre los registros generales de personas productoras y gestoras de residuos de Cataluña.	<ul style="list-style-type: none"> Regular la comunicación prevista antes de la realización de cualquier actividad de producción o transporte a realizar por cualquier agente o negociante de residuos, en cumplimiento de lo establecido en el Decreto Legislativo 1/2009, de 21 de julio, así como del Registro general de personas productoras y gestoras de residuos en Cataluña (Departamento de Territorio y Sostenibilidad, 2016).
Decreto 98/2015, de 9 de junio , del Consejo para la Prevención y la Gestión de los Residuos en Cataluña.	<ul style="list-style-type: none"> Regular la estructura y la actividad del anterior Consejo, como ente de asesoría y participación del Consejo de Dirección de la Agencia de Residuos de Cataluña, respecto a la previsión, disminución y manejo de los residuos (Departamento de Territorio y Sostenibilidad, 2015).
Decreto 69/2009, de 28 de abril , por el que se establecen los criterios y los procedimientos de admisión de residuos en los depósitos controlados.	<ul style="list-style-type: none"> Incorporar a la legislación catalana los criterios y procedimientos de aceptación de residuos en los vertederos de Cataluña (Departamento de Medio Ambiente y Vivienda, 2009).
Decreto 1/1997, de 7 de enero , sobre la disposición de los desperdicios de los residuos en depósitos controlados.	<ul style="list-style-type: none"> Regular técnica y administrativamente las condiciones con las que deben cumplir los depósitos controlados o vertederos (Departamento de Medio Ambiente, 1997).

Tabla 2. Normativa Catalana vigente en materia de Residuos de Construcción y Demolición. Fuente: Elaboración Propia

2.6 Conclusiones de Estado del Arte

A partir del desarrollo de estado del arte de nuestro trabajo, hemos concluido lo siguiente:

- El sector Construcción es el mayor consumidor de recursos naturales, representado sus actividades el 50% del total del material extraído. También, tiene una cuota importante de generación de emisiones de Gases Efecto Invernadero, siéndole adjudicables entre el 5% y 12% de del total emitido. Sus impactos se verifican en todas las etapas de la construcción, desde la fabricación de los materiales, hasta la disposición final de la edificación llegado su fin de vida, en donde pasan a ser RCD.
- El sector Construcción es el mayor productor de residuos. A nivel mundial, los RCD representan entre el 30-40% de los residuos producidos, mientras, a nivel europeo, contribuye con un 35% del

total de los residuos generados, por encima de todos los demás sectores económicos. Esto ha llevado a su declaración como “flujo de residuos prioritario”, “área prioritaria” y “cadena de valor clave” por la Comisión Europea, en 1996, 2015 y 2020, respectivamente.

- La acumulación de residuos, entre los que están los RCD, por la implementación durante 250 años de la Economía Lineal, han producido impactos en el medio ambiente y la salud humana que ha despertado la preocupación de los países. Esto ha dado lugar a la implementación de numerosas iniciativas de aplicación de la Economía Circular, con el objetivo reducir la acumulación de residuos mediante su aprovechamiento para la obtención de materia prima para nuevos procesos y de mantener los recursos inicialmente explotados circulando en el medio el mayor tiempo posible. La más reciente a nivel europeo corresponde al *COM (2020) 18 - Nuevo Plan de acción para la economía circular: Por una Europa más limpia y más competitiva*. A nivel español, destaca la *Estrategia Española de Economía Circular: España Circular 2030*, que promueve la transición de España hacia la Economía Circular y marca las pautas para facilitar el proceso y, a nivel catalán, el *Programa de Prevención y Gestión de Residuos y Recursos de Cataluña (PRECAT20)*.
- Pese a los esfuerzos de los países, en promoción de iniciativas y creación de legislaciones no se ha logrado alcanzar el 70% en peso de recuperación de los RCD establecido como objetivo por la Directiva 2008/98/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 19 de noviembre de 2008. Lo anterior está motivado, entre otras cosas, por las barreras existentes para la implementación de la Economía Circular, como son desconfianza en los materiales obtenidos, falta de mercado para estos materiales y de incentivo para las empresas que realizan los procesos, así como renuencia ante cambio de modelo por los directivos y personas influyentes.
- Por su parte, la implementación de la Economía Circular produce también impactos ambientales y económicos a cargo de los procesos realizados para lograr el aprovechamiento de los RCD. Estos procesos son, en nuestro caso de estudio, el reciclaje mediante el uso de Planta Fija y Planta Móvil. Sus impactos ambientales pueden ser evaluados por medio del método de Análisis de Ciclo de Vida, mientras que los económicos pueden ser evaluados por medio de un Análisis de Costes. Ante la necesidad de migración desde el modelo de Economía Lineal hacia el modelo de Economía Circular, producida a su vez por la necesidad de detener la degradación del medio ambiente y de reducción de los residuos, la determinación de estos impactos es primordial para la buena toma de decisiones y para promover el cambio de mentalidad general frente a los materiales reciclados, que provocaría a su vez una aumento de su consumo basados en la confianza y el conocimiento de los efectos de su uso.

3 Metodología

Este trabajo ha sido realizado siguiendo estructura descrita en la Figura 3, definida a continuación:

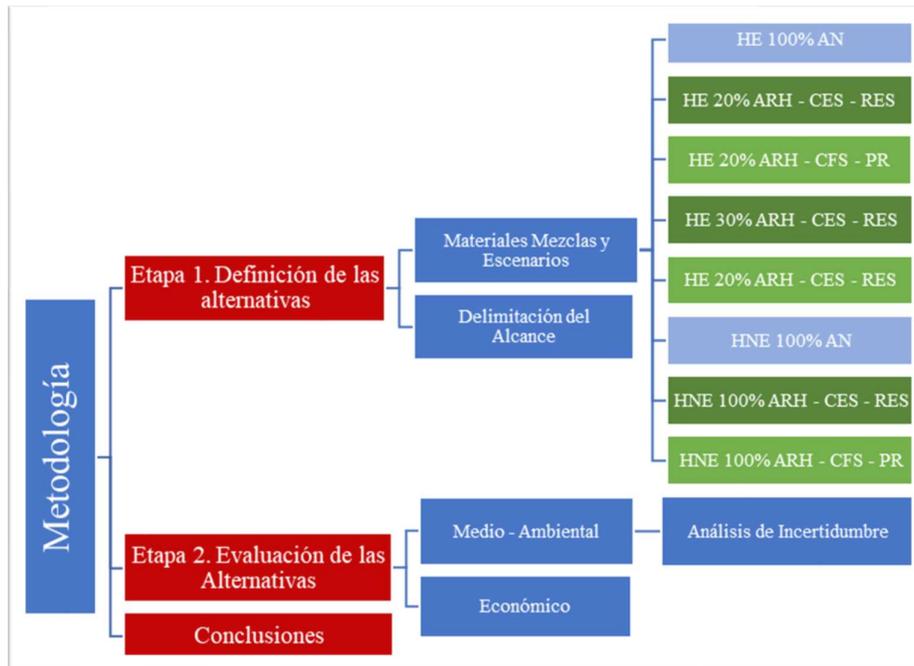


Figura 3. Metodología de desarrollo del trabajo. Fuente: Elaboración Propia

Etapa 1. Definición de las alternativas

En esta se realiza la definición y justificación de los materiales a estudiar, se establece la composición de las mezclas a ser implementadas, así como su criterio de selección y, los escenarios o alternativas a ser evaluados, los cuales han sido definidos en base al modelo de aplicación desarrollado por (López Ruiz et al., 2020). Además, se establece el alcance territorial del estudio y los puntos a ser tomados como referencias principales para el establecimiento de las distancias entre instalaciones.

Etapa 2. Evaluación de las alternativas

Serán evaluadas en base a criterios medioambientales, como manera de establecer los impactos del uso de los RCD como materia prima en la fabricación de hormigón y aportar al desarrollo de su implementación, y económicos, por considerarlo de suma importancia a la hora de decidir sobre la adopción de un material o de una tecnología de procesamiento de materiales.

a) Evaluación Ambiental

La evaluación de impacto ambiental se ha realizado mediante la metodología de ACV y comprende las cuatro fases indicadas por la (International Organization for Standardization, 2006a): 1) Objetivo y definición del alcance, 2) Análisis del Inventario de Ciclo de Vida, 3) Estudio de los Impactos e 4) Interpretación.

Análisis de Incertidumbre

Será realizado para la Evaluación Ambiental, por medio del uso de la herramienta de Monte Carlo, incluida en el programa SIMAPRO.

b) Evaluación Económica

La evaluación de los impactos económicos comprende la definición de los objetivos, del alcance del estudio, la explicación del método de cálculo, los resultados y su discusión. Esta será realizada por medio del establecimiento del Costo Base de Licitación de los componentes del hormigón, del proceso de mezclado y de los procesos adicionales aplicables a las Economía Lineal y Circular.

Conclusiones

Que presentará las conclusiones del trabajo alcanzadas tras la realización de la *Evaluación Ambiental y Económica* de las alternativas propuestas.

4 Aplicación de la metodología

4.1 Etapa 1. Definición de las Alternativas

4.1.1 Materiales, Mezclas y Escenarios

❖ Materiales

Los materiales por evaluar en nuestro estudio son los áridos, de producción primaria, y de producción secundaria, fabricados a partir de Residuos de Construcción y Demolición por medio del uso de Plantas de Reciclaje Fijas y Móviles y, el hormigón, como material contenedor de estos áridos. Los criterios de elección del hormigón han sido, como indicado en la *Introducción*, su importancia dentro de los productos creados y usados por el hombre, así como su importancia como industria consumidora de recursos naturales. En el caso de los áridos, ha sido su peso respecto a los demás componentes del hormigón.

❖ Mezclas

Para realizar una correcta comparación entre los hormigones y garantizar una acertada evaluación de los impactos de las mezclas, debe ser certificado que las propiedades mecánicas (resistencia a la compresión, flexión, durabilidad, etc.) de las alternativas comparadas se mantendrán iguales independientemente de la proporción de las sustituciones de áridos reciclados. Esto se regula por medio del establecimiento de una resistencia de control, que deberán cumplir todas las mezclas de la misma aplicación y que se verificará mediante ensayos de laboratorio.

Para el caso del **hormigón estructural**, se ha establecido **30 MPa (C30/40)** como resistencia de control, a partir de la dosificación utilizada por (Zhou & Chen, 2017), la cual ha sido seleccionada en base a la frecuencia de utilización del artículo en el campo de investigación de los Residuos de la Construcción, agregados gruesos reciclados y hormigón reciclado, para el cual hemos encontrado 45 citaciones entre el 2020 y el 2017 (citaciones; 2020=13x, 2019=19x, 2018=10x y 2017=3x) según se muestra en el Anexo 1.

En esta mezcla se empleó Cemento Ordinario Portland con resistencia a la compresión de 42.5 MPa a los 28 días. La composición típica del Cemento Ordinario Portland es presentada en la Tabla 3 (Ismail & Ramli, 2013). Respecto a los agregados, como finos se consideró arena natural media-gruesa proveniente de cantera. Para los agregados gruesos naturales se consideró roca triturada (AN) y para los reciclados, roca triturada (ARH) proveniente del procesamiento de bloques de concreto fabricados previamente en laboratorio con una resistencia de 30 MPa. Las propiedades de los agregados gruesos utilizados se presentan en la Tabla 4.

MATERIALES	COMPOSICIÓN (%)										
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	SO ₃	P ₂ O ₅	MnO	TiO ₂	OTROS CEMENTOS
Cemento	16	3.6	2.9	72	1.5	0.34	3.1	0.06	0.03	0.17	0.44

Tabla 3. Composición Típica del Cemento Ordinario Portland. Fuente: Ismail & Ramli, 2013

AGREGADO GRUESO	TAMAÑO (MM)	CONTENIDO DE HUMEDAD (%)	ABSORCIÓN DE AGUA (%)	DENSIDAD APARENTE (KG/M3)	DENSIDAD VOLUMÉTRICA (KG/M3)	MORTERO ADHERIDO (%)
AN	5 ~ 20	0.01	0.05	2722	1435	0
ARH	5 ~ 20	1.82	3.16	2655	1270	5.5

Tabla 4. Propiedades de los agregados gruesos naturales y reciclados utilizados en el hormigón de 30 MPa. Fuente: Zhou & Chen, 2017

En el caso del **hormigón no estructural**, se ha elegido una mezcla de **16 MPa (C16/20)** a partir de la dosificación utilizada por (Topçu & Şengel, 2004), en la cual empleó Cemento Portland ASTM C 150 Tipo I. Los agregados reciclados gruesos provienen igualmente de la trituración de antiguas probetas cilíndricas de laboratorio de resistencia de 14 MPa. Las propiedades de los agregados utilizados se muestran en la Tabla 5, así como la composición típica del cemento es presentada en la Tabla 6 (Gutiérrez Junco, 2017).

AGREGADOS	TAMAÑO (MM)	ABSORCIÓN DE AGUA (%)	PESO UNITARIO (KG/M3)	PESO SUELTO (KG/M3)	MORTERO ADHERIDO (%)	MÓDULO DE FINURA
ARH	0.25 ~ 16	7	2470	1160	1435	5.5
Arena		1.5	2660	800	800	3.81
Grava			2700	1700	1270	5.74

Tabla 5. Propiedades de los agregados gruesos naturales y reciclados utilizados en el hormigón de 16 MPa. Fuente: Topçu & Şengel, 2004

MATERIALES	COMPOSICIÓN (%)				
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	OTROS CEMENTOS
Cemento	22	5	3	67	3

Tabla 6. Composición Típica del Cemento Portland ASTM C 150 Tipo I. Fuente: Gutiérrez Junco, 2017

En la fabricación de los hormigones no fueron considerados aditivos químicos ni superplastificantes.

❖ Escenarios

Los escenarios se han establecido partiendo de varios criterios, que combinados, permiten obtener 8 alternativas diferentes.

- Economía Lineal y Economía Circular

En la Economía Lineal, los materiales componentes del hormigón son de producción primaria, y, cuando la estructura alcanza su fin de vida y se produce su demolición, los Residuos de la Construcción y Demolición (RCD) son llevados de manera íntegra hasta un vertedero en donde son dispuestos definitivamente y sin ninguna consideración de recuperación de materiales.

En la Economía Circular, se considera que, tras la realización de una Desconstrucción Selectiva, se tratan los Residuos de la Construcción y Demolición obtenidos con miras a la producción de árido grueso reciclado (producción secundaria) para su utilización en la fabricación de hormigón, con lo que se logra la recirculación parcial de residuos como materia prima.

- Aplicaciones del Hormigón

Para contemplar los posibles usos del hormigón como Hormigón Estructural u Hormigón No Estructural.

- Clasificación de desechos

Que corresponde al emplazamiento en el cual se realizará la clasificación de los desechos; en el Sitio de Obra, antes de su transporte, o en la Planta de Reciclaje.

- Planta Fija o Móvil

Que corresponde al tipo de planta en la cual se realizará el reciclaje de los agregados; si es en una Planta Móvil, conlleva el transporte e instalación en el Sitio de Obra de la maquinaria necesaria para lograr la obtención de los agregados reciclados en un lugar preparado a los fines, o en una Planta Fija, siendo el material transportado a una Planta de Reciclaje de Desechos de Construcción y Demolición para su posterior procesamiento.

- Proporción de agregados naturales a sustituir

Criterio que se aplica en caso de la Economía Circular y que define la cantidad de agregados gruesos reciclados que se incorporarán en sustitución de los agregados naturales. Las proporciones de Agregado Grueso Reciclado (ARH) adoptadas han sido establecidas en base a los límites recomendados por Instrucción de Hormigón Estructural (EHE 08); para hormigón estructural establece un 20% como a recomendación máxima, indicando, sin embargo, que es posible aumentar este porcentaje sujeto “a realización de estudios específicos y experimentación complementaria en cada aplicación” con lo que se justifica la posibilidad de utilización de 30% de AGH. Para el hormigón no estructural, se permite hasta un 100% de sustitución de los *Agregados Naturales* (AN) por *Agregados Reciclados* gruesos (ARH).

El total de escenarios a evaluar queda descrito a continuación en la Tabla 7.

Criterios	HE 100% AN	HE 20% ARH – CES – RES	HE 20% ARH – CFS – PR	HE 30% ARH – CES – RES	HE 30% AHR – CFS – PR	HNE 100% AN	HNE 100% ARH – CES – RES	HNE 100% ARH – CFS – PR
Tipo de Economía	Lineal	Circular	Circular	Circular	Circular	Lineal	Circular	Circular
Tipo de Hormigón	Estructural	Estructural	Estructural	Estructural	Estructural	No Estructural	No Estructural	No Estructural
Tipo de Clasificación de Desecho	N/A	En Sitio	Fuera de Sitio	En Sitio	Fuera de Sitio	N/A	En Sitio	Fuera de Sitio
Tipo de Planta de Reciclaje	N/A	Móvil	Fija	Móvil	Fija	N/A	Móvil	Fija
Proporción de agregados naturales a sustituir	N/A	20%	20%	30%	30%	N/A	100%	100%
Nombres Alternativos	HE 100% AN	HE 20% ARH – PM	HE 20% ARH – PF	HE 30% ARH – PM	HE 30% AHR – PF	HNE 100% AN	HNE 100% ARH – PM	HNE 100% ARH – PF
	HE1	HE2	HE3	HE4	HE5	HNE1	HNE2	HNE3

HE= Hormigón Estructural; HNE= Hormigón No Estructural; AN= Agregado Natural; ARH= Agregado Reciclado de Hormigón; CES= Clasificación en Sitio; CFS= Clasificación Fuera de Sitio; RES= Reciclaje En Sitio; PR= Planta de Reciclaje

Tabla 7. Descripción de alternativas según la proporción de la sustitución de agregado, el lugar de clasificación y de reciclaje de los áridos.

Fuente: Elaboración Propia

A partir de los escenarios planteados en la Tabla 7, y de las dosificaciones propuestas por (Zhou & Chen, 2017) y (Topçu & Şengel, 2004), la composición de los hormigones a evaluar en nuestro estudio quedan indicadas en la Tabla 8.

DESCRIPCIÓN		W/C	CEMENTO (kg/m ³)	AGUA (kg/m ³)	ÁRIDO NATURAL FINO (kg/m ³)	ÁRIDO NATURAL GRUESO (kg/m ³)	ÁRIDO REICLADO (kg/m ³)
Hormigón Estructural 30 MPa	HE1	0.49	398	195	614	1193	0
	HE2, HE3	0.49	398	198.2	614	954	239
	HE4, HE5	0.49	398	199.8	614	835	358
Hormigón No Estructural 16 MPa	HNE1	0.639	327	209	901	914	0
	HNE2, HNE3	0.637	289	184	0	0	1764

Tabla 8. Composición hormigones 30 MPa y 16 MPa, según alternativa. Fuente: Elaboración Propia

4.1.2 Delimitación del alcance

El estudio es llevado a cabo en la Comunidad Autónoma de Cataluña, específicamente en la provincia de Barcelona que comprende un territorio de 7,726.36 km². Se estará haciendo referencia a la totalidad de instalaciones ubicadas en esta Comunidad respecto a la fabricación de los diferentes componentes a utilizar en nuestro estudio. Sin embargo, los datos presentados corresponderán únicamente a los establecimientos ubicados dentro del territorio barcelonés. El criterio de elección Barcelona corresponde a que es la capital de la comunidad autónoma con mayor producción de RCD en toda España (Asociación Española de Reciclaje de Residuos de Construcción y Demolición, 2017) hasta el 2015.

Se define como “Sitio de Obra” el lugar donde se realizará la demolición de la estructura existente y la construcción de la nueva estructura.

El emplazamiento que utilizaremos como referencia para el “Sitio de Obra” de nuestro estudio se encuentra en las cercanías del Campus Nord de la UPC, en el polígono formado por las calles Dulcet al norte, Passeig dels Til·lers al noreste, Ignasi de Solà Morales al noroeste, Jordi Girona al sur y sureste, y, John Maynard Keynes al suroeste, en las coordenadas (latitud, longitud) 41.3891492, 2.1148339, y en cuyos terrenos se encuentran localizados el Rectorado de la Universidad, el Barcelona Supercomputing Center, la Torre Girona, la Residencia y el Edificio Til·lers (Figura 4). A partir de este punto, se establecerá la distancia a la planta de hormigón que se utilizará como punto de referencia en el estudio, según el escenario que aplique y como estaremos explicando más adelante.



Figura 4. Localización del Sitio de Obra en Barcelona. Fuente: UPC, 2020; Google Earth, 2020

4.2 Etapa 2. Evaluación de las alternativas

Los diferentes escenarios indicados en la sección 4.1.1 anterior (Escenarios), han sido evaluados en base a dos criterios:

- Criterio Medio Ambiental
- Criterio Económico

4.2.1 Etapa 2a. Evaluación Medio Ambiental. Análisis de Ciclo de Vida

El criterio Medio Ambiental es valorado por medio de la aplicación del método de Análisis de Ciclo de Vida, el cual ha sido realizado mediante el uso del programa SIMAPRO (versión PhD, Released 9.0.0.49). El tipo de modelización utilizada es la Atribucional, ya que estaremos haciendo la comparación entre los impactos ambientales resultantes de la fabricación de las mezclas utilizando la misma unidad funcional, así como estableciendo los puntos críticos de su ciclo de vida.

El método de evaluación elegido para ser utilizado en nuestro estudio es el CML-IA Baseline, versión 3.05. Los criterios para su la selección del método han sido, en primer lugar, que es un método mid-point, resultando menos complejo, subjetivo y más transparente que el método end-point (Lockrey et al., 2018) y, en segundo, su recurrente utilización en estudios similares, consultados para la realización de nuestro trabajo (Butera & Christensen, Thomas H. Astrup, 2015; López Gayarre et al., 2016; Marinković et al., 2010; Mercante et al., 2012; Peixoto Rosado et al., 2019).

Las categorías de impactos ambientales se muestran en la Tabla 9.

CATEGORÍA DE IMPACTO	ABREVIACIÓN	UNIDAD	
Agotamiento Abiótico	Abiotic Depletion	AAB	kg Sb eq
Agotamiento Abiótico (Combustibles Fósiles)	Abiotic Depletion (Fossil Fuels)	AAF	MJ
Calentamiento Global (GWP100a)	Global Warming (GWP100a)	GWP	kg CO2 eq
Reducción de la Capa de Ozono (ODP)	Ozone Layer Depletion (ODP)	ODP	kg CFC-11 eq
Toxicidad Humana	Human Toxicity	TOH	kg 1,4-DB eq
Ecotoxicidad en Agua Dulce	Fresh Water Aquatic Ecotoxicity	EAD	kg 1,4-DB eq
Ecotoxicidad en Aguas Marinas	Marine Aquatic Ecotoxicity	EAM	kg 1,4-DB eq
Ecotoxicidad Terrestre	Terrestrial Ecotoxicity	ETE	kg 1,4-DB eq
Oxidación Fotoquímica	Photochemical Oxidation	OFO	kg C2H4 eq
Acidificación	Acidification	ACI	kg SO2 eq
Eutrofización	Eutrophication	EUT	kg PO4--- eq

Tabla 9. Impactos evaluados mediante CML-IA Baseline. Fuente: Elaboración Propia

4.2.1.1 Objetivo y Definición del Alcance

❖ Objetivo

El objetivo de la realización del ACV de nuestro trabajo es de establecer los impactos ambientales de la fabricación *Agregados Reciclados* a partir de Plantas de Reciclaje Fijas y Móviles, así como de su incorporación en sustitución del *Agregado Natural* en diferentes proporciones para la elaboración de hormigón estructural y no estructural, como forma de aplicación de la Economía Circular en el campo de los RCD. Estos resultados serán comparados con los impactos de hormigón estructural y no estructural confeccionados a partir de materiales primarios, en base a la implementación de la Economía Lineal.

El análisis se hace para todos los escenarios planteado en la sección 4.1.1 anterior, subsección *Escenarios*, así como para los *Agregados Naturales* y *Agregados Reciclados* (Planta Fija y Planta Móvil).

❖ Definición del Alcance

Respecto a los hormigones correspondientes a los escenarios de Economía Lineal, el alcance del estudio abarca desde la producción de cada uno de sus materiales componentes hasta su demolición llegado su fin de vida y, la posterior disposición final de los residuos en un vertedero de inertes, según queda establecido en los límites del escenario de Economía Lineal (Figura 5).

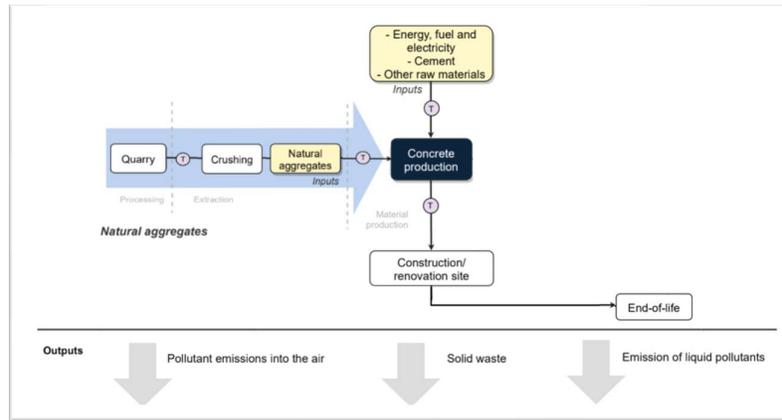


Figura 5. Límites del escenario de Economía Lineal para la fabricación de hormigón estructural y no estructural Fuente: Elaboración Propia en base a esquemas de López Ruiz et al., 2020

En el caso de los escenarios de Economía Circular, el alcance para el hormigón estructural queda descrito según la Figura 6, y en la Figura 7, para el hormigón no estructural. Para el primer caso, incluye la producción de los agregados naturales, desde la extracción hasta su transporte hasta la Planta de Hormigón y, para ambos caso, la producción de los *Agregados Reciclados*, desde la demolición de la estructura que da origen a los RCD, su clasificación, reciclado (que puede ser en el Sitio de Obr, mediante el uso de una Planta Móvil o en una Planta Fija), su transporte hasta la Planta de Hormigón, su mezclado en planta y el transporte y tratamiento y/o disposición final en vertedero de todos los desechos producido en los procesos. En ninguno de los casos se considera la extracción, transporte o transporte de acero incluido en el hormigón demolido.

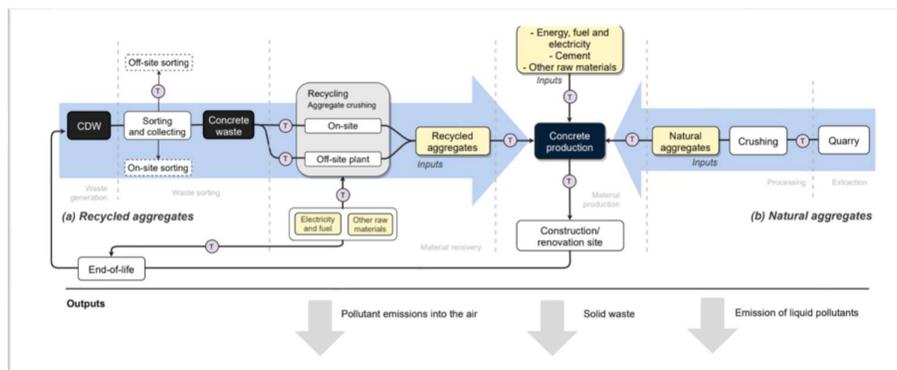


Figura 6. Límites del sistema de Economía Circular para la fabricación de hormigón estructural. Fuente: (López Ruiz et al., 2020)

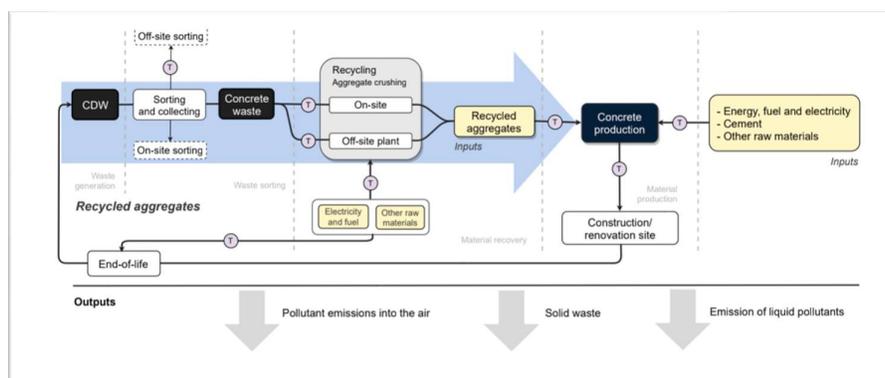


Figura 7. Límites del sistema de Economía Circular para la fabricación de hormigón no estructural. Fuente: (López Ruiz et al., 2020)

❖ Definición de Unidad Funcional

La unidad funcional queda definida como 1 m³ de hormigón, fabricado para una vida útil de 50 años. El uso de esta unidad ha sido verificado en otros estudios consultados para la elaboración de nuestro trabajo (Ding et al., 2016; López Gayarre et al., 2016; Mercante et al., 2012; Suárez Silgado et al., 2018) y la duración de la vida útil ha sido fijada en base al valor establecido en el Capítulo I del EHE 08 (Ministerio de la Presidencia, 2008b) para Edificios de Oficinas.

4.2.1.2 Análisis del Inventario de Ciclo de Vida

Para la elaboración del Inventario de Ciclo de Vida (ICV), hemos realizado una amplia búsqueda en artículos científicos publicados previamente, así como en las páginas web de las instituciones pertenecientes a la Confederación Española de Asociaciones de Fabricantes de Productos de Construcción (CEPCO, 2004), y del sector eléctrico español (REE, 2020). Las entidades consultadas se muestran en la Tabla 10.

INSUMO	NOMBRE DE ENTIDAD
Cemento	Agrupación de Fábricas de Cemento de España (OFICEMEN) Agrupación de Fabricantes de Cemento de Cataluña (Ciment Català)
Agregado Naturales	Federación de Áridos (FdA) Gremi D'Àrids de Catalunya (GREMIARIDS)
Agregados Reciclados	Agencia de Residuos de Cataluña (ARC)
Depósitos Controlados Municipales	Agencia de Residuos de Cataluña (ARC)
Depósitos Controlados de Escombros de Construcción	Agencia de Residuos de Cataluña (ARC)
Fábricas de Hormigón	Asociación Nacional Española de Fabricantes de Hormigón Preparado (ANEFHOP)
Energía Eléctrica	Red Eléctrica de España (REE)

Tabla 10. Entidades ligadas al sector de fabricación de hormigón consultadas Fuente: Elaboración Propia

Además, nos hemos valido de datos obtenidos a partir de la base de datos de Ecoinvent V3, incluida con el programa SIMAPRO, utilizado en nuestro estudio.

De manera particular, para cada componente de los escenarios contemplados en nuestro estudio, las consideraciones del inventario se describen a continuación:

4.2.1.2.1 Agregados Naturales Finos y Gruesos (Producción de Arena | Cut-off, U y Producción de Grava Triturada | Cut-off, U)

Para los áridos gruesos se ha contemplado el proceso de Ecoinvent V3 “*Gravel, crushed {CH} | production | Cut-off*”, *U*”, mientras para los finos se ha empleado el proceso “*Sand {CH} | gravel and quarry operation | Cut-off*”, *U*”. Ambos, incluyen la totalidad del proceso de manufactura de los agregados en cantera, a partir de grava, desde su extracción hasta la obtención de los materiales triturados, el proceso de restauración de la mina, los transportes internos, el agua de proceso, la infraestructura, la energía (electricidad y combustible), los lubricantes y materiales necesarios para el mantenimiento, las emisiones al aire y agua, el tratamiento de los residuos municipales y de aceite del proceso, así como el transporte del material terminado hasta la planta de hormigón.

Los valores de consumo de energía eléctrica, que han sido ajustados al contexto español, del combustible y de las emisiones han sido adoptados a partir del estudio de (López Gayarre et al., 2016).

Para el transporte hasta la Planta de Hormigón, se ha establecido una distancia de 36 km, y el camión “*Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO6 {RER}| transport, freight, lorry*” de la base de datos Ecoinvent V3, a partir del cálculo realizado y los conceptos explicados en el 4.2.1.2.4. El mismo criterio se ha adoptado para el transporte hasta el vertedero municipal, para el cual se ha establecido una distancia de 80 km y el camión de la base de datos Ecoinvent V3 “*Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO6 {RER}| transport, freight, lorry*”.

Los procesos restantes y sus cantidades afectadas han sido adoptados de la base de datos de Ecoinvent V3, haciendo siempre el ajuste de los consumos de energía al sistema eléctrico español.

La producción anual de las instalaciones de *Agregados Naturales Finos y Gruesos* es de aproximadamente 400,000 t y la mina tiene una vida útil de 50 años, según queda establecido en la literatura de Ecoinvent V3 para los dos procesos.

4.2.1.2.2 Agregados Reciclados Gruesos

Para estos agregados no existe un proceso como tal en Ecoinvent V3, por lo que para nuestro caso de estudio y en base a los criterios establecidos por (Suárez, 2015), hemos creado dos procesos según la localización del procesamiento del agregado, sea de una Planta de Reciclaje Fija o de una Planta de Reciclaje Móvil. De manera general, ambos procesos incluyen tanto la energía (combustible y electricidad) utilizada para la demolición, la clasificación y el reciclaje del hormigón llegado a su fin de vida, que convertido en RCD servirá como materia prima para la obtención de los agregados reciclados, la infraestructura y maquinarias, como las emisiones al aire. Estos datos mencionados anteriormente han sido obtenidos a partir del estudio de (López Gayarre et al., 2016). De manera particular, cada proceso incluye entradas que serán explicadas a continuación:

- **Agregado Reciclado Grueso - Planta Fija (Producción Agregados Reciclados - Planta Fija | Cut-off, U)**

Según lo explicado en el párrafo anterior, para la confección del proceso *Agregado Reciclado Grueso - Planta Fija (Producción Agregados Reciclados - Planta Fija | Cut-off, U)* se ha considerado el conjunto de procesos presentados en la Tabla 11:

PROCESOS DE ECOINVENT V3	COMENTARIO
<i>Sorting facility, for construction waste {CH} sorting facility construction, for Construction waste Cut-off, U</i>	Contempla la infraestructura de la planta de reciclaje, su mantenimiento, uso de suelo y la energía para el funcionamiento de la calefacción de la planta de producción.
<i>Conveyor belt {CH} production Cut-off, U</i>	Contempla la fabricación, uso y mantenimiento de las cintas transportadoras. Se han mantenido los mismos valores establecidos por Ecoinvent V3 para la planta de agregados del proceso “ <i>Gravel, crushed {CH} production Cut-off, U</i> ”, utilizada en el caso de los <i>Agregados Naturales Finos y Gruesos</i> , ya que transportarán la misma cantidad de material.
<i>Diesel, burned in building machine {GLO} processing Cut-off, U</i>	Considerado para incluir el combustible a utilizar por las maquinarias para la demolición (CAT 325D UHD y Hydraulic excavator. CAT 325D), clasificación (Hydraulic excavator. CAT 318), trituración (Planta de Reciclaje Fija) y carguío de los materiales (Wheel loader CAT 928G), a partir de las maquinarias y consumos establecidos por (López Gayarre et al., 2016).
<i>Producción de Agua Cut-off, U</i>	Representa el agua necesaria para el proceso de procesamiento de los agregados. Este proceso ha sido adoptado de la base de datos Ecoinvent V3.
<i>Synthetic rubber {GLO} market for Cut-off, U</i>	Material utilizado para el mantenimiento de la planta, no incluido en el proceso de “ <i>Sorting facility, for construction waste {CH} sorting facility construction, for Construction waste Cut-off, U</i> ”. Para este se han adoptado las cantidades establecidas en

	el proceso “Gravel, crushed {CH} production Cut-off”, U”, utilizado para los Agregados Naturales Finos y Gruesos.
<i>Electricity, medium voltage {ES} electricity voltage transformation from high to medium voltage Cut-off, U</i>	El proceso descrito por (López Gayarre et al., 2016) solo contempla la energía para la trituración, por lo que hemos contemplado la adición del consumo energético para el funcionamiento de los talleres y oficina adjuntos a la planta, de 1.02 kWh/t de residuos (Suárez, 2015).
<i>Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO6 {RER} transport, freight, lorry</i>	Camión asumido para el transporte de este material. Se han establecido las distancias de 18 km desde el Sitio de Obra hasta la Planta de Tratamiento y de 13 km desde la Planta de Tratamiento hasta la Planta de Hormigón, según explicado más adelante en el 4.2.1.2.4 No hemos contemplado transporte hasta el Vertedero de Inertes pues, como el RCD que tratamos en nuestro estudio es limpio, consideramos que la Planta de Reciclaje puede asumir cualquier residuo del proceso.
<i>Emisiones de NH₃, CO₂, CO, N₂O, Pb, CH₄, NO, NMVOC, PAH, Partículas y SO₂</i>	Para considerar las emisiones de los procesos. Los valores han sido adoptados del estudio de (López Gayarre et al., 2016).

Tabla 11. Procesos Ecoinvent V3 adicionales considerados para la producción de *Agregado Reciclado Grueso - Planta Fija*.
Fuente: Elaboración Propia

En la literatura de la base de datos Ecoinvent V3, se establece que la producción anual de esta planta es de 200,000 t, para una vida útil de 50 años. Para hacer posible la utilización de los datos especificados en la Tabla 11, se considera que se tendrán dos plantas de tratamiento, con lo que también se alcanza igual producción anual de agregados.

