



UNIVERSITAT POLITÈCNICA
DE CATALUNYA
BARCELONATECH

ETSAB Escola Tècnica
Superior d'Arquitectura
de Barcelona

ANÁLISIS DE IMPACTO AMBIENTAL DEL HORMIGÓN ESTRUCTURAL FABRICADO CON ÁRIDO RECICLADO

JUAN GARCÍA PALACIOS

Trabajo final de Grado GARqEtsab

Ámbito de Tecnología de la Arquitectura

Tutor: Dr. Roger Señis López

Convocatoria Ordinaria 2º semestre 2021/22

ÍNDICE

ÍNDICE DE TABLAS	4
RESUMEN	5
1. INTRODUCCIÓN	6
1.1 ASPECTOS GENERALES	6
1.2 OBJETIVOS	7
1.3 ESTRUCTURA DEL TFG	8
2. ESTADO DEL ARTE	9
2.1 CONTEXTO TEÓRICO	9
2.2 MARCO NORMATIVO NACIONAL	10
2.3 MARCO NORMATIVO LOCAL	14
2.4 MARCO NORMATIVO INTERNACIONAL	16
3. MATERIALES	18
3.1 TIPIFICACIÓN DE MATERIALES	18
3.1.1 Cemento	18
3.1.2 Áridos	19
3.1.3 Aditivos	19
4. METODOLOGÍA Y FORMACIÓN DE FLUJOS	20
4.1 INTRODUCCIÓN A LA METODOLOGÍA DE ANÁLISIS	20
4.2 OBJETIVO Y DEFINICION DEL ALCANCE	21
4.2.1 Sistema del producto	21
4.2.2 Función del sistema, unidad funcional y flujo de referencia	22
4.2.3 Dosificaciones	23
4.3 ANÁLISIS DE INVENTARIO DE CICLO DE VIDA (ICV)	24
4.3.1 Reglas de asignación	24
4.3.2 Recopilación de datos de inventario	25
4.3.3 Áridos naturales	25
4.3.4 Áridos reciclados	27
4.3.5 Cemento	28
4.3.6 Aditivos	29
4.3.7 Transporte	29
4.3.8 Planta de procesado y Mezclado	29
4.3.9 Suministro Eléctrico	30
4.3.10 Suministro de agua	32
4.3.11 Inventario global del sistema	32

5.	EVALUCIÓN DE IMPACTO DE CICLO DE VIDA (EICV)	32
5.1	SELECCIÓN DE CATEGORÍAS DE IMPACTO	33
5.1.1	Mecanismos medioambientales	33
5.2	CLASIFICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN	40
5.3	RESULTADOS DE LOS INDICADORES DE CATEGORIA (Perfil AICV)	40
5.3.1	Resultados por porcentaje de atribuciones	40
5.3.2	Inventario de impactos totales	44
5.3.3	Comparativa gráfica por categorías	44
6.	CONCLUSIONES FINALES	46
6.1	FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN	47
7.	REFERENCIAS	48

ÍNDICE DE TABLAS:

Tabla 1.0 Requisitos de composición del árido grueso reciclado	12
Tabla 2.0 Producción de áridos por comunidades	15
Tabla 3.0 Las impurezas del árido reciclado Norma Inglesa	16
Tabla 4.0 Extracto del Anejo 4 Código estructural, Recomendaciones de cemento	18
Tabla 5.0 Dosificaciones calculadas	23
Tabla 6.0 Emisiones e Impactos generados por la producción de áridos reciclados	27
Tabla 7.0 ACV de Superplastificantes aditivos del hormigón	29
Tabla 8.0 Inventario de emisiones de planta de producción y mezclado de hormigón por 1m ³ de mezcla	30
Tabla 9.0 Emisiones utilizadas para el cómputo global de salidas	31
Tabla 10. Inventario global del sistema	32
Tabla 11. Inventario de impactos totales	44

ÍNDICE DE GRÁFICAS:

Gráfica 1.0 Instalaciones de gestión de runas y otros residuos de la construcción en Cataluña	14
Gráfica 2.0 Plantas inscritas en la GRC	14
Gráfica 3.0 Estructura de ACV	21
Gráfica 4.0 Diagrama del sistema y alcance	22
Grafica 5.0 Proceso de extraccion del arido natural y cantera	25
Grafica 6.0 Diagrama de subsistema de planta de tratamiento de áridos naturales estudiado:	26
Grafica 7.0 Proceso de reciclaje del RDC	28
Gráfica 10. Diagrama de producción de Cemento	28
Gráfica 11. Diagrama de producción y mezclado del hormigón	30
Grafica 12. Porcentaje de electricidad de mezcla en España en 2016	31
Grafica 13. Esquema de la clasificación y caracterización de la fase del AICV	40
Graficas 14,15,16. Resultados por porcentajes de atribuciones	41-43
Grafica 17 Comparativa por categorías de impacto	44-46

RESUMEN

El objetivo de este trabajo final de grado es analizar el impacto medioambiental que producen los nuevos hormigones estructurales con áridos reciclados en su composición en el ámbito de la edificación, cuantificando cada aspecto en los distintos estados del ciclo de vida del material. Otro interés que persigue este TFG, del mismo modo que otras ramas de investigación actuales, es conocer e investigar sobre el desarrollo sostenible en los procesos de la construcción en la edificación y cuantificar la aportación del uso del árido reciclado frente a los hormigones convencionales con árido grueso de cantera.