- **Agregado Reciclado Grueso - Planta Móvil (Producción Agregados Reciclados - Planta Móvil | Cut-off, U)**

En este caso, para la confección del proceso *Agregado Reciclado Grueso - Planta Móvil (Producción Agregados Reciclados - Planta Móvil | Cut-off, U)* se ha considerado el conjunto de procesos presentados en la Tabla 12:

PROCESOS DE ECOINVENT V3	COMENTARIO
<i>Diesel, burned in building machine {GLO} processing Cut-off, U</i>	Considerado para incluir el combustible a utilizar por las maquinarias para la demolición (CAT 325D UHD y Hydraulic excavator. CAT 318D), clasificación (Hydraulic excavator. CAT 325D), trituración (Mobile jaw crusher (Powerscreen Pegson XA400S)), cribado (Mobile screening plant (Powerscreen Warrior 1400)) y carguío de los materiales (Wheel loader CAT 928G), a partir de las maquinarias y los consumos establecidos por (López Gayarre et al., 2016).
<i>Conveyor belt {CH} production Cut-off, U</i>	Contempla la fabricación, uso y mantenimiento de las cintas transportadoras. Se han mantenido los mismos valores establecidos por Ecoinvent V3 para la planta de agregados del proceso “Gravel, crushed {CH} production Cut-off”, U”, utilizada en el caso de los <i>Agregados Naturales Finos y Gruesos</i> , ya que transportarán la misma cantidad de material.
<i>Industrial machine, heavy, unspecified {RER} production Cut-off, U</i>	Considerado para incluir la fabricación de los equipos. Comprende los materiales más importantes y su transporte hasta el sitio de ensamblaje, sin energía y sin disposición de residuos en vertedero.
<i>Lubricating oil {RER} market for lubricating oil Cut-off, U</i>	Procesos considerados para contemplar el material utilizado para el mantenimiento de la planta. Para estos se han adoptado las cantidades establecidas en el proceso “Gravel, crushed {CH} production Cut-off”, U”, utilizado para los <i>Agregados Naturales Finos y Gruesos</i> , por haber asumido la misma producción de material grueso anual.
<i>Steel, low-alloyed {GLO} market for Cut-off, U</i>	
<i>Synthetic rubber {GLO} market for Cut-off, U”</i>	

<i>Transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO6 {RER} transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO6 Cut-off, U</i>	Camión asumido para el transporte de los equipos de clasificación, trituración y cribado (no se incluyen los demás equipos ya que se asume que se encuentran en obra para otras actividades). Los equipos pesan en total 97 t (Caterpillar, n.d.; Powerscreen, n.d.-a, n.d.-b) y serán transportados a lo largo de 18km, siendo esta la distancia establecida en el 4.2.1.2.4 entre el Sitio de Obra y su lugar de origen que se considera la Planta de Reciclaje (estos equipos normalmente son ofertados en alquiler por las Plantas de Reciclaje Fijas); un total de 1,742 tkm por viaje por dos viajes (ida y vuelta).
<i>Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO6 {RER} transport, freight, lorry</i>	Camión asumido para el transporte de los residuos del proceso de reciclaje hasta el Vertedero de Inertes a lo largo de una distancia de 60 km, según se explica en la sección Transporte.
<i>1. Emisiones de NH₃, CO₂, CO, N₂O, Pb, CH₄, NO, NMVOC, PAH, Partículas y SO₂</i> <i>2. Waste concrete {ES} treatment of waste concrete, inert material landfill Cut-off, U</i>	El (1.) ha sido contemplado para considerar las emisiones de los procesos. Los valores han sido adoptados del estudio de (López Gayarre et al., 2016). El (2.) contempla el tratamiento y disposición final de los residuos del proceso de reciclaje.

Tabla 12. Procesos Ecoinvent V3 adicionales considerados para la producción de Agregado Reciclado Grueso en Planta Móvil. Fuente: Elaboración Propia

En su estudio, este autor ha establecido los valores necesarios para procesar 100 t/h, por lo que para alcanzar una producción de aproximadamente 400,000 t debemos considerar dos conjuntos de equipos trabajando 6 días a la semana, 6.5 horas por días, durante 52 semanas al año.

4.2.1.2.3 Otros procesos considerados

Además de los Agregados Gruesos, existen otros procesos que se han contemplado para la elaboración del Inventario de Ciclo de Vida. Estos son presentados en la Tabla 13.

PROCESO IMPLEMENTADO EN EL ESTUDIO	PROCESOS DE ECOINVENT V3 UTILIZADO	COMENTARIO
Cemento (Producción de Cemento Portland Cut-off, U)	<i>Cement, Portland {Europe without Switzerland} production Cut-off, U</i>	Contempla todo el proceso de manufactura incluyendo los procesos precursores (fabricación de clínker, yeso, caliza...) hasta el cemento fabricado en el molino, la energía (electricidad y combustible) adaptada al contexto español y las emisiones al aire de los procesos anteriormente mencionados. Incluye también el transporte del material terminado hasta la Planta de Hormigón, para el cual se ha establecido una distancia de 38 km, y el camión “ <i>Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO6 {RER} transport, freight, lorry</i> ” a partir del cálculo realizado y los conceptos explicados en el 4.2.1.2.4.
Agua (Producción de Agua Cut-off, U)	<i>Tap water {Europe without Switzerland} market for Cut-off, U</i>	Contempla el proceso de tratamiento del agua desde la planta hasta su llegada a presión hasta la casa o la industria del consumidor, materiales, energía (electricidad y combustible) y fuentes de agua adaptadas al contexto español e infraestructura y uso de suelo. Incluye la red de distribución y las pérdidas durante la distribución.
Mezclado de Hormigón en Planta (Producción de Concreto Cut-off, U)	<i>Concrete, high exacting requirements {CH} concrete production, for building construction, with cement CEM I/IIA Cut-off, U</i>	Proceso de Ecoinvent V3 modificado para adaptar las fuentes de energía al contexto español. Se eliminan de este los materiales que componen el homigón (considerados separadamente) para guardar así únicamente el proceso de mezclado. Incluye la construcción y el mantenimiento de las infraestructuras, la energía en forma de electricidad, combustible y calor (adaptados al contexto español), la emisión de los residuos municipales a tratar y de concreto a depositar en vertedero de inertes. Para el transporte de estos residuos se han establecido las distancias de 92 km hasta el vertedero municipal y 87 km hasta el Vertedero de Inertes. El camión a utilizar (incluido en el proceso) para ambos casos es el “ <i>Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO6 {RER} transport, freight, lorry</i> ”. También se ha considerado el transporte del hormigón desde la Planta de Hormigón hasta el Sitio de Obra, por una distancia de 10 km y utilizando un camión “ <i>Transport, freight,</i>

		<i>lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO6 {RER} transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO6 Cut-off, U</i> ".
Demolición y carguío de residuos (Demolición de Estructura - Economía Lineal)	<ol style="list-style-type: none"> 1. <i>Excavation, hydraulic digger {RER} processing Cut-off, U</i> 2. <i>Excavation, skid-steer loader {RER} processing Cut-off, U</i> 	Según el estudio de (López Gayarre et al., 2016), la demolición y el carguío de alrededor de 100 t/h de estructura se logra con dos excavadoras hidráulicas: CAT 325 UHD y CAT 325 D. De la base de datos Ecoinvent V3, hemos utilizado estos dos procesos, que incluyen su fabricación y mantenimiento de los equipos y consumo de combustible y emisiones. Esta maquinaria se considera dos veces para ajustarla a la producción necesaria establecida en el estudio (aprox. 400,000 t/a) y no será movilizad por cuenta del estudio pues se considera que se encuentra en la obra para otras actividades.
Deposición Final en Vertedero de Inertes (Economía Lineal)	<ol style="list-style-type: none"> 1. <i>Fin de Vida – HE 100% AN</i> 2. <i>Fin de Vida - HNE 100% AN</i> 3. <i>Waste concrete {Europe without Switzerland} treatment of waste concrete, inert material landfill Cut-off, U</i> 	(1.) y (2.) son escenario de deposición final, los cuales incluyen el transporte desde el Sitio de Obra al Vertedero de Inertes, mediante el uso del camión " <i>Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO6 {RER} transport, freight, lorry</i> " de la base de datos Ecoinvent V3, a una distancia de 60 km calculados según se explica en el 4.2.1.2.4. El proceso (3.) contempla la construcción del vertedero y su mantenimiento hasta 5 años después de su clausura, su uso de suelo y energía de operación, ajustada al contexto español.

Tabla 13. Otros procesos considerados en el Inventario de Ciclo de Vida. Fuente: Elaboración Propia

4.2.1.2.4 Transporte

El establecimiento de las distancias de transporte utilizadas en nuestro estudio ha sido realizado utilizando el método descrito a continuación:

Paso 1) Se ha realizado una búsqueda bibliográfica de distancias de transporte consideradas en artículos científicos previamente publicados, para los materiales establecidos en nuestro estudio. Los resultados encontrados han sido recopilados en la Tabla 14, destacándose de esto estudios que los puntos de referencia para el establecimiento de las distancias son la Planta de Concreto y el Sitio de Obra (Ding et al., 2016; López Gayarre et al., 2016; Marinković et al., 2010; Oliver-Solà et al., 2009; Suárez Silgado et al., 2018). Por lo anterior, hemos procedido a fijar para nuestro estudio la ubicación de la Planta de Hormigón, a partir del Sitio de Obra previamente establecido según se explica en el acápite 4.1.2 del presente trabajo.

LUGAR REFERENCIA	DE	CEMENTO (km)	AGREGADOS NATURALES FINOS Y GRUESOS (km)	PLANTA DE RECICLAJE (km)	PLANTA DE CONCRETO (km)	VERTEDERO DE INERTES (km)	VERTEDERO MUNICIPAL (km)
Planta de concreto		75 ^a	40 ^a	30 ^a		17 ^c	21 ^c
Sitio de Obra					10 ^b		

^a (Oliver-Solà et al., 2009)

^b (Marinković et al., 2010)

^c (Suárez Silgado et al., 2018)

Tabla 14. Radios de distancias empleados para calcular la distancia promedio a utilizar en el ACV. Fuente: Elaboración Propia

Paso 2) Se han identificado las instalaciones correspondientes a los insumos a necesarios para la fabricación de las mezclas de nuestro estudio, localizadas en Cataluña. Esta identificación ha sido realizada por provincia, aunque finalmente estaremos considerando únicamente las ubicadas en Barcelona (Anexo 1).

Paso 3) Se han ubicado geográficamente, por medio de la utilización de Google Earth, cada una de las instalaciones ubicadas en Barcelona (Anexo 1)

Paso 4) A partir del punto geográfico en que se encuentra la Planta de Hormigón, se han descrito varias circunferencias, para cada uno de los materiales de las mezclas del estudio, utilizando como radios las distancias establecidas en el Paso 1 (Tabla 14).

Paso 5) Dentro de estas circunferencias, se han ubicado las instalaciones correspondientes al radio aplicable, eliminándose en este paso del alcance de nuestro estudio las que han quedado fuera del área del círculo.

Paso 6) Finalmente, se ha realizado el promedio de las distancias de las instalaciones dentro de la circunferencia, la cual se ha adoptado como distancia final a emplear en nuestro estudio, según se muestra en la Tabla 15.

LUGAR DE REFERENCIA	CEMENTO (km)	AGREGADOS NATURALES FINOS Y GRUESOS (km)	PLANTA DE RECICLAJE (km)	PLANTA DE CONCRETO (km)	VERTEDERO DE INERTES (km)	VERTEDERO MUNICIPAL (km)
Planta de concreto	38.0	36.0	13.0		64.0	84.0
Sitio de Obra			18.0	10.0	60.0	77.0
Planta de Reciclaje					60.0	90.0
Agregados Naturales Finos y Gruesos						80.0
Cemento						90.0

Tabla 15. Distancias empleadas en nuestro estudio. Fuente: Elaboración Propia

Respecto a los vehículos pesados considerados en nuestro trabajo, de acuerdo con (Oliver-Solà et al., 2009) y (Ding et al., 2016), para el transporte de los insumos a la Planta de Hormigón y de los residuos a las diferentes instalaciones de tratamiento o deposición final, hemos adoptado el camión de 16 a 32 t de la base de datos Ecoinvent V3 “*Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO6 {RER} | transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO6 | Cut-off, U*” que abarca el rango de vehículos medios y pesados. Para el caso del transporte de hormigón mezclado, basándonos en que los camiones de hormigón pueden transportar aproximadamente 8 m³, hemos definido para este caso el camión “*Transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO6 {RER} | transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO6 | Cut-off, U*” de la base de datos Ecoinvent V3. Por otra parte, aunque no contamos con información sobre las flotillas de vehículos pesados utilizados por las diversas entidades consideradas en nuestro estudio, como normativa para la regulación de las emisiones de estos vehículos, hemos adoptado la Euro 6, ya que según el Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, 2020b, es la norma actualmente vigente para camiones, propuesta por el Reglamento 595/2009 y efectiva desde el 2013.

- **Sitio de Obra a Planta de Hormigón**

Según lo establecido en la página web de la Asociación Nacional Española de Fabricantes de Hormigón Preparado (ANEFHOP, 2020), en Cataluña existen actualmente 110 plantas productoras de hormigón preparado (Anexo 2). De estas, 55 están localizadas en la provincia de Barcelona.

De acuerdo con (Marinković et al., 2010, Tabla 11), hemos adoptado la distancia de 10 km desde el Sitio de Obra hasta la Planta de Hormigón, establecida como “típica” entre ambas implantaciones. A partir de este dato, se fijó un radio de 10 km y se verificó la existencia de plantas de hormigón en dicho rango, obteniendo un total de 14 instalaciones (Figura 8).

Finalmente, de estas 14 instalaciones, se ha seleccionado la planta de hormigón de Betón Catalán, ubicada en el punto 41.347221, 2.125503, (exactamente a 9.8 km del Sitio de Obra), tomando como último criterio de selección la compañía con más cantidad de plantas (2x) dentro del radio de 10 km (Figura 8).



Figura 8. Localización de las Plantas Productoras de Hormigón Preparado de Barcelona dentro del radio de 10 km. Fuente: Elaboración Propia

• Cemento a Planta de Hormigón

De acuerdo con la Agrupación de Fabricantes de Cemento de España (OFICEMEN, 2017) y la Agrupación de Fabricantes de Cemento de Cataluña (Ciment Català, 2020), en Cataluña existen actualmente 6 plantas productoras de cemento, 5 de estas en Barcelona, de las cuales solo 3 fabrican el cemento CEM I 42.5 R, (Tabla 16) empleado en nuestras mezclas. En nuestro estudio estaremos inicialmente considerando como posibles suplidoras las plantas ubicadas en Barcelona que fabrican el cemento utilizado en nuestras mezclas (3).

NOMBRE DEL PRODUCTOR	LOCALIZACIÓN (Latitud, Longitud)	PROVINCIA	CEMENTOS PRODUCIDOS
CEMEX España Operaciones, S.L.U.	40.576408, 0.544242	Tarragona	CEM I 42,5 R CEM I 42,5 R -SR 5 CEM I 52,5 N -SR 5 CEM I 52,5 R CEM II/A-L 42,5 R CEM II/A-LL 42,5 R CEM II/B-LL 32,5 N
* LAFARGEHOLCIM España, S.A.U.	41.474807, 2.183834	Barcelona	CEM I 42,5 R CEM I 52,5 R CEM II/A-V 42,5 R CEM II/A-V 52,5 N CEM II/B-L 32,5 R
* Grupo Cementos Portland Valderrivas	41.311835, 1.661513	Barcelona	CEM I 42,5 N -SR 5 CEM I 42,5 R CEM I 52,5 R CEM I 52,5 R CEM I 52,5 R -SR 5 CEM II/A-L 42,5 R CEM II/A-V 42,5 R CEM II/B-L 32,5 N
Cementos Molins Industrial, S.A.	41.406072, 1.997884	Barcelona	CAC Cemento CEM I 42,5 R -SR 5

Cementos Molins Industrial, S.A.	41.402549, 2.054947	Barcelona	CEM I 52,5 R CEM II/A-L 42,5 R CEM II/B-L 32,5 N Información no presentada
* Grupo Cementos Portland Valderrivas	41.242476, 1.860400	Barcelona	CEM I 42,5 R CEM I 52,5 R CEM II/A-V 42,5 R

* Fabricante de cemento que produce el CEM I 42,5 R.

Tabla 16. Localización de las Plantas de Fabricación de Cemento de la Comunidad Autónoma de Cataluña. Fuente: Elaboración Propia

Como explicado en el apartado anterior, a partir del radio de 75 km trazado desde la Planta de Hormigón se verificó la localización de las 3 posibles Plantas de Cemento (Figura 9), realizando el cálculo de la distancia promedio, finalmente adoptada como distancia de acarreo en el estudio (Tabla 17).



Figura 9. Localización de las Plantas Productoras de Cemento de Barcelona dentro del radio de 75 km. Fuente: Elaboración Propia

PRODUCTOR DE CEMENTO	PROVINCIA	LOCALIZACIÓN (Latitud, Longitud)	DISTANCIA A LA PLANTA DE HORMIGÓN (km)
LAFARGEHOLCIM España, S.A.U.	Barcelona	41.474807, 2.183834	24.2
Grup Cementos Portland Valderrivas	Barcelona	41.311835, 1.661513	60.8
Grup Cementos Portland Valderrivas	Barcelona	41.242476, 1.860400	28.8
Valor Promedio			37.93= 38.0

Tabla 17. Cálculo de distancia para Plantas Productoras de Cemento localizadas dentro del radio de 75 km. Fuente: Elaboración Propia

- **Agregados Naturales Gruesos y Finos a Planta de Hormigón**

En la Comunidad Autónoma de Cataluña se localizan 66 emplazamientos dedicados a la extracción de *Agregados Naturales* (Anexo 3), de acuerdo con el Gremi D'Àrids de Catalunya (GREMIARIDS, 2020),

21 de los cuales se ubican en Barcelona. Entre los materiales extraídos de estas explotaciones tenemos: árido calizo, arenas, gravas, sauló, árido granítico, escollera, arcillas, árido sílice, piedra ornamental, basalto, entre otros.



Figura 10. Localización de las Plantas Productoras de Áridos Naturales de Barcelona dentro del radio de 40 km. Fuente: Elaboración Propia

Además de su ubicación en Barcelona dentro del radio establecido (**Error! Reference source not found.**) en la Tabla 14, hemos considerado como criterio de selección la oferta explícita por las plantas de “grava y arena” como producto, con lo que se reduce el total inicial a 15 instalaciones. A partir de lo anterior, se calcularon las distancia de cada una de las instalaciones, adoptándose para nuestro estudio distancia promedio resultante (Tabla 18).

PRODUCTOR DE AGREGADOS NATURALES	PROVINCIA	LOCALIZACIÓN (Latitud, Longitud)	PLANTA DE HORMIGÓN (km)
Àrids Anton, SL	Barcelona	41.420200, 2.008938	16.7
Àrids Anton, SL	Barcelona	41.530418, 1.894933	36.9
Àrids Anton, SL	Barcelona	41.530418, 1.894933	36.9
Àrids Garcia Pedrera GAR 1, SL	Barcelona	41.606354, 2.382561	51.1
Àrids Garcia Pedrera GAR 1, SL	Barcelona	41.606293, 2.382561	51.2
Cemex España Operaciones, SLU, SA	Barcelona	41.341343, 1.890630	28.2
J. Riera, SA	Barcelona	41.335407, 1.863390	30.5
Valor Promedio			35.93= 36.0

Tabla 18. Cálculo de distancia para Plantas Productoras de Áridos Naturales localizadas dentro del radio de 40 km. Fuente: Elaboración Propia

- **Agregados Reciclados a Planta de Hormigón**

Según la Agencia de Residuos de Cataluña (ARC), en el territorio de Cataluña se encuentran localizadas 72 plantas de tratamiento de residuos de la construcción (Anexo 4), que producen áridos

reciclados a partir de concreto proveniente de demoliciones. De estas, 23 está ubicadas en la provincia de Barcelona.



Figura 11. Localización de las Plantas Productoras de Áridos Naturales de Barcelona dentro del radio de 40 km. Fuente: Elaboración Propia

En nuestro trabajo, hemos encontrado un nuevo criterio de clasificación para estas plantas: las que pueden realizar la clasificación de los desechos dentro de la misma instalación, y que ha sido consideradas para nuestro proceso de “clasificación de los desechos fuera del Sitio de Obra” (2 plantas), y las que únicamente realizan el proceso de reciclaje y que reciben material previamente clasificado (5 plantas). Luego de realizados los pasos explicados en el 4.2.1.2.4 (Figura 11), hemos de igual forma obtenido la distancia promedio para las (2x) que realizan los procesos de “clasificación y reciclaje” de los residuos (Tabla 19).

PRODUCTOR DE ÁRIDOS REICLADOS	PROVINCIA	LOCALIZACIÓN (Latitud, Longitud)	SITIO DE OBRA (km)	PLANTA DE HORMIGÓN (km)
*Planta de Reciclaje de Barcelona	Barcelona	41.334578, 2.131822	11.5	4.9
*Planta de Reciclaje de Sant Cugat del Vallès	Barcelona	41.459408, 2.007644	23.6	20.9
Valor Promedio Plantas Con Clasificación			17.55=18.0	12.9=13.0

*Plantas de reciclaje que realizan el proceso de clasificación dentro de sus instalaciones

Tabla 19. Cálculo de distancia para Plantas Productoras de Áridos Reciclados localizadas dentro del radio de 30 km. Fuente: Elaboración Propia

• Sitio de Obra y Planta Reciclaje a Vertederos

De acuerdo con la Agencia de Residuos de Cataluña (ARC), en la Comunidad Autónoma de Cataluña se localizan 55 emplazamientos dedicados al vertido de residuos de la construcción y demolición y 23 de vertido de residuos municipales, de los cuales 26 y 4 se ubican en Barcelona, respectivamente (Tabla 20). Aunque en nuestra investigación hemos encontrado bibliografía que señala 17 km como distancia asumible entre el “Sitio de Obra” y el Vertedero de Residuos de la Construcción y Demolición (Suárez Silgado et al., 2018), en nuestro caso particular no contamos con ninguna instalación ubicada a menos de 20.2 km,

según se puede verificar en la Tabla 20. Por lo anterior, el proceso para la obtención de la distancia a utilizar en nuestro caso de estudio se ha realizado calculando la distancia promedio de todos los emplazamientos aplicables a la actividad de los residuos en cuestión; desde el “Sitio de Obra” para transportar los residuos producidos por la “Clasificación y Reciclaje en el Sitio de Obra” y desde la “Planta de Reciclaje” para los residuos producidos como resultado del “Reciclaje en la planta” o “Fuera de Sitio”. El mismo procedimiento ha sido aplicado para el caso de los Vertederos Municipales, para los cuales la distancia de referencia bibliográfica con la que contamos es de 21 km (Suárez Silgado et al., 2018), hasta la Planta de Hormigón.

NOMBRE DEL VERTEDERO	PROVINCIA	LOCALIZACIÓN (Latitud, Longitud)	SITIO DE OBRA (km)	PLANTA DE HORMIGÓN (km)	PLANTA DE RECICLAJE CON TRIAJE (km)
Depósito de Escombros de Construcción de Esparreguera	Barcelona	41.532631, 1.899025	34.2	35.2	33.4
Depósito de Escombros de Construcción de Olérdola	Barcelona	41.316105, 1.732917	54.2	52.4	50.7
Depósito de Escombros de Construcción de Badalona	Barcelona	41.556856, 2.313972	46.6	47.2	41.3
Depósito de Escombros de Construcción de Brunyola	Barcelona	41.895338, 2.704448	103	106	117
Depósito de Escombros de Construcción D'Avià	Barcelona	42.057133, 1.823687	111	116.6	113.5
Depósito de Escombros de Construcción de Badalona	Barcelona	41.48724, 2.220299	20.2	28.3	28.4
Depósito de Escombros de Construcción de Callús	Barcelona	41.79167, 1.768437	68.6	75.7	67.1
Depósito de Escombros de Construcción de Cardona	Barcelona	41.93029, 1.662795	93.2	97.3	89.1
Depósito de Escombros de Construcción de Castellar De Vallès	Barcelona	41.614832, 2.052891	41.1	50.2	39.5
Depósito de Escombros de Construcción de Cercs (Ii)	Barcelona	42.127938, 1.851874	111.5	120.0	112.2
Depósito de Escombros de Construcción de Dosrius	Barcelona	41.583023, 2.390196	44.3	50.4	46.5
Depósito de Escombros de Construcción del Papiol (Pedrera Silvia Ampliació)	Barcelona	41.447362, 2.00098	22.8	20.9	14.3
Depósito de Escombros de Construcción D'esperguera	Barcelona	41.532613, 1.899025	34.2	35.15	29.4
Depósito de Escombros de Construcción de Llinars Del Vallès	Barcelona	41.606929, 2.385158	49.4	51.4	46.0
Depósito de Escombros de Construcción de Manlleu	Barcelona	42.007243, 2.254774	89	101.0	92.6
Depósito de Escombros de Construcción de Moià	Barcelona	41.82997, 2.08147	75.8	78.1	77.4
Depósito de Escombros de Construcción de Montmaneu	Barcelona	41.626619, 1.42467	82.2	84.5	84.2
Depósito de Escombros de Construcción D'olèrdola	Barcelona	41.316105, 1.732917	52.2	50.8	48.9
Depósito de Escombros de Construcción de Palafoills	Barcelona	41.665651, 2.722798	76.6	80.2	80.3
Depósito de Escombros de Construcción de Pujalt	Barcelona	41.6996, 1.471982	90.9	98.7	90.8
Depósito de Escombros de Construcción de Rubí	Barcelona	41.50589, 1.994593	28.7	32.2	21.5
Depósito de Escombros de Construcción de Sallent	Barcelona	41.816828, 1.884117	70.6	74.3	65.9
Depósito de Escombros de Construcción de Sant Celoni	Barcelona	41.68106, 2.492587	57.0	62.5	60.0
Depósito de Escombros de Construcción de Subirats	Barcelona	41.397166, 1.873526	24.9	31.7	29.5
Depósito de Escombros de Construcción de Vilanova Del Vallès	Barcelona	41.55763, 2.316217	42.1	44.1	38.5
Depósito de Escombros de Construcción de Vilanova I La Geltrú	Barcelona	41.256986, 1.725323	44.6	42.7	49.4
Valor Promedio Depósito Escombros de Construcción			60.3= 60.0	64.1=64.0	60.3=60.0
Depósito Municipal D'hostalets de Pierola	Barcelona	41.527205, 1.810084	43.9	48.7	45.8
Depósito Municipal D'orís	Barcelona	42.075618, 2.206006	102	115	113
Depósito Municipal de Manresa (II)	Barcelona	41.703062, 1.852915	54.9	59.9	57.3
Depósito Municipal de Berga	Barcelona	42.108447, 1.87078	106	112.3	144
Valor Promedio Depósito Municipal			76.7= 77.0	84.0= 84.0	90.0= 90.0

Tabla 20. Cálculo de distancia desde los Vertederos de Materiales de Construcción y Demolición y Municipales hasta el Sitio de Obra y la Planta de Reciclaje. Fuente: Elaboración Propia

- **Otras distancias**

Estas distancias han sido calculadas para ajustar el transporte de los Residuos Municipales producidos en las canteras de Agregados Finos y Gruesos y en la Fábrica de Cemento, considerados en los procesos de SIMAPRO “Producción de Grava Triturada | Cut-off, U”, “Producción de Arena | Cut-off, U”, U” y “Producción de Concreto | Cut-off, U” (Tabla 21).

PRODUCTOR DE AGREGADOS NATURALES	PROVINCIA	LOCALIZACIÓN (Latitud, Longitud)	DEPÓSITO MUNICIPAL D'HOSTALETS DE PIEROLA (km)	DEPÓSITO MUNICIPAL D'ORÍS (km)	DEPÓSITO MUNICIPAL DE MANRESA (II) (km)	DEPÓSITO MUNICIPAL DE BERGA (km)
Àrids Anton, SL	Barcelona	41.420200, 2.008938	31.9	111.7	46.7	102.9
Àrids Anton, SL	Barcelona	41.530418, 1.894933	12.1	106.2	26.3	87.1
Àrids Anton, SL	Barcelona	41.530418, 1.894933	12.1	106.2	26.3	87.1
Àrids Garcia Pedrera GAR 1, SL	Barcelona	41.606354, 2.382561	79.4	88.1	83.2	118.0
Àrids Garcia Pedrera GAR 1, SL	Barcelona	41.606293, 2.382561	79.4	88.1	83.2	118.0
Cemex España Operaciones, SLU, SA	Barcelona	41.341343, 1.890630	50.2	133.3	73.2	123.0
J. Riera, SA	Barcelona	41.335407, 1.863390	47.5	133.3	67.0	116.3
Valor Promedio					79.9= 80.0	
LAFARGEHOLCIM España, S.A.U.	Barcelona	41.474807, 2.183834	50.2	95.1	50.3	107.2
Grup Cementos Portland Valderrivas	Barcelona	41.311835, 1.661513	46.8	134.0	73.4	115.0
Grup Cementos Portland Valderrivas	Barcelona	41.242476, 1.860400	62.9	135.3	80.6	129.0
Valor Promedio					90.0= 90.0	

Tabla 21. Cálculo de distancia desde Plantas de Productoras de Áridos Naturales y Cemento hasta Vertederos Municipales.
Fuente: Elaboración Propia

4.2.1.3 Inventario de Ciclo de Vida

Luego de la definición de los componentes de las mezclas, los escenarios de residuo/ disposición y de las distancias de transporte, según lo explicado anteriormente, el *Inventario de Ciclo de Vida* de nuestro estudio queda establecido en la Tabla 22.

EVALUACIÓN AMBIENTAL Y ECONÓMICA DE LA GESTIÓN DE RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN CON UNA PERSPECTIVA DE ECONOMÍA CIRCULAR
TRABAJO DE FIN DE MÁSTER

TFM

Proceso	Proceso en EcoInvent V3	Unidad	Producción de cemento (por kg)	Producción de arena (por kg)	Producción de agregado grueso triturado (por kg)	Producción de agregado reciclado (por kg)		Producción de Hormigón (por m³)	Demolición (por m³)	Deposición Final en Vertedero de Inertes (por m³)	Transporte (por tkm) Camión de 3.5-7.5 t	Transporte (por tkm) Camión de 16-32 t	Transporte (por tkm) Camión > 32 t
						Planta Fija	Planta Móvil						
ENTRADAS													
Entradas desde la Naturaleza													
Grava	Gravel	kg	3.64E-01	1.04E+00									
Agua (kg)	Water, unspecified natural origin, ES	m³	4.83E-04	1.11E-03									
Ocupación del lugar de extracción	Occupation, mineral extraction site	m²a	1.01E-04	2.88E-04									
Ocupación del cuerpo de agua	Occupation, water bodies, artificial	m²a	2.19E-05	6.27E-05									
Transformación desde desconocido	Transformation, from unknown	m²	1.23E-05	3.51E-05									
Transformación a sitio de extracción	Transformation, to mineral extraction site	m²	1.01E-05	2.88E-05									
Transformación a cuerpo de agua	Transformation, to water bodies, artificial	m²	2.19E-06	6.27E-06									
Entradas desde la Tecnosfera: materiales/ combustibles													
Construcción de Planta de Cemento	Cement factory (GLO) market for Cut-off, U	p	5.36E-11										
Clinker	Clinker (ES) production Cut-off, U	kg	9.03E-01										
Carbón	Hard coal (RoW) market for Cut-off, U	MJ	9.36E-01										
Coca	Petroleum coke (GLO) market for Cut-off, U	MJ	1.06E-01										
Electricidad	Electricity, medium voltage (ES) electricity voltage transformation from high to medium voltage Cut-off, U	MJ	3.23E-01	3.43E-03	3.38E-02	3.47E-02		1.55E+01					
	Electricity, high voltage (ES) electricity production, hydro, run-of-river Cut-off, U	MJ	9.18E-04										
Etilenglicol (Aditivo molendado)	Ethylene glycol (GLO) market for Cut-off, U	kg	1.90E-04										
Yeso	Gypsum, mineral (ES) market for Cut-off, U	kg	4.75E-02										
Acero, baja aleación (desgaste)	Limestone, crushed, for mill (ES) market for limestone, crushed, for mill Cut-off, U	kg	5.00E-02										
	Steel, low-alloyed (GLO) market for Cut-off, U	kg	1.10E-04	4.55E-05	5.10E-05		5.10E-05						
Construcción de nave	Building, hall, steel construction (CH) building construction, hall, steel construction Cut-off, U	m²		1.76E-07	2.85E-06								
Construcción de Planta de Sorting facility, for construction waste (CH) sorting facility construction, for construction waste Cut-off, U		p				4.75E-11							
Construcción de Cinta transportadora	Conveyor belt (RER) production Cut-off, U	m		3.33E-08	9.51E-08	9.51E-08	9.51E-08						
	Diesel, burned in building machine (GLO) processing Cut-off, U	MJ	1.31E-02	5.15E-03	1.25E-02	1.22E-01	1.27E-01	4.00E-01					
Diesel	Diesel (RER) market group for Cut-off, U	MJ						3.43E+01					
	Diesel, low-sulfur (RER) market group for Cut-off, U	MJ								7.20E+00	2.40E+00	1.26E+00	
Cantera de arena/grava	Gravel/sand quarry infrastructure (CH) gravel/sand quarry construction Cut-off, U	p		1.68E-11	4.75E-11								
Gas Natural	Natural gas, high pressure (Europe without Switzerland) market group for Cut-off, U	MJ	6.15E-03										
	Heat, central or small-scale, other than natural gas (ES) market for heat, central or small-scale, other than natural gas Cut-off, U	MJ	1.41E-03	8.54E-04	4.91E-03								
Calor	Heat, district or industrial, natural gas (CH) market for heat, district or industrial, natural gas Cut-off, U	MJ						5.70E+00					
Fabricación de maquinaria	Industrial machine, heavy, unspecified (RER) production Cut-off, U	kg		3.93E-06	9.51E-05		9.51E-05						
Excavadora	Hydraulic digger (GLO) market for Cut-off, U	p						2.00E-06					
Excavadora	Building machine (GLO) market for Cut-off, U	p						1.82E-06					
Acetate lubricante	Lubricating oil (RER) market for lubricating oil Cut-off, U	kg	6.48E-07	2.50E-06		2.50E-06	2.00E-02	1.10E-02					
Recultivación de área	Recultivation, limestone mine (CH) processing Cut-off, U	m²		2.97E-06	1.27E-06								
Goma Sintética (desgaste)	Synthetic rubber (GLO) market for Cut-off, U	kg	7.00E-07	4.00E-06	4.00E-06	4.00E-06	1.20E-01						
Agua (proceso)	Production de Agua Cut-off, U	kg	3.55E-03	1.22E-02	1.22E-02								
Construcción Planta de Hormigón	Concrete mixing factory (CH) construction Cut-off, U	p						4.17E-07					
	Heavy fuel oil (Europe without Switzerland) market for Cut-off, U	MJ	1.04E+00										
Fuel oil	Light fuel oil (Europe without Switzerland) market for Cut-off, U	MJ	1.48E-02										
	Heat, district or industrial, other than natural gas (CH) heat production, light fuel oil, at industrial furnace 1MW Cut-off, U	MJ						8.20E+00					
Vertedero	Inert material landfill (GLO) market for Cut-off, U							1.48E-09					
	Process-specific burdens, inert material landfill (RoW) market for process-specific burdens, inert material landfill Cut-off, U	kg						1.00E+00					
Camión, 16 ton	Lorry, 16 metric ton (GLO) market for Cut-off, U	p						1.88E-06	3.20E-07	9.65E-06			
Mantenimiento, Camión 16 ton	Maintenance, lorry 16 metric ton (GLO) market for Cut-off, U	p						1.88E-06	3.20E-07	9.65E-06			
Carretera	Road (GLO) market for Cut-off, U	my						1.95E-03	1.05E-03	1.09E-03			
SALIDAS													
Emisiones al aire													
C ₂ H ₆ O	Acetaldehyde	g									3.81E-04	1.51E-04	7.50E-05
C ₃ H ₈ O	Acrolein	g									1.47E-04	5.83E-05	2.91E-05
NH ₃	Ammonia	g	2.06E-02			1.00E-04	1.00E-04				3.05E-03	5.18E-04	1.88E-04
Sb	Antimony	g	1.81E-06										
As	Arsenic	g	1.08E-05										
C ₂ H ₄ O	Benzaldehyde	g									1.10E-08	3.66E-09	1.92E-09
C ₆ H ₆	Benzene	g									1.14E-04	4.52E-05	2.25E-05
C ₁₀ H ₁₂	Benzo(a)pyrene	g									5.83E-06	2.31E-06	1.15E-06
Be	Beryllium	g	2.71E-06										
C ₄ H ₁₀	Butane	g									1.25E-05	4.94E-06	2.46E-06
Cd	Cadmium	g	6.32E-06								9.54E-07	3.19E-07	1.67E-07
CO ₂	Carbon dioxide, fossil	g	7.71E+02			5.37E+00	4.66E+00	5.22E-06	1.63E+03	3.48E+02	1.15E+02	5.75E+01	
CO	Carbon monoxide, fossil	g	4.26E-01			1.16E-02	1.19E-02	5.94E+00			2.72E-01	1.13E-01	5.24E-02
Cr	Chromium	g	1.31E-06								3.29E-06	1.10E-06	5.76E-07
Cr ₂ O ₃	Chromium VI	g	4.96E-07								6.58E-09	2.20E-09	1.15E-09
Cu	Copper	g	1.26E-05								8.88E-04	2.32E-06	7.77E-07
N ₂ O	Dinitrogen monoxide	g				1.00E-04	1.00E-04	6.28E-02			1.60E-02	6.14E-03	3.13E-03
C ₁₂ H ₁₀ Cl ₂ O ₂	Dioxin, 2,3,7,8 Tetrachlorodibenzo-p-	g	8.66E-10								3.14E-11		
C ₂ H ₂	Ethane	g									2.50E-06	9.89E-07	4.92E-07
CH ₂ O	Formaldehyde	g									7.00E-04	2.77E-04	1.38E-04
Heat, waste	Calor	MJ	1.35E-01										
C ₇ H ₁₆	Heptane	g									2.50E-05	9.89E-06	4.92E-06
HCl	Hydrogen chloride	g	5.69E-03										
Pb	Lead	g	7.67E-05			4.70E-06	4.80E-06				5.71E-06	1.91E-06	1.00E-06
HgO	Mercury	g	2.98E-05								5.81E-07	1.94E-07	1.02E-07
CH ₄	Methane, fossil	g	8.01E-03			5.10E-03	4.40E-03	8.39E-02			2.05E-04	8.11E-05	4.04E-05
C ₈ H ₁₈	m-Xylene	g									8.16E-05	3.23E-05	1.61E-05
Ni	Nickel	g	4.51E-06								3.65E-05	9.64E-07	3.22E-07
NO	Nitrogen oxides	g	9.75E-01			5.49E-02	5.50E-02	2.30E+01			1.27E-01	5.22E-02	2.63E-02
NMVOG	NMVOG, non-methane volatile organic compounds, unspecified origin	g	5.09E-02			2.30E-03	2.40E-03	2.70E+00			6.77E-03	2.68E-03	1.33E-03
C ₈ H ₁₀	o-Xylene	g									3.33E-05	1.32E-05	6.57E-06
PAH	PAH, polycyclic aromatic hydrocarbons	g				1.15E-08	1.16E-07	1.76E-03			8.57E-06	2.67E-06	1.50E-06
Partículas	Particulates, < 2.5 um	g	9.19E-02		8.00E-09	1.70E-03	1.80E-03	2.34E+00			1.36E-03	4.94E-04	2.37E-04
C ₅ H ₁₂	Pentane	g									5.00E-06	1.98E-06	9.85E-07
C ₃ H ₈	Propane	g									8.33E-06	3.30E-06	1.64E-06
Se	Selenium	g	2.17E-02								5.22E-06		
C ₈ H ₈	Styrene	g									1.10E-08	3.66E-09	1.62E-09
SO ₂	Sulfur dioxide	g	3.20E-01			1.80E-03	1.00E-04	5.28E-01			4.66E-05	1.85E-05	9.19E-06
Tl	Thallium	g	1.17E-05								1.75E-03	5.67E-04	3.13E-04
TiN	Tin	g	8.12E-06										
C ₇ H ₈	Toluene	g									8.33E-07	3.30E-07	1.64E-07
V	Vanadium	g	4.51E-06										
H ₂ O	Water/m3	m³	2.85E-01		3.07E-04						5.22E-04	1.90E-04	6.37E-05
Zn	Zinc	g											
Emisiones al agua													
H ₂ O	Water, ES	m³	1.51E+00		8.18E-04								
Salida a la Tecnosfera: Residuos a tratar													
Residuos Municipales	Municipal solid waste (ES) market for municipal solid waste Cut-off, U	kg		9.70E-07	2.12E-06					5.00E-02			
Residuos de concreto	Waste concrete (ES) treatment of waste concrete, inert material landfill Cut-off, U	kg					6.70E-01	5.38E+00					
Residuos de aceite mineral	Waste mineral oil (Europe without Switzerland) market for waste mineral oil Cut-off, U	kg		6.48E-07	2.90E-06				1.10E-02				
Emisiones por uso de freno	Brake wear emissions, lorry (GLO) market for Cut-off, U	kg									4.13E-05	2.22E-05	1.69E-05
Emisiones por uso de carretera	Road wear emissions, lorry (GLO) market for Cut-off, U	kg									3.56E-05	1.91E-05	1.46E-05
Emisiones por uso de neumáticos	Tyre wear emissions, lorry (GLO) market for Cut-off, U	kg									4.10E-04	2.20E-04	1.68E-04

Tabla 22. Inventario de Ciclo de Vida. Fuente: Elaboración Propia

A partir de los elementos definidos en el *Inventario de Ciclo de Vida* y mediante la aplicación de las dosificaciones establecidas en la sección 4.1.1, subsección *Mezclas*, se realizó la confección de los Ciclos de Vida a ser estudiados mediante el uso del SIMAPRO para los escenarios tanto de Economía Lineal como Circular, que fueron planteados en el programa como se muestra en la Tabla 23.