En la fase de análisis y cálculo, se estudian tres tipos de hormigones estructurales: un hormigón convencional, para el cual se ha calculado la dosificación utilizada según el método A.C.I. (American Concrete Institute) y dos hormigones con árido grueso reciclado. Para poder estimar la repercusión de los áridos reciclados en la mezcla final, y su máximo potencial como material, se utilizó el mismo árido grueso obtenido a partir de residuos de la demolición y misma resistencia característica (25 MPa). Los porcentajes utilizados en la dosificación para sustituir el árido reciclado por el convencional han sido de 0%, 20 y 100% respectivamente para cada dosificación.

Para ello se ha utilizado un modelo informático específico para cada material y proceso, teniendo en cuenta la extracción y transporte de materias primas, la producción del cemento Portland, el transporte y el mezclado en la planta hormigonera, hasta obtener un metro cúbico de cada hormigón a analizar.

Así mismo, se ha cuantificado los impactos ambientales mediante el método ACV (Análisis de ciclo de vida) siguiendo la norma ISO 14040 que investiga y evalúa los impactos ambientales del producto durante las etapas del ciclo de vida escogido y, finalmente, se han extraído los datos resultantes de esta investigación.

Por último se han analizado los impactos registrados, los cuales han sido: cambio climático, acidificación terrestre, eutrofización de agua dulce, reducción de la capa de ozono, reducción de recurso fósiles, ecotoxicidad en agua dulce, toxicidad humana, radiaciones ionizantes, ecotoxicidad marina, eutrofización marina, agotamiento de recursos metálicos, transformación del medio terrestre, formación de partículas en suspensión, formación de oxidantes fotoquímicos, ecotoxicidad terrestre y agotamiento de reservas de agua.

De acuerdo a los resultados, se constata que los hormigones con árido reciclado mejoraban, relativamente poco, las prestaciones ambientales, dado que en la mayoría de los casos se obtuvo un beneficio promedio del 2% respecto al uso del árido convencional. Los resultados aun así fueron satisfactorios observando una mejora en las prestaciones ecológicas y se ha podido discretizar al mismo tiempo otras ramas de la producción que presentan mayor impacto global, como la producción del cemento y el proceso de mezclado.

Por lo tanto, se concluye que los áridos reciclados generan un efecto positivo en el material final, pero presentan valores que mejoran en poca medida su impacto ecológico frente a los hormigones de árido convencional.

1. INTRODUCCIÓN

1.1 ASPECTOS GENERALES

Los estudios relacionados con la utilización de áridos reciclados en la construcción han ido aumentando de forma paulatina en los últimos años, la búsqueda de materiales más ecológicos y las nuevas tecnologías han propiciado que el árido reciclado sea una opción realmente plausible para introducir en el mercado de la edificación de forma inmediata. La utilización del árido reciclado en la fabricación de nuevos hormigones estructurales hace posible la reducción de uso de recursos naturales, y también los espacios de almacenaje y tratamiento de escombros de la construcción.

Como material, ha habido reticencias en su uso y cada estado se ha visto obligado a sacar sus propias normativas que regulen la utilización de este nuevo material. Actualmente su utilización en hormigones de uso estructural es minoritaria y no se ha popularizado mucho debido a aspectos propios negativos de la utilización del árido el cual principalmente y en altos porcentajes en la dosificación, reduce la resistencia final en comparación a hormigones con agregados naturales. Aun así, debido a la utilización y demanda de hormigón estructural para la edificación a lo largo de todo el mundo y colocado en la actualidad como uno de los materiales más usados en la construcción; se ha incrementado la necesidad de hacer frente a los problemas que acarrea este material a lo largo de su producción, procesado, uso y reciclado. Los áridos reciclados han entrado a formar parte de una posible alternativa más amigable con el medio ambiente, de tal forma que se ha tenido que intensificar las investigaciones para lograr cuantificar y predecir sus comportamientos tanto mecánicos y físicos como sus bondades y desventajas medioambientales que generaría su utilización.

1.2 OBJETIVOS

El objetivo principal de este proyecto es estudiar y evaluar el impacto medioambiental del hormigón estructural fabricado con áridos reciclados utilizado en la construcción de edificación. Para llegar a este objetivo se desarrollara un LCI (*Life cycle inventory*) y posteriormente se procederá con el análisis LCA (*Life cycle Analysis*) de tres hormigones HA-25/B/32/IIa: un hormigón convencional de árido grueso de cantera, el cual se ha calculado la dosificación según el método ACI, un hormigón con árido grueso reciclado con la misma dosificación de mortero, agua y áridos finos que el convencional de las mismas características y sustituyendo el árido grueso natural por reciclado en un 20% del total del árido grueso tal y como se recomienda en la instrucción técnica del Real Decreto 470/2021, de 29 de junio.

Posteriormente se ha realizado el mismo análisis con un último hormigón con las mismas dosificaciones que el convencional, pero esta vez, sustituyendo el 100% del árido grueso natural por reciclado para poder cuantificar el potencial del árido en su máxima concentración. Cabe aclarar, que este último hormigón y siguiendo las recomendaciones de la anterior instrucción citada, debe ser ensayada su resistencia característica y comportamiento físico-químicos ya que puede variar cuando las concentraciones superan el 20%.

Los datos interpretados que se representaran en este estudio corresponden a los requisitos ordenados por la norma ISO 14001 que corresponde a sistemas de gestión ambiental que aboga por la protección del medio ambiente a través de la regulación de riesgos medioambientales vinculados a las actividades producidas

De este modo, en este TFG se busca alcanzar los siguientes objetivos específicos.

- Determinar la metodología y el alcance más adecuado para el estudio del impacto medioambiental del material a analizar.
- Profundizar en el estudio de los procesos de producción y uso para poder reproducir de forma precisa cada aporte en el cómputo global del material.
- Cuantificar los impactos en la sustitución del árido en las distintas dosificaciones.
- Analizar los resultados para comprobar que el hormigón reciclado exhibe cualidades mejoradas en comparación al convencional y diagnosticar qué procesos producen mayor impacto ecológico para posteriores vías de desarrollo de materiales más sostenibles.

1.3 ESTRUCTURA DEL TFG

El estudio se compone de cinco apartados que facilitan el seguimiento del proceso analítico realizado durante la investigación y finaliza al exponer las conclusiones.

En primer lugar, se inicia con el estado del arte donde se crea un marco teórico contextual, el cual muestra la actualidad de las diferentes investigaciones que se están llevando a cabo en relación a la utilización de hormigón con árido reciclado e impactos ambientales derivados. Para ello se ha llevado a cabo una búsqueda de publicaciones científicas en las que se estudian distintos puntos de partida en relación a la temática de estudio. Además se ha hecho una recopilación de normativas sobre el uso y dosificaciones del hormigón con árido reciclado y se ha puntualizado en el territorio de Cataluña, el reciclado y sistemas que se están implementando a nivel local.

En el siguiente apartado se especifican los materiales estudiados donde se especifican sus propiedades y su aportación a la mezcla final.

A continuación, se detalla la metodología escogida y se concreta el alcance de la investigación, se explican las dosificaciones utilizadas y se procede a desarrollar los procesos que intervienen en la extracción, producción, transporte, mezclado y reciclado de los diferentes compuestos que forman los flujos del hormigón a estudiar. Para llegar a un inventario de entradas y salidas del material y modelizar los ciclos a estudiar para extraer sus impactos resultantes.

Seguidamente se exponen los resultados del análisis generado en el apartado anterior, de esta forma se interpretan y analizan estos resultados obtenidos de forma individual para cada hormigón.

Finalmente se enuncian las conclusiones de la comparativa de los tres casos de estudio y se proponen a posterior diversas líneas de investigación para la continuación de este TFG.

2. ESTADO DEL ARTE

2.1 CONTEXTO TEÓRICO

Actualmente la mayor parte de las investigaciones se centran en estudiar las capacidades mecánicas de los hormigones con aporte de áridos reciclados y pocas se centran en el ámbito medioambiental de este material, aun así, ha habido algunos estudios académicos que se han centrado en identificar posibles impactos de este nuevo material, así como de la economía cíclica que conlleva la sustitución de los agregados.

El departamento de ingeniería civil de la Universidad Politécnica de Milán publicó en la tesis, [1] el impacto ambiental que generan los residuos de la construcción y la demolición en la región de Lombardía la cual daba a conocer en sus conclusiones, que los residuos generaban más impacto al ser reciclados, predominantemente por el transporte de estos, y que la utilización como áridos reciclados no compensaba de forma totalitaria el impacto total.

Un aumento de la demanda del hormigón reciclado y una gestión más eficiente generaría un balance ecológico ya que desde una perspectiva global, en el ámbito de la edificación todavía no es un material común.

El instituto superior técnico de la universidad de Lisboa también ha colaborado en la investigación de impactos de áridos reciclados, en el artículo [2] se expone el estudio detallado del uso y reciclado de este material en Portugal concluyendo, que el uso de los áridos finos contribuye en una mejora de prestaciones medioambientales y cuando la sustitución de áridos por reciclados es total, mejora linealmente.

Respecto a sus cualidades físicas también se han realizado ensayos experimentales para ver la trazabilidad de este material en la construcción para hormigones de alta resistencia. La universidad Politécnica de Cataluña ha estudiado anteriormente este material. Desde el departamento de la ingeniería de la construcción de la escuela técnica superior de caminos, canales y puertos, se realizó una investigación [3] que estudiaba las problemáticas del uso de los áridos reciclados puntualizando la expansión de estos áridos, la durabilidad, el diseño de mezclas, los problemas de los finos por disgregación del árido.