Etapas del Producto	Proceso	Proceso en Ecoinvent V3	Unidad	HE 100% AN	HE 20% ARH - CES - RES	HE 20% ARH - CFS - PR	HE 30% ARH - CES - RES	HE 30% ARH - CFS - PR	HNE 100% AN	HNE 100% ARH - CES - RES	HNE 100% ARH - CFS - PR
Ensamblaje	ANG - Agregado Natural Grueso	Producción de Grava Triturada Cut-off, U	kg	1,193.00	954.00	954.00	835.00	835.00	914.00	-	-
		Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO6 (RER) transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO6 Cut-off, U	tkm	42.95	34.34	34.34	30.06	30.06	32.90	-	-
	ANF - Agregado Natural Fino	Producción de Arena Cut-off, U	kg	618.00	618.00	618.00	618.00	618.00	901.00	-	-
		Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO6 (RER) transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO6 Cut-off, U	tkm	22.25	22.25	22.25	22.25	22.25	32.44	-	-
	ARH - Agregados Reciclados de Hormigón - Planta Fija	Producción Agregados Reciclados - Planta Fija Cut-off	kg	-	-	239.00	-	358.00	-	-	1,764.00
		Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO6 (RER) transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO6 Cut-off, U	tkm	-	-	3.11	-	4.65	-	-	22.93
	ARH - Agregados Reciclados de Hormigón - Planta Móvil	Producción Agregados Reciclados - Planta Móvil Cut-off	kg	-	239.00	-	358.00	-	-	1,764.00	-
		Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO6 (RER) transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO6 Cut-off, U	tkm	-	2.39	-	3.58	-	-	17.64	-
	CP - Cemento Portland	Producción de Cemento Portland Cut-off, U	kg	398.00	398.00	398.00	398.00	398.00	327.00	289.00	289.00
		Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO6 (RER) transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO6 Cut-off, U	tkm	15.12	15.12	15.12	15.12	15.12	12.43	10.98	10.98
	H ₂ O - Agua	Producción de Agua Cut-off, U	kg	195.00	198.20	198.20	199.80	199.80	209.00	184.00	184.00
	Mezclado de Hormigón	Producción de Concreto Cut-off, U	m3	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Transporte de Hormigón	Transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO6 (RER) transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO6 Cut-off, U	tkm	24.00	24.03	24.03	24.05	24.05	23.51	22.37	22.37	
Procesos	Demolición de Estructura	Demolición de Estructura - Economía Lineal	kg	2,400.00	-	-	-	-	2,351.00	-	-
		Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO6 (RER) transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO6 Cut-off, U	tkm	144.00	-	-	-	-	-	-	-
Escenarios+A10 7.F.12b de Residuo/ Disposición	Fin de Vida - HE 100% AN	Waste concrete (ES) treatment of waste concrete, inert material landfill Cut-off, U	kg	2,400.00	-	-	-	-	-	-	-
		Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO6 (RER) transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO6 Cut-off, U	tkm	-	-	-	-	-	141.06	-	-
Escenarios+A10 7.F.12b de Residuo/ Disposición	Fin de Vida - HNE 100% AN	Waste concrete (ES) treatment of waste concrete, inert material landfill Cut-off, U	kg	-	-	-	-	-	2,351.00	-	-
		Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO6 (RER) transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO6 Cut-off, U	tkm	-	-	-	-	-	-	-	-

Tabla 23. Concepción del estudio en SIMAPRO según los escenarios establecidos. Fuente: Elaboración Propia

4.2.1.4 Resultados y discusión

En el presente apartado presentaremos y discutiremos los resultados de la caracterización de las diferentes opciones de agregados utilizados en nuestro estudio, así como de los escenarios de Economía Lineal y Circular en los que se incluye el uso de estos materiales.

4.2.1.4.1 Agregado Natural y Reciclado

❖ Agregado Natural

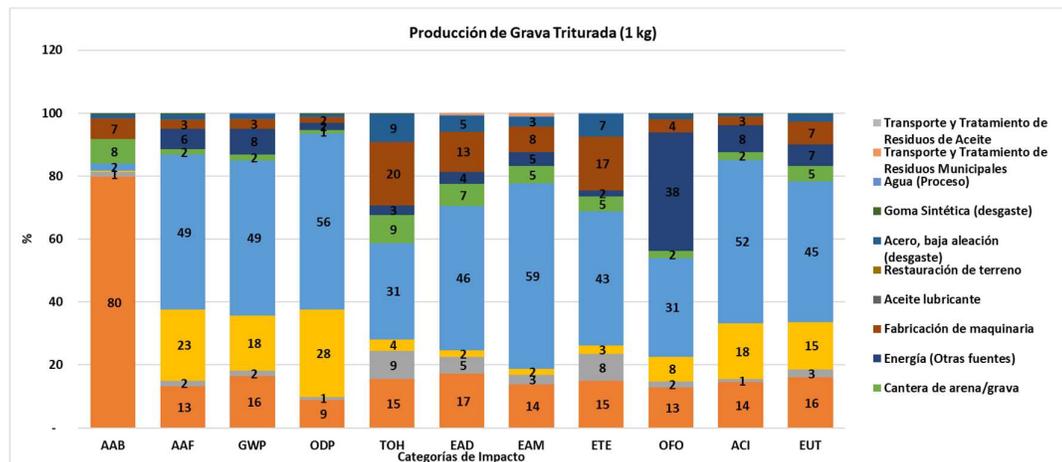


Figura 12. Resultados de la caracterización del proceso de producción de 1 kg de Agregado Natural. Fuente: Elaboración Propia

En la Figura 12 podemos observar que la *Electricidad* utilizada para el procesamiento de los materiales extraídos de la cantera para la fabricación de la grava presenta los mayores impactos en prácticamente todas las categorías, alcanzando valores de hasta el 59%. Estos valores vienen soportados por la producción de emisiones de CO₂, SO₂, NO_x y partículas que generan sus fuentes de producción.

La *Construcción de Nave*, que representa la infraestructura de la cantera, compuesta principalmente por materiales metálicos, alcanza su mayor valor, 80%, en *Agotamiento Abiótico*, debido a la extracción y consumo de materiales naturales necesarios para su construcción. Para las demás categorías de impacto presenta valores entre 9 y 17%.

El *Diésel*, utilizado en la cantera para la extracción de los materiales, presenta sus mayores valores en *Reducción de la Capa de Ozono*, *Agotamiento Abiótico (combustibles fósiles)*, *Calentamiento Global*, todo como consecuencia de su consumo y de las emisiones de CO₂ y Cloro que genera su combustión (Bolaji & Hua, 2013) y en, *Acidificación* y *Eutrofización*, debido las emisiones de óxidos de nitrógeno y dióxido de azufre que producen su consumo (Suárez, 2015).

La *Restauración de Terreno*, a producirse luego de la explotación de la cantera, supone sus impactos más importantes en las categorías *Toxicidad Humana* (20%), *Ecotoxicidad terrestre* (17%), *Ecotoxicidad en Agua Dulce* (13%) y *Ecotoxicidad en Aguas Marinas* (8%).

❖ Agregado Reciclado de Hormigón - Planta Fija

En la Figura 13, se puede apreciar que, para el caso de los *Agregados Reciclados - Planta Fija*, la mayor carga ambiental la produce el proceso de *Trituración de Áridos*, en el cual están incluidos los procesos de demolición de la estructura, su clasificación y reciclaje dentro de la instalación, conteniendo cada uno los consumos de energía y las emisiones producidas por estos proceso. El mayor valor lo presentan las categorías de *Eutrofización* y *Acidificación*, ambas con un 97%. Esto debido a los consumos de combustible y energía, que producen emisiones de SO₂ y NO_x. Mientras, *Oxidación Fotoquímica*, *Calentamiento Global*, *Reducción de la Capa de Ozono* y *Agotamiento Abiótico (combustibles fósiles)* se encuentran todas con valores sobre el 90%, básicamente también por el CO₂, el Cloro, NO_x y SO₂ que produce la combustión del diésel utilizado en las maquinarias. Para *Ecotoxicidad en Aguas Marina*, *Ecotoxicidad en Agua Dulce*, *Ecotoxicidad Terrestre*, *Toxicidad Humana* y *Agotamiento Abiótico*, se muestran valores de 87, 86, 83, 83 y 28 %, respectivamente.

A este proceso le sigue en importancia *el Transporte de los RCD a la Planta de Reciclaje*, el cual presenta su mayor valor en la categoría de *Agotamiento Abiótico*, con 16%, debido a la explotación de materiales necesarios para la construcción del camión y de la carretera, así como su mantenimiento. Para el resto de las categorías muestra valores entre 2 y 13%, todos ligados al efecto de la combustión del diésel utilizado, así como de las partículas por el uso de la carretera y los frenos del camión.

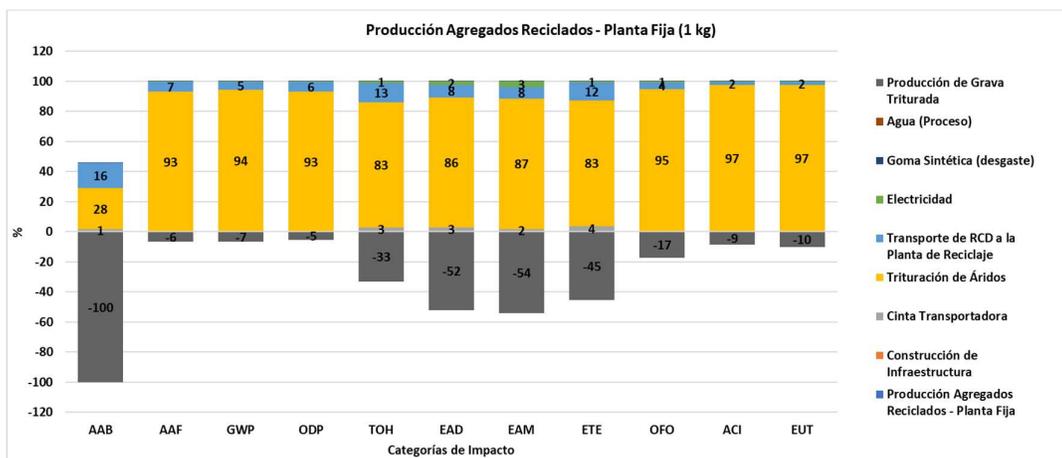


Figura 13. Resultados de la caracterización del proceso de producción de 1 kg de Agregado Reciclado de Hormigón en una Planta Fija.
Fuente: Elaboración Propia

Se verifica una aportación positiva (valores negativos) debido a los materiales evitados, en este caso, a la *Producción de Grava Triturada Evitada*, por cuenta del *Agregado Natural* que no se explota gracias al uso del *Agregado Reciclado – Planta Fija*. Para el *Agotamiento Abiótico*, presenta un impacto positivo del 100% debido, básicamente, a que 1kg de grava reciclada evita la explotación de 1 kg de grava natural. Otros procesos con valores a destacar son la *Ecotoxicidad en Aguas Marinas* y *Ecotoxicidad en Agua Dulce*, con impactos positivos de 54 y 52%, respectivamente. También, la *Ecotoxicidad Terrestre*, con un -45%, y finalmente, la *Toxicidad Humana*, con un -33%. Todos estos impactos positivos vienen asociados con el consumo de diésel y energía evitados, necesarios para la explotación de la cantera, así como con sus emisiones de compuestos químicos y partículas asociadas.

Los demás procesos presentan valores prácticamente despreciables para todas las categorías de impacto.

❖ **Agregado Reciclado de Hormigón – Planta Móvil**

Este proceso contempla la fabricación de Agregado Reciclado de Hormigón, a partir de su procesamiento en una Planta de Reciclaje Móvil, transportada a los fines hasta el Sitio de Obra. Según se verifica en la Figura 14, al igual que para el *Agregado Reciclado - Planta Fija*, este insumo presenta sus mayores valores en el proceso de *Trituración de Áridos*. Sin embargo, los valores evidenciados para cada categoría de impacto son menores que para el proceso en Planta Fija. Los mayores valores lo presentan las categorías de *Acidificación* y *Eutrofización*, con 86 y 85%, respectivamente. Mientras, *Calentamiento Global*, con 83%, *Oxidación Fotoquímica*, con 78%, *Reducción de la Capa de Ozono* y *Agotamiento Abiótico (combustibles fósiles)*, ambas con 71%, son las categorías que le siguen respecto a los valores mostrados. Para *Ecotoxicidad en Agua Dulce*, *Ecotoxicidad en Aguas Marina*, *Toxicidad Humana*, *Ecotoxicidad Terrestre* y *Agotamiento Abiótico*, se muestran valores de 53, 51, 51, 49 y 12%, respectivamente.

El siguiente proceso en términos de importancia es el *Transporte de residuos de trituración a Vertedero de Inertes*. Este proceso, que no aparece para los *Agregados Reciclados - Planta Fija* porque hemos asumido que sus residuos de proceso pueden ser diluidos en la misma planta, contempla el transporte de los residuos del proceso de reciclaje hasta el vertedero a una distancia de 60 km. Presenta su mayor valor en *Toxicidad Humana*, con un 24%, y valores mayores al 20% en las categorías *Agotamiento Abiótico* y *Ecotoxicidad Terrestre*. Para las restantes categorías de impacto, los valores oscilan entre 5 y 20%. En relación con los residuos del proceso de reciclaje en Planta Móvil está también el *Tratamiento de Residuos de Concreto*, que contempla la construcción, operación y cierre del Vertedero de Inertes en el que se dispondrán finalmente los residuos. Presenta valores entre 4 y 14% en todas las categorías de impacto.

Los procesos de *Fabricación de Maquinaria*, *Acero, baja aleación (desgaste)*, y *Cinta Transportadora*, comprenden los impactos por categoría ocasionados por la construcción y mantenimiento de los equipamientos utilizados para el reciclaje de los agregados en el Sitio de Obra. Presentan valores importantes en las mismas categorías (la sumatoria entre un 15% y un 21%): *Ecotoxicidad Terrestre*, con 21%, *Ecotoxicidad en Agua Dulce*, con 20%, *Toxicidad Humana*, con 18%, *Ecotoxicidad en Aguas Marinas*, con 14% y, *Agotamiento Abiótico*, con 9%.

Para este material también se verifica una aportación positiva (valores negativos) debido a los materiales evitados, en este caso, a la *Producción de Grava Triturada Evitada*, por cuenta del *Agregado Natural* que no se explota gracias al uso del *Agregado Reciclado - Planta Móvil*. Para el *Agotamiento Abiótico*, y para la *Ecotoxicidad en Aguas Marinas*, presenta un impacto positivo del 100% debido, básicamente, a que 1kg de grava reciclada evita la explotación de 1 kg de grava natural. Otros procesos con valores a destacar son la *Ecotoxicidad en Agua Dulce* y *Ecotoxicidad Terrestre*, con impactos positivos de 86 y 64%, respectivamente. También, la, y finalmente, la *Toxicidad Humana*, con un -47%. Todos estos impactos

positivos vienen asociados con el consumo de diésel y energía evitados, necesarios para la explotación de la cantera, así como con sus emisiones de compuestos químicos y partículas asociadas evitadas.

Los demás procesos presentan valores prácticamente despreciables para todas las categorías de impacto.

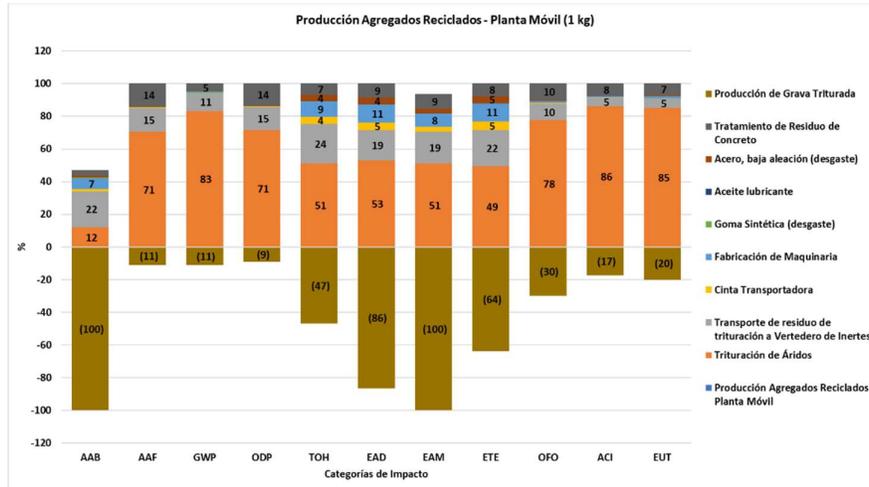


Figura 14. Resultados de la caracterización del proceso de producción de 1 kg de Agregado Reciclado de Hormigón en una Planta Móvil. Fuente: Elaboración Propia

4.2.1.4.2 Economía Lineal

❖ Hormigón Estructural 100% Agregados Naturales (HE 100% AN)

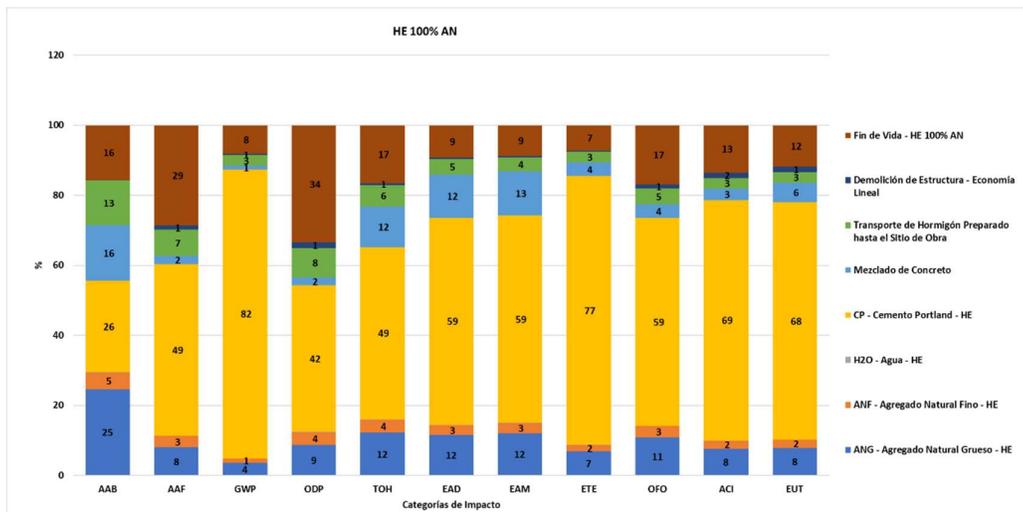


Figura 15. Resultados de la caracterización del escenario HE 100% AN. Fuente: Elaboración Propia

Según se verifica en la Figura 15, el CP - *Cemento Portland - HE* es el proceso que ejerce el mayor impacto sobre medio ambiente en todas las categorías, llegando a representar el 82% de *Calentamiento Global*, el 77% de *Ecotoxicidad Terrestre*, el 69% de *Acidificación*, el 68% de *Eutrofización*, el 59% de *Ecotoxicidad en Agua Dulce*, *Aguas Marinas* y *Oxidación Fotoquímica*. Para las demás categorías, presenta valores de menos del 50%: 49% de *Agotamiento Abiótico (combustibles fósiles)*, 42% de *Reducción de la Capa de Ozono* y 26% de *Agotamiento Abiótico*. Este lugar lo debe a la producción del clínker necesario para su fabricación (Suárez, 2015), el cual lo compone en un 90% según se muestra en la Tabla 3.

El segundo proceso más impactantes es *Fin de Vida – HE 100% AN*, que contempla la demolición y el transporte de los RCD y su disposición final en Vertedero de Inertes y que presenta su mayor valor en la categoría de *Reducción de la Capa de Ozono*, con un 34%, siguiéndole en importancia el *Agotamiento Abiótico (combustibles fósiles)* con un 29%. Para las demás categorías, los valores oscilan entre un 17 y un 7%. Esto se debe, principalmente, al combustible utilizado por el camión en el transporte y por los equipos durante la construcción y mantenimiento del vertedero, cuyas emisiones afectan la capa de ozono, la salud humana y el medio ambiente, así como representan consumo de combustibles fósiles y de materiales de la naturaleza para la construcción de instalaciones, carretera y equipos.

Otros procesos con impactos a destacar es el *ANG – Agregado Natural Grueso – HE*, que presenta valores de 25% en el *Agotamiento Abiótico*, por el consumo de recursos naturales para su producción. Para el resto de las categorías presenta valor promedio de 9% (entre 4% y 12%), debido a las emisiones producto del diésel y la electricidad consumida por las maquinarias. El *Mezclado de Concreto*, que presenta su mayor valor en *Agotamiento Abiótico*, con un 16%, por el consumo de recurso para la construcción de la planta de hormigón y los equipos que contiene, seguido por un 13% en *Ecotoxicidad en Aguas Marinas* y un 12% para *Ecotoxicidad en Agua Dulce y Toxicidad Humana*, por las emisiones producto de la combustión del diésel de los procesos envueltos. Para las demás categorías registra un valor promedio de 3% (entre 1 y 6%).

Los demás procesos presentan valores prácticamente despreciables para todas las categorías de impacto.

❖ Hormigón No Estructural 100% Agregados Naturales (HE 100% AN)

Para el *HNE 100% AN* (Figura 16), los procesos presentan el mismo comportamiento que en el *HE 100% AN*. Esto se debe a que los escenarios han sido planteados de manera similar, cambiando únicamente la proporción de la mezcla y por ende, los valores de los procesos, que serán menores en comparación con el *HE 100% AN*, pues este hormigón es menos denso.

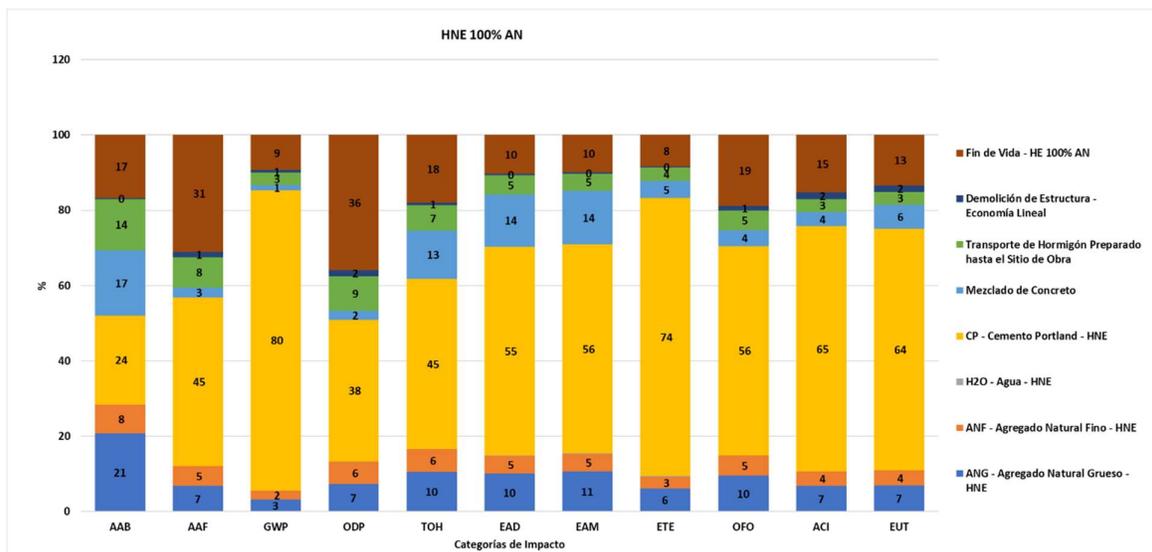


Figura 16. Resultados de la caracterización del escenario HNE 100% AN. Fuente: Elaboración Propia

El proceso de *CE – Cemento Portland – HNE*, es el que presenta mayores valores en todas las categorías de impacto: 80% en *Calentamiento Global*, 74% en *Ecotoxicidad Terrestre*, 65 y 64% en *Acidificación y Eutrofización*, respectivamente. Presenta 56% para *Oxidación Fotoquímica y Ecotoxicidad en Aguas Marinas* y 55% en *Ecotoxicidad en Agua Dulce*. Para *Agotamiento Abiótico (combustibles fósiles)* presenta un 45%, 38% para *Reducción de la Capa de Ozono* presenta un 38% y 24% para *Agotamiento Abiótico*.

Fin de Vida – HNE 100% AN es el segundo proceso más impactante y su mayor valor lo presenta en la categoría de *Reducción de la Capa de Ozono*, con un 36%, seguido por un 31% en *Agotamiento Abiótico (combustibles fósiles)*. Las categorías *Oxidación Fotoquímica*, *Toxicidad Humana* y *Agotamiento Abiótico*, presentan valores de 19, 18 y 17%, respectivamente, mientras, para las demás categorías, los valores oscilan entre un 8 y un 13%.

Otros procesos con impactos a destacar es el *ANG – Agregado Natural Grueso – HNE*, que presenta valores de 21% en el *Agotamiento Abiótico*, y un valor promedio de 8% para el resto de las categorías (entre 3% y 7%) y, el *Mezclado de Concreto*, que presenta su mayor valor en *Agotamiento Abiótico*, con un 17%, seguido por un 14% en *Ecotoxicidad en Agua Dulce y Aguas Marinas* y un 13% para *Toxicidad Humana*. Para las demás categorías registra un valor promedio de 4% (entre 1 y 6%).

El *Transporte de Hormigón Preparado hasta el Sitio de Obra*, presenta su valor más importante en *Agotamiento Abiótico*, con un 14%. Mientras, para las demás categorías presenta valores entre 8 y 3%.

Los demás procesos presentan valores prácticamente despreciables para todas las categorías de impacto.

4.2.1.4.3 Economía Circular

❖ Hormigón Estructural 20% Agregados Reciclados Gruesos – Planta Móvil (HE 20% ARH - PM)

En el escenario *HE 20% ARH – PM* (Figura 17), en el cual se mantiene el 80% de los *Agregados Naturales* y se sustituye el 20% restante por agregado reciclado de hormigón, fabricado mediante el uso de una Planta Móvil transportada hasta el Sitio de Obra, se mantiene el *CP – Cemento Portland- HE* como proceso más impactante en todas las categorías, presentando su valor más alto en *Calentamiento Global*, con 88%, seguido por *Ecotoxicidad Terrestre*, para la que presenta un 83%. En *Acidificación*, *Eutrofización* y *Oxidación Fotoquímica*, presenta un 76, 74 y 69%, respectivamente, para ser seguidas en importancia por *Agotamiento Abiótico (combustibles fósiles)*, *Ecotoxicidad de Agua Dulce y Aguas Marinas*, todas con un 65%. Finalmente, los valores menores son presentados por *Reducción de la Capa de Ozono*, con 59% y *Agotamiento Abiótico*, con un 32%.

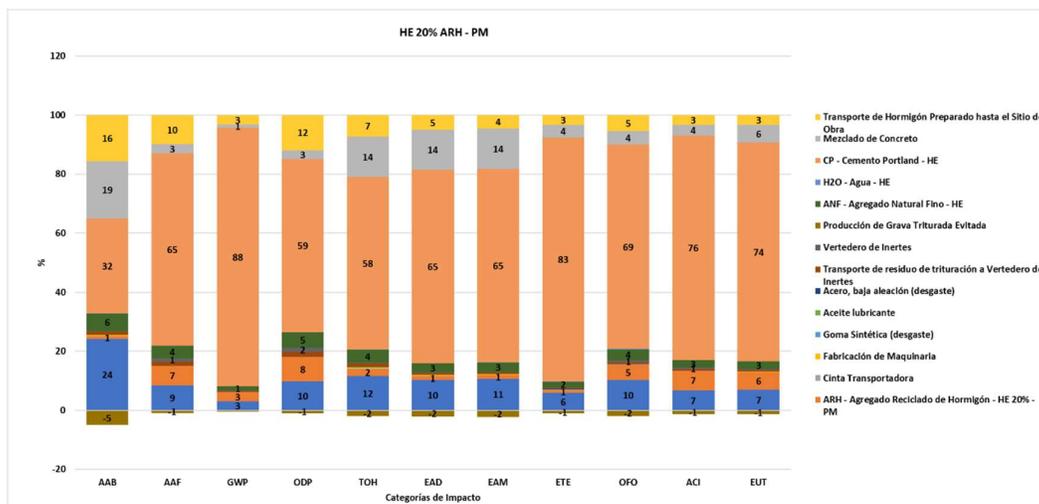


Figura 17. Resultados de la caracterización del escenario HE 20% ARH – PM. Fuente: Elaboración Propia

El proceso *ANG – Agregado Natural Grueso – HE*, que presenta su mayor valor en *Agotamiento Abiótico*, con 24%, presentando para todas las demás categorías valores entre 12 y 3%, es el segundo en importancia.

A este proceso le continua el *Mezclado de Concreto*, cuyo máximo valor lo muestra el *Agotamiento Abiótico*, con 19%, seguido por *Toxicidad Humana*, *Ecotoxicidad en Agua Dulce* y en *Aguas Marinas*, con 14% cada uno. Finalmente, consideramos destacable, el *Transporte de Hormigón Preparado hasta el Sitio de Obra*, que presenta 16, 12 y 10% en *Agotamiento Abiótico*, *Reducción de la Capa de Ozono* y *Agotamiento Abiótico* (combustibles fósiles), respectivamente. Los demás procesos, presentan impactos prácticamente desconsiderables.

Se verifican impactos positivos provenientes del proceso *Producción de Grava Triturada evitada*, dada la sustitución de la grava natural en el porcentaje de los agregados reciclados de hormigón utilizados (20%). Estos impactos se verifican en todas las categorías, presentándose su mayor valor en *Agotamiento Abiótico*, en la que presenta un 5%, seguido por *Toxicidad Humana*, *Ecotoxicidad en Agua Dulce*, *Aguas Marinas* y en *Oxidación Fotoquímica*, para los cuales presenta un 2%.

❖ **Hormigón Estructural 20% Agregados Reciclados Gruesos – Planta Fija (HE 20% ARH - PF)**

En el escenario *HE 20% ARH – PF* (Figura 18), en el cual el 20% del *Agregado Reciclado* de hormigón introducido en la mezcla en sustitución del mismo porcentaje de *Agregado Natural*, proviene de una Planta Fija, mantiene el *CP – Cemento Portland- HE* como proceso más impactante en todas las categorías, presentando su valor más alto en *Calentamiento Global*, con 86%, seguido por *Ecotoxicidad Terrestre*, para la que presenta un 82%. En *Acidificación*, *Eutrofización* y *Oxidación Fotoquímica*, presenta un 71, 69 y 66%, respectivamente, para ser seguidas en importancia por *Ecotoxicidad de Agua Dulce* y *Aguas Marinas*, ambas con un 64% y por *Agotamiento Abiótico* (combustibles fósiles), con un 61%. Finalmente, los valores menores son presentados por *Reducción de la Capa de Ozono*, con 54% y *Agotamiento Abiótico*, con un 32%.

El segundo en importancia respecto a los valores arrojados es el *ANG – Agregado Natural Grueso – HE*, que presenta su mayor valor en *Agotamiento Abiótico*, con 24%, presentando para todas las demás categorías valores entre 12 y 3%. A este proceso le continua *ARH – Agregado Reciclado de Hormigón – HE 20% - PF* y el *Mezclado de Concreto*, con valores similares que oscilan entre 2 y 19%. Los demás procesos, a excepción del *ANF – Agregado Natural Fino – HE*, que muestra en promedio 3% para todas las categorías, presentan impactos prácticamente desconsiderables.

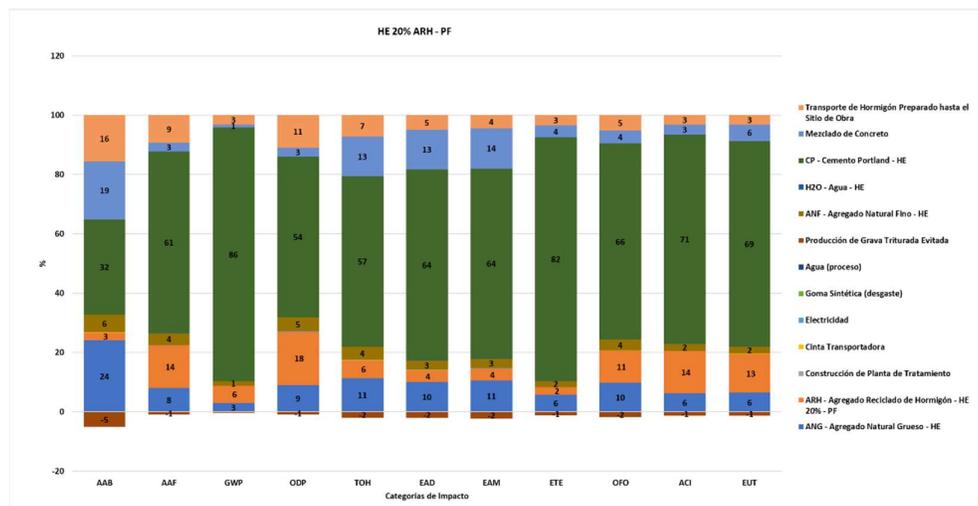


Figura 18. Resultados de la caracterización del escenario HE 20% ARH – PF. Fuente: Elaboración Propia

Se verifican impactos positivos proveniente del proceso *Producción de Grava Triturada evitada*, dada la sustitución del *Agregado Natural* en el porcentaje de los *Agregados Reciclados* de hormigón utilizados

(20%). Estos impactos se verifican en todas las categorías, presentándose su mayor valor en *Agotamiento Abiótico*, en la que presenta un 5%, seguidos por *Toxicidad Humana*, *Ecotoxicidad en Agua Dulce*, *Aguas Marinas* y en *Oxidación Fotoquímica*, para los cuales presenta un 2%.