Aportando tres tesis posteriores para su mejora prestacional llevadas a cabo por Anna Sidorova, Alexandra Descarrega y Marcel Algué. [3]

El hormigón con árido reciclado en el marco nacional se ha usado principalmente en obra civil para rellenos, morteros y hormigones de baja y media resistencia y la utilización de estos áridos para hormigón estructural es más restrictivo que para cualquier otro uso.

2.2 MARCO NORMATIVO NACIONAL

El primer intento de generar una recomendación técnica para el uso de áridos reciclados en España se remonta a 1995 con la propuesta de norma sobre la utilización de granulados procedentes del machaqueo de residuos de la construcción elaborado por el ITeC, en colaboración con la Universidad Politécnica de Cataluña. En mayo de 1999 finalizó la investigación del comité técnico de la normalización y se aprobó la propuesta de norma PNE 146131.

Años posteriores, en el 2002 la Dirección General de Calidad y Evaluación Ambiental del Ministerio de Medio Ambiente publica el Catálogo de residuos utilizables en la construcción. En el año 2003 el ITeC publica la *Guía de Evaluación de los áridos reciclados procedentes de residuos de construcción* cuya finalidad es unificar los requisitos exigibles del material reciclado, los métodos de verificación y criterios para adecuarlos al uso de destino.

El profesor Enric Vázquez (UPC; Barcelona) es el primero en ahondar en España en la década de los años ochenta el uso de los áridos reciclados, que llevara a impulsarse durante los noventa y ya entrado el siglo XXI. Entre los años 2004 y 2007 se introducen nuevas miradas con estudios pre normativos que trataban temas como la utilización de los residuos de la construcción de aplicaciones estructurales financiados por el ministerio de medio ambiente. [4]

En los años sucesivos comprendidos entre el 2007 y 2010 se presentaron bajo el proyecto CLEAM y supervisado por la plataforma tecnológica española de la construcción, análisis del reciclado del RCD para usos en hormigones estructurales y no estructurales. En 2010 la junta de Andalucía publica sus recomendaciones [5] y en 2011 se publica la pre normativa del organismo del gobierno vasco con el mismo fin. Posteriormente, el Ministerio de Medio Ambiente ha redactado el Plan Nacional Integrado de Residuos (PNRI), 2008-2015, que contiene en el Anexo 6 el II Plan Nacional de Residuos de Construcción y Demolición (IIPNRCD).

Actualmente la Instrucción técnica del código estructural aprobada por Real Decreto 470/2021 [6], de 29 de junio que deroga las anteriores instrucciones del EHE-08, aunque está planteada como mejora de esta, marca una serie de recomendaciones a seguir. Cabe destacar que no se contradice con el Anejo 15 de la EHE-08 con lo que relacionada a la temática de los áridos reciclados, las dos son complementarias.

En la norma vigente se define como árido reciclado al “árido obtenido como producto de una operación de reciclado de residuos de hormigón, permitiéndose únicamente la utilización de árido grueso reciclado y en los términos recogidos en el Real Decreto 470/2021 para la fabricación de hormigón reciclado”. Para su aplicación en hormigón estructural, este Código no contempla porcentajes de sustitución superiores al 20% en peso sobre el contenido total de árido grueso. Por encima de este valor sería necesaria la realización de estudios específicos y experimentación complementaria en cada aplicación, que deberá ser aprobada por la Dirección facultativa.

Este árido grueso reciclado puede emplearse tanto para hormigón en masa como hormigón armado de resistencia característica no superior a 40 N/mm², quedando excluido su empleo en hormigón pretensado.

Y quedan fuera de este marco legal:

- Los hormigones fabricados con árido fino reciclado.
- Los hormigones fabricados con áridos reciclados de naturaleza distinta del hormigón (áridos mayoritariamente cerámicos, asfálticos, etc.).
- Los hormigones fabricados con áridos reciclados procedentes de estructuras de hormigón con patologías que afectan a la calidad del hormigón tales como álcali-árido, ataque por sulfatos, fuego, etc.
- Hormigones fabricados con áridos reciclados procedentes de hormigones especiales tales como aluminoso, con fibras, con polímeros, etc.

Los áridos se designarán, de acuerdo con el siguiente formato:

d/D - IL

Donde:

d/D Fracción granulométrica, comprendida entre un tamaño mínimo, d, y un tamaño máximo, D, en mm.

IL Forma de presentación: R, rodado; T, triturado (de machaqueo); M, mezcla.

Preferentemente, se indicará también la naturaleza del árido (C, calizo; S, silíceo; G, granito; O, ofita; B, basalto; D, dolomítico; Q, traquita; I, fonolita; V, varios; A, artificial; R, reciclado), en cuyo caso, la designación sería d/D – IL – N

El árido grueso reciclado deberá presentar una absorción no superior al 7 % y el árido grueso natural, con el que vaya a ser mezclado, no superior al 4,5 %. Para la resistencia al desgaste del árido grueso reciclado el valor del coeficiente de Los Ángeles no será superior al 40 %. Y los componentes del árido grueso reciclado, determinados de acuerdo con la norma UNE-EN 12620 deberán cumplir los requisitos recogidos en la norma.

En la norma se especifican los requisitos de composición del árido grueso reciclado que serán usados posteriormente en el apartado de modelado de flujo

Tabla 1.0 Requisitos de composición del árido grueso reciclado

Elemento	Categoría	Límite
Hormigón, mortero, material pétreo	R _{cu} 95	≥95 %
Partículas ligeras	FL ₂ -	≤2 %
Materiales bituminosos	Ra ₁ -	≤1 %
Otros materiales (arcilla, vidrio, plásticos, metales, etc.)	XRg _{0,5} -	≤0,5 %

Para porcentajes de árido grueso reciclado superiores al 20%, la densidad resultante del hormigón reciclado es inferior a la de un hormigón convencional por la menor densidad que presenta el árido reciclado, a causa del mortero que permanece adherido al árido natural.

Cuanto mayor es el porcentaje de árido reciclado utilizado menor será la densidad del hormigón. Así, para sustituciones totales del árido grueso, los descensos se sitúan entre el 5-15% de la densidad de un hormigón convencional.

Los tipos de cemento utilizados en la fabricación de hormigones con áridos reciclados serán los mismos, según la instrucción que se emplean en un hormigón convencional para las mismas aplicaciones y el tamaño mínimo permitido de árido reciclado es de 4 mm recomendables para su empleo en hormigón estructural.

Y fundamentalmente los áridos reciclados deberán presentar un contenido de desclasificados inferiores menor o igual al 10% y un contenido de partículas que pasan por el tamiz de 4 mm no superior al 5%.

Esta norma regula uno de los condicionantes más desfavorable de los hormigones de árido reciclado ya que el contenido de desclasificados suele ser superior al de los áridos naturales, ya que estos pueden ser generados después del tamizado, durante el almacenamiento y transporte debido a su mayor friabilidad, además de la fracción fina predominantemente de mortero ya comentada anteriormente. Esta característica del material es la principal causa de restringir su uso en la aplicación estructural ya que minora las cualidades físico-mecánicas.

Para hormigones con 100% en árido grueso reciclado que también se estudian en esta tesina, la norma específica que éste debe cumplir la especificación máxima del 0,25% de terrones de arcilla y un control exhaustivo en su producción para eliminar al máximo las impurezas de tierras que lleve la materia prima, y así facilitar que el árido combinado cumpla la especificación.

Los áridos reciclados normalmente incorporan impurezas y contaminantes que afectan de forma negativa en las propiedades del hormigón. Estos contaminantes pueden ser variados, como plástico, madera, yeso, ladrillo, vidrio, materia orgánica, aluminio, asfalto, etc. Estas impurezas producen en todos los casos un descenso de resistencia en el hormigón.

Además, y según la tipología de la impureza se pueden generar otros problemas como reacciones álcali-árido (vidrio), ataque por sulfatos (yeso), desconchados superficiales (madera o papel), elevada retracción (tierras arcillosas) o mal comportamiento hielo-deshielo (algunos cerámicos). Por este motivo en hormigones reciclados con sustitución igual o mayor al 20% se recomienda la utilización de aditivos que modifiquen la reología, esto mejorará la trabajabilidad, compensando la mayor absorción de agua del árido reciclado y tendrá un impacto ambiental derivado del uso de estos.[7]

La mayor porosidad del árido reciclado hace al hormigón más sensible a sufrir efectos derivados del ambiente, por lo que en dosificaciones con ambientes agresivos y en porcentajes mayores al 20%, se deberá de tener en cuenta esta característica mediante un incremento en el contenido de cemento o una disminución de la relación agua/cemento en las dosificaciones o aumentar los recubrimientos.

Dentro de sus propiedades mecánicas para porcentajes de árido reciclado superiores al 20% la normativa puntualiza dos aspectos del diagrama tensión-deformación que pueden verse afectados:

- El aumento de la deformación en la zona elástico-plástica a medida que se incrementa la proporción de áridos ya que estos se deforman más.
- La pérdida de resistencia
- Ligera reducción en la capacidad adherente

Esto hará que, como valor orientativo, el módulo del hormigón para un 100% de árido grueso reciclado, será 0,8 veces, su retracción será de 1,5 veces y la fluencia será 1,25 veces la del hormigón convencional.

2.3 MARCO NORMATIVO LOCAL

En el panorama nacional, centrando el foco en la provincia de Cataluña.

Cataluña cuenta con 71 plantas que fabrican áridos reciclados. De ellas, 27 hacen criba de los materiales de los residuos de la construcción. Otras 6 plantas son de trasvase.

En la primera figura, se muestra en la actualidad las instalaciones de gestión de runas y otros residuos de la construcción en Cataluña de los cuales se puede obtener la materia prima para la producción de árido reciclado.

En la segunda figura se pueden ver todas las plantas inscritas en la GRC (gestora de runas de Cataluña) donde se pueden ver en los tonos verdes, las instalaciones de reciclaje y limpieza de áridos).