❖ **Hormigón Estructural 30% Agregados Reciclados Gruesos – Planta Móvil (HE 30% ARH - PM)**

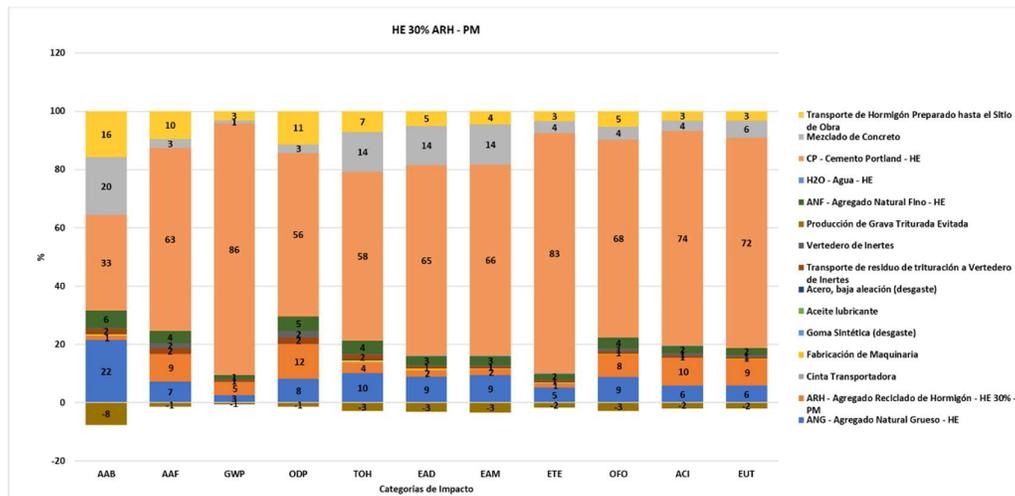


Figura 19. Resultados de la caracterización del escenario HE 30% ARH – PM. Fuente: Elaboración Propia

En el escenario *HE 30% ARH – PM* (Figura 19), en el cual se mantiene el 70% de los *Agregados Naturales* y se sustituye el 30% restante por *Agregado Reciclado* de hormigón, fabricado mediante el uso de una *Planta Móvil* transportada hasta el *Sitio de Obra*, se mantiene el *CP – Cemento Portland- HE* como proceso más impactante en todas las categorías, presentando su valor más alto en *Calentamiento Global*, con 86%, seguido por *Ecotoxicidad Terrestre*, para la que presenta un 83%. En *Acidificación*, *Eutrofización* y *Oxidación Fotoquímica*, presenta un 74, 72 y 68%, respectivamente, para ser seguidas en importancia por *Ecotoxicidad de Agua Dulce* y *Aguas Marinas*, con un 65 y 66%, respectivamente y por *Agotamiento Abiótico (combustibles fósiles)*, con un 63%. Finalmente, los valores menores son presentados por *Toxicidad Humana*, con un 58%, *Reducción de la Capa de Ozono*, con 56% y *Agotamiento Abiótico*, con un 33%.

Luego del *CP – Cemento Portland- HE*, se observan tres procesos con proporciones de impacto similares *ANG – Agregado Natural Grueso – HE*, el *ARH – Agregado Reciclado de Hormigón – HE 30% - PM* y el *Mezclado de Concreto*, los cuales se relacionan entre sí por las infraestructura que conllevan para la realización de los procesos, así como por el consumo de diésel y energía de los procesos envueltos para su operación.

Se verifican impactos positivos provenientes del proceso *Producción de Grava Triturada evitada*, dada la sustitución del *Agregado Natural* en el porcentaje de los *Agregados Reciclados* de hormigón utilizados (30%). Estos impactos se verifican en todas las categorías, presentándose su mayor valor en *Agotamiento Abiótico*, en la que se observa un 8%, seguidos por *Toxicidad Humana*, *Ecotoxicidad en Agua Dulce*, *Aguas Marinas* y en *Oxidación Fotoquímica*, para los cuales presenta un 3% en todos los casos.

Globalmente, se percibe la misma estructura y valores que el *HE 20% ARH – PM* para todos los procesos excepto, lógicamente, la producción de *Agregados Reciclados* que aumenta respecto del *Agregado Natural* grueso por el cambio de proporciones de *Agregados Reciclados* que pasa de 20% a 30%.

❖ **Hormigón Estructural 30% Agregados Reciclados Gruesos – Planta Fija (HE 30% ARH - PF)**

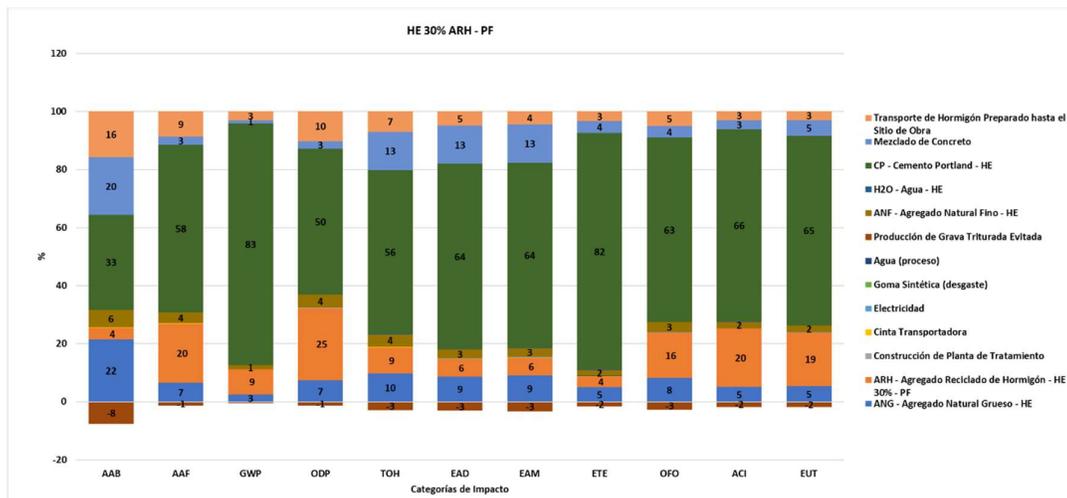


Figura 20. Resultados de la caracterización del escenario HE 30% ARH – PF. Fuente: Elaboración Propia

En el escenario *HE 30% ARH – PF* (Figura 20), en el cual el 30% del agregado reciclado de hormigón introducido en la mezcla en sustitución del mismo porcentaje de agregado natural, proviene de una Planta Fija, mantiene el *CP – Cemento Portland- HE* como proceso más impactante en todas las categorías, presentando su valor más alto en *Calentamiento Global*, con 83%, seguido por *Ecotoxicidad Terrestre*, para la que presenta un 82%. En *Acidificación*, *Eutrofización* y *Oxidación Fotoquímica*, presenta un 66, 65 y 63%, respectivamente, para ser seguidas en importancia por *Ecotoxicidad de Agua Dulce* y *Aguas Marinas*, ambas con un 64% y por *Agotamiento Abiótico (combustibles fósiles)*, con un 58%. Finalmente, los valores menores son presentados por *Toxicidad Humana*, con un 56%, *Reducción de la Capa de Ozono*, con 50% y *Agotamiento Abiótico*, con un 33%.

El segundo en importancia respecto a los valores arrojados es, en ese escenario, el *ARH – Agregado Reciclado de Hormigón - HE 30% - PF* que representa valores superiores a 15% en *Agotamiento Abiótico*, *Reducción de la Capa de Ozono*, *Oxidación Fotoquímica* y *Acidificación*. A continuación están, con impactos relativamente similares, el *ANG – Agregado Natural Grueso – HE*, que presenta su mayor valor en *Agotamiento Abiótico*, con 22%, con valores para todas las demás categorías valores entre 10 y 3% y el *Mezclado de Concreto*, cuyo máximo valor lo muestra el *Agotamiento Abiótico*, con 20%, seguido por *Toxicidad Humana*, *Ecotoxicidad en Agua Dulce* y en *Aguas Marinas*, con 13% cada una. Finalmente, consideramos destacable, el *Transporte de Hormigón Preparado hasta el Sitio de Obra*, que presenta 16, 10 y 9% en *Agotamiento Abiótico*, *Reducción de la Capa de Ozono* y *Agotamiento Abiótico (combustibles fósiles)*, respectivamente. Los demás procesos, a excepción del *ANF – Agregado Natural Fino – HE*, que muestra en promedio 3% para todas las categorías, presentan impactos prácticamente desconsiderables.

Se verifican impactos positivos provenientes del proceso *Producción de Grava Triturada evitada*, dado la sustitución del *Agregado Natural* en el porcentaje de los *Agregados Reciclados* de hormigón utilizados (30%). Estos impactos se verifican en todas las categorías, presentándose su mayor valor en *Agotamiento Abiótico*, en la que presenta un 8%, seguidos por *Toxicidad Humana*, *Ecotoxicidad en Agua Dulce*, *Aguas Marinas* y en *Oxidación Fotoquímica*, para los cuales presenta un 3 en todos los casos.

Globalmente se nota la misma estructura y valores que *el HE 20% ARH – PF* para todos los procesos. Sin embargo, el nivel de impactos de la producción del *Agregado Reciclado* se vuelve superior al de

producción del *Agregados Natural* grueso por el aumento en la proporción y los impactos asociados a la producción en Planta Fija.

❖ **Hormigón No Estructural 100% Agregados Reciclados Gruesos – Planta Móvil (HNE 100% ARH - PM)**

En este escenario (Figura 21), se realiza la sustitución del 100% de los *Agregados Naturales* finos y gruesos por *Agregados Reciclados* de hormigón. Tal como en los casos anteriores, el CP – *Cemento Portland – HNE* ocupa el primer lugar respecto a los impactos causados, presentando un 74% en *Ecotoxicidad Terrestre*, 67% en *Calentamiento Global*, 58% en *Ecotoxicidad en Aguas Marinas* y 56% en *Ecotoxicidad en Agua Dulce*. Para todas las demás categorías, aunque los valores siguen siendo importantes, representan menos del 50%: 47% para *Eutrofización*, 46% para *Acidificación* y *Oxidación Fotoquímica*, 44% para *Toxicidad Humana*, 37% para *Agotamiento Abiótico* y 30% para *Agotamiento Abiótico y Reducción de la Capa de Ozono*.

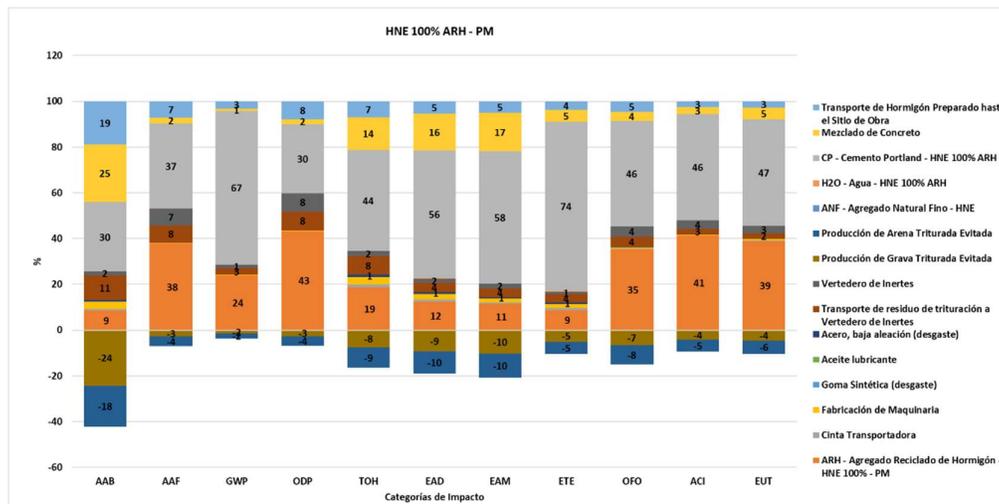


Figura 21. Resultados de la caracterización del escenario HNE 100% ARH – PM. Fuente: Elaboración Propia

El segundo lugar lo ocupa, *ARH – Agregado Reciclado de Hormigón – HNE 100% - PM*, presentando sus mayores valores en *Reducción de la Capa de Ozono*, con 43%, *Agotamiento Abiótico (combustibles fósiles)*, con 38%, *Acidificación*, con 41%, *Oxidación Fotoquímica*, con 35%, *Eutrofización*, con 39% y *Calentamiento Global* con 24%, como consecuencia de la combustión de diésel y sus emisiones. Le sigue en importancia el *Mezclado de Concreto*, que presenta porcentajes mayores al 15% en 4 categorías; *Agotamiento Abiótico*, *Toxicidad Humana* y *Ecotoxicidad en Agua Dulce* y en *Aguas Marinas*.

Se verifican impactos positivos provenientes de 2 procesos: *Producción de Grava Triturada evitada* y *Producción de Arena Triturada evitada*, siendo en este caso de mucho mayor importancia que en los anteriores, dada la completa sustitución de los *Agregados Naturales* finos y gruesos por los *Agregados Reciclados* de hormigón, que evita en mayor proporción, el consumo de materiales naturales, de combustibles fósiles y las emisiones asociadas.

❖ **Hormigón No Estructural 100% Agregados Reciclados Gruesos – Planta Fija (HNE 100% ARH - PF)**

En el escenario *HE 100% ARH – PF*, según evidencia la Figura 22, *ARH – Agregado Reciclado de Hormigón – HNE 100% - PF*, pasa a ocupar la primera posición respecto a los impactos que produce, presentando sus mayores valores en *Reducción de la Capa de Ozono*, con 71%, *Agotamiento Abiótico*

(combustibles fósiles), con 65%, *Acidificación*, con 64%, *Eutrofización*, con 62%, *Oxidación Fotoquímica*, con 58%, y *Calentamiento Global* con 40%, como consecuencia de la combustión de diésel y sus emisiones y el consumo de energía eléctrica para el procesamiento de los materiales.

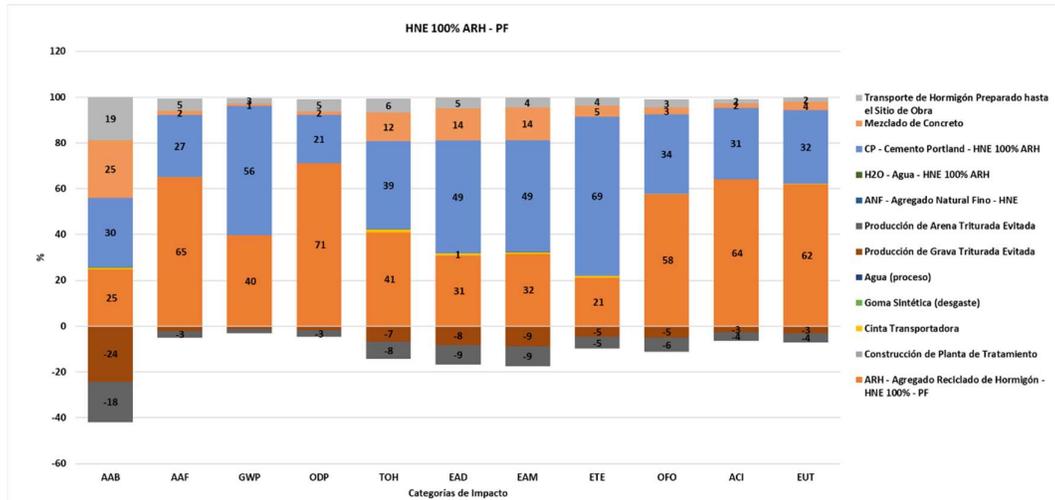


Figura 22. Resultados de la caracterización del escenario HNE 100% ARH – PF. Fuente: Elaboración Propia

El segundo lugar lo ocupa, *CP – Cemento Portland – HNE*, el cual presenta su mayor valor en *Ecotoxicidad Terrestre*, con un 69%, seguido por *Calentamiento Global*, con 36%, *Ecotoxicidad en Agua Dulce* y en *Aguas Marinas*, ambas con un 49% y, *Toxicidad Humana*, 39%. Las demás categorías presentan valores entre 34 y 21%. Le sigue en importancia el *Mezclado de Concreto*, que presenta porcentajes mayores al 10% en 4 categorías (*Agotamiento Abiótico*, *Toxicidad Humana* y *Ecotoxicidad en Agua Dulce* y en *Aguas Marinas*).

Se verifican impactos positivos provenientes de 2 procesos: *Producción de Grava Triturada evitada* y *Producción de Arena Triturada evitada*, siendo en este caso, al igual que en el *HNE 100% ARH - PM* de mucho mayor importancia que en los restantes escenarios, dada la completa sustitución de los *Agregados Naturales* finos y gruesos por los *Agregados Reciclados* de hormigón, que evita en mayor proporción, el consumo de materiales naturales, de combustibles fósiles y las emisiones asociadas.

En comparación con el *HE 100% ARH – PM*, se destaca el aumento de los valores de impacto para los *ARH – Agregado Reciclado de Hormigón - PF* debido al método de producción, concordando con lo establecido en el 4.2.1.5.1 de que la producción mediante el uso de Plantas Fijas es más impactante que la realizada con Plantas Móviles.

4.2.1.5 Interpretación de la Evaluación de Ciclo de Vida

4.2.1.5.1 Agregados Naturales (Grava Triturada), Agregados Reciclados – Planta Fija y Agregados Reciclados – Planta Móvil

La Tabla 24, establece los valores obtenidos para las categorías de impacto del estudio, respecto a la producción de los *Agregados Naturales* gruesos (Grava Triturada), los *Agregados Reciclados – Planta Fija* y los *Agregados Reciclados - Planta Móvil*. Mientras, la Figura 23 muestra de manera gráfica la comparación de los resultados de los impactos de los procesos de producción de *Agregados Naturales* (Grava Triturada) y *Agregados Reciclados* (Planta Fija y Planta Móvil) en las categorías evaluadas. Se

comparan los valores obtenidos con el valor máximo registrado para cada proceso y cada categoría de impacto.

Categorías de Impacto	Unidad	Producción de grava Triturada (1 kg)	Producción de Agregados Recicladados - Planta Fija (1 kg)	Producción de Agregados Recicladados - Planta Móvil (1 kg)
		Total	Total	Total
Agotamiento Abiótico	AAB kg Sb eq	9.04E-08	-6.74E-08	-6.65E-08
Agotamiento Abiótico (Combustibles fósiles)	AAF MJ	7.35E-02	9.70E-01	5.00E-01
Calentamiento Global (GWP100a)	GWP kg CO2 eq	6.54E-03	8.48E-02	4.56E-02
Reducción de la Capa de Ozono	ODP kg CFC-11 eq	7.51E-10	1.23E-08	6.36E-09
Toxicidad Humana	TOH kg 1,4-DB eq	4.21E-03	6.50E-03	2.71E-03
Ecotoxicidad en Agua Dulce	EAD kg 1,4-DB eq	2.86E-03	2.05E-03	-1.34E-04
Ecotoxicidad en Aguas Marinas	EAM kg 1,4-DB eq	9.16E+00	6.11E+00	-2.26E+00
Ecotoxicidad Terrestre	ETE kg 1,4-DB eq	2.52E-05	2.21E-05	6.03E-06
Oxidación Fotoquímica	OFO kg C2H4 eq	2.94E-06	1.31E-05	5.96E-06
Acidificación	ACI kg SO2 eq	4.92E-05	5.11E-04	2.22E-04
Eutrofización	EUT kg PO4--- eq	1.34E-05	1.17E-04	5.05E-05

Tabla 24. Resultado de la caracterización y comparación de los diferentes agregados gruesos del estudio. Fuente: Elaboración Propia

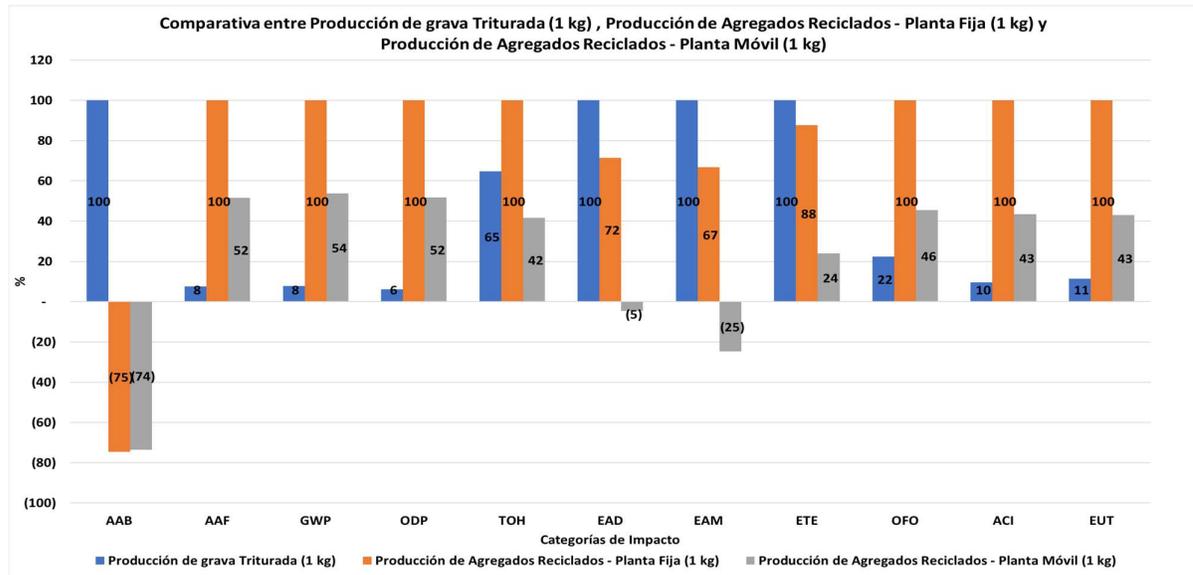


Figura 23. Resultados de la comparación de los diferentes tipos de agregados del estudio. Fuente: Elaboración Propia

El *Agregado Natural* grueso es el más impactante respecto a las categorías *Agotamiento Abiótico*, *Ecotoxicidad en Agua Dulce*, *Ecotoxicidad en Aguas Marinas* y *Ecotoxicidad Terrestre*. Esto básicamente por la explotación de recursos naturales producida por la extracción de materiales en la cantera y por los materiales necesarios para la construcción de la infraestructura, por las emisiones de partículas producto del procesado del material y por las emisiones de compuestos químicos asociadas, tanto al consumo energético como de diésel requerido por la actividad.

Para el caso del *Agregado Reciclado – Planta Fija*, es el más impactante en las categorías de *Agotamiento Abiótico (combustibles fósiles)*, *Calentamiento Global*, *Reducción de la Capa de Ozono*, *Toxicidad Humana*, *Oxidación Fotoquímica*, *Acidificación* y *Eutrofización*. Los altos valores en estas categorías los debe principalmente al consumo de electricidad y a la combustión de diésel empleado para las operaciones de demolición, clasificación y reciclaje de los RCD, así como al transporte de los residuos hasta la planta de reciclaje, realizado para una distancia de 18km. La electricidad y el diésel producen como principales emisiones CO₂, Cloro, SO₂, NO_x, y material particulado. Por otra parte, los frenos y los neumáticos del camión asumido para el transporte y, la construcción y el uso de la carretera, que también está considerada como “input” del camión elegido, producen emisiones de compuestos y partículas que posicionan a estos

agregados por encima de los naturales en cuanto a las categorías anteriormente listadas, ya que para en el caso del Agregado Natural, no existe transporte externo de los materiales de construcción a procesar. El *Agregado Reciclado - Planta Fija* presenta un impacto positivo en la categoría de *Agotamiento Abiótico*, por motivo de la producción de agregados triturados evitada, y su consumo de recursos naturales asociado, ya que 1 kg de grava triturada producida puede sustituir 1 kg de grava natural.

El *Agregado Reciclado – Planta Móvil* resulta el menos agresivo ambientalmente de todos, pues no lidera los impactos para ninguna de las categorías. Además, presenta impactos positivos dentro de las categorías *Agotamiento Abiótico*, *Ecotoxicidad en Aguas Marinas* y *Ecotoxicidad en Agua Dulce*, partiendo del uso de *Agregado Natural* evitado y de la no utilización de otras fuentes de energía diferente del diésel (energía eléctrica...), ni de agua de proceso, que impactan negativamente las dos últimas categorías mencionadas.

4.2.1.5.2 Escenarios de Hormigón Estructural y de Hormigón No Estructural

La Tabla 25, establece los valores obtenidos para las categorías de impacto del estudio, respecto a todos los escenarios planteados en la sección 4.1.1, subsección *Escenarios*, clasificados según correspondan a escenarios de Hormigón Estructural o escenarios de Hormigón No Estructural.

Categoría de Impacto	Unidad	Hormigón Estructural					Hormigón No Estructural		
		HE 100% AN	HE 20% ARH - PF	HE 20% ARH - PM	HE 30% ARH - PF	HE 30% ARH - PM	HNE 100% AN	HNE 100% ARH - PF	HNE 100% ARH - PM
Agotamiento Abiótico	AAB kg Sb eq	5.24E-04	4.12E-04	4.09E-04	3.94E-04	3.88E-04	4.78E-04	1.96E-04	1.93E-04
Agotamiento Abiótico (Combustibles fósiles)	AAF MJ	2.40E+03	2.19E+03	1.95E+03	2.30E+03	1.90E+03	2.16E+03	3.20E+03	2.25E+03
Calentamiento Global (GWP100a)	GWP kg CO2 eq	4.14E+02	4.17E+02	3.99E+02	4.27E+02	3.96E+02	3.51E+02	4.41E+02	3.64E+02
Reducción de la Capa de Ozono	ODP kg CFC-11 eq	2.49E-05	2.26E-05	1.96E-05	2.40E-05	1.89E-05	2.27E-05	3.69E-05	2.49E-05
Toxicidad Humana	TOH kg 1,4-D8 eq	6.01E+01	5.32E+01	5.10E+01	5.35E+01	4.99E+01	5.38E+01	4.97E+01	4.17E+01
Ecotoxicidad en Agua Dulce	EAD kg 1,4-D8 eq	3.53E+01	3.28E+01	3.18E+01	3.28E+01	3.11E+01	3.10E+01	2.85E+01	2.24E+01
Ecotoxicidad en Aguas Marinas	EAM kg 1,4-D8 eq	1.06E+05	9.82E+04	9.49E+04	9.79E+04	9.25E+04	9.26E+04	7.85E+04	6.34E+04
Ecotoxicidad Terrestre	ETE kg 1,4-D8 eq	5.81E-01	5.49E-01	5.40E-01	5.49E-01	5.33E-01	4.96E-01	4.30E-01	3.97E-01
Oxidación Fotoquímica	OFO kg C2H4 eq	4.18E-02	4.07E-02	3.72E-02	4.20E-02	3.61E-02	3.68E-02	4.93E-02	3.49E-02
Acidificación	ACI kg SO2 eq	9.90E-01	1.10E+00	9.64E-01	1.16E+00	9.28E-01	8.58E-01	1.59E+00	1.02E+00
Eutrofización	EUT kg PO4--- eq	2.50E-01	2.76E-01	2.25E-01	2.88E-01	2.35E-01	2.17E-01	3.80E-01	2.50E-01

Tabla 25. Resultado de la caracterización de los diferentes escenarios del estudio. Fuente: Elaboración Propia

- Escenarios de Hormigón Estructural

En la Tabla 25 y Figura 24, se observan los resultados de la caracterización de los escenarios de Hormigón Estructural del estudio.

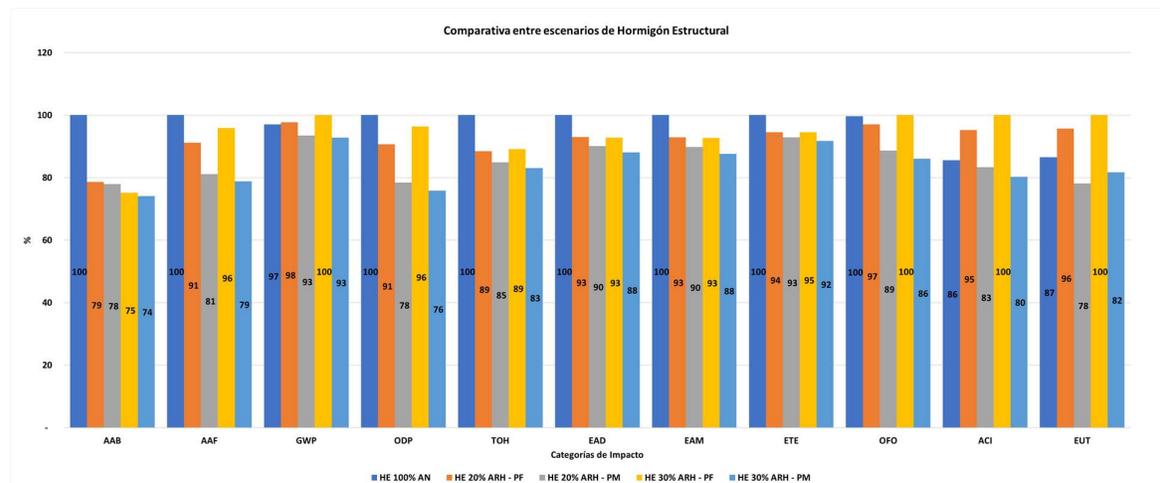


Figura 24. Resultados de la comparación de los escenarios de Hormigón Estructural. Fuente: Elaboración Propia

Los mismos permiten establecer que:

- El HE 100% AN, es el más impactante en mayor número de categorías de impacto (8). Lidera las categorías *Agotamiento Abiótico*, *Toxicidad Humana*, *Ecotoxicidad de Agua Dulce*, *Ecotoxicidad*

en Aguas Marina, Ecotoxicidad Terrestre, debido principalmente a su contenido total de *Agregados Naturales* gruesos, cuyos impactos asociados han sido descritos anteriormente. Lidera también las categorías de *Agotamiento Abiótico (combustibles fósiles)*, *Reducción de la Capa de Ozono* y *Oxidación Fotoquímica* debido a los procesos de fin de vida (demolición de las estructuras, carguío y transporte de los RCD) que se aplican al 100% de la unidad funcional definida, o sea, los procesos se realizan para 2,400 kg de material.

- Luego cabe destacar que el proceso de fabricación de hormigón estructural con *Agregado Reciclado - Planta Fija* (sea con 20% o 30% de sustitución) siempre supera el proceso realizado con *Agregado Reciclado - Planta Móvil* asociado a la misma cantidad de sustitución y presenta siempre los mayores valores respecto a los restantes escenarios en 3 categorías de impactos: *Calentamiento Global*, *Acidificación* y *Eutrofización* (Figura 24). Según lo comentado en la sección anterior, se reafirma lo establecido sobre los mayores impactos de la producción de *Agregados Reciclados - Planta Fija*, en particular en esas mismas categorías de impacto debido al consumo de energía de diferentes fuentes (energía eléctrica, diésel, ...).
- Respecto a los escenarios menos impactantes, tenemos para todas las categorías de impacto los procesos de fabricación de hormigón con *Agregado Reciclado - Planta Móvil*, presentando la mayor sustitución (30%) los menores valores en 10, de las 11 categorías estudiadas. Esto se debe a que ambos poseen los agregados reciclados que provienen del tipo de procesamiento menos agresivo con el medio ambiente.
- Es interesante destacar que, a final de cuentas, el tipo de proceso de generación de agregados gruesos (natural, reciclado con Planta Fija o Planta Móvil) es el que genera la tendencia de impactos que tendrá el Hormigón Estructural mezclado. Los escenarios menos impactantes son los que provienen del proceso de fabricación de agregados gruesos menos impactante, a saber, el reciclado con Planta Móvil.

• **Escenarios de Hormigón No Estructural**

En la Tabla 25 y Figura 25, se observan los resultados de la caracterización de los escenarios de Hormigón No Estructural del estudio.

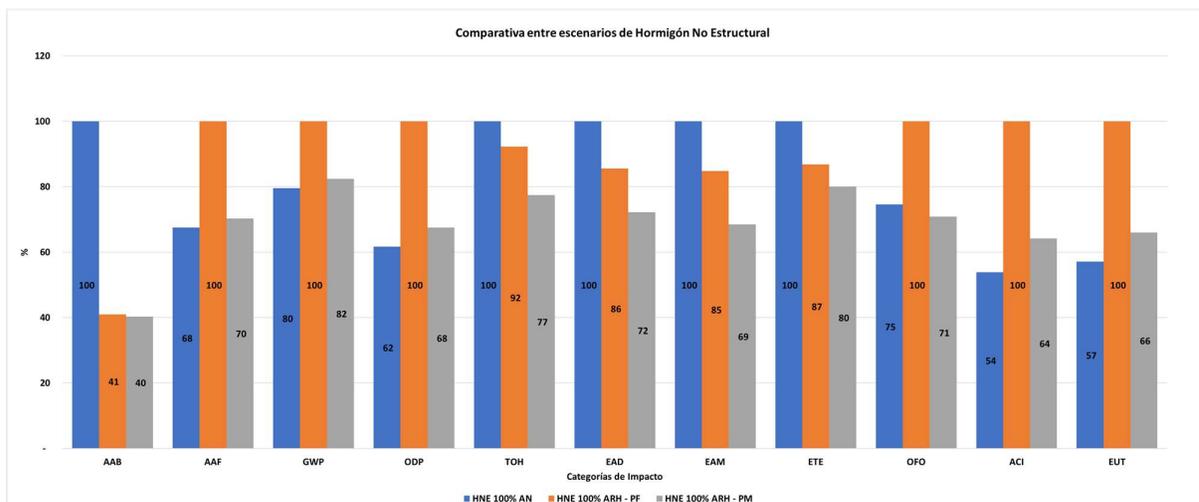


Figura 25. Resultados de la comparación de los escenarios de Hormigón No Estructural. Fuente: Elaboración Propia

Los mismos permiten establecer que:

- El HNE 100% ARH - PF, es el más impactante en mayor número de categorías de impacto (6). Lidera las categorías *Agotamiento Abiótico (combustibles fósiles)*, *Calentamiento Global*, *Reducción de la Capa de Ozono*, *Oxidación Fotoquímica*, *Acidificación* y *Eutrofización*, debido principalmente a su contenido de *Agregado Reciclada - Planta Fija*, categorizada en las secciones anteriores como la más impactante entre los procesos de obtención de material reciclado. Todos estos impactos vienen asociados al consumo de diésel y de energía, producida a partir de fuentes de origen fósil.
- El HNE 100% AN, es el más impactante en 5 categorías de impacto. Lidera las categorías *Agotamiento Abiótico*, *Toxicidad Humana*, *Ecotoxicidad en Agua Dulce*, *Ecotoxicidad en Aguas Marinas* y *Ecotoxicidad Terrestre*, debido a su contenido de agregados naturales (100%) que está directamente asociado a la explotación de la cantera, construcción de la infraestructura y el consumo de electricidad y diésel para las operaciones y procesamiento de los materiales.
- El HNE 100 ARH – PM, resulta el menos impactante en todas las categorías de impacto estudiadas. Esto a cuenta de la total sustitución de los agregados naturales por agregados reciclados provenientes del proceso de producción menos impactante, el de Planta Móvil.

4.2.1.6 Análisis de Incertidumbre

El Análisis de Incertidumbre, llamada también Evaluación de Incertidumbre (EI), se define como un procedimiento sistemático para cuantificar la incertidumbre introducida en los resultados de un Análisis de Inventario de Ciclo de Vida debido a los efectos acumulativos de la imprecisión del modelo, incertidumbre de las entradas y variabilidad de los datos. Esta incertidumbre puede ser determinada mediante rangos o distribución de probabilidad (International Organization for Standardization, 2006b).

Constituye una técnica adicional utilizada para establecer la fiabilidad de los resultados, y uno de los pasos establecidos por la ISO como indispensable a efectuar tras la realización de un Análisis de Ciclo de Vida, si se ha de realizar una comparación a ser presentadas al público.

4.2.1.6.1 Objetivo y Definición del Alcance

❖ Objetivo

El objetivo del presente análisis es de establecer el rango de incertidumbre de los resultados obtenidos en la realización de los Análisis de Ciclo de Vida de las diferentes mezclas de nuestro estudio, y establecer la fiabilidad de los resultados obtenidos en el 4.2.1.4. Esto será realizado por medio del uso de la herramienta del SIMAPRO, mediante la aplicación de la opción del Método de Monte Carlo, según explicaremos más adelante.

❖ Alcance

El alcance del estudio contempla la evaluación de los escenarios planteados en el 4.1.1. La evaluación de incertidumbre se hace únicamente sobre los resultados de cálculo de la Evaluación Medio Ambiental. Se considera que los valores de costo usados en la Evaluación Económica son del mercado local y del año 2020 y por tanto no sujetos a mayores variaciones.

4.2.1.6.2 Evaluación de Incertidumbre. Método de Monte Carlo.

Para aplicar el método de Monte Carlo en SIMAPRO se han de seguir los siguientes pasos:

Paso 1. Elegir el tipo de distribución estándar aplicable a nuestra data. En nuestro caso de estudio, hemos adoptado la distribución Lognormal, pues al ser la más frecuente, es considerada como la más importante en un Estudio de Ciclo de Vida y la distribución por “default” (PRé, 2016).