Gráfica 1.0 Instalaciones de gestión de runas y otros residuos de la construcción en Cataluña

Gráfica 2.0 Plantas inscritas en la GRC



La Gestora de Runas de la Construcción es una empresa mixta público-privada que gestiona la mayoría de los residuos de la construcción en Cataluña a través de la red de depósitos, plantas de reciclado y plantas de transferencia, actualmente está constituida por un 45% por la agencia de residuos de Cataluña y un 55% por la Confederación Catalana de la Construcción; actualmente es el principal productor de árido reciclado en Cataluña y el cual se encarga de proveer el material.

En esta tabla se puede observar los datos promedio de (2009- 2013) de la producción total de RCD de cada comunidad autónoma en la que destaca por encima de todas Cataluña de acuerdo con los estudios hechos por el FERCD.

Tabla 2.0 Producción de áridos por comunidades [8]

CCAA	Ratio de producción (t/hab/año)	CCAA	Producción (t)	%
La Rioja	0.96	Cataluña	28703458	19
Aragón	0.8	Andalucía	25629857	17
País Vasco	0.77	Madrid	22912820	15
Cataluña	0.76	Valencia	17820382	12
Madrid	0.71	País Vasco	8460967	5
Navarra	0.7	Castilla y León	8402082	5
Valencia	0.7	Galicia	7177096	5
Castilla y León	0.66	Castilla La Mancha	6433142	4
Baleares	0.65	Canarias	5697042	4
Canarias	0.54	Aragón	5409107	3
Castilla La Mancha	0.61	Baleares	3581061	2
Andalucía	0.61	Murcia	3570640	2
Asturias	0.6	Extremadura	2302725	1
Cantabria	0.51	Asturias	3217037	2
Galicia	0.5	Navarra	2251281	1
Murcia	0.49	La Rioja	1554487	1
Extremadura	0.42	Cantabria	1472812	1

Según los datos obtenidos en el 2020 facilitados por la GRC. Esta gestiona 335.560 toneladas de tierras y 1.574.685 toneladas de escombros. El destino de estos escombros de deriva a un 42% al reciclaje y a un 58% en depósitos. Dentro de la infraestructura de tratamiento de estos residuos encontramos un 22% de plantas de transferencia, un 25% de plantas de reciclaje y un 53% de depósitos.

Según los objetivos de recuperación de residuos y los objetivos de desarrollo sostenible (ODS), la vía que sigue la Generalidad de Cataluña en estos momentos es el tratamiento de residuos para obtención de materia prima y contribuir a la economía circular. Esto ha impulsado de forma pionera en todo el ámbito nacional, que Cataluña aprobara reciente la orden [9]

Exponiendo: que los proyectos de construcción de obra pública y de obra privada determinarán el uso de áridos reciclados procedentes de la valorización de residuos de la construcción y la demolición en un porcentaje mínimo del 5% en peso sobre el total de áridos previstos.

Paralelamente, el mismo artículo contempla que se establecerán mediante orden, los requisitos para la utilización de los áridos reciclados y de los materiales de construcción obtenidos como producto de una operación de valorización de residuos de la construcción y la demolición.

Para llevar a cabo esta orden se ha publicado en marzo de 2021 la *Guia per al compliment de l'ús del 5% d'àrids reciclats als projectes de construcció*; [10] que da directrices sobre el cálculo de sustitución del árido, la expedición del certificado de utilización de áridos reciclados (CUAR) y el certificado de suministro de áridos reciclados (CSAR) y siempre bajo las recomendaciones de la Instrucción técnica del código estructural nacional.

2.3 MARCO NORMATIVO INTERNACIONAL

En el ámbito europeo el sector de la construcción, fue uno de los primeros focos de actuación al resultar prioritario en la producción de problemáticas ambientales. Actualmente y según el Centro de Contacto Europe Direct, los RCD generan el mayor flujo de residuos de la unión europea presentando un tercio del total de residuos.

Esta implicación de parte de la comisión se ha visto reforzada en el Pacto Verde Europeo y en el Nuevo Plan de Acción para la Economía Circular, adoptado a finales de marzo de 2020 que generan un marco legal para la producción sostenible y promover su uso circular.

Cada país miembro ha generado normativas distintas y otros países como Japón, Australia o Brasil se han unido a estas directrices.

El proyecto de norma japonesa, [11] se pueden diferenciar dos tipologías según su uso: en obra civil o en edificación. Dentro de estas categorías, se disgregan las clasificaciones de los áridos según aplicaciones: el árido tipo uno de uso estructural, tipo dos para hormigones en masa y tipo 3 para hormigones pobres.

La normativa belga [12] está basada a las recomendaciones de la RILEM (The International Union of Laboratories and Experts in Construction Materials, Systems and Structure), diferenciando dos grupos de áridos reciclados, GBSB-I y GBSB-II, El primer tipo corresponde a compuestos producidos principalmente de escombros de fábrica de ladrillo mientras que el GBSB-II correspondería a áridos procedentes de escombros de hormigón.