Los procesos obtenidos de la base de datos de Ecoinvent V3 para los *Unit Process* (utilizados en nuestro estudio), tienen incluido la mayor parte de las ocasiones, especificaciones sobre la incertidumbre (distribución y valor). Para el caso de los datos obtenido de otras fuentes, se hace necesario la especificación, de manera manual, de estos parámetros. Para ello, nos hemos servido de la Matriz de Pedigree (Tabla 26), sugerida por la base de datos para estimar la desviación estándar de datos que no provienen de grandes muestras de mediciones.

Puntuación:	1	2	3	5	5
1 Fiabilidad	Datos verificados en base a mediciones	Datos verificados parcialmente en base a asunciones o datos no verificados basada en mediciones	Datos no verificados parcialmente basados en estimaciones calificadas	Estimación calificada (por ejemplo, por industrial experto); datos derivado de información teórica (estequiometría, entalpía, etc.)	Estimación no calificada
	1.00	1.05	1.10	1.20	1.50
2 Amplitud	Datos representativos de todos los sitios relevante para el mercado considerado sobre un adecuado período para igualar fluctuaciones normales	Datos representativos de > 50% de los sitios relevantes para el mercado considerado sobre un período adecuado para igualar lo normal fluctuaciones	Datos representativos de solo algunos sitios (<< 50%) relevantes para el mercado considerado o > 50% de los sitios pero durante períodos más cortos	Datos representativos de solo uno sitio relevante para el mercado considerado o algunos sitios pero durante períodos más cortos	Datos representativos de solo un sitio relevante para el mercado considerado o algunos sitios pero durante períodos más cortos
	1.00	1.02	1.05	1.10	1.20
3 Correlación Temporal	Menos de 3 años de diferencia a nuestro año de referencia	Menos de 6 años de diferencia a nuestro año de referencia	Menos de 10 años de diferencia a nuestro año de referencia	Menos de 15 años de diferencia a nuestro año de referencia	Edad de la datos desconocida o más de 15 años de diferencia a nuestro año de referencia
	1.00	1.03	1.10	1.20	1.50
4 Correlación Geográfica	Datos del área en estudio	Datos promedio de un área mayor que contiene el área de estudio	Datos de un área menor que el área en estudio, o de tamaño similar	Datos de un área con condiciones de producción ligeramente similares	Datos de zonas desconocidas o claramente diferentes (Norteamérica en lugar de Medio Este, OCDE-Europa en lugar de Rusia)
	1.00	1.001	1.02	1.05	1.10
5 Otras Correlaciones Tecnológicas	Datos de empresas, proceso y materiales bajo estudio (tecnología idéntica)	Datos de procesos y materiales en estudio (tecnología idéntica) pero de empresas diferentes	Datos de procesos relacionados o materiales, con igual tecnología o datos de procesos y materiales en estudio, pero con tecnología diferente	Datos de procesos o materiales relacionados, pero con diferente tecnología, o datos basados en procesos a escala de laboratorio y la misma tecnología	Datos en procesos o materiales relacionados, pero en escala de laboratorio con diferente tecnología
	1.00	1.05	1.20	1.50	2.00

Tabla 26. Matriz Pedigree. Fuente: PRé, 2016

Paso 2. Elegir el intervalo de confianza. De manera predeterminada, se encuentra preestablecido en 95%, valor mantenido en nuestro estudio.

Paso 3. El método de estudio de impacto a utilizar: CML-IA Baseline, versión 3.05 / EU25, mismo método utilizado para los Análisis de Ciclo de Vida de nuestro trabajo.

Paso 4. El número fijo de corridas del programa: De manera predeterminada, se encuentra preestablecido en 1000, valor mantenido en nuestro estudio.

Paso 5. El criterio de parada de los cálculos. De manera predeterminada, se encuentra preestablecido en 0.005, valor mantenido en nuestro estudio. Sin embargo, notamos que el criterio dominante en nuestro caso es el *Números Fijo de Corridas del Programa*, por lo que no es aplicable (a menos que cambiemos manualmente el criterio elegido).

4.2.1.6.3 Resultados y discusión

Tras verificar el cumplimiento de los pasos anteriores, y tomando en cuenta la consideración establecida por (PRé, 2016) que indica “*En general, podemos suponer que si del 90 al 95% de las corridas de Monte Carlo son favorables para un producto, la diferencia puede considerarse significativa*”, se realizó la Evaluación de la Incertidumbre de los resultados obtenidos a partir de la Evaluación Ambiental. Los resultados de la EI son presentados a continuación:

❖ Agregados Naturales y Reciclados

Se ha realizado la comparación entre la *Producción Agregados Reciclados – Planta Fija* y la *Producción Agregados Reciclados - Planta Móvil*, obteniendo como resultado la Figura 26. En esta figura, las barras azules representan las veces en que la *Producción Agregados Reciclados – Planta Fija* presentó, por categoría de impacto, menores valores que la *Producción Agregados Reciclados - Planta Móvil*, representada por las barras naranjas. Finalmente, esto permite concluir que, las diferencias entre los agregados producidos en Planta Móvil respecto a los de Planta Fija son significativas y que estas presentan como más favorables a los de Planta Móvil en prácticamente todas las categorías de impacto, soportando los resultados obtenidos en la Figura 23, con porcentaje de ocurrencia de 100%. Para el caso de *Agotamiento Abiótico (Abiotic Depletion)*, las diferencias son insignificantes, puesto que los resultados no alcanzan el 90%.

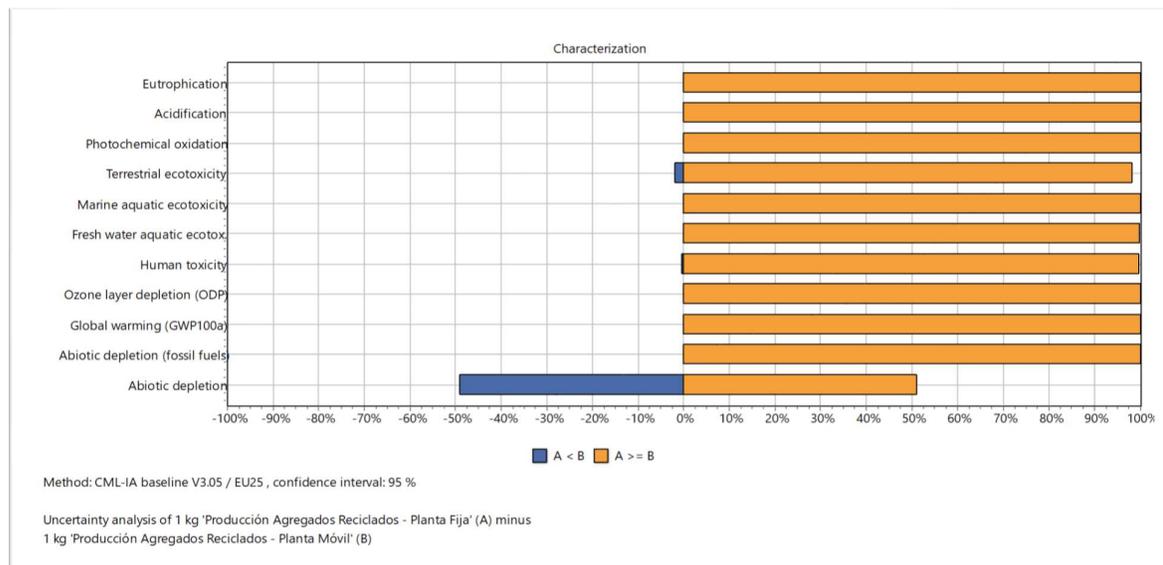


Figura 26. Resultado de Monte Carlo de la comparación entre la Producción de Agregado Reciclado en Planta Móvil y en Planta Fija.
Fuente: Elaboración propia a partir del SIMAPRO

Luego, la *Producción Agregados Reciclados – Planta Fija* ha sido comparada con la *Producción de Grava Triturada*, pudiéndose afirmar, según la Figura 27, que las diferencias entre uno y el otro son significativas para las categorías de *Eutrofización*, *Acidificación*, *Oxidación Fotoquímica*, *Reducción de la Capa de Ozono*, *Calentamiento Global* y *Agotamiento Abiótico (combustibles fósiles)*, en la que presenta como más

favorable a la *Producción de Grava Triturada* en un 90% de las simulaciones. Mientras, el segundo es más favorable para *Agotamiento Abiótico*, también, para un 90% de las simulaciones. Lo anterior concuerda con los resultados obtenidos en la Evaluación Ambiental, mostrados en la Figura 23. Para las categorías de impacto *Ecotoxicidad Terrestre*, *Ecotoxicidad en Aguas Marinas*, *Ecotoxicidad en Agua Dulce*, la Evaluación de Incertidumbre indica que las diferencias entre escenarios no son significativas.

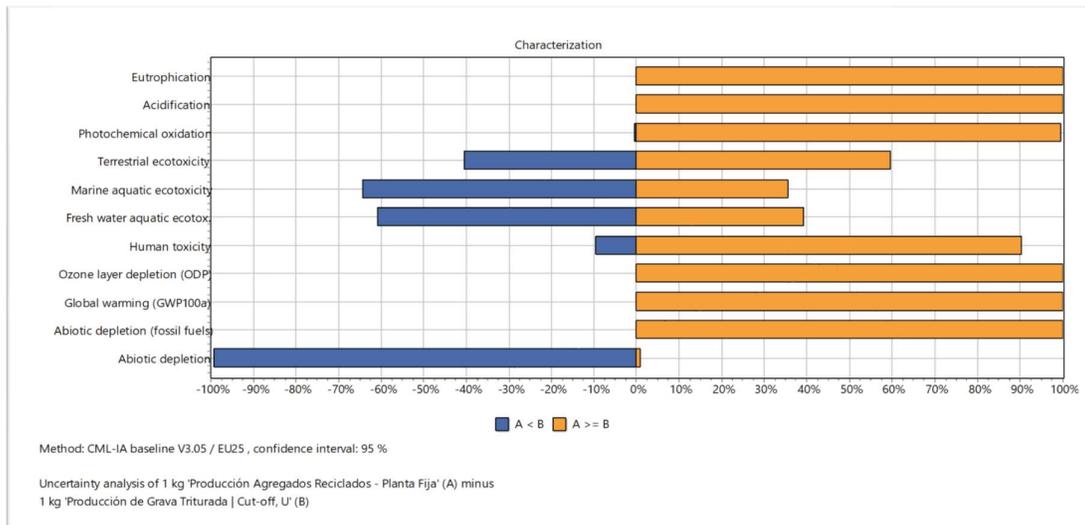


Figura 27. Resultado de Monte Carlo de la comparación entre la Producción de Agregado Reciclado en Planta Fija y Agregado Natural.
Fuente: Elaboración Propia a partir del SIMAPRO

Finalmente, la *Producción Agregados Reciclados – Planta Móvil* ha sido comparada con la *Producción de Grava Triturada*, pudiéndose establecer, según la Figura 29 , que las diferencias entre ambos son significantes y que que el *Agregado Reciclado - Planta Móvil* es menos favorable en las categorías de *Eutrofización*, *Acidificación*, *Oxidación Fotoquímica*, *Reducción de la Capa de Ozono*, *Calentamiento Global* y *Agotamiento Abiótico (combustibles fósiles)* en más de un 90% de las simulaciones. Para las restantes categorías de impacto, el menos favorable resulta el *Agregado Natural*, por igual con mas de 90% de las simulaciones a favor, con excepción de *Toxicidad Humana*, que solo presenta 75% de las simulaciones a favor.

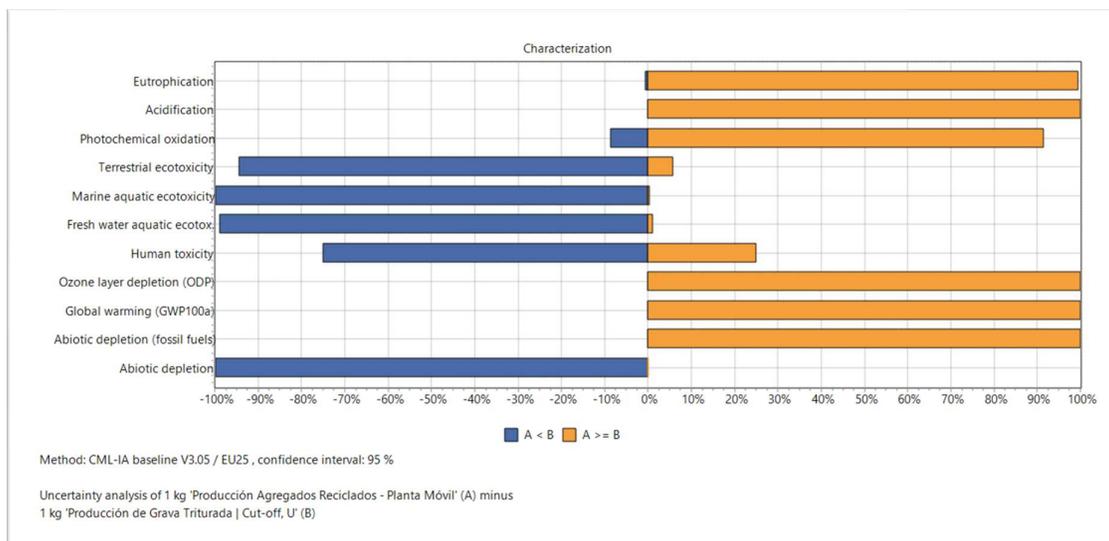


Figura 28. Resultado de Monte Carlo de la comparación entre la Producción de Agregado Natural y Agregado Reciclado en Planta Móvil.
Fuente: Elaboración Propia a partir del SIMAPRO

❖ Escenarios de Hormigones Estructurales y No Estructurales

Por otra parte, a efecto de nuestro estudio, se ha usado la Figura 24 como base para determinar los escenarios más pertinentes a los cuales aplicar la *Evaluación de Incertidumbre*. La figura muestra valores sensiblemente idénticos entre los escenarios siguientes:

- *HE 100% AN* y *HE 20% ARH – PF*
- *HE 20% ARH – PF* y *HE 20% ARH – PM*
- *HE 100% AN* y *HE 20% ARH – PM*
- *HNE 100% ARH – PF* y *HNE 100% ARH – PM*

En todos los casos, como puede apreciar en las figuras a continuación, se nota que, en base a la Evaluación Ambiental realizada en las secciones anteriores, el primer escenario de cada una de las comparaciones se observa como más impactante en la mayoría de las categorías del estudio. Por tanto, procederemos a evaluar la incertidumbre de los resultados de la Evaluación Ambiental para permitirnos establecer el grado de certidumbre de estas conclusiones.

○ Evaluación de Incertidumbre *HE 100% AN* vs *HE 20% ARH – PF*

Como dicho en el párrafo anterior, según los resultados obtenidos a partir de la Evaluación Ambiental de los escenarios de Hormigón Estructural, entre las alternativas *HE 100% AN* y *HE 20% ARH – PF*, la primera resulta ambientalmente más impactante para casi todas las categorías, a excepción de *Acidificación* y *Eutrofización* (Figura 29).

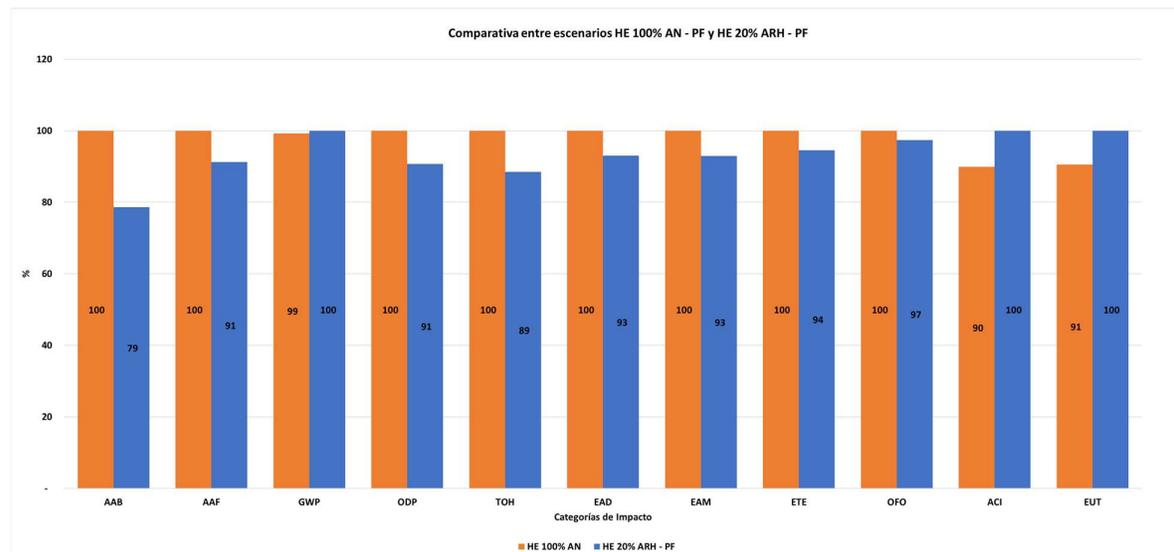


Figura 29. Resultados de la comparación de escenarios de *HE 100% AN* y *HE 20% ARH - PF* (Extracto Figura 22).
Fuente: Elaboración Propia

Según los resultados presentados en la Evaluación de Incertidumbre realizada por el Método de Monte Carlo, incluido en el programa SIMAPRO, esto se verifica solo en algunas ocasiones. Tal y como se puede apreciar en la Figura 30, el escenario *HE 20% ARH – CFS - PR* resulta favorecido como menos impactante, en promedio, en un 70% de las simulaciones, lo que indica que entre los escenarios las diferencias no son significativas y en 30% de las ocasiones los resultados de las simulaciones realizadas pueden cambiar y favorecer indicando como menos impactante al escenario *HE 100% AN*.

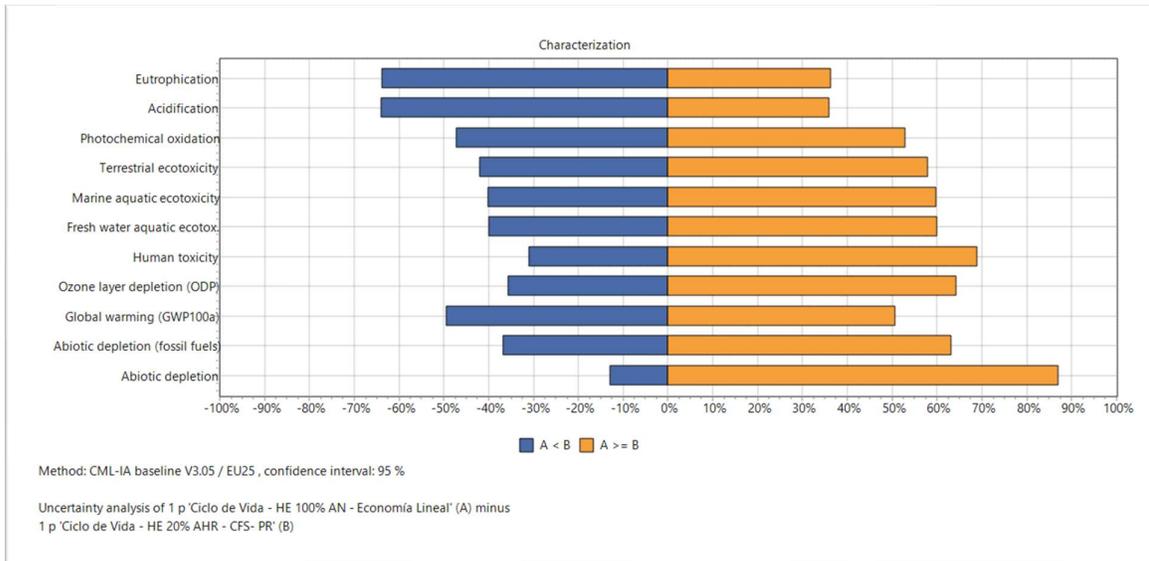


Figura 30. Resultado de Monte Carlo de la comparación entre escenarios HE 100% AN y HE 20% ARH - PF. Fuente: Elaboración propia a partir del SIMAPRO

○ Evaluación de Incertidumbre HE 20% ARH – PF y HE 20% ARH – PM

Para el presente caso, según los resultados obtenidos a partir de la Evaluación Ambiental de los escenarios de Hormigón Estructural, entre las alternativas HE 20% ARH – PF y HE 20% ARH – PM, la primera resulta ambientalmente más impactante para todos los casos (Figura 31).

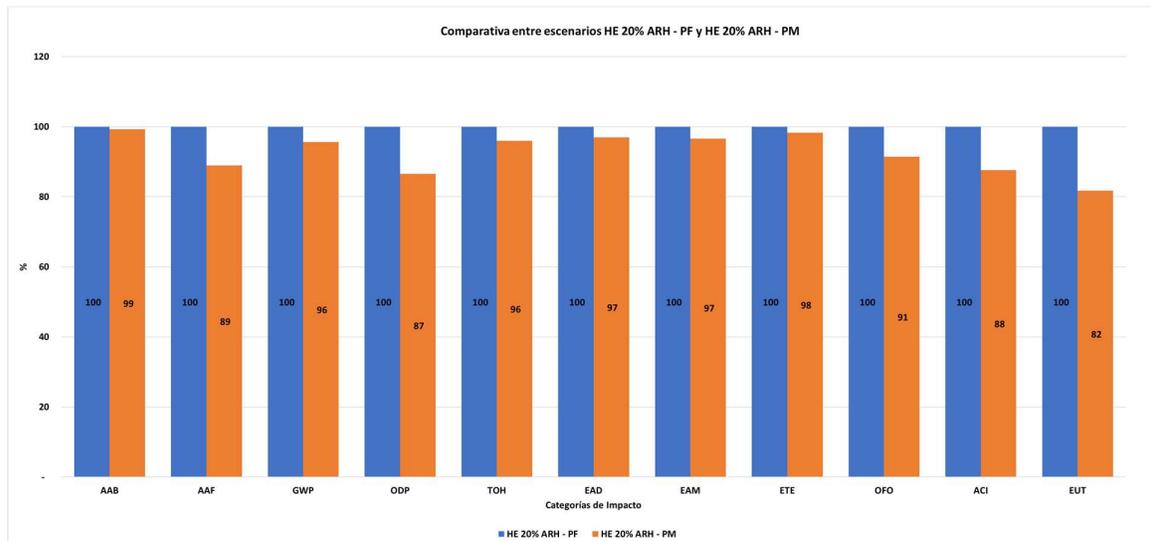


Figura 31. Resultados de la comparación de escenarios HE 20% ARH - PF y HE 20% ARH - PM (Extracto Figura 22). Fuente: Elaboración Propia

Según los resultados presentados en la Evaluación de Incertidumbre realizada por el Método de Monte Carlo, incluido en el programa SIMAPRO, la diferencia entre los escenarios es mínima para todas las categorías de impacto. Tal y como se puede apreciar en la Figura 32, los resultados obtenidos por la evaluaciones realizadas por el SIMAPRO, establecen que en aproximadamente 40% de las simulaciones HE 20% ARH – PM (HE 20% ARH – CES – RES) se constata como siendo más impactante frente a la HE 20% ARH – PF (HE 20% ARH – CFS – PR), para todas las categorías del estudio, quedando entonces el escenario de Planta Fija (PF) como más impactante en un 60% de las simulaciones.

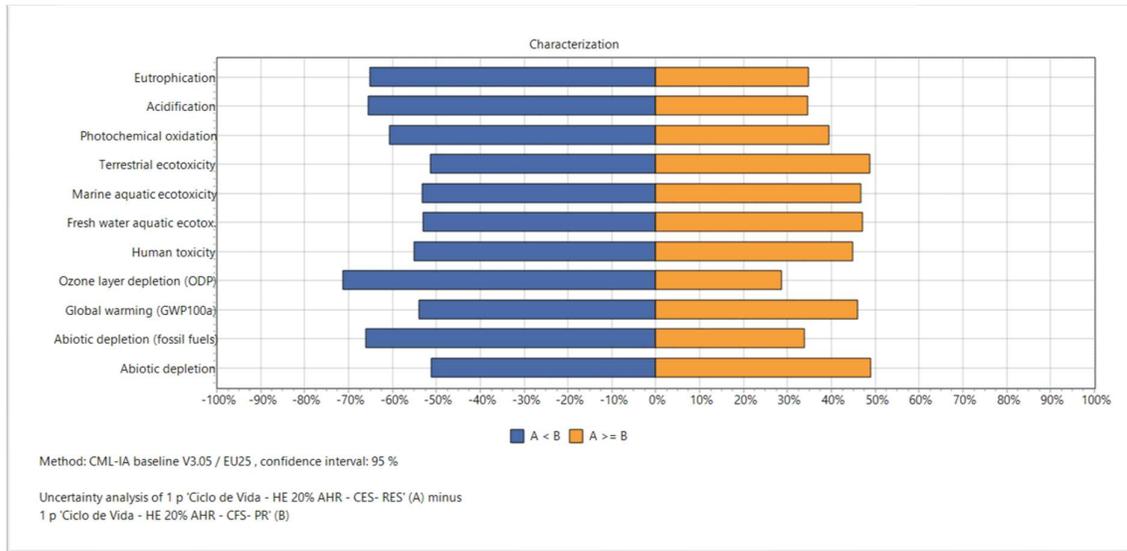


Figura 32. Resultado de Monte Carlo de la comparación entre los escenarios HE 20% ARH - PF y HE 20% ARH - PM. Fuente: Elaboración propia a partir del SIMAPRO

○ Evaluación de Incertidumbre HE 100% AN y HE 20% ARH – PM

Para el presente caso, según los resultados obtenidos a partir de la Evaluación Ambiental de los escenarios de Hormigón Estructural, entre las alternativas HE 100% AN y HE 20% ARH – PF, la primera resulta ambientalmente más impactante para todos los casos (Figura 33).

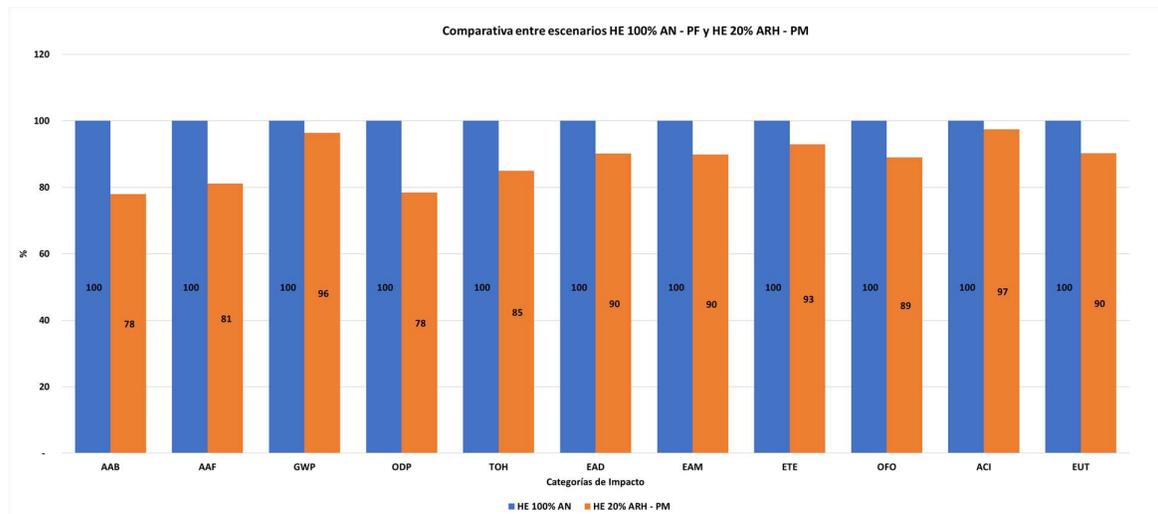


Figura 33. Resultados de la comparación de los escenarios de HE 100% AN y HE 20% ARH - PM (Extracto Figura 22). Fuente: Elaboración Propia

Según los resultados obtenidos en la Evaluación de Incertidumbre realizada mediante el Método de Monte Carlo, incluido en el programa SIMAPRO, los resultados de las simulaciones soportan estos resultados solo en un 70% de las ocasiones, en promedio. Lo anterior permite concluir que las diferencias entre escenarios son mínimas y que las simulaciones pueden colocar, en aproximadamente 30% de las simulaciones, al HE 100% AN como menos impactante que el HE 20% ARH – PF en todas la categorías de impacto.

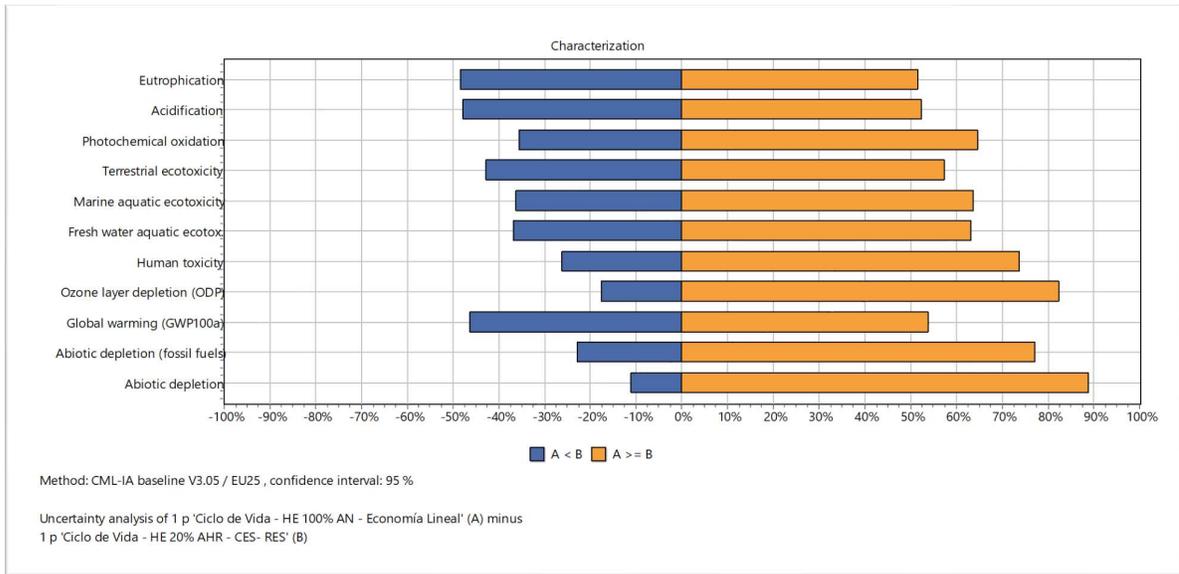


Figura 34. Resultado de Monte Carlo de la comparación entre los escenarios HE 100% AN y HE 20% ARH - CES - RES.
Fuente: Elaboración propia a partir del SIMAPRO

○ **Evaluación de Incertidumbre HNE 100% ARH y HNE 100% ARH – PM**

La Figura 35 presenta los resultados de la Evaluación Ambiental donde se observa que, en los escenarios de Hormigones No Estructurales con sustitución, los fabricados con agregados provenientes de una Planta Móvil presentan siempre menores impactos que los producidos con una Planta Fija.

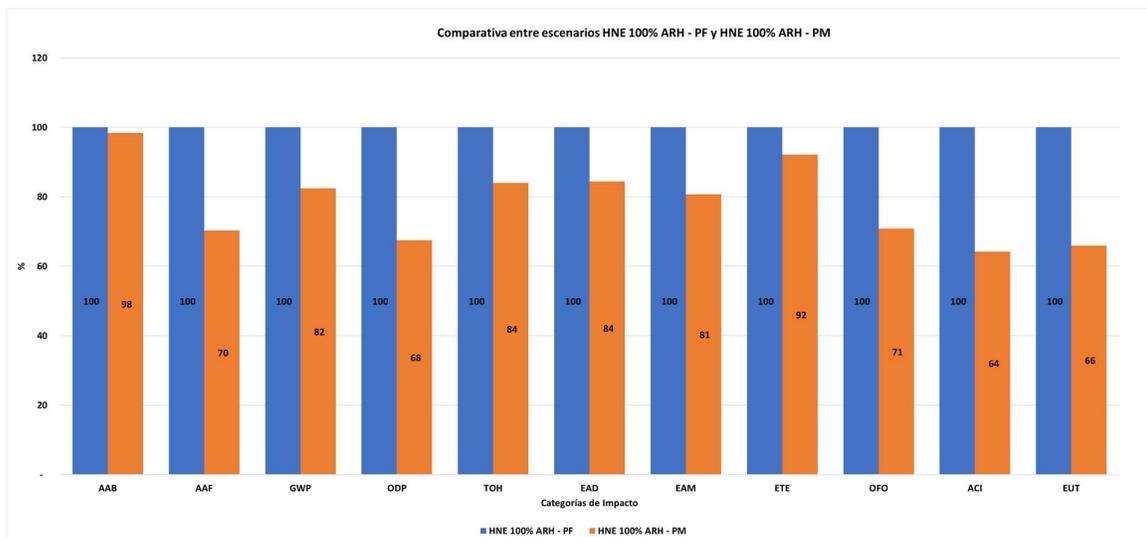


Figura 35. Resultados de la comparación de los escenarios de HNE 100% ARH - PF y HNE 100% ARH – PM (Extracto Figura 22).
Fuente: Elaboración Propia

Los resultados de las simulaciones realizadas por el SIMAPRO y reflejados en la Figura 36, muestran valores de casi el 90% para las categorías de impacto de *Agotamiento Abiótico (combustibles fósiles)*, *Reducción de la Capa de Ozono*, *Eutrofización*, *Acidificación* y *Oxidación Fotoquímica*, favoreciendo al *HE 100% ARH – PM* como menos impactante. Sin embargo, en promedio, en el 10% de las simulaciones resulta favorecido como menos impactante el *HNE 100% ARH – PF*.

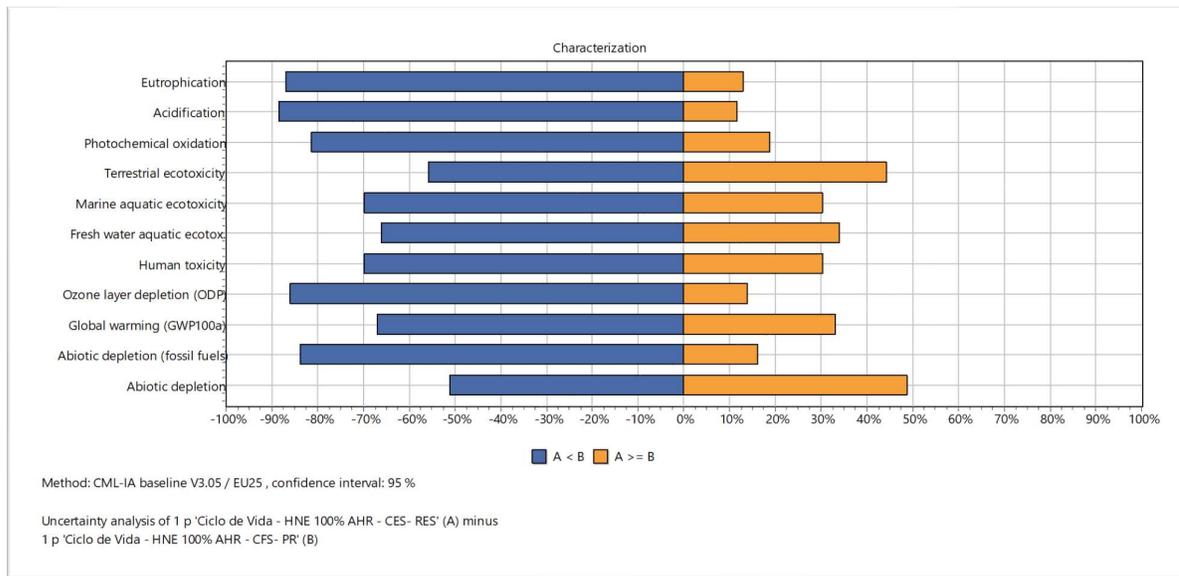


Figura 36. Resultado de Monte Carlo de la comparación entre HE 100% ARH - CES- RES y HE 100% ARH - CFS - PR.
Fuente: Elaboración propia a partir de SIMAPRO

4.2.2 Etapa 2b. Análisis Económico

El criterio económico, desarrollado en la presente sección, establece el costo de 1m³ de hormigón para cada uno de los escenarios indicados en el capítulo 4.1.1 anterior, el cual ha sido estimado en base al establecimiento del Costo Base de Licitación de los componentes del hormigón, de proceso de mezclado y de los procesos particulares aplicables a las Economía Lineal y Circular.

4.2.2.1 Objetivo y Definición del Alcance

❖ Objetivos

El objetivo del siguiente análisis es establecer el costo de 1 m3 de hormigón estructural y no estructural para cada uno de los escenarios planteados en este estudio y así poder determinar el impacto económico que representa el uso de *Agregados Reciclad*os obtenidos a partir del reciclaje de Residuos de Construcción y Demolición (RCD) en Planta Fija o en Planta Móvil (Economía Circular) respecto del uso de *Agregados Naturales* (Economía Lineal).

❖ Definición del Alcance

La evaluación ha sido realizada tomando como referencias los parámetros de ubicación, equipos, distancias entre instalaciones previamente establecidos para la elaboración del ACV en la sección 4.2.1.2, y su alcance comprende:

- los componentes de cada una de las mezclas transportados hasta la Planta de Hormigón,
- las actividades necesarias para la producción de Residuos de Construcción y Demolición en el Sitio de Obra:
 - demolición de estructura de hormigón llegada a su fin de vida,
 - clasificación en obra de residuos,
- las actividades necesarias para el reciclaje de los residuos:
 - transporte de residuos a la Planta de Reciclaje,
 - alquiler y transporte de equipo de machaqueo y cribado al Sitio de Obra,

- gestión y transporte de los residuos producidos en el Sitio de Obra a partir del Reciclaje en Sitio.
- las tasas envueltas en los diferentes procesos:
 - tasa por deposición de controlada de residuos en Planta de Reciclaje,
 - tasa por deposición de controlada de residuos en Vertedero (con el canon),
- las actividades necesarias para la producción del hormigón reciclado:
 - preparado de hormigón en Planta de Hormigón.

El alcance del estudio excluye:

- transporte de equipos requeridos para la demolición al Sitio de Obra (se consideran como previamente movilizados al Sitio de Obra para otras actividades),
- transporte del hormigón preparado al Sitio de Obra, por ser un valor idéntico para todos los escenarios,
- las actividades requeridas para el tratamiento de los residuos de acero, así como los beneficios de su comercialización, ya que el enfoque del presente estudio es exclusivamente el manejo del hormigón,
- la gestión de los desechos de la fabricación del hormigón preparado en la Planta de Hormigón.

4.2.2.2 Metodología y datos

Los datos económicos han sido obtenidos mediante consulta de la base de datos del Banco de Construcción 2020 BEDEC, del Instituto de Tecnología de la Construcción de Cataluña – ITeC, en su última versión a la fecha (versión 2020-1). Los precios para la fabricación del hormigón arrojados por nuestro análisis representan los Coste Base de Licitación, o sea, el Costo de Ejecución (Costo Directo más un porcentaje de Costos Indirectos del 10%) afectado por un 13% de Gastos Generales y un 6% de Beneficio Industrial. Estos porcentajes han sido asumidos en base a los rangos indicados en el BEDEC para cada uno de los costos.

Para el cálculo de los costos envueltos en nuestro estudio estaremos auxiliándonos de tres fórmulas:

- Para el cálculo del Costo de las mezclas, utilizaremos la fórmula (1):

$$C_{ME} = C_{MA} + C_{AR} + C_{FH} \quad (1)$$

donde,

C_{ME} = Costo de las mezclas (€/m³)

C_{MA} = Costo de Materiales (€/m³) = Costo de suministro (C_{SM}) + Costo de Transporte (C_{TM}). A utilizar para los materiales naturales (agregado natural fino, agregado natural grueso, cemento, agua).

C_{AR} = Costo de Agregados Reciclados (€/m³) = Costo de suministro (C_{SM}) + Costo de Transporte (C_{TM}). A utilizar para los materiales naturales (agregado natural fino, agregado natural grueso, cemento, agua).

C_{FH} = Costo de Fabricación de Hormigón (€/m³)

- Para el cálculo del Costo de los *Agregados Reciclados - Planta Móvil*, se tomarán los parámetros establecidos en la fórmula (2):

$$C_{AR} = C_{MD} + C_{AL} \quad (2)$$

donde,

C_{AR} = Costo de Agregado Reciclado (€/m³)

C_{MD} = Costo de Movilización, Desmovilización Equipos de Machaqueo, Cribado y llenado al Sitio de Obra

C_{AL} = Costo de Alquiler de Equipos de Machaqueo, Cribado y Llenado.

- Para el cálculo del Coste de Aplicación de las economías, utilizaremos la fórmula (3):

$$C_{AE} = C_{PR} + C_{TM} + C_{DR} \quad (3)$$

donde,

C_{AE} = Costo de aplicación de economía (€/m³)

C_{PR} = Costo de Producción de Residuo en Sitio de Obra (€/m³) = Costo de Demolición de Estructura (C_{DE}) + Costo de Clasificación de residuos (C_{CR}) (aplicable solo a Planta Móvil).

C_{TM} = Costo de Transporte (€/m³) = Costo de Transporte de residuos desde Sitio de Obra a Planta de Tratamiento (para reciclaje en Planta Fija) o Costo de Transporte de Grava Reciclada en Sitio de Obra a la Planta de Hormigón (para reciclaje en Planta Móvil) o Costo de Carga y Transporte (para reciclaje en Planta Móvil).

C_{DR} = Costo de Deposición de residuos (€/m³) = Costo de Deposición de Residuos en Planta de Reciclaje (C_{DP} ; aplicable a reciclaje en Planta Fija) o Costo de Deposición de Residuos en Vertedero incluyendo canon (C_{DV} ; aplicable a Economía Lineal y Economía Circular con reciclaje en Planta Móvil).

4.2.2.3 Resultados y discusión

❖ Hormigón mezclado en Planta

Para la fabricación de 1 m³ de hormigón, existen partidas comunes independientemente del escenario de nuestro estudio: los suministros de los insumos, incluyendo su transporte (ítem 1 al 6) y, el proceso de mezclado de hormigón en planta (ítem 7). En la Tabla 27, se puede verificar que la diferencia entre el precio de fabricación por alternativa depende, para los escenarios de Economía Lineal ($HE1$ y $HNE1$), únicamente de las proporciones aplicadas a cada una de las partidas. En cambio, en los escenarios de Economía Circular ($HE2$, $HE3$, $HE4$, $HE5$, $HN2$ y $HN3$), además de las proporciones, influye también el proceso utilizado para la obtención del *Agregado Reciclado* grueso; si es procesado en una Planta Fija o Móvil.

En los subapartados siguientes estaremos explicando los procesos de obtención de los precios aplicados a cada uno de los ítems considerados en nuestro estudio.

Descripción	Siglas en Fórmulas	Precio	Unidad	ESCENARIOS															
				HE 100% AN (HE1)		HE 20% ARH - PF (HE2)		HE 20% ARH - PM (HE3)		HE 30% ARH - PF (HE4)		HE 30% ARH - PM (HE5)		HNE 100% AN (HNE1)		HNE 100% ARN - PF (HNE2)		HNE 100% ARN - PM (HNE3)	
				Cantidad	Total	Cantidad	Total	Cantidad	Total	Cantidad	Total	Cantidad	Total	Cantidad	Total	Cantidad	Total	Cantidad	Total
1.00 Agregado Natural Fino	CMA																		
1.1 Suministro de Agregado Natural Fino (incluyendo carguo y transporte hasta 30 km)		0.017	€/ kg	614.00	10.88	614.00	10.88	614.00	10.88	614.00	10.88	614.00	10.88	614.00	10.88	614.00	10.88	614.00	10.88
1.2 Camión para transporte de materiales a Planta de Hormigón 241 (>30 km)		0.043	€/ km	3.68	0.16	3.68	0.16	3.68	0.16	3.68	0.16	3.68	0.16	3.68	0.16	3.68	0.16	3.68	0.16
2.00 Agregado Natural Grueso	CMA																		
2.0 Suministro de Agregado Natural Grueso (incluyendo carguo y transporte hasta 30 km)		0.018	€/ kg	1,193.00	21.92	954.00	17.52	954.00	17.52	835.00	15.34	835.00	15.34	914.00	16.79	-	-	-	-
2.0 Camión para transporte de materiales a Planta de Hormigón 241 (>30 km)		0.043	€/ km	7.16	0.30	5.72	0.24	5.72	0.24	5.01	0.21	5.01	0.21	5.48	0.23	-	-	-	-
3.00 Agregado Reciclado Grueso - Planta Fija	CAR																		
3.1 Suministro de Agregado Reciclado Grueso - Planta Fija (incluyendo carguo y transporte hasta 30 km)		0.011	€/ kg	-	-	239.00	2.63	-	-	358.00	3.94	-	-	-	-	1,764.00	19.40	-	-
4.00 Agregado Reciclado Grueso - Planta Móvil	CAR																		
4.1 Suministro de Agregado Reciclado Grueso - Planta Móvil		0.007	€/ kg	-	-	-	-	239.00	1.65	-	-	358.00	2.47	-	-	-	-	1,764.00	12.18
4.1.1 Movilización, desmovilización y transporte de equipo a Sitio de Obra 75t	CMD	0.000	C / kg	-	-	-	-	239.00	0.01	-	-	358.00	0.01	-	-	-	-	1,764.00	0.04
4.1.2 Pala excavadora para movimiento de material	CAL	0.005	C / kg	-	-	-	-	239.00	1.14	-	-	358.00	1.71	-	-	-	-	1,764.00	8.44
4.1.3 Alquiler de Equipo de Machaqueo y Cribado	CAL	0.002	€/ kg	-	-	-	-	239.00	0.50	-	-	358.00	0.75	-	-	-	-	1,764.00	3.69
4.2 Camión para transporte de materiales a Planta de Hormigón 241 (>30 km)		0.043	€/ km	-	-	-	-	2.39	0.10	-	-	3.58	0.15	-	-	-	-	17.64	0.75
5.00 Cemento	CMA																		
5.1 Suministro de Cemento (incluyendo carguo y transporte hasta 30 km)		0.100	C / kg	398.00	39.69	398.00	39.69	398.00	39.69	398.00	39.69	398.00	39.69	327.00	32.61	289.00	28.82	289.00	28.82
5.2 Camión para transporte de materiales a Planta de Hormigón 241 (>30 km)		0.043	€/ km	3.18	0.14	3.18	0.14	3.18	0.14	3.18	0.14	3.18	0.14	2.62	0.11	2.31	0.10	2.31	0.10
6.00 Agua	CMA																		
6.1 Suministro de Agua		0.002	€/ kg	195.00	0.31	198.20	0.32	198.20	0.32	199.80	0.32	199.80	0.32	209.00	0.33	184.00	0.29	184.00	0.29
7.00 Mezzado de hormigón en Planta 60 m3/h	CFH	11.401	€/ m ³	1.00	11.40	1.00	11.40	1.00	11.40	1.00	11.40	1.00	11.40	1.00	11.40	1.00	11.40	1.00	11.40
Total	CME																		

Tabla 27. Resultados para 1m³ de hormigón preparado en planta según el escenario de estudio. Fuente: Elaboración Propia

○ Agregado Natural Fino (Arena)

El costo para este material (C_{MA}) se obtiene al aplicar el precio del BEDEC de *Arena de cantera de piedra granítica para hormigones*, que equivale a 17.46 €/ t (C_{SM}), a las proporciones correspondientes a las mezclas adoptadas para nuestro estudio. Este suministro incluye transporte hasta 30 km. Sin embargo, como nuestra distancia desde la Planta de Producción de Agregados hasta la Planta de hormigón es de 36

km, agregamos un transporte adicional aplicando el precio de Camión para transporte de 24 t de 0.043 €/tkm al material transportado, por los 6 km adicionales (C_{TM}).

Como la proporción de la arena se mantiene igual en todos los escenarios de hormigón estructural (614 kg/m³ de hormigón preparado), el costo total es de 10.88 €/m³ de hormigón preparado por escenario, por concepto de arena. Respecto al hormigón no estructural, aplicando el mismo principio tenemos 901 kg/m³ de hormigón preparado para el escenario *HNE1*, que equivale a 15.95 €/m³. Los escenarios *HN2* y *HN3*, no presentan costos por este concepto ya que el *Agregado Natural Fino* ha sido sustituido en su totalidad por *Agregado Reciclado grueso*.

○ Agregado Natural Grueso (Grava Natural)

El costo para este material (C_{MA}) se obtiene al aplicar el precio del BEDEC *Grava de cantera de piedra granítica, de tamaño máximo 20 mm*, para hormigones, que equivale a 18.37 €/t (C_{SM}), a las proporciones correspondientes a las mezclas adoptadas para nuestro estudio. Este suministro incluye transporte hasta 30 km. Sin embargo, como nuestra distancia desde la Planta de Producción de Agregados hasta la Planta de hormigón es de 36 km, agregamos un transporte adicional aplicando el precio de Camión para transporte de 24 t de 0.043 €/tkm al material transportado, por los 6 km adicionales (C_{TM}).

Como este material será el sustituido por el *Agregado Reciclado*, las proporciones varían según el porcentaje de sustitución establecido en el estudio. Para el caso del *HE1*, que presenta 1,193 kg de grava/m³ de hormigón preparado, el costo equivale a 22.22 € de grava/m³ de hormigón preparado. Para los escenarios de *HE2* y *HE3* (20% de sustitución; 954 kg de grava/m³ de hormigón preparado) y, *HE4* y *HE5* (30% de sustitución; 835 kg de grava/m³ de hormigón preparado), en donde solo varía la procedencia de la grava, el costo asciende a 17.77 € y, 15.55 € de grava/m³ de hormigón preparado, respectivamente. En el caso del hormigón no estructural, el *HNE1* presenta 914 kg de grava/m³ de hormigón preparado, mientras el *HN2* y *HN3* (100% de sustitución) no presentan costos por este concepto ya que el *Agregado Natural grueso* ha sido sustituido en su totalidad por *Agregado Reciclado grueso*.

○ Agregado Reciclado Grueso (Grava Reciclada) – Planta Fija

El costo para este material (C_{MA}) se obtiene al aplicar el precio del BEDEC *Grava de árido reciclado de hormigón de 20 a 40 mm*, que equivale a 11.00 €/t (C_{SM}), a las proporciones correspondientes a las mezclas adoptadas para nuestro estudio. Este suministro incluye transporte hasta 30 km y, al ser la distancia entre la Planta de Reciclaje y la Planta de Hormigón igual a 18 km, no se requiere la consideración de costo adicional por transporte (C_{TM}).

Para este material, las proporciones varía según el porcentaje de sustitución establecido en el estudio. El *HE1* y el *HNE1*, no presentan costos por este concepto pues solo contienen grava natural. Para los escenarios de *HE2* (20% de sustitución; 239 kg de grava/m³ de hormigón preparado) y *HE4* (30% de sustitución; 358 kg de grava/m³ de hormigón preparado), el costo asciende a 2.63 € y 3.58 € de grava/m³ de hormigón preparado, respectivamente. El *HNE2* presenta 1,764 kg de grava/m³ de hormigón preparado, que genera un costo de 19.40 € de grava/m³ de hormigón preparado.

○ Agregado Reciclado Grueso (Grava Reciclada) – Planta Móvil

En el BEDEC no existe un costo propio para este material. Sin embargo, hemos realizado la composición de un precio mediante la aplicación de la fórmula 2, basándonos en los criterios expuestos a continuación:

- Los equipos a utilizar y sus rendimientos han sido obtenidos del estudio realizado por (López Gayarre et al., 2016), para los cuales se ha buscado una equivalencia en BEDEC a partir de sus especificaciones, según se muestra en la Tabla 28.

Equipo	Capacidad	Equivalencia en BEDEC	€/h	€/m ³
Jaw crusher Powerscreen Pegson (Machacadora)	100 t/h	Machacadora de residuos pétreos, sobre orugas con capacidad para tratar de 100 a 450 t/h, autopropulsada, con cinta transportadora para cargar material triturado	110.74	1.09
Powerscreen Warrior 1400 ^a	100 t/h	Machacadora de residuos pétreos, sobre orugas con capacidad para tratar de 100 a 450 t/h, autopropulsada, con cinta transportadora para cargar material triturado	44.40	0.44
Hydraulic excavator CAT 325D	90 t/h	Pala excavadora giratoria sobre cadenas de 21 a 30 t	116.46	3.49
		Camión semiremolque para transportes especiales de 75 t de carga útil, con dolly y 35 m de longitud ^b	129.04	N/A

^a 40% de precio de la machacadora (a partir de cotización)

^b Para movilización y desmovilización de los equipos al/ del Sitio de Obra

Tabla 28. Precios utilizados del BEDEC para cálculo de precio de Agregado Reciclado - Planta Móvil. Fuente: Elaboración Propia

- Producción de 400,000 t/a (aprox.). El tiempo de alquiler de los equipos propios del carguío, machaqueo y cribado ha sido considerado como de un año (a trabajar 6 días a la semana x 6.5 horas x 52 semanas) y se requieren 2 conjuntos de equipos.

La movilización, desmovilización y transporte de los equipos de carguío, machaqueo y cribado al Sitio de Obra (C_{MD}) ha sido calculada en base al costo de alquiler por hora de los equipos durante el tiempo de su traslado/instalación hacia/ desde el Sitio de Obra y del costo del camión utilizado para el transporte (4 horas por viaje por equipo), lo que nos permite tener un valor total de 3,571.59 € por este concepto. Siendo que el equipo trabaja 6.5 h/día x 6 días a la semana durante 52 semanas al año, tenemos una producción de 202,800 m³ de material machacado por conjunto de equipos, del cual es aprovechable el 60% (Marinković et al., 2010), o sea, 121,680 m³ de grava reciclada. Finalmente, el monto de la movilización, desmovilización y transporte de los equipos que se le aplicará a cada m³ de grava corresponde a 0.03 €/m³. Ese precio unitario se ajusta con la proporción de kg de grava por metro cúbico que son 1,215kg para dar el precio en €/kg.

Respecto al llenado del equipo, la pala excavadora del estudio tiene un rendimiento de 90 t/ h. Según la densidad de nuestro hormigón esto equivale a 0.03h/m³, lo que multiplicado por el precio de alquiler establecido en la Tabla 28 y por el porcentaje de grava aprovechable por m³ cargado, nos da como resultado 5.82 €, a aplicar a cada m³ de grava producida (C_{AL}). Ese precio unitario se ajusta con la proporción de kg de grava por metro cúbico que son 1,215 kg para dar el precio en €/kg.

El costo del alquiler del equipo de machaqueo por m³ es de 1.09 €/m³. En el BEDEC no hemos logrado obtener precio del equipo de cribado, pero haciendo relación en una cotización en las que se ofertan los dos equipos (machaqueo y cribado) podemos establecer que el equipo de cribado cuesta el 40% del equipo del machaqueo (Anexo 7), lo que nos permite tener un precio de 0.44 €/m³ de material cribado. Estos dos valores, ajustados por el 60% de material aprovechable, nos permiten fijar el valor de 2.55 €/m³ de material cribado (C_{AL}), a aplicar a cada m³ de grava producida. Ese precio unitario se ajusta con la proporción de kg de grava por metro cúbico que son 1,215kg para dar el precio en €/kg.

Lo anterior nos permite establecer un precio de m³ de grava producida en Planta Móvil en el Sitio de Obra de 7.97 €/m³ de grava (6.56 €/t de material, según la densidad de la grava reciclada de nuestro estudio; 1.215 t/m³), el cual, luego de transportar la grava desde el Sitio de Obra hasta la Planta de Hormigón (10 km) utilizando el precio del Camión para transporte de 24 t de 0.043 €/tkm, termina siendo 6.99 €/t de grava reciclada (C_{AR}).

○ **Cemento**

El costo para este material (C_{MA}) se obtiene al aplicar el precio del BEDEC de *Cemento Portland CEM I 42,5 R según UNE-EN 197-1, a granel*, que equivale a 99.73 €/t (C_{SM}), a las proporciones correspondientes

a las mezclas adoptadas para nuestro estudio. Este suministro incluye transporte hasta 30 km. Sin embargo, como nuestra distancia desde la Planta de Producción de Agregados hasta la Planta de hormigón es de 38 km, agregamos un transporte adicional aplicando el precio de Camión para transporte de 24 t de 0.043 €/tkm al material transportado, por los 8 km adicionales (C_{TM}).

Como la proporción del cemento se mantiene igual en todos los escenarios de hormigón estructural (398 kg/m³ de hormigón preparado), el costo total es de 39.83 €/m³ de hormigón preparado por escenario. Respecto al hormigón no estructural, aplicando el mismo principio tenemos 327 kg / m³ de hormigón preparado para el escenario *HNE1*, que equivale a 32.72 €/m³. Para los escenarios *HN2* y *HN3*, el costo es de 32.72 €/m³ de hormigón preparado para una proporción de 289 kg/m³.

○ Agua

El costo para este material (C_{MA}) se obtiene al aplicar el precio del BEDEC de Agua, que equivale a 1.6 € / m³ (C_{SM}), a las proporciones correspondientes a las mezclas adoptadas para nuestro estudio.

Aunque la variación es muy mínima, las proporciones de este ítem difieren según el porcentaje de sustitución establecido en el estudio. Para el caso del *HE1*, que presenta 195 kg de agua/m³ de hormigón preparado, el costo equivale a 0.31 €/m³ de hormigón preparado. Para los escenarios de *HE2* y *HE3* (20% de sustitución; 198.20 kg de agua/m³ de hormigón preparado) y, *HE4* y *HE5* (30% de sustitución; 199.8 kg de agua/m³ de hormigón preparado), el costo se mantiene para todos los casos en 0.32 €/m³ de hormigón preparado. En el caso del hormigón no estructural, el *HNE1* presenta 209 kg de agua/m³ de hormigón preparado, mientras el *HN2* y *HN3* (100% de sustitución; 184 kg/m³ de hormigón preparado) el costo de 0.29 €/m³.

○ Mezclado de hormigón planta 60 m³/h

El costo para esta actividad (C_{FH}) se obtiene al modificar el precio del BEDEC de *Hormigón compactado RTB-3.3, de consistencia seca con cemento CEM I 42,5 N y cenizas volantes, aditivo inhibidor de fraguado y árido de piedra granítica de tamaño máximo 20 mm, elaborado en obra con planta hormigonera de 60 m³/h*, que equivale a 68.92 €/m³, eliminando todos los componentes del hormigón, obteniendo como resultado un total de 11.40 €/m³ de hormigón fabricado en planta (Tabla 29). Como la cantidad de hormigón fijada en nuestro estudio es 1m³, esta valor es aplicable e invariable en todos los escenarios.

Descripción	Unidad	Precio
Peón especialista	€ / m ³	5.17
Pala cargadora sobre neumáticos 15 a 20 t	€ / m ³	1.46
Planta de Hormigón para 60m ³ /h	€ / m ³	1.56
Gastos auxiliares sobre la mano de obra (10%)	€ / m ³	0.517
Total (Costo Directo)	€ / m³	8.71
Total, incluyendo porcentaje CBL	€ / m³	11.40

Tabla 29. Precios utilizados del BEDEC para cálculo del precio de Mezclado de Hormigón en Planta de 60 m³/h.

Fuente: Elaboración Propia

❖ Economía Lineal y Economía Circular

El ciclo de vida del hormigón, en adición a su proceso de elaboración detallado en los subcapítulos anteriores, conlleva la ejecución de actividades adicionales, cuyos costos no se ven reflejados en el importe del m³ de fabricación. Sin embargo, el establecimiento de estos costos adicionales permite determinar el impacto económico de la aplicación de los conceptos de Economía Lineal y Economía Circular en su fabricación, lo cual llevaremos a cabo por medio de la aplicación de la fórmula 3.

En el caso de la Economía Lineal, estos costos corresponden a las actividades a realizar para desechar la estructura de hormigón al llegar al final de su vida útil y depositar el RCD en su totalidad en un vertedero. Mientras, para la Economía Circular, estos costos corresponden a las actividades necesarias para lograr la reinsertión de los RCD a la cadena de producción de hormigón. En nuestro caso de estudio, estas actividades variarán según el escenario de economía aplicado y el método utilizado para el reciclaje de los RCD (Planta Móvil o Fija) y comprenden los procesos de: demolición, clasificación de los RCD, carga y transporte a la instalación de gestión y deposición controlada de residuos en Planta de Reciclaje Fija o en Vertedero.

El costo por escenario Tabla 30 ha sido establecido en base a 1m³ demolido y a los precios del BEDEC de las actividades implicadas Anexo 8. Para la definición de la cantidad de residuo a depositar en el vertedero hemos partido del criterio establecido por (Marinković et al., 2010), que indica que de los residuos de 1 m³ de hormigón reciclados para la obtención de Agregados Reciclados Gruesos, es recuperable únicamente un 60%, ya que el otro 40% está compuesto de materiales finos cuyo destino principal es el vertedero.

○ Economía Lineal

En los escenarios de economía lineal, el costo del proceso de elaboración del hormigón estructural (HEI) fue establecido en 84.64 €/m³ (Tabla 27). Adicionando a este costo los correspondientes a las actividades necesarias para la demolición, transporte de residuos y deposición en vertedero (fórmula 3), que según la Tabla 30, representan 92.83 €/ m³, se establece un costo final de 177.47 €/ m³. Para el caso del hormigón no estructural (HNEI), el hormigón mezclado en planta tiene un costo de 77.44 €/ m³ (Tabla 27), que depositado en vertedero al final de su vida útil alcanza un total de 169.73 €/ m³ (Tabla 30).

Descripción	Código	Precio	Unidad	Economía Lineal				Economía Circular - PF				Economía Circular - PM			
				HE		HNE		HE		HNE		HE		HNE	
				Cantidad	Total	Cantidad	Total	Cantidad	Total	Cantidad	Total	Cantidad	Total	Cantidad	Total
8.00 Otras actividades					92.83		92.29		72.11		71.72		62.10		61.88
8.10 Demolición	CDE				13.40		13.40		13.40		13.40		12.23		12.23
8.1.1 Demolición de estructura (incluye carguo a camión)		13.400	€/ m ³	1.00	13.40	1.00	13.40	1.00	13.40	1.00	13.40	-	-	-	-
8.1.2 Demolición de estructura		12.229	€/ m ³	-	-	-	-	-	-	-	-	1.00	12.23	1.00	12.23
8.2 Clasificación de los RCD	CCR				-		-		-		-		4.00		4.00
8.2.1 Clasificación Mecánica de los RCD		3.998	€/ m ³	-	-	-	-	-	-	-	-	1.00	4.00	1.00	4.00
8.3 Transporte	CTM				53.03		53.03		39.51		39.51		-		-
8.2.1 Transporte de RCD a Instalación de Gestión 20t - hasta 2 km		2.330	€/ m ³	1.35	3.15	1.35	3.15	1.35	3.15	1.35	3.15	-	-	-	-
8.2.2 Transporte de RCD a Instalación de Gestión 20t - de 2 a 5 km		3.880	€/ m ³	1.35	5.24	1.35	5.24	1.35	5.24	1.35	5.24	-	-	-	-
8.2.3 Transporte de RCD a Instalación de Gestión 20t - de 5 a 10 km		5.360	€/ m ³	1.35	7.24	1.35	7.24	1.35	7.24	1.35	7.24	-	-	-	-
8.2.4 Transporte de RCD a Instalación de Gestión 20t - de 10 a 15 km		7.690	€/ m ³	1.35	10.38	1.35	10.38	1.35	10.38	1.35	10.38	-	-	-	-
8.2.5 Transporte de RCD a Instalación de Gestión 20t - de 15 a 20 km		10.010	€/ m ³	1.35	13.51	1.35	13.51	1.35	13.51	1.35	13.51	-	-	-	-
8.2.6 Transporte de RCD a Instalación de Gestión 20t - > 20 km		10.010	€/ m ³	1.35	13.51	1.35	13.51	-	-	-	-	-	-	-	-
8.4 Carga y Transporte	CTM				-		-		-		-		35.31		35.31
8.4.1 Carga y Transporte de RCD a Instalación de Gestión 20t - hasta 2 km		3.160	€/ m ³	-	-	-	-	-	-	-	-	1.35	4.27	1.35	4.27
8.4.2 Carga y Transporte de RCD a Instalación de Gestión 20t - de 2 a 5 km		4.710	€/ m ³	-	-	-	-	-	-	-	-	1.35	6.36	1.35	6.36
8.4.3 Carga y Transporte de RCD a Instalación de Gestión 20t - de 5 a 10 km		6.200	€/ m ³	-	-	-	-	-	-	-	-	1.35	8.37	1.35	8.37
8.4.4 Carga y Transporte de RCD a Instalación de Gestión 20t - de 10 a 15 km		8.520	€/ m ³	-	-	-	-	-	-	-	-	0.54	4.60	0.54	4.60
8.4.5 Carga y Transporte de RCD a Instalación de Gestión 20t - de 15 a 20 km		10.850	€/ m ³	-	-	-	-	-	-	-	-	0.54	5.86	0.54	5.86
8.4.6 Carga y Transporte de RCD a Instalación de Gestión 20t - > 20 km		10.850	€/ m ³	-	-	-	-	-	-	-	-	0.54	5.86	0.54	5.86
8.5 Deposition controlada de Residuos	CDR				26.40		25.86		19.20		18.81		10.56		10.34
8.5.1 Deposition controlada en Planta Fija		0.008	€/ kg	-	-	-	2.400.00	19.20	2.351.00	18.81	-	-	-	-	-
8.5.2 Deposition controlada en Vertedero		0.011	€/ kg	2.400.00	26.40	2.351.00	25.86	-	-	-	960.00	10.56	940.40	10.34	
Total (CAE)	CAE		€/ m³		92.83		92.29		72.11		71.72		62.10		61.88

Tabla 30. Costo de aplicación de economía lineal y circular, para 1m³ de hormigón. Fuente: Elaboración Propia

Como se puede apreciar en los resultados, el hormigón estructural es más costoso en un 4% que el hormigón no estructural al aplicar el concepto de Economía Lineal. Esto se debe a la diferencia de proporciones entre ambos hormigones, ya que el hormigón estructural presenta mayores cantidades en todos sus componentes (con excepción de los áridos naturales finos), provocando un mayor costo de los materiales a mezclar. De igual forma, el hormigón estructural presenta una densidad mayor, lo que provoca un mayor costo de su deposición en vertedero, actividad que se paga por tonelaje.

○ Economía Circular

Para estos escenarios, los resultados se han obtenido por medio de la apropiación de un porcentaje del costo de la aplicación de la economía (CAE), definidos en la Tabla 30, calculado a partir de la proporción

de grava de la mezcla respecto a la densidad del hormigón Tabla 31. Para el hormigón estructural, en el caso de las alternativas HE2 y HE3, que recuperan 239 kg/m³ de *Agregados Reciclados* con diferencia únicamente del método de producción de estos agregados, el porcentaje aplicable es 10%, siendo por tanto los costos de los escenarios de 90.00 € y 88.13 €, respectivamente. Para las alternativas HE4 y HE5, el porcentaje es de 15%, y los costos 92.67 € y 89.87 €, respectivamente.

Escenario	Costo Economía Circular (Cae)	Grava Reciclada (1)	Densidad del Hormigón (2)	Proporción (1)/(2)	Costo de Cae a apropiar	Costo del Hormigón Preparado (Cme)	Total
	€/ m3	kg / m3	kg/m3		€/ m3	€/ m3	
HE2	72.11	239	2,400	10%	7.18	82.82	90.00
HE3	62.10	239	2,400	10%	6.18	81.95	88.13
HE4	72.11	358	2,400	15%	10.76	81.92	92.67
HE5	62.10	358	2,400	15%	9.26	80.60	89.87
HN2	71.72	1,764	2,351	75%	53.81	60.02	113.84
HN3	61.88	1,764	2,351	75%	46.43	53.55	99.98

Tabla 31. Precio por m³ de hormigón incluyendo costos de aplicación de escenario de economía y circular.
Fuente: Elaboración Propia

Por otra parte, para el hormigón no estructural y sus alternativas HNE2 y HNE3, que recuperan 1,764 kg/m³ de *Agregados Reciclados*, el porcentaje aplicable es 75%, siendo por tanto los costos de los escenarios de 113.84 €/m³ y 99.37 €/m³, respectivamente.

4.2.2.4 Interpretación de la Evaluación Económica

La Tabla 32 presenta un resumen de los valores de costos calculados en las secciones anteriores.

Descripción	Siglas en Fórmula	Hormigón Estructural					Hormigón No Estructural		
		HE 100% AN HE1	HE 20% ARH - PF HE2	HE 20% ARH - PM HE3	HE 30% ARH - PF HE4	HE 30% ARH - PM HE5	HNE 100% AN HNE1	HNE 100% ARH - PF HNE2	HNE 100% ARH - PM HNE3
Producción	CME	84.64	82.82	81.95	81.92	80.60	77.44	60.02	53.55
Otras actividades	CAE	92.83	7.18	6.18	10.76	9.26	92.29	53.81	46.43
Total		177.47	90.00	88.13	92.68	89.86	169.73	113.83	99.98

Tabla 32. Resumen de valores de costo económico por escenario. Fuente: Elaboración propia

○ Análisis Coste de la Mezcla (CME)

En primer instancia, si se compara el costo de producción del metro cúbico de Hormigón Estructural se observa que las diferencias entre las mezclas producidas con *Agregados Reciclados* no conllevan ahorros sustanciales respecto la producción de hormigón con *Agregados Naturales*:

- -2.15% con producción a partir de agregados reciclados en Planta Fija y 20% de sustitución,
- -3.18% con producción a partir de agregados reciclados en Planta Móvil y 20% de sustitución,
- -3.21% con producción a partir de agregados reciclados en Planta Fija y 30% de sustitución,
- -4.77% con producción a partir de agregados reciclados en Planta Móvil y 30% de sustitución.

Aunque poco sensible, también se nota que el costo de la producción de *Agregado Reciclado - Planta Fija* es ligeramente superior al costo de producción a partir de *Agregados Reciclado - Planta Móvil* (-1.4% en promedio).

Una mayor cantidad de *Agregados Reciclados* gruesos (30% vs 20%) de igual manera produce un ahorro, pero tampoco es significativo (-1.4%).

En el caso del Hormigón No Estructural, las diferencias son más sustanciosas:

- -22.49% con producción a partir de agregados reciclados en Planta Fija,
- -30.85% con producción a partir de agregados reciclados en Planta Móvil.

Para ambos caso, de Hormigón Estructural y Hormigón No Estructural, las diferencias se explican principalmente por el costo de producción de los *Agregados Naturales* que es mucho mayor que los costos de producción de los *Agregados Reciclad*os, independientemente del método de obtención de estos últimos.

○ Análisis Coste Global

El análisis global, considerando también el Coste de Aplicación de Economía es más interesante. La diferencia de un proceso con *Agregados Reciclad*os frente a *Agregados Naturales* es la siguiente:

Para el Hormigón Estructural:

- -49.29% con producción a partir de agregados reciclados en Planta Fija y 20% de sustitución,
- -50.34% con producción a partir de agregados reciclados en Planta Móvil y 20% de sustitución,
- -47.78% con producción a partir de agregados reciclados en Planta Fija y 30% de sustitución,
- -49.37% con producción a partir de agregados reciclados en Planta Móvil y 30% de sustitución.

Y, para el Hormigón No Estructural:

- -32.93% con producción a partir de agregados reciclados en Planta Fija,
- -41.09% con producción a partir de agregados reciclados en Planta Móvil.

En la práctica, este ahorro muy significativo no beneficia al consumidor que solo compra el hormigón al momento de la construcción de la obra nueva, y no soporta los costos del ciclo completo (incluyendo los gastos de fin de vida).

El dato, sin embargo, muestra el interés de la realización del análisis financiero de una construcción hecha sobre el ciclo completo y los beneficios que supone de manera global la aplicación de la Economía Circular.

5 Conclusiones

Mediante el presente trabajo hemos realizado la evaluación de los impactos ambientales y económicos de la aplicación de las Economías Lineal (EL) y Circular (EC) en el sector de la Construcción en la provincia de Barcelona, a partir del reciclaje de Residuos de Construcción y Demolición provenientes de hormigón. La evaluación comprendió el análisis de 5 escenarios de Hormigón Estructural (1 de EL y 4 de EC) y 3 escenarios de Hormigón No Estructural (1 de EL y 2 de EC). La Evaluación Ambiental fue realizada mediante la aplicación del método de Análisis de Ciclo de Vida Atribucional, empleando del método CML-IA Baseline, versión 3.05 y el programa SIMAPRO, en su versión PhD, Released 9.0.0.49. Mientras, la Evaluación Económica se realizó mediante un Análisis de Costes, empleando los Costes Base de Licitación, a partir de la base de datos del ITeC, el BEDEC, en su versión 2020-1.

La evaluación del criterio ambiental permite establecer que, para todos los escenarios del estudio, la categoría de impacto más importante es la *Ecotoxicidad en Aguas Marinas*.

Para la producción de los *Agregados Naturales* y los *Agregados Reciclados – Planta Fija*, el proceso que más incide es el consumo de *Electricidad*. En el caso de los *Agregados Reciclados – Planta Móvil*, el consumo de combustible, en este caso *Diésel*, es el proceso que más incide en todas las categorías de impacto. Los *Agregados Reciclados* presentan ambos impactos positivos a cuenta de la producción de *Agregados Naturales* evitada.

Para los casos de hormigón estructural, el proceso con mayor aporte a las categorías de impacto fue el *Cemento Portland*, seguido por el *Mezclado de Concreto* y el *Agregado Natural* grueso. Para el hormigón estructural, sin embargo, el proceso más impactante puede variar entre el *Cemento Portland* y los *Agregados Reciclados*, por cuenta de los porcentajes de sustitución de AN por ARH, que alcanzan el 100%.

Lo establecido en el párrafo anterior resalta la importancia de los impactos de los componentes del hormigón, principalmente del *Cemento Portland* y el *Agregado Natural* grueso y, de la necesidad de implementación de mejoras en el proceso de fabricación de hormigón. Estas mejoras deben ir dirigidas principalmente a la industria del cemento, por medio del desarrollo de procesos de fabricación menos contaminantes o de materiales que permitan la sustitución total o parcial del este como componente del hormigón. Respecto al *Agregado Natural* grueso, las mejoras corresponden al desarrollo de tecnología de explotación con menores consumos energéticos y de combustible, pero principalmente en la mejora de los procesos de producción de *Agregados Reciclados*, que aumenten y garanticen la calidad de los productos fabricados para permitir realizar mayores sustituciones de *Agregado Natural*, en el caso del hormigón estructural, y de políticas que promuevan e incentiven su uso como componente del hormigón. Para el proceso de *Mezclado de Concreto*, las mejoras deben ser dirigidas a los materiales utilizados para la construcción y mantenimiento de las instalaciones y al consumo eléctrico asociado al proceso de producción como tal.

Los impactos positivos a cuenta de los *Agregados Naturales* cuya explotación se evita con el uso de *Agregados Reciclados*, son significativos únicamente para los casos de grandes sustituciones de AN por ARH. En nuestro caso de estudio, esto se verifica con el 42% de impactos positivos que generan los hormigones no estructurales con sustitución de 100% de AN por ARH, en la categoría de *Agotamiento Abiótico* frente a 5 y 8% que generan las sustituciones de 20% y 30%, respectivamente.