Desde 2008, la norma europea para Áridos para hormigón, NBN EN 12620 [13], contiene algunas cláusulas explícitas para el reciclado de agregados; además de aspectos sobre el contenido de cloruros y sulfatos, se están desarrollando nuevos métodos de identificación para evaluar la composición de los áridos reciclados. Para el hormigón estructural, el anexo belga, está en revisión y contendrá algunos aspectos sobre el uso de áridos reciclados. El proyecto de versión actual menciona la asignación de sustitución para un 20% de árido de hormigón por reciclado, comúnmente aceptado en la UE.

La norma inglesa [14] basada en el eurocódigo también pone limitaciones de uso de áridos reciclados en porcentaje en masa sobre el árido natural. Según la ley BS 8500, en un 20% para hormigón armado, y también especifica porcentajes para pavimentos (0%), soleras en ambiente agresivo (0%), rellenos de zanjas no armados (100%) y firmes de carreteras (100%). Hace distinción entre el árido procedente del hormigón (RCA) y árido reciclado procedente de materiales cerámicos (RA).

Las impurezas del árido reciclado están reguladas según la norma BS 8500-2 y resultan menos restrictivas que las españolas:

Tabla 3.0 Las impurezas del árido reciclado Norma Inglesa [14]

Elemento	Categoría	Límite
Hormigón, mortero, material pétreo	R _{cu} 90	≥ 90 %
Partículas ligeras	FL ₂ -	≤ 2 %
Materiales bituminosos	Ra ₅ -	≤ 5 %
Otros materiales (arcilla, vidrio, plásticos, metales, etc.)	XRg ₁ -	≤ 1 %

3. MATERIALES

En este apartado se especifican los materiales utilizados en el análisis de impacto ambiental para las distintas dosificaciones. A continuación, se describirán sus propiedades.

3.1 TIPIFICACIÓN DE MATERIALES

3.1.1 Cemento:

El cemento utilizado para realizar el análisis fue el Cemento Portland CEM I 32,5N cumpliendo con las recomendaciones del ANEJO 4° Recomendaciones para la selección del tipo de cemento a emplear en hormigones estructurales.

Tabla 4.0 Extracto del Anejo 4 Código estructural, Recomendaciones de cemento [7]

CLASE DE EXPOSICIÓN	TIPO DE PROCESO (agresividad debida a)	CEMENTOS RECOMENDADOS
I	Ninguno	Todos los recomendados según la aplicación prevista
II	Corrosión de las armaduras de origen diferente de los cloruros	CEM I, cualquier CEM II (preferentemente CEM II/A), CEM III/A, CEM IV/A.
III (*)	Corrosión de las armaduras por cloruros de origen marino	Muy adecuados los cementos CEM II/S, CEM II/V (preferentemente los CEM II/B-V), CEM II/P (preferentemente los CEM II/B-P), CEM II/A-D, CEM III, CEM IV (preferentemente los CEM IV/A) y CEM V/A
IV	Corrosión de las armaduras por cloruros de origen no marino	Preferentemente, los CEM I y CEM II/A y, además, los mismos que para la clase de exposición III.
Q (**)	Ataque al hormigón por sulfatos	Los mismos que para la exposición III
Q	Lixiviación del hormigón por aguas puras, ácidas, o con CO2 agresivo	Los cementos comunes de los tipos CEM II/P, CEM II/V, CEM II/A-D, CEM II/S, CEM III, CEM IV y CEM V
Q	Reactividad álcali-árido	Cementos de bajo contenido en alcalinos (**)(óxidos de sodio y de potasio) en los que $(Na_2 O)_{eq} = Na_2 O (\%) + 0.658 K_2 O (\%) < 0.60$

APLICACIÓN	CEMENTOS RECOMENDADOS
Hormigón en masa	Todos los cementos comunes, excepto los tipos CEM II/A-Q, CEM II/B-Q, CEM II/A-W, CEM II/B-W, CEM II/A-T, CEM II/B-T y CEM III/C Cementos para usos especiales ESP VI-1 (*)
Hormigón armado	Todos los cementos comunes excepto los tipos CEM II/A-Q, CEM II/B-Q, CEM II/A-W, CEM II/B-W, CEM II/A-T, CEM II/B-T, CEM III/C, CEM V/B
Hormigón pretensado incluidos los prefabricados estructurales	Cementos comunes (**) de los tipos CEM I, CEM II/A-D, CEM II/A-V, CEM II/A-P y CEM II/A-M (V-P) (***)

3.1.2 Áridos:

Los áridos utilizados para las dosificaciones del hormigón convencional y reciclado fueron los siguientes:

Áridos Finos:

Para el modelado de los procesos del hormigón se utilizó un tipo de árido fino natural: Arena de río 0/2mm

Áridos Gruesos:

Los áridos gruesos naturales utilizados para la dosificación de los hormigones fueron: Grava calcárea Triturada 2/32 mm

Los áridos gruesos reciclados utilizados se obtuvieron a partir de un 70% a 90% de la masa total de hormigón original. Su densidad se sitúa entre 2,07-2,65 kg/dm³ en su densidad real estableciendo este dato como control de calidad. [4]

Debido a la propiedad de una capacidad de absorción mayor, es recomendable saturarlos antes de proceder al mezclado con la intención de controlar la relación a/c. Se recomienda conseguir un nivel de humedad del 80% respecto a su absorción total y no llegar al 100% para evitar bajar la adherencia entre el árido reciclado y la mezcla.