Los escenarios convencionales de hormigón estructural y no estructural, o sea, los que presentan 100% de *Agregados Naturales* y que su fabricación y disposición final siguen los conceptos de la Economía Lineal, son en general, los más impactantes. Según la EA, el hormigón convencional, *HE 100% AN*, resulta más

impactante al medio ambiente en 8 de 11 categorías de impacto. Esto es confirmado por la Evaluación de Incertidumbre en aproximadamente un 65% de las simulaciones.

El tipo de proceso de generación de agregados reciclados gruesos (Planta Fija o Planta Móvil) es el que genera la tendencia de impactos que tendrá el hormigón mezclado. El proceso de producción de *Agregado Reciclado – Planta Fija* presenta mayores valores que el proceso de producción de *Agregados Reciclados – Planta Móvil*, en todas las categorías de impacto y, respecto al *Agregado Natural*, en la mayoría de las categorías de impacto. En este orden, los escenarios de Economía Circular más impactantes son los producidos a partir del uso de una Planta Fija, en su mayor porcentaje de sustitución, o sea, el *HE 30% ARH – PF*, para los hormigones estructurales y el *HNE 100% ARH – PF*, para los hormigones no estructurales.

Los resultados de la Evaluación Ambiental han sido sometidos a un Evaluación de la Incertidumbre (EI), por medio de la aplicación de método de Monte Carlo, incluido en el programa SIMAPRO. Los resultados de las simulaciones señalan, para la mayoría de las ocasiones, diferencias insignificantes entre los escenarios comparados. De manera general, este análisis nos permite concluir que en el estudio ha sido introducida mucha incertidumbre a través de los datos. Esta incertidumbre viene principalmente por cuenta de:

- La fiabilidad de los datos, los cuales provienen tanto de mediciones, como de data estimada a partir de datos verificados.
- la antigüedad de los estudios que han servido como base para la confección del Inventario de Ciclo de Vida, que comprende un rango de años que va desde el 2004 al 2018.
- la cantidad de empresas consideradas para la obtención de los datos, que en la mayor parte de las ocasiones corresponden solo a una empresa.
- el área geográfica de proveniencia de los datos respecto al área de estudio, que además de España, incluye países como Turquía, China, Serbia y Qatar.
- La correlación tecnológica adicional de los datos respecto al mercado de proveniencia y la escala de los trabajos, que incluye datos de empresas respecto a los materiales de estudio y a procesos realizados con la misma tecnología del estudio pero, que también contiene datos a escala de laboratorio.

Por lo anterior, la Evaluación de Incertidumbre permite concluir además, que para reducir la incertidumbre de un estudio, debe realizarse un Inventario de Ciclo de Vida en base a datos lo más cercano, recientes y representativos de la realidad de los materiales y procesos estudiados, considerando en la medida de lo posible y únicamente: datos del área de estudio, de mediciones realizadas por múltiples empresas que lleven a cabo la misma actividad estudiada, y desconsiderando todo dato que provenga de asunciones y de estudios a escala de laboratorio.

Respecto a la evaluación del criterio económico, el *Agregado Reciclado - Planta Móvil* resulta el más económico de todos, seguido por el *Agregado Reciclado - Planta Fija*, siendo el *Agregado Natural* el más costoso. En el caso del hormigón estructural, respecto a la producción de hormigón convencional, el costo de producción de 1 m³ de hormigón presenta ligeros ahorros económicos que aumentan a medida que aumenta la sustitución del *Agregado Natural* por *Agregado Reciclado*, alcanzado su máximo ahorro, alrededor de un 5%, con el uso de los agregados provenientes de una Planta Móvil en una proporción de 30%. Para el caso del hormigón no estructural, esta reducción de costos es más importante, motivada por el porcentaje de sustitución, pudiendo alcanzar valores de hasta un 31%, si los agregados provienen de una Planta Móvil.

El Costo de la Aplicación de las Economías (C_{AE}) alcanza su valor máximo para los escenarios de Economía Lineal (hormigones fabricados con 100% de áridos naturales) a lo que le son aplicados el 100%

del costo de las actividades de Fin de Vida (demolición, transporte, vertido) por m³. Para este caso el más costoso resulta el *HE 100% AN*. En el caso de la Economía Circular, la aplicación resulta más costosa para los casos de hormigones fabricados a partir de Agregados Reciclados - Planta Fija, y aumenta a medida que aumenta la proporción de la sustitución, resultando, por tanto, el *HE 30% ARH – PF*, el más costoso para el caso de los hormigones estructurales y el *HNE 100% ARH – PF*, para el caso de los hormigones no estructurales.

Todo lo anterior nos permite concluir que los mayores beneficios ambientales y económicos del estudio son alcanzados por los escenarios que logran la implementación de la Economía Circular con mayores proporciones de sustitución de agregados, provenientes del procesamiento en Planta Móvil. En cambio, los mayores impactos provienen de los escenarios de Economía Lineal, con 100% de *Agregados Naturales* y disposición final en vertederos. Finalmente, nos permite establecer los escenarios más favorable en términos ambientales y económicos para nuestro caso de estudio, siendo, para el hormigón estructural, el *HE 30% ARH – PM* y para el hormigón no estructural el *HNE 100% ARH – PM*. Como menos favorables señalamos el *HE 100% AN* y el *HNE 100% AN*, para el hormigón estructural y el hormigón no estructural, respectivamente.

6 Bibliografía

- Agencia de Residuos de Cataluña. (n.d.). *Instalaciones de gestión*. Agencia de Residuos de Cataluña. Retrieved September 16, 2020, from http://residus.gencat.cat/es/ambits_dactuacio/tipus_de_residu/runes_i_altres_residus_de_la_construccio/instal_lacions_de_gestio/
- Allen, E., Thallon, R., & Schreyer, A. (2017). *Fundamentals of Residential Construction* (4th ed.). John Wiley & Sons. <https://books.google.fr/books?id=1OoCDgAAQBAJ&pg=PR13&lpg=PR13&dq=allen,+thallon&source=bl&ots=KC4xFDXfkJ&sig=ACfU3U18yBnu3LNscVkoI4NMPkIUyXvDJA&hl=es&sa=X&ved=2ahUKEwj3zu2n6avqAhVRVhoKHUEtALMQ6AEwCnoECAoQAQ#v=onepage&q=sand&f=false>
- ANEFHOP. (2020). *Plantas de Hormigón*. Asociación Nacional Española de Fabricantes de Hormigón Preparado. <https://www.anefhop.com/plantas-de-hormigon/>
- Asociación Española de Reciclaje de Residuos de Construcción y Demolición. (2017). *Informe de Producción y Gestión de RCD en España, Periodo 2011-2015*. Asociación Española de Reciclaje de Residuos de Construcción y Demolición. <https://rcdasociacion.es/images/documents/Informe-RCDA-11-15.pdf>
- Bolaji, B. O., & Hua, Z. (2013). Ozone depletion and global warming: Case for the use of natural refrigerant – a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 18, 49–54. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.10.008>
- Butera, S., & Christensen, Thomas H. Astrup, T. F. (2015). Life cycle assessment of construction and demolition waste management. *Waste Management*, 44, 196–205. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.07.011>
- Caterpillar. (n.d.). *325 Hydraulic Excavator | Cat | Caterpillar*. Caterpillar. Retrieved September 6, 2020, from https://www.cat.com/en_US/products/new/equipment/excavators/medium-excavators/100383.html
- CEPCO. (2004). *Confederación Española de Asociaciones de Fabricantes de de Productos de Construcción*. http://www.cepco.es/noticia.asp?id_rep=1
- Cerdá, E., & Khalilova, A. (2016). Economía Circular. *Revista Economía Industrial*, 401. <https://www.mincotur.gob.es/Publicaciones/Publicacionesperiodicas/EconomiaIndustrial/RevistaEconomiaIndustrial/401/CERDÁ y KHALILOVA.pdf>
- Ciment Català. (2020). *No Title*. Ciment Català. <https://ciment-catala.org/empresas/fabricas-cataluna/>
- Comisión Europea. (1996). Resolución sobre la Comunicación de la Comisión sobre la revisión de la estrategia comunitaria para la gestión de residuos y el proyecto de resolución del Consejo sobre la política de gestión de residuos (COM(96)0399 - C4-0453/96). *Diario Oficial N° C 362 de 02/12/1996 p. 0241*;
- Comisión Europea. (2015). *COM (2015) 614 - Cerrar el círculo: un plan de acción de la UE para la economía circular*. Comisión Europea. https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:8a8ef5e8-99a0-11e5-b3b7-01aa75ed71a1.0011.02/DOC_1&format=PDF
- Comisión Europea. (2016). *Protocolo de gestión de residuos de construcción y demolición en la UE*. Comisión Europea. <https://ec.europa.eu/docsroom/documents/20509/attachments/1/translations/es/renditions/native>
- Comisión Europea. (2018). *EU Construction and Demolition Waste Protocol and Guidelines | Internal Market, Industry, Entrepreneurship and SMEs*. 2018. https://ec.europa.eu/growth/content/eu-construction-and-demolition-waste-protocol-0_en
- Comisión Europea. (2020). *COM (2020) 98 - Nuevo Plan de acción para la economía circular - por una Europa más limpia y más competitiva*. Comisión Europea. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/HTML/?uri=CELEX:52020DC0098&from=EN>
- Comunidad Autónoma de Cataluña. (2008). Ley 8/2008, de 10 de julio, de financiación de las infraestructuras de gestión de los residuos y de los cánones sobre la disposición del desperdicio de los residuos. *Boletín Oficial Del Estado*, 188. <https://www.boe.es/buscar/pdf/2008/BOE-A-2008->

- 13350-consolidado.pdf
- Comunidad Autónoma de Cataluña. (2009). Decreto Legislativo 1/2009, de 21 de julio, por el que se aprueba el Texto refundido de la Ley reguladora de los residuos. *Boletín Oficial Del Estado*, 262, 1–51. <https://boe.es/buscar/pdf/2009/BOE-A-2009-17181-consolidado.pdf>
- Cortina Ramírez, J. M. (2007). *Guía para el manejo de residuos sólidos generados en la industria de la construcción (Capítulo 6)*.
http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/mgc/cortina_r_jm/capitulo6.pdf
- Departamento de Medio Ambiente. (1997). Decreto 1/1997, de 7 de enero, sobre la disposición de los desperdicios de los residuos en depósitos controlados. *Diari Oficial de La Generalitat de Catalunya*, 2307, 296–307.
http://residus.gencat.cat/web/.content/home/ambits_dactuacio/tractament_final/disposicio/residus_no_especials/decret_1_1997.pdf
- Departamento de Medio Ambiente y Vivienda. (2009). DECRETO 69/2009, de 28 de abril, por el que se establecen los criterios y los procedimientos de admisión de residuos en los depósitos controlados. *Diari Oficial de La Generalitat de Catalunya*, 5370, 35657–35673.
http://residus.gencat.cat/web/.content/home/consultes_i_tramits/normativa/normativa_catalana_en_materia_de_residus/decreto_69_2009_es.pdf
- Departamento de Territorio y Sostenibilidad. (2015). DECRETO 98/2015, de 9 de junio, del Consejo para la Prevención y la Gestión de los Residuos en Cataluña. *Diari Oficial de La Generalitat de Catalunya*, 6890.
<http://normativa.infocentre.es/sites/normativa.infocentre.es/files/noticies/20209222e.pdf>
- Departamento de Territorio y Sostenibilidad. (2016). DECRETO 197/2016, de 23 de febrero, sobre la comunicación previa en materia de residuos y sobre los registros generales de personas productoras y gestoras de residuos de Cataluña. *Diari Oficial de La Generalitat de Catalunya*, 7066.
<http://portaldogc.gencat.cat/utillsEADOP/PDF/7066/1476498.pdf>
- Departamento de Territorio y Sostenibilidad. (2017). DECRETO 152/2017, de 17 de octubre, sobre la clasificación, la codificación y las vías de gestión de los residuos en Cataluña. *Diari Oficial de La Generalitat de Catalunya*, 7477, 1–70.
http://residus.gencat.cat/web/.content/home/consultes_i_tramits/normativa/normativa_catalana_en_materia_de_residus/decret_152_17_es.pdf
- Ding, T., Xiao, J., & Tam, V. W. Y. (2016). A closed-loop life cycle assessment of recycled aggregate concrete utilization in China. *Waste Management*, 56, 367–375.
<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.05.031>
- Ellen MacArthur Foundation. (2013). *Towards the Circular Economy - Economic and business rationale for an accelerated transition*.
<https://www.ellenmacarthurfoundation.org/assets/downloads/publications/Ellen-MacArthur-Foundation-Towards-the-Circular-Economy-vol.1.pdf>
- European Construction Industry Federation. (2018). *Key Figures - FIEC*. European Construction Industry Federation. <http://www.fiec.eu/en/library-619/key-figures.aspx>
- Eurostat. (2016). *Waste statistics - Statistics Explained*. Eurostat. https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Waste_statistics#Waste_treatment
- Evangelista, L., & De Brito, J. (2007). *Mechanical behaviour of concrete made with fine recycled concrete aggregates*. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2006.12.004>
- Ghisellini, P., Cialani, C., & Ulgiati, S. (2015). *A review on circular economy: the expected transition to a balanced interplay of environmental and economic systems*.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.09.007>
- GREMIARIDS. (2020). *Gremi D'Àrids de Catalunya*.
<https://www.gremiarids.com/index.php/associats/mapa-d-associats.html?view=alnegremiats>
- Gutiérrez Junco, Ó. J. (2017). *El cementante*.
http://www.uptc.edu.co/docentes/oscar_gutierrez/En_Concreto/Materia4.html?accessible=true
- Huang, B., Xiangyu, W., Harnwei, K., Geng, Y., Raimund, B., & Jingzheng, R. (2018). Construction and demolition waste management in China through the 3R principle. *Resources, Conservation &*

- Recycling*, 129, 36–44. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.09.029>
- International Organization for Standardization. (2006a). *BS EN ISO 14040:2006 Environmental management-Life cycle assessment-Principles and framework*. <http://www.cseses.com/uploads/2016328/20160328110518251825.pdf>
- International Organization for Standardization. (2006b). *Environmental management — Life cycle assessment — Requirements and guidelines*.
- Ismail, S., & Ramli, M. (2013). Engineering properties of treated recycled concrete aggregate (RCA) for structural applications. *Construction and Building Materials*, 44, 464–476. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.03.014>
- Jefatura del Estado. (2016). Ley 22/2011, de 28 de julio, de residuos y suelos contaminados. *Boletín Oficial Del Estado*. <https://www.boe.es/buscar/pdf/2011/BOE-A-2011-13046-consolidado.pdf>
- Jin, R., Hongping, Y., & Qian, C. (2019). Science mapping approach to assisting the review of construction and demolition waste management research published between 2009 and 2018 - ScienceDirect. *Resources, Conservation & Recycling*, 140, 175–188. <https://www.sciencedirect.com/recursos.biblioteca.upc.edu/science/article/pii/S0921344918303628?via%3Dihub>
- Koç, G., & Christiansen, B. (2019). *Reusable and Sustainable Building Materials in Modern Architecture* (The Authors). IGI Global. https://books.google.fr/books?id=R3NyDwAAQBAJ&pg=PA109&lpg=PA109&dq=concrete+is+the+most+consumed+resource+after+water&source=bl&ots=bdkbBHykt4&sig=ACfU3U1txjCV00YwK7Zwd66kIGDeEhz5iA&hl=es&sa=X&ved=2ahUKEwj4nKKr0KvqAhUPmRoKHU_OA60Q6AEwEXoECAkQAQ#v=onepage
- Lockrey, S., Nguyen, H., Crossin, E., & Verghese, K. (2016). Recycling the construction and demolition waste in Vietnam: opportunities and challenges in practice. *Journal of Cleaner Production*, 133, 757–766. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.05.175>
- Lockrey, S., Verghese, K., Crossin, E., & Nguyen, H. (2018). *Concrete recycling life cycle flows and performance from construction and demolition waste in Hanoi*. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.12.271>
- López Gayarre, F. (2008). *Influencia de la variación de los parámetros de dosificación y fabricación de hormigón reciclado estructural sobre sus propiedades físicas y mecánicas*.
- López Gayarre, F., González Pérez, J. P., López-Colina Pérez, C., Serrano López, M., & López Martínez, A. (2016). Life cycle assessment for concrete kerbs manufactured with recycled aggregates. *Journal of Cleaner Production*, 113, 41–52. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.11.093>
- López Ruiz, L. A., Roca Ramón, X., & Gassó Domingo, S. (2020). The circular economy in the construction and demolition waste sector – A review and an integrative model approach. *Journal of Cleaner Production*, 248. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119238>
- Mahpour, A. (2018). Prioritizing barriers to adopt circular economy in construction and demolition waste management. *Resources, Conservation & Recycling*, 134, 216–227. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.01.026>
- Marinković, S., Radonjanin, V., Malešev, M., & Ignjatović, I. (2010). Comparative environmental assessment of natural and recycled aggregate concrete. *Waste Management*, 30(11), 2255–2264. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2010.04.012>
- Mercante, I. T., Bovea, M. D., Ibáñez-Forés, V., & Arena, A. P. (2012). Life cycle assessment of construction and demolition waste management systems: a Spanish case study. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 17, 232–241. DOI 10.1007/s11367-011-0350-2
- Ministerio de Agricultura Alimentación y Medio Ambiente. (2015). Resolución de 16 de noviembre de 2015, de la Dirección General de Calidad y Evaluación Ambiental y Medio Natural, por la que se publica el Acuerdo del Consejo de Ministros de 6 de noviembre de 2015, por el que se aprueba el Plan Estatal Marco de Gestión. *Boletín Oficial Del Estado Del Estado BOE*, 297, 117395–117397. http://residus.gencat.cat/web/.content/home/consultes_i_tramits/normativa/normativa_estatal_en_materia_de_residus/Resol_16_11_15.pdf
- Ministerio de Agricultura Alimentación y Medio Ambiente. (2016). *Plan Estatal Marco de Gestión de Residuos (PEMAR)*.

- Ministerio de Agricultura y Pesca Alimentación y Medio Ambiente. (2018). Real Decreto 210/2018, de 6 de abril, por el que se aprueba el Programa de Prevención y Gestión de Residuos y Recursos de Cataluña (PRECAT20). *Boletín Oficial Del Estado*, I(92), 39125–30130.
http://residus.gencat.cat/web/.content/home/consultes_i_tramits/normativa/normativa_estatal_en_materia_de_residus/rd_210_2018_precat.pdf
- Ministerio de Agricultura y Pesca Alimentación y Medio Ambiente (MAPAMA). (2018). *España Circular 2030. Estrategia Española de Economía Circular. Borrador para información pública*.
<https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/participacion-publica/Residuos-2018-Nota-sobre-proceso-informacion-publica-estrategia-espanola-economia-circular.aspx>
- Ministerio de la Presidencia. (2003). *Real Decreto 1428/2003, de 21 de noviembre, por el que se aprueba el Reglamento General de Circulación para la aplicación y desarrollo del texto articulado de la Ley sobre tráfico, circulación de vehículos a motor y seguridad vial, aprobado por el Real De*. *Boletín Oficial Del Estado*. <https://www.boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-2003-23514>
- Ministerio de la Presidencia. (2008a). Real Decreto 105/2008, de 1 de febrero, por el que se regula la producción y gestión de los residuos de construcción y demolición. *Boletín Oficial Del Estado*.
<https://www.boe.es/buscar/pdf/2008/BOE-A-2008-2486-consolidado.pdf>
- Ministerio de la Presidencia. (2008b). REAL DECRETO 1247/2008, de 18 de julio, por el que se aprueba la instrucción de hormigón estructural (EHE-08). *Boletín Oficial Del Estado*, 203, 35176–35178. <https://www.boe.es/eli/es/rd/2008/07/18/1247/dof/spa/pdf>
- Ministerio de la Presidencia. (2018). *Real Decreto 1514/2018, de 28 de diciembre, por el que se modifica el Reglamento General de Circulación, aprobado por el Real Decreto 1428/2003, de 21 de noviembre*. *Boletín Oficial Del Estado*. <https://www.boe.es/boe/dias/2018/12/29/pdfs/BOE-A-2018-18002.pdf>
- Ministerio de Medio Ambiente. (2002). ORDEN MAM/304/2002, de 8 de febrero, por la que se publican las operaciones de valorización y eliminación de residuos y la lista europea de residuos. *Boletín Oficial Del Estado*, 6494–6515.
http://residus.gencat.cat/web/.content/home/consultes_i_tramits/normativa/normativa_estatal_en_materia_de_residus/orden_mam_304_2002.pdf
- Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. (2020a). Real Decreto 646/2020, de 7 de julio, por el que se regula la eliminación de residuos mediante depósito en vertedero. *Boletín Oficial Del Estado*, 187, 48659–48721. <https://www.boe.es/boe/dias/2020/07/08/pdfs/BOE-A-2020-7438.pdf>
- Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. (2020b). *Transporte - Vehículos pesados*. Ministerio Para La Transición Ecológica y El Reto Demográfico.
https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/atmosfera-y-calidad-del-aire/emisiones/act-emis/transportes_pesados.aspx
- OFICEMEN. (2017). *Agrupación de Fabricantes de Cemento de España*. <https://www.oficemen.com/el-cemento/fabricas-cemento-espana/>
- Oh, D.-Y., Noguchi, T., Kitagaki, R., & Park, W.-J. (2014). *CO 2 emission reduction by reuse of building material waste in the Japanese cement industry*. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.036>
- Oliver-Solà, J., Josa, A., Rieradevall, J., & Gabarrell, X. (2009). Environmental optimization of concrete sidewalks in urban areas. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 14(4), 302–312.
<https://doi.org/10.1007/s11367-009-0083-7>
- Ostrowski, K., Stefaniuk, D., Sadowski, Ł., Krzywiński, K., Gicala, M., & Róžańska, M. (2020). Potential use of granite waste sourced from rock processing for the application as coarse aggregate in high-performance self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*, 238.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117794>
- Parlamento Europeo. (2008). *Directiva 2008/98/CE Del Parlamento Europeo y del Consejo, de 19 de noviembre de 2008, sobre los residuos y por la que se derogan determinadas Directivas*. Diario Oficial de La Unión Europea. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/PDF/?uri=CELEX:32008L0098&from=ES>
- Parlamento Europeo. (2018). *Directiva (UE) 2018/ del Parlamento Europeo y del Consejo, de 30 de*

- mayo de 2018, por la que se modifica la Directiva 2008/98/CE sobre los residuos.
- Peixoto Rosado, L., Vitale, P., Penteado, C. S. G., & Arena, U. (2019). Life cycle assessment of construction and demolition waste management in a large area of São Paulo State, Brazil. *Waste Management*, 85, 447–489. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.01.011>
- Powerscreen. (n.d.-a). *Powerscreen XA400S/ XR400S* | powerscreen. Power. Retrieved August 27, 2020, from https://powerscreensales.com/crushers/xa400s_32
- Powerscreen. (n.d.-b). *Warrior 1400X & 1400XE - Powerscreen - Crushing and Screening*. Powerscreen. Retrieved August 27, 2020, from <https://www.powerscreen.com/es/screens/warrior-screen/warrior-1400x/>
- PRé. (2016). *Introduction to LCA with SimaPro*.
- REE. (2020). *Red Eléctrica Española*. <https://www.ree.es/es/datos/balance/balance-electrico>
- Smol, M., Kulczycka, J., Henclik, A., Gorazda, K., & Wzorek, Z. (2015). *The possible use of sewage sludge ash (SSA) in the construction industry as a way towards a circular economy*. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.02.051>
- Suárez, S. (2015). Propuesta metodológica para evaluar el comportamiento ambiental y económico de los residuos de construcción y demolición (RCD) en la producción de materiales pétreos. *Universitat Politècnica de Catalunya*, 305.
- Suárez Silgado, S., Calderón Valdiviezo, L., Gassó Domingo, S., & Roca, X. (2018). Multi-criteria decision analysis to assess the environmental and economic performance of using recycled gypsum cement and recycled aggregate to produce concrete: The case of Catalonia (Spain). *Resources, Conservation and Recycling*, 133(February 2018), 120–131. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.11.023>
- Topçu, I. B., & Şengel, S. (2004). Properties of concretes produced with waste concrete aggregate. *Cement and Concrete Research*, 34(8), 1307–1312. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2003.12.019>
- Ulubeyli, S., Kazaz, A., & Arslan, V. (2017). Construction and Demolition Waste Recycling Plants Revisited: Management Issues. *Procedia Engineering*, 172, 1190–1197. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.02.139>
- Zhou, C., & Chen, Z. (2017). Mechanical properties of recycled concrete made with different types of coarse aggregate. *Construction and Building Materials*, 134, 497–506. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.163>

7 Anexos

❖ Bibliografía

Autor	Título	Año	Título de la fuente
Cao, W.-L., Wang, R.-W., Yin, F., Dong, H.-Y.	Seismic performance of a steel frame assembled with a CFST-bordered composite wall structure	2020	Engineering Structures
Munir, M.J., Kazmi, S.M.S., Wu, Y.-F., Patnaikuni, I., Wang, J., Wang, Q.	Development of a unified model to predict the axial stress-strain behavior of recycled aggregate concrete confined through spiral reinforcement	2020	Engineering Structures
Tian, Y., Yan, X., zhang, M., Yang, T., Zhang, J., Wang, Z.	Effect of the characteristics of lightweight aggregates presaturated polymer emulsion on the mechanical and damping properties of concrete	2020	Construction and Building Materials
Ren, R., Qi, L., Xue, J., Zhang, X.	Cyclic bond property of steel reinforced recycled concrete (SRRC) composite structure	2020	Construction and Building Materials
Makul, N.	Cost-benefit analysis of the production of ready-mixed high-performance concrete made with recycled concrete aggregate: A case study in Thailand	2020	Heliyon
Khan, A.-U.-R., Khan, M.S., Fareed, S., Xiao, J.	Structural Behaviour and Strength Prediction of Recycled Aggregate Concrete Beams	2020	Arabian Journal for Science and Engineering
Kurda, R., de Brito, J., Silvestre, J.D.	A comparative study of the mechanical and life cycle assessment of high-content fly ash and recycled aggregates concrete	2020	Journal of Building Engineering
Sargam, Y., Melugiri Shankaramurthy, B., Wang, K.	Characterization of RCAs and their concrete using simple test methods	2020	Journal of Sustainable Cement-Based Materials
Visintin, P., Xie, T., Bennett, B.	A large-scale life-cycle assessment of recycled aggregate concrete: The influence of functional unit, emissions allocation and carbon dioxide uptake	2020	Journal of Cleaner Production
Venkreb, V., Klanšek, U.	Suitability of recycled concrete aggregates from precast panel buildings deconstructed at expired lifespan for structural use	2020	Journal of Cleaner Production
Muduli, R., Mukharjee, B.B.	Performance assessment of concrete incorporating recycled coarse aggregates and metakaolin: A systematic approach	2020	Construction and Building Materials
Zhang, S., Pei, J., Li, R., Wen, Y., Zhang, J.	Investigation on comparison of morphological characteristics of various coarse aggregates before and after abrasion test	2020	Materials
Deng, Z., Liu, B., Ye, B., Xiang, P.	Mechanical behavior and constitutive relationship of the three types of recycled coarse aggregate concrete based on standard classification	2020	Journal of Material Cycles and Waste Management
Sasanipour, H., Aslani, F.	Effect of specimen shape, silica fume, and curing age on durability properties of self-compacting concrete incorporating coarse recycled concrete aggregates	2019	Construction and Building Materials
Ju, M., Park, K., Park, W.-J.	Mechanical Behavior of Recycled Fine Aggregate Concrete with High Slump Property in Normal- and High-Strength	2019	International Journal of Concrete Structures and Materials
Xu, J.J., Zhao, X.Y., Chen, Z.P., Liu, J.C., Xue, J.Y., Elchalakani, M.	Novel prediction models for composite elastic modulus of circular recycled aggregate concrete-filled steel tubes	2019	Thin-Walled Structures
Kazmi, S.M.S., Munir, M.J., Wu, Y.-F., Patnaikuni, I., Zhou, Y., Xing, F.	Influence of different treatment methods on the mechanical behavior of recycled aggregate concrete: A comparative study	2019	Cement and Concrete Composites
Lv, Z., Liu, C., Zhu, C., Bai, G., Qi, H.	Experimental study on a prediction model of the shrinkage and creep of recycled aggregate concrete	2019	Applied Sciences (Switzerland)
Wang, R., He, X., Li, Y.	Evaluation of microcracks in the interfacial transition zone of recycled rubber concrete	2019	Structural Concrete
Zeng, L., Li, L., Yang, X., Liu, F.	Seismic behavior of large-scale FRP-recycled aggregate concrete-steel columns with shear connectors	2019	Earthquake Engineering and Engineering Vibration
Dong, J., Ma, H., Zou, C., Liu, Y., Huang, C.	Finite element analysis and axial bearing capacity of steel reinforced recycled concrete filled square steel tube columns	2019	Structural Engineering and Mechanics
Yang, H., Zhao, H., Liu, F.	Compressive Stress-Strain Relationship of Concrete Containing Coarse Recycled Concrete Aggregate at Elevated Temperatures	2019	Journal of Materials in Civil Engineering
Shatarat, N., Alhaq, A.A., Katkhuda, H., Jaber, M.A.	Investigation of axial compressive behavior of reinforced concrete columns using Recycled Coarse Aggregate and Recycled Asphalt Pavement aggregate	2019	Construction and Building Materials
Khan, A.R., Fareed, S.	Behaviour of recycled aggregates RC columns strengthened with CFRP under uniaxial compressive loadings	2019	IOP Conference Series: Materials Science and Engineering

Pitarch, A.M., Reig, L., Tomás, A.E., López, F.J.	Effect of Tiles, Bricks and Ceramic Sanitary-Ware Recycled Aggregates on Structural Concrete Properties	2019	Waste and Biomass Valorization
Salahuddin, H., Nawaz, A., Maqsoom, A., Mehmood, T., Zeeshan, B.U.A.	Effects of elevated temperature on performance of recycled coarse aggregate concrete	2019	Construction and Building Materials
Velay-Lizancos, M., Martinez-Lage, I., Vazquez-Burgo, P.	The effect of recycled aggregates on the accuracy of the maturity method on vibrated and self-compacting concretes	2019	Archives of Civil and Mechanical Engineering
Khan, A.R., Fareed, S., Khan, M.S.	Use of recycled concrete aggregates in structural concrete	2019	Sustainable Construction Materials and Technologies
Rucińska, T.	Use of sustainable fine-grain aggregates in cement composites	2019	Journal of Ecological Engineering
Hu, X., Lu, Q., Cheng, S.	Uniaxial damaged plastic constitutive relation of recycled aggregate concrete	2019	Advances in Materials Science and Engineering
Tamanna, K., Tiznobaik, M., Rockson, C., Banthia, N., Alam, M.S.	Experimental investigation of the flexural behaviour of rubberized concrete containing recycled concrete aggregate	2019	Proceedings, Annual Conference - Canadian Society for Civil Engineering
Ajmani, H.A., Suleiman, F., Abuzayed, I., Tamimi, A.	Evaluation of concrete strength made with recycled aggregate	2019	Buildings
Hu, X., Lu, Q., Xu, Z., Zhang, W., Cheng, S.	Compressive stress-strain relation of recycled aggregate concrete under cyclic loading	2018	Construction and Building Materials
Velay-Lizancos, M., Martinez-Lage, I., Azenha, M., Granja, J., Vazquez-Burgo, P.	Concrete with fine and coarse recycled aggregates: E-modulus evolution, compressive strength and non-destructive testing at early ages	2018	Construction and Building Materials
Jayasuriya, A., Adams, M.P., Bandelt, M.J.	Understanding variability in recycled aggregate concrete mechanical properties through numerical simulation and statistical evaluation	2018	Construction and Building Materials
de Brito, J., Kurda, R., da Silva, P.R.	Can we truly predict the compressive strength of concrete without knowing the properties of aggregates?	2018	Applied Sciences (Switzerland)
González-Fonteboa, B., Seara-Paz, S., De Brito, J., González-Taboada, I., Martínez-Abella, F., Vasco-Silva, R.	Recycled concrete with coarse recycled aggregate. An overview and analysis	2018	Materiales de Construcción
Bui, N.K., Satomi, T., Takahashi, H.	Mechanical properties of concrete containing 100% treated coarse recycled concrete aggregate	2018	Construction and Building Materials
Ma, H., Li, S.-Z., Li, Z., Wang, Z.-S., Liang, J.-F.	Shear bearing capacity of steel reinforced recycled concrete column-steel beam composite frame joints	2018	Gongcheng Lixue/Engineering Mechanics
Xianggang, Z., Shuren, W., Xiang, G.	Mechanical properties of recycled aggregate concrete subjected to compression test	2018	Journal of Engineering Science and Technology Review
Nahhab, A.H., Zahra, G.F.A.	Volume change and strength characteristics of normal and high-strength mortars: effect of aggregate type and water-binder ratio	2018	Cogent Engineering
De Brito, J., Agrela, F., Silva, R.V.	Construction and demolition waste	2018	New Trends in Eco-efficient and Recycled Concrete
Kim, S.-W., Park, W.-S., Jang, Y.-I., Jang, S.-J., Yun, H.-D.	Bonding behavior of deformed steel rebars in sustainable concrete containing both fine and coarse recycled aggregates	2017	Materials
Zhao, H., Wang, Y., Liu, F.	Stress-strain relationship of coarse RCA concrete exposed to elevated temperatures	2017	Magazine of Concrete Research
Hachani, M.I., Kriker, A., Seghiri, M.	Experimental study and comparison between the use of natural and artificial coarse aggregate in concrete mixture	2017	Energy Procedia

Anexo I. Citaciones artículo Zhou & Chen, 2017 (Scopus, 2020).

❖ Localización de instalaciones en Cataluña

NOMBRE	PROVINCIA	LOCALIZACIÓN (Latitud, Longitud)
Arenes I Graves Castellot, S.A.	Barcelona	42.007178, 2.247798
Arids Anton, S.A.	Barcelona	41.420262, 2.009781
Arids Bofill, S.A.	Barcelona	41.700761, 2.731176
Arids I Formigó Conanglell, S.L.	Barcelona	42.048125, 2.241363
Beton Catalan, S.A.	Barcelona	42.171214, 1.860734
Beton Catalan, S.A.	Barcelona	41.896004, 1.881398
Beton Catalan, S.A.	Barcelona	41.762773, 1.790951
Beton Catalan, S.A.	Barcelona	41.355443, 1.725964
Beton Catalan, S.A.	Barcelona	41.46893, 1.91389
Beton Catalan, S.A.	Barcelona	41.312659, 2.02139

Beton Catalan, S.A.	Barcelona	41.347221, 2.125503
Beton Catalan, S.A.	Barcelona	41.477526, 2.09812
Beton Catalan, S.A.	Barcelona	41.464522, 2.176587
Beton Catalan, S.A.	Barcelona	41.576792, 2.27658
Cantera Roca, S.L.	Barcelona	41.255583, 1.722575
Catalana D'exploracions I Manteniments, S.L.U.P.	Barcelona	41.739029, 1.541718
Cementos Portland Valderrivas, S.A.	Barcelona	41.328063, 2.140896
Cemex España Operaciones, S.L.U.	Barcelona	41.378356, 2.06963
Cemex España Operaciones, S.L.U.	Barcelona	41.49866, 2.188658
Excavacions, Grues I Formigons Vilanova, S.L.	Barcelona	41.576566, 1.64492
Fiasa Mix, S.A.	Barcelona	42.092747, 1.819868
Fiasa Mix, S.A.	Barcelona	41.780312, 1.863991
Fiasa Mix, S.A.	Barcelona	41.81249, 2.116567
Fiasa Mix, S.A.	Barcelona	41.731175, 1.537672
Fiasa Mix, S.A.	Barcelona	41.568414, 1.656293
Formigons Tenes, S.L.	Barcelona	41.41993, 2.009573
Formigons Tenes, S.L.	Barcelona	41.569828, 2.236999
Hanson Hispania Hormigones, S.L.	Barcelona	41.334271, 2.131965
Hanson Hispania Hormigones, S.L.	Barcelona	41.500193, 2.186917
Hormicon, S.A.	Barcelona	41.851433, 1.885647
Hormicon, S.A.	Barcelona	41.442818, 1.997782
Hormicon, S.A.	Barcelona	41.584126, 2.021034
Hormicon, S.A.	Barcelona	41.456479, 2.190419
Hormigones Salicart, S.L.	Barcelona	41.722859, 2.567319
Hormigones Vallirana, S.L.	Barcelona	41.379469, 1.920236
Lafargeholcim España, S.A.U.	Barcelona	41.434486, 2.011474
Lafargeholcim España, S.A.U.	Barcelona	41.332745, 2.134134
Lafargeholcim España, S.A.U.	Barcelona	41.471416, 2.177412
Lafargeholcim España, S.A.U.	Barcelona	41.609958, 2.354767
Mortero Bensec, S.L.	Barcelona	41.564368, 2.268067
Preter, S.L.	Barcelona	41.318156, 1.728195
Promotora Mediterranea 2, S.A.	Barcelona	42.043931, 1.878281
Promotora Mediterranea 2, S.A.	Barcelona	41.993496, 2.244164
Promotora Mediterranea 2, S.A.	Barcelona	41.584638, 1.632355
Promotora Mediterranea 2, S.A.	Barcelona	41.666731, 2.28204
Promotora Mediterranea 2, S.A.	Barcelona	41.208753, 1.667006
Promotora Mediterranea 2, S.A.	Barcelona	41.408575, 1.996803
Promotora Mediterranea 2, S.A.	Barcelona	41.333725, 2.133153
Promotora Mediterranea 2, S.A.	Barcelona	41.552159, 2.035413
Promotora Mediterranea 2, S.A.	Barcelona	41.420533, 2.192136
Promotora Mediterranea 2, S.A.	Barcelona	41.491596, 2.164025
Promotora Mediterranea 2, S.A.	Barcelona	41.666731, 2.28204
Promotora Mediterranea 2, S.A.	Barcelona	41.530224, 2.418481
Rogasa Construcciones Y Contratas, S.A.U.	Barcelona	41.33117, 2.032519
Rogasa Construcciones Y Contratas, S.A.U.	Barcelona	41.543597, 2.233353
Arids Bofill, S.A.	Girona	42.222938, 2.977705
Arids Bofill, S.A.	Girona	42.122613, 3.068431
Arids Bofill, S.A.	Girona	41.953997, 3.184902
Arids Bofill, S.A.	Girona	41.93456, 2.794197
Formigons Cassá, S.L.	Girona	41.891458, 2.864199
Formigons Coll, S.L.	Girona	42.164875, 2.471194
Formigons Curanta, S.L.	Girona	42.16692, 3.040715
Formigons Girona, S.A.	Girona	42.274522, 2.931288
Formigons Girona, S.A.	Girona	42.248152, 2.969476
Formigons Girona, S.A.	Girona	42.030399, 2.837146
Hormigones Pirenaicos, S.A.	Girona	42.19606, 2.497834
Promotora Mediterranea 2, S.A.	Girona	42.399298, 1.912337
Promotora Mediterranea 2, S.A.	Girona	42.270096, 2.369683
Promotora Mediterranea 2, S.A.	Girona	42.015513, 2.830824
Promotora Mediterranea 2, S.A.	Girona	41.741312, 2.617324
Suberolita, S.A.	Girona	41.950837, 3.189672
Suberolita, S.A.	Girona	41.713, 2.83227
Arids Daniel, S.A.	Lérida	41.756699, 0.802114
Arids Daniel, S.A.	Lérida	41.633793, 0.667026
Arids Daniel, S.A.	Lérida	41.640489, 1.001727
Beton Catalan, S.A.	Lérida	41.593876, 0.618456
Beton Catalan, S.A.	Lérida	41.664935, 1.132662

Cemex España Operaciones, S.L.U.	Lérida	41.67675, 0.591025
Fiasa Mix, S.A.	Lérida	41.987553, 1.505
Fiasa Mix, S.A.	Lérida	41.93268, 1.630459
Fiasa Mix, S.A.	Lérida	41.932452, 1.200466
Fiasa Mix, S.A.	Lérida	41.674935, 1.258847
Garrofe, S.A.	Lérida	41.527612, 0.875387
Garrofe, S.A.	Lérida	41.626583, 0.855244
Garrofe, S.A.	Lérida	41.64888, 1.076033
Gls Consorcio Del Hormigon, S.L.U.	Lérida	41.632768, 0.654049
Promotora Mediterranea 2, S.A.	Lérida	42.507924, 0.810306
Promotora Mediterranea 2, S.A.	Lérida	42.340206, 1.422657
Promotora Mediterranea 2, S.A.	Lérida	42.125179, 0.94628
Promotora Mediterranea 2, S.A.	Lérida	41.551053, 0.497115
Ribalta I Fills, S.A.	Lérida	42.375187, 1.761133
Ribalta I Fills, S.A.	Lérida	42.070583, 1.303583
Ribalta I Fills, S.A.	Lérida	41.961227, 1.58209
Ribalta I Fills, S.A.	Lérida	41.919834, 1.076966
Ribalta I Fills, S.A.	Lérida	41.786963, 1.281704
Sorigue, S.A.	Lérida	41.456634, 0.424232
Beton Catalan, S.A.	Tarragona	41.392264, 1.169786
Beton Catalan, S.A.	Tarragona	41.133393, 1.191262
Canteras La Ponderosa, S.A.	Tarragona	41.257761, 1.160991
Cemex España Operaciones, S.L.U.	Tarragona	40.762195, 0.578604
Cemex España Operaciones, S.L.U.	Tarragona	41.059663, 0.624772
Cemex España Operaciones, S.L.U.	Tarragona	41.095754, 1.10448
Ernesto Pique E Hijos, S.A.	Tarragona	41.132856, 0.684835
Ernesto Pique E Hijos, S.A.	Tarragona	41.08747, 1.075815
Hormigones Arga, S.A.	Tarragona	41.148832, 1.356857
Hormigones L'ametlla, S.A.	Tarragona	40.772908, 0.659255
Hormigones L'ametlla, S.A.	Tarragona	40.929066, 0.833861
Lafargeholcim España, S.A.U.	Tarragona	40.76035, 0.549936
Promotora Mediterranea 2, S.A.	Tarragona	41.168107, 1.180571
Promotora Mediterranea 2, S.A.	Tarragona	41.168107, 1.180571

Anexo 2. Localización de las Plantas Productoras de Hormigón Preparado de la Comunidad Autónoma de Cataluña.

Fuente: Elaboración Propia

<i>PRODUCTOR DE AGREGADOS NATURALES</i>	<i>PROVINCIA</i>	<i>EXPLOTACIÓN</i>	<i>LOCALIZACIÓN (LATITUD, LONGITUD)</i>
* Albert Xuclà Tarté	Barcelona	Pedrerá Fitó	41.754986, 2.253361
Arenes i Graves Castellot, SA	Barcelona	La Pineda	41.862146, 1.931954
Arenes i Graves Castellot, SA	Barcelona	Cantera del Cerdà	41.772166, 2.223514
Arenes i Graves Castellot, SA	Barcelona	Can Carriel	42.068794, 2.227515
* Àrids Anton, SL	Barcelona	Planta de tractament	41.420200, 2.008938
* Àrids Anton, SL	Barcelona	Can Claramunt	41.530418, 1.894933
* Àrids Anton, SL	Barcelona	El Truquell	41.530418, 1.894933
* Àrids Garcia Pedrerá GAR 1, SL	Barcelona	El Coll	41.606354, 2.382561
* Àrids Garcia Pedrerá GAR 1, SL	Barcelona	Gar-1	41.606293, 2.382561
Àrids i Formigons Conanglell, SL	Barcelona	El Planàs	42.070923, 2.223168
* Àrids i Formigons Conanglell, SL	Barcelona	Àrids i Formigons	42.047298, 2.241275
* Àrids Manlleu	Barcelona	Creu Mola	41.993275, 2.243652
* Canteras Anoià, SL	Barcelona	Font de Conill	41.719482, 1.445670
Cemex España Operaciones, SLU, SA	Barcelona	Les Cubetes	41.341343, 1.890630
* Graves Alou, SL	Barcelona	La Lou	41.850296, 1.885312
* Güell - Reixach, SL	Barcelona	Extracció d'Àrids	41.966507, 2.336002
* Hormiconsa	Barcelona	Dato no indicado	Dato no indicado
J. Riera, SA	Barcelona	Els Casals	41.335407, 1.863390
* J. Riera, SA	Barcelona	Ivonne	Dato no indicado
* JMD Àrids y Hormigones, SL	Barcelona	Pedrerá	41.722984, 2.566332
* Sefel, SA	Barcelona	Dato no indicado	Dato no indicado
Àrids Hermanos Curanta, SA	Girona	Meandre Vell	42.167648, 3.040794
Àrids Hermanos Curanta, SA	Girona	Pairades	42.135052, 3.048606
Àrids Hermanos Curanta, SA	Girona	Gravera Mas Cases II	41.959332, 3.185368
Àrids Bofill, SA	Girona	Gorners	42.121567, 3.067402
Àrids Bofill, SA	Girona	Àrids Bofill	41.953304, 3.184879
Àrids Guixeras, SL	Girona	Serra Bou	41.791977, 2.687982

Àrids Guixeras, SL	Girona	Can Súria	41.793171, 2.716223
Àrids Jaume Colomer, SL	Girona	La Palma	42.187553, 2.851813
Àrids Jaume Colomer, SL	Girona	Pla de l'illa	42.175480, 2.869591
Àrids Pujol Custey, SL	Girona	Els Estepars	42.122814, 3.068850
Àrids Pujol Custey, SL	Girona	Rec del Molí	42.080036, 2.995538
Àrids Vilanna, SL	Girona	Casadevall	41.972618, 2.682112
Àrids Vilanna, SL	Girona	Palmeres d'en Mingo	41.972576, 2.682941
Àrids Vilanna, SL	Girona	Planta d'Àrids	41.972523, 2.682935
Germans Cañet - Xirgu, SL	Girona	Gravera Can Xirgu	41.898514, 2.862983
Germans Cañet - Xirgu, SL	Girona	L'Alsina	41.895180, 2.704534
Pedrera Mas Sabé, SL	Girona	Pedrera Mas Sabé	41.797848, 2.710212
Benito Arnó e Hijos, SA	Lleida	Aurora	41.826427, 0.583222
Benito Arnó e Hijos, SA	Lleida	Pedrera Anna Mari	41.853401, 0.613193
Benito Arnó e Hijos, SA	Lleida	Gravera Marta	41.817284, 0.835318
Benito Arnó e Hijos, SA	Lleida	Canxinxes	41.850529, 0.560556
Bons Àrids, SA	Lleida	Dato no indicado	Dato no indicado
Cervós, SA	Lleida	Claveral	42.136608, 0.864282
Cervós, SA	Lleida	Enviny	42.392960, 1.116087
Jose Antonio Romero Polo, SA	Lleida	Costa Dreta	41.691113, 0.575278
Miquel Rius, SA	Lleida	Ana Maria	42.250210, 0.977259
Pavimentos Gar, SA	Lleida	Gravera Pla de Violes	41.721943, 0.722222
Ribalta i Fills, SA	Lleida	Dato no indicado	Dato no indicado
Àrids i Excavacions Mont-roig, SL	Tarragona	Gravera Pinar del Llop	41.101677, 0.923738
Àrids Mallafre, SL	Tarragona	Pedrera Mallafre II	41.100925, 0.913684
Àrids Mallafre, SL	Tarragona	Gravera Margarita	41.107925, 0.978483
Àrids Mallafre, SL	Tarragona	Gravera Marta	41.082672, 0.977888
Arigermar	Tarragona	Silvia	40.698872, 0.427588
Cemex España Operaciones, SLU, SA	Tarragona	Laureano	40.796585, 0.430892
Cemex España Operaciones, SLU, SA	Tarragona	Martinenca	40.586884, 0.538457
Centro de Maquinaria Tomás, SA	Tarragona	Dato no indicado	Dato no indicado
Ernesto Piqué e Hijos, SA	Tarragona	Gravera Joana	41.098194, 1.070014
Ernesto Piqué e Hijos, SA	Tarragona	Pedrera Pypsa	41.183834, 1.066670
Ernesto Piqué e Hijos, SA	Tarragona	Magda	41.117401, 1.070058
Kanars, SL	Tarragona	Covalta	40.782558, 0.424788
Kanars, SL	Tarragona	Josefa	40.771477, 0.586244
Kanars, SL	Tarragona	Parellades	40.797951, 0.422937
Kanars, SL	Tarragona	Sant Onofre	40.763115, 0.578224
Kanars, SL	Tarragona	Mas de la Misa	40.739460, 0.583032
Kanars, SL	Tarragona	Peralta	40.782558, 0.424788

* Productor de áridos naturales que incluye específicamente "Arenas y Gravas" entre su material ofertado.

Anexo 3. Localización de las Plantas Productoras de Agregados Naturales de la Comunidad Autónoma de Cataluña.

Fuente: Elaboración Propia

NOMBRE DEL GESTOR	PROVINCIA	LOCALIZACIÓN (LATITUD, LONGITUD)
Planta De Reciclaje del Puerto de Barcelona	Barcelona	41.301758, 2.137131
Planta De Reciclaje D'Arenys De Munt	Barcelona	41.599236, 2.559647
Planta de Reciclaje de Barcelona	Barcelona	41.334578, 2.131822
Planta de Reciclaje de Caldes De Montbui	Barcelona	41.631172, 2.182143
Planta de Reciclaje de Calldetenes	Barcelona	41.924814, 2.303458
Planta de Reciclaje de Callús	Barcelona	41.79167, 1.768437
Planta de Reciclaje de Centelles	Barcelona	41.781005, 2.095803
Planta de Reciclaje de Fonollosa	Barcelona	41.757203, 1.7821
Planta de Reciclaje de La Garriga (I)	Barcelona	41.665241, 2.288377
Planta de Reciclaje de La Garriga (II)	Barcelona	41.669903, 2.281947
Planta de Reciclaje de Les Franqueses Del Vallès	Barcelona	41.640786, 2.289667
Planta de Reciclaje de Manlleu	Barcelona	42.006708, 2.250059
Planta de Reciclaje de Moià (Ubicada dentro el Depósito Controlado)	Barcelona	41.82997, 2.081506
Planta de Reciclaje de Montmeló	Barcelona	41.559571, 2.250478
Planta de Reciclaje de Pujalt (Ubicada dentro el Depósito Controlado)	Barcelona	41.6996, 1.471982
Planta de Reciclaje de Ripollet	Barcelona	41.506401, 2.147037
Planta de Reciclaje de Sant Cugat Del Vallès	Barcelona	41.459408, 2.007644
Planta de Reciclaje de Santa Fe Del Penedès	Barcelona	41.386808, 1.712182
Planta de Reciclaje de Seva (Ubicada dentro el Depósito Controlado)	Barcelona	No indicada

Planta de Reciclaje de Torelló	Barcelona	42.05011, 2.248521
Planta de Reciclaje de Viladecavalls	Barcelona	41.561638, 1.968389
Planta de Reciclaje de Vilanova Del Vallès (Ubicada dentro el Depósito Controlado)	Barcelona	41.55763, 2.316217
Planta De Reciclaje D'olèrdola	Barcelona	No indicada
Planta De Reciclaje D'arbúcies	Girona	41.827108, 2.517603
Planta de Reciclaje de Begur	Girona	41.930188, 3.157078
Planta de Reciclaje de Campllong	Girona	41.903209, 2.822312
Planta de Reciclaje de Cassà De La Selva	Girona	41.898826, 2.863723
Planta de Reciclaje de Forallac	Girona	41.980806, 3.077002
Planta de Reciclaje de Fortià	Girona	42.226897, 3.018831
Planta de Reciclaje de Girona	Girona	41.96235, 2.807015
Planta de Reciclaje de Girona (Ubicada dentro el Depósito Controlado)	Girona	42.014562, 2.836338
Planta de Reciclaje de La Tallada D'empordà	Girona	42.054001, 3.079277
Planta de Reciclaje de Llançà	Girona	42.360252, 3.137707
Planta de Reciclaje de Palamós	Girona	No indicada
Planta de Reciclaje de Peralada (Ubicada dentro el Depósito Controlado)	Girona	42.307847, 3.045986
Planta de Reciclaje de Porqueres	Girona	42.104239, 2.79079
Planta de Reciclaje de Regencós	Girona	41.950699, 3.185204
Planta de Reciclaje de Sant Andreu Salou	Girona	41.871933, 2.831485
Planta de Reciclaje de Sant Feliu De Guíxols (I)	Girona	41.79498, 3.031294
Planta de Reciclaje de Sant Feliu De Guíxols (Ii)	Girona	41.795173, 3.015406
Planta de Reciclaje de Sant Ferriol	Girona	42.192729, 2.731104
Planta de Reciclaje de Sant Joan De Les Abadesses (Ubicada dentro el Depósito Controlado)	Girona	42.253835, 2.291217
Planta de Reciclaje de Sant Julià De Ramis (Ubicada dentro el Depósito Controlado)	Girona	42.035036, 2.830946
Planta de Reciclaje de Santa Cristina D'aro (Ubicada dentro el Depósito Controlado)	Girona	41.818191, 2.944108
Planta de Reciclaje de Tossa De Mar	Girona	41.746067, 2.898059
Planta de Reciclaje de Vilablareix	Girona	41.951445, 2.764891
Planta De Reciclaje del Far D'Empordà	Girona	42.259995, 2.983038
Planta De Reciclaje D'Agramunt	Lérida	41.783016, 1.070738
Planta De Reciclaje D'Artesa De Segre	Lérida	41.896695, 1.066524
Planta de Reciclaje de Bossòst (Ubicada dentro el Depósito Controlado)	Lérida	42.794616, 0.700567
Planta de Reciclaje de Castell De Mur	Lérida	42.121264, 0.898698
Planta de Reciclaje de Guissona	Lérida	41.797474, 1.282534
Planta de Reciclaje de L'albesa	Lérida	41.746927, 0.673126
Planta de Reciclaje de Miralcamp (Ubicada dentro el Depósito Controlado)	Lérida	41.580705, 0.896903
Planta de Reciclaje de Montoliu De Lleida (Ubicada dentro el Depósito Controlado)	Lérida	41.542089, 0.606174
Planta de Reciclaje de Ponts (Ubicada dentro el Depósito Controlado)	Lérida	41.895192, 1.178951
Planta de Reciclaje de Puiggròs (Ubicada dentro el Depósito Controlado)	Lérida	41.569884, 0.883953
Planta de Reciclaje de Rosselló	Lérida	41.691052, 0.575604
Planta de Reciclaje de Sanatüja	Lérida	41.865604, 1.326135
Planta de Reciclaje de Torrefarrera (Ubicada dentro el Depósito Controlado)	Lérida	41.683924, 0.574959
Planta de Reciclaje de Vilanova De La Barca	Lérida	No indicada
Planta de Reciclaje de Botarell (Ubicada dentro el Depósito Controlado)	Tarragona	No indicada
Planta de Reciclaje de Calafell	Tarragona	41.214853, 1.569278
Planta de Reciclaje de Camarles	Tarragona	40.786134, 0.659022
Planta de Reciclaje de Gandesa (Ubicada dentro el Depósito Controlado)	Tarragona	41.041999, 0.428201
Planta de Reciclaje de Sant Carles De La Ràpita	Tarragona	40.63728, 0.591442
Planta de Reciclaje de Sant Jaume Dels Domenys	Tarragona	41.311858, 1.586345
Planta de Reciclaje de Torredembarra	Tarragona	41.163225, 1.399134
Planta de Reciclaje de Valls	Tarragona	41.327196, 1.269709
Planta de Reciclaje de Vinebre (Ubicada dentro el Depósito Controlado)	Tarragona	41.189562, 0.586875
Planta De Reciclaje del Perelló	Tarragona	40.887528, 0.714166
Planta De Reciclaje D'Ulldecona	Tarragona	40.621732, 0.397186

Anexo 4. Localización de las Plantas de Tratamientos de Residuo de Construcción y Demolición de la Comunidad Autónoma de Cataluña.

Fuente: Elaboración Propia

❖ **Procesos Ecoinvent V3 modificados**

Proceso Madre	Nuevo Proceso	Cambios
Producción de Cemento Portland		
Cement, Portland {ES} production Cut-off, U	Producción de Cemento Portland Cut-off, U	“Electricity, medium voltage {CH} market for Cut-off, U” por “Electricity, medium voltage {ES} market for Cut-off, U”
Producción de Agregado Natural Fino		
Sand {CH} gravel and quarry operation Cut-off, U	Producción de Arena Cut-off, U	<ul style="list-style-type: none"> El valor de output to technosphere ha sido disminuido a 0.35kg pues en el proceso está descrito que para un kg de explotación se obtiene 35% de arena y 65% grava (y solo estamos interesados en la arena). Cambio de: <ul style="list-style-type: none"> “Water, unspecified natural origin, CH” por “Water, unspecified natural origin, ES” “Electricity, medium voltage {CH} market for Cut-off, U” por “Electricity, medium voltage {ES} market for Cut-off, U” “Heat, central or small-scale, other than natural gas {CH} market for Cut-off, U” por “Heat, central or small-scale, other than natural gas {ES} market for heat, central or small-scale, other than natural gas Cut-off, U”. Tap water {CH} market for Cut-off, U por “Tap water {ES} market for Cut-off, U”. “Municipal solid waste {CH} market for municipal solid waste Cut-off, U” por “Municipal solid waste {ES} market for municipal solid waste Cut-off, U”
Producción de Agregado Natural Grueso		
Gravel, crushed {CH} production Cut-off, U	Producción de Grava Triturada Cut-off, U	<ul style="list-style-type: none"> Cambio de: <ul style="list-style-type: none"> “Water, unspecified natural origin, CH” por “Water, unspecified natural origin, ES” Cambio de “Electricity, medium voltage {CH} market for Cut-off, U” por “Electricity, medium voltage {ES} market for Cut-off, U” Cambio de “Water, CH” por “Water, ES” Cambio de “Tap water {CH} market for Cut-off, U” por “Tap water {ES} market for Cut-off, U” Cambio de “Heat, central or small-scale, other than natural gas {CH} market for Cut-off, U” por “Heat, central or small-scale, other than natural gas {ES} market for heat, central or small-scale, other than natural gas Cut-off, U”
Producción de Concreto		
Concrete, high exacting requirements {CH} concrete production, for building construction, with cement CEM II/A Cut-off, U	Producción de Concreto Cut-off, U	<ul style="list-style-type: none"> Cambio de: <ul style="list-style-type: none"> “Electricity, medium voltage {CH} market for Cut-off, U” por “Electricity, medium voltage {ES} market for Cut-off, U”. “Cement, alternative constituents 6-20% {CH} market for Cut-off, U” igual a cero (0). “Gravel, round {CH} market for gravel, round Cut-off, U” igual a cero (0).

		<ul style="list-style-type: none"> ○ “Sand {GLO} market for Cut-off, U” igual a cero (0). ○ “Tap water {CH} market for Cut-off, U” igual a cero (0). ○ “Municipal solid waste {CH} market for Cut-off, U” por “Municipal solid waste {ES} market for municipal solid waste Cut-off, U” ○ Cambio de “Waste concrete {CH} market for waste concrete Cut-off, U” por “Waste concrete {ES} market for waste concrete Cut-off, U”.
Waste concrete {Europe without Switzerland} market for waste concrete Cut-off, U	Waste concrete {ES} market for waste concrete Cut-off, U	<ul style="list-style-type: none"> • Eliminación de “Transport, freight train {Europe without Switzerland} market for Cut-off, U” e adopción de los datos calculados para las distancias entre la planta de hormigón y el depósito de escombros de la construcción. • Cambio “Waste concrete {Europe without Switzerland} treatment of waste concrete, inert material landfill Cut-off, U” por “Waste concrete {ES} treatment of waste concrete, inert material landfill Cut-off, U”.
Waste concrete {Europe without Switzerland} treatment of waste concrete, inert material landfill Cut-off, U	Waste concrete {ES} treatment of waste concrete, inert material landfill Cut-off, U	<ul style="list-style-type: none"> • Cambio de “Inert material landfill {GLO} market for Cut-off, U” por “Inert material landfill {ES} market for Cut-off, U”. • Cambio de “Process-specific burdens, inert material landfill {RoW} market for process-specific burdens, inert material landfill Cut-off, U” por “Process-specific burdens, inert material landfill {CH} market for process-specific burdens, inert material landfill Cut-off, U”.
Inert material landfill {GLO} market for Cut-off, U	Inert material landfill {ES} market for Cut-off, U	<ul style="list-style-type: none"> • Cambio de “Inert material landfill {RoW} construction Cut-off, U” por “Inert material landfill {CH} construction Cut-off, U”.
Process-specific burdens, inert material landfill {CH} market for process-specific burdens, inert material landfill Cut-off, U	Process-specific burdens, inert material landfill {ES} market for process-specific burdens, inert material landfill Cut-off, U	<ul style="list-style-type: none"> • Cambio de “Process-specific burdens, inert material landfill {CH} production Cut-off, U” de “Process-specific burdens, inert material landfill {ES} production Cut-off, U”.
Process-specific burdens, inert material landfill {CH} production Cut-off, U	Process-specific burdens, inert material landfill {ES} production Cut-off, U	<ul style="list-style-type: none"> • Cambio de “Electricity, low voltage {CH} market for Cut-off, U” de “Electricity, low voltage {ES} market for Cut-off, U”. • Cambio de “Heat, central or small-scale, other than natural gas {CH} market for Cut-off, U” de “Heat, central or small-scale, other than natural gas {Europe without Switzerland} market for heat, central or small-scale, other than natural gas Cut-off, U”.
Heat, central or small-scale, other than natural gas {Europe without Switzerland} market for heat, central or small-scale, other than natural gas Cut-off, U	Heat, central or small-scale, other than natural gas {ES} market for heat, central or small-scale, other than natural gas Cut-off, U	<ul style="list-style-type: none"> • Eliminación de: <ul style="list-style-type: none"> ○ “Heat, central or small-scale, other than natural gas {AT} heat and power co-generation, biogas, gas engine Cut-off, U”. ○ “Heat, central or small-scale, other than natural gas {BE} heat and power co-generation, biogas, gas engine Cut-off, U”.

		<ul style="list-style-type: none"> ○ “Heat, central or small-scale, other than natural gas {CZ} heat and power co-generation, biogas, gas engine Cut-off, U”, ○ “Heat, central or small-scale, other than natural gas {DE} heat and power co-generation, biogas, gas engine Cut-off, U”, ○ “Heat, central or small-scale, other than natural gas {DK} heat and power co-generation, biogas, gas engine Cut-off, U”, ○ “Heat, central or small-scale, other than natural gas {EE} heat and power co-generation, biogas, gas engine Cut-off, U”, ○ “Heat, central or small-scale, other than natural gas {FI} heat and power co-generation, biogas, gas engine Cut-off, U”, ○ “Heat, central or small-scale, other than natural gas {FR} heat and power co-generation, biogas, gas engine Cut-off, U”, ○ “Heat, central or small-scale, other than natural gas {GB} heat and power co-generation, biogas, gas engine Cut-off, U”, ○ “Heat, central or small-scale, other than natural gas {GR} heat and power co-generation, biogas, gas engine Cut-off, U”, ○ “Heat, central or small-scale, other than natural gas {HR} heat and power co-generation, biogas, gas engine Cut-off, U”, ○ “Heat, central or small-scale, other than natural gas {HU} heat and power co-generation, biogas, gas engine Cut-off, U”, ○ “Heat, central or small-scale, other than natural gas {IE} heat and power co-generation, biogas, gas engine Cut-off, U”, ○ “Heat, central or small-scale, other than natural gas {IT} heat and power co-generation, biogas, gas engine Cut-off, U”, ○ “Heat, central or small-scale, other than natural gas {LT} heat and power co-generation, biogas, gas engine Cut-off, U”, ○ “Heat, central or small-scale, other than natural gas {LU} heat and power co-generation, biogas, gas engine Cut-off, U”, ○ “Heat, central or small-scale, other than natural gas {LV} heat and power co-generation, biogas, gas engine Cut-off, U”, ○ “Heat, central or small-scale, other than natural gas {NL} heat and power co-generation, biogas, gas engine Cut-off, U”, ○ “Heat, central or small-scale, other than natural gas {NO} heat and power co-generation, biogas, gas engine Cut-off, U”, ○ “Heat, central or small-scale, other than natural gas {PL} heat and power co-generation, biogas, gas engine Cut-off, U”, ○ “Heat, central or small-scale, other than natural gas {PT} heat and
--	--	--

		<p>power co-generation, biogas, gas engine Cut-off, U”,</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ “Heat, central or small-scale, other than natural gas {RO} heat and power co-generation, biogas, gas engine Cut-off, U”, ○ “Heat, central or small-scale, other than natural gas {RS} heat and power co-generation, biogas, gas engine Cut-off, U”, ○ “Heat, central or small-scale, other than natural gas {SE} heat and power co-generation, biogas, gas engine Cut-off, U”, ○ “Heat, central or small-scale, other than natural gas {SI} heat and power co-generation, biogas, gas engine Cut-off, U”, ○ “Heat, central or small-scale, other than natural gas {SK} heat and power co-generation, biogas, gas engine Cut-off, U”, e incorporación del total de los valores de estas en la partida “Heat, central or small-scale, other than natural gas {ES} heat and power co-generation, biogas, gas engine Cut-off, U”.
Escenario de vertederos		
Escenario 100% a Vertedero Inertes		
		<ul style="list-style-type: none"> • Aplicación de “Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 {RER} transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 Cut-off, U” a una distancia de 60 km. • Aplicación de “Waste concrete {ES} treatment of waste concrete, inert material landfill Cut-off, U.
Municipal waste collection service by 21 metric ton lorry {GLO} market for Cut-off, U	Municipal waste collection service by 21 metric ton lorry {ES} market for Cut-off, U	<ul style="list-style-type: none"> • Eliminación de “Municipal waste collection service by 21 metric ton lorry {RoW} processing Cut-off, U” y adición de sus tkm a “Municipal waste collection service by 21 metric ton lorry {CH} processing Cut-off, U”.

Anexo 5. Procesos de Ecoinvent V3 modificados. Fuente: Elaboración Propia

❖ Precios

• Precios de camión para transporte en tkm

Para convertir el dato correspondiente al *Camión para transporte* de €/h a €/tkm, hemos realizado una consulta de los reglamentos que establecen las velocidades de circulación para camiones en España, obteniendo como resultado los valores mínimos y máximos para las vías urbanas y para las carreteras convencionales, autopistas y autovías. A partir de estos, calculamos la velocidad promedio a aplicar en nuestro estudio, y tomando en cuenta la capacidad del camión, establecimos el precio de €/tkm para cada tipo de camión del estudio, tal como se muestra en la Anexo 6.

Velocidad de Camiones	Velocidad			Tipo de camión		
	Máxima (km/h)	Mínima (km/h)	Promedio (km/h)	7t (€/Tkm)	12t (€/Tkm)	24t (€/Tkm)
Vías urbanas ^a	50	25	37.5= 38	0.12	0.09	0.06
Carreteras Convencionales ^b	80	60	70	0.07	0.05	0.03
Autovías/ Autopistas ^b	90	35-40	63.75= 64	0.07	0.05	0.04
Total				0.09	0.06	0.04

^a Real Decreto 1428/2003, de 21 de noviembre (Ministerio de la Presidencia, 2003).

^b Real Decreto 1514/2018, de 28 de diciembre (Ministerio de la Presidencia, 2018).

Anexo 6. Cálculo de precio (€/tkm) de Camión para transporte según su capacidad. Fuente: Elaboración Propia

- Cotización alquiler equipos reciclaje móviles

ASWAN TRADING AND CONT. CO.

PS70 & Pumping Mains
Title: Excavation Works
Option 01

Rev.: 00
Pages: 01
Date: 28-Mar-09

Quantities and Rates:

S/N	Description	Unit	Qty.	Rate/Unit in QR	Amount in QR
1	Earth work excavation in all kinds of soil including Hard Rocks from existing top level to bottom design level using Rock Hawg TESMEC TRS-1475.	M3	750,000	70.00	52,500,000
2	Supply of (5-20) mm Gabbro Aggregate including delivery to site.	M3	2,700	228.00	615,600
3	Supply of (5-20) mm Limestone Aggregate including delivery to site.	M3	10,000	128.00	1,280,000
4	Monthly rental of D9R CAT Dozer, (260 hrs/Month).	Monthly	2	51,000.00	-
5	Monthly rental of HL-780-3A Hyundai Wheel Loader "5 m ³ bucket", (260 hrs/Month).	Monthly	4	38,500.00	-
6	Monthly rental of Tipper Truck " 18 m ³ ", (260 hrs/Month).	Monthly	5	23,000.00	-
7	Monthly rental of Power Screen , (260 hrs/Month).	Monthly	1	52,000.00	-
8	Monthly rental of Mobile Crusher for maximum feed size 200 mm, (260 hrs/Month).	Monthly	1	130,000.00	-
TOTAL					-

Anexo 7. Cotización equipos reciclaje móviles. Fuente: Aswan Trading and Cont. Co, 2009

- Precios varios utilizados para el análisis económico

Descripción	Unidad	Condiciones	Precio
Cemento Pórtland CEM I 42,5 R según UNE-EN 197-1, a granel	€ / t	Incluye transporte hasta 30 km.	99.73
Grava de cantera de piedra granítica, de tamaño máximo 20 mm, para hormigones	€ / t	Incluye transporte hasta 30 km.	18.37
Arena de cantera de piedra granítica para hormigones	€ / t	Incluye transporte hasta 30 km.	17.46
Grava de árido reciclado de hormigón de 20 a 40 mm	€ / t	Planta Fija. Incluye transporte hasta 30 km.	11.00
Agua	€ / m3		1.60
Peón especialista	€ / m3		5.17
Pala cargadora sobre neumáticos 15 a 20 t	€ / m3		1.46
Planta de Hormigón para 60m3/h	€ / m3		1.56
Pala excavadora giratoria sobre cadenas de 21 a 30 t	€ / h		116.46
Camión para transporte de 12 t	€ / h		39.37
* Camión para transporte 12t	€ / tkm		0.06
* Camión para transporte 24t	€ / tkm		0.04
Machacadora de residuos pétreos, sobre orugas con capacidad para tratar de 100 a 450 t/h, autopropulsada, con cinta transportadora para cargar material triturado	€ / h		110.74
Machaqueo material pétreo en obra con machacadora de residuos pétreos, sobre orugas con capacidad para tratar de 100 a 450 t/h, autopropulsada, con cinta transportadora para cargar material triturado sobre camión o contenedor	€ / m3		0.83
Camión semi-remolque para transportes especiales de 75 t de carga útil, con dolly y 35 m de longitud	€ / h	Para transporte de equipos.	129.04

Derribo de edificación aislada, de más de 250 m3 de volumen aparente, de 4 m de altura, con estructura de hormigón armado, sin derribo de cimientos, solera ni medianeras, sin separación, transporte ni gestión de residuos ni residuos peligrosos, con medios manuales y mecánicos e carga mecánica de escombros sobre camión o contenedor	€/ m3	Incluye carguío a camión. No incluye transporte.	13.40
Derribo de edificación aislada, de más de 250 m3 de volumen aparente, de 4 m de altura, con estructura de hormigón armado, sin derribo de cimientos, solera ni medianeras, sin separación, transporte ni gestión de residuos ni residuos peligrosos, con medios manuales y mecánicos	€/ m3	No incluye carguío a camión. No incluye transporte.	12.23
Clasificación a pie de obra de residuos de construcción o demolición en fracciones según REAL DECRETO 105/2008, con medios mecánicos	€/ m3		4.00
Deposición controlada en centro de reciclaje de residuos de hormigón inertes con una densidad 1,45 t/m3, procedentes de construcción o demolición, con código 170101 según la Lista Europea de Residuos (ORDEN MAM/304/2002)	€/ t		8.00
Deposición controlada en vertedero autorizado incluido el canon sobre la deposición controlada de residuos de la construcción según la LLEI 8/2008, de residuos de hormigón inertes con una densidad 1,45 t/m3, procedentes de construcción o demolición, con código 170101 según la Lista Europea de Residuos (ORDEN MAM/304/2002)	€/ t		11.00
Carga con medios mecánicos y transporte de residuos inertes o no peligrosos (no especiales) a instalación autorizada de gestión de residuos, con camión para transporte de 20 t, con un recorrido de hasta 2 km	€/ m3		3.16
Carga con medios mecánicos y transporte de residuos inertes o no peligrosos (no especiales) a instalación autorizada de gestión de residuos, con camión para transporte de 20 t, con un recorrido de más de 2 y hasta 5 km	€/ m3		4.71
Carga con medios mecánicos y transporte de residuos inertes o no peligrosos (no especiales) a instalación autorizada de gestión de residuos, con camión para transporte de 20 t, con un recorrido de más de 5 y hasta 10 km	€/ m3		6.2
Carga con medios mecánicos y transporte de residuos inertes o no peligrosos (no especiales) a instalación autorizada de gestión de residuos, con camión para transporte de 20 t, con un recorrido de más de 10 y hasta 15 km	€/ m3		8.52
Carga con medios mecánicos y transporte de residuos inertes o no peligrosos (no especiales) a instalación autorizada de gestión de residuos, con camión para transporte de 20 t, con un recorrido de más de 15 y hasta 20 km	€/ m3		10.85
Carga con medios mecánicos y transporte de residuos inertes o no peligrosos (no especiales) a instalación autorizada de gestión de residuos, con camión para transporte de 20 t, con un recorrido de más de 20 km	€/ m3		10.85
Transporte de residuos a instalación autorizada de gestión de residuos, con camión de 20 t y tiempo de espera para la carga a máquina, con un recorrido de hasta 2 km	€/ m3		2.33
Transporte de residuos a instalación autorizada de gestión de residuos, con camión de 20 t y tiempo de espera para la carga a máquina, con un recorrido de más de 2 y hasta 5 km	€/ m3		3.88
Transporte de residuos a instalación autorizada de gestión de residuos, con camión de 20 t y tiempo de espera para la carga a máquina, con un recorrido de más de 5 y hasta 10 km	€/ m3		5.36
Transporte de residuos a instalación autorizada de gestión de residuos, con camión de 20 t y tiempo de espera para la carga a máquina, con un recorrido de más de 10 y hasta 15 km	€/ m3		7.69
Transporte de residuos a instalación autorizada de gestión de residuos, con camión de 20 t y tiempo de espera para la carga a máquina, con un recorrido de más de 15 y hasta 20 km	€/ m3		10.01
Transporte de residuos a instalación autorizada de gestión de residuos, con camión de 20 t y tiempo de espera para la carga a máquina, con un recorrido de más de 20 km	€/ m3		10.01

*Precios calculados a partir de los obtenidos en el BEDEC y de asunciones particulares del estudio.

Anexo 8. Precios obtenidos mediante consulta del BEDEC 2020 (versión 2020-1). Fuente: Elaboración Propia