3.1.3 Aditivos

Debido a las recomendaciones propuestas en el Anejo 15 del código estructural EHE 08 se utilizaron aditivos tanto en las mezclas con áridos reciclados como en las que no. En todas las dosificaciones se utilizaron aditivos superplastificantes que se añaden agentes antiespumantes y conservantes como componentes menores y auxiliares. La concentración de sustancia activa se encuentra entre 10 y 40% en masa. Los datos del superplastificante utilizado se obtuvieron de European Federation of Concrete Admixtures Associations a.i.s.b.l.(EFCA) [15]

La lista de proporciones en masa de los materiales constituyentes y auxiliares:

Lignosulfonato: máx. 40 %

Sulfonato de naftaleno: máx. 40 %

Sulfonato de melamina: máx. 45 %

Policarboxilato: máx. 45 %

Poliarileter máx. 35 %

Na-gluconato máx. 35 %

Aditivos: máx. 5 %

Agua: aprox. 55 - 75 %

4. METODOLOGÍA Y FORMACIÓN DE FLUJOS

En este apartado se explicará con profundidad la metodología escogida para llevar a cabo el estudio. Se definirá el análisis de ciclo de vida, el alcance de la investigación, los procesos que se han estudiado y los flujos de materia y energía consecuentes de estos.

4.1 Introducción a la metodología de análisis.

El análisis de ciclo de vida (ACV) (life cycle assessment) (LCA) en inglés, es un método descrito en la norma ISO 14040 [16] utilizado para evaluar el impacto ambiental asociado a un producto o proceso, organizando y haciendo una recopilación en forma de inventario las entradas y las salidas de energía y materia necesarias y relevantes para la muestra.

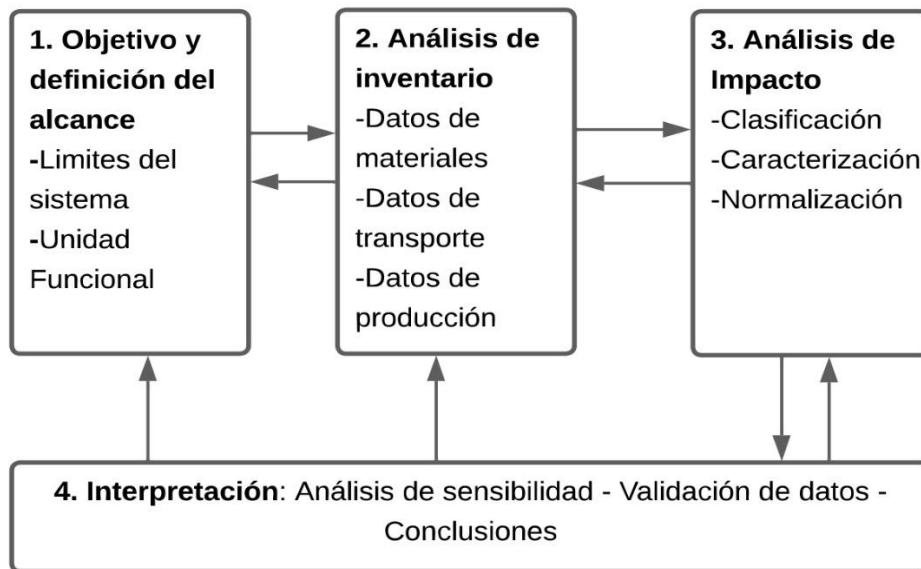
La estructura del análisis se presenta en cuatro fases:

La primera es la definición del alcance de la investigación, en el cual se definirá el material final a estudiar y los límites de entradas y salidas que intervienen en el proceso de la formación de este.

El inventario se realizará posteriormente en el cual, quedan cuantificados y recogidos todos los insumos (entradas) y todas los productos o emisiones ambientales producidas (salidas) ligados al sistema evaluado.

La fase final será la evaluación del impacto (EICV), en este punto, se buscará evaluar la trascendencia potencial de los impactos estudiados con anterioridad. En esta fase se incluyen los siguientes campos de estudio: la clasificación de las categorías de impacto ambiental, los indicadores de estas y los modelos de representación como fase previa, la relación de los resultados obtenidos en el análisis con las categorías de impacto escogidas y una última etapa de medición (caracterización) donde se calcularán numéricamente los indicadores de la categoría.

Gráfica 3.0 Estructura de ACV:



4.2 OBJETIVO Y DEFINICIÓN DEL ALCANCE

Este proyecto establece una comparativa ACL del hormigón con árido reciclado en distintas proporciones y un hormigo convencional analizando también las distintas materias primas y el transporte y producción. En este caso, la problemática de la asignación se ha evitado mediante la expansión y sustitución del sistema.

4.2.1 SISTEMA DEL PRODUCTO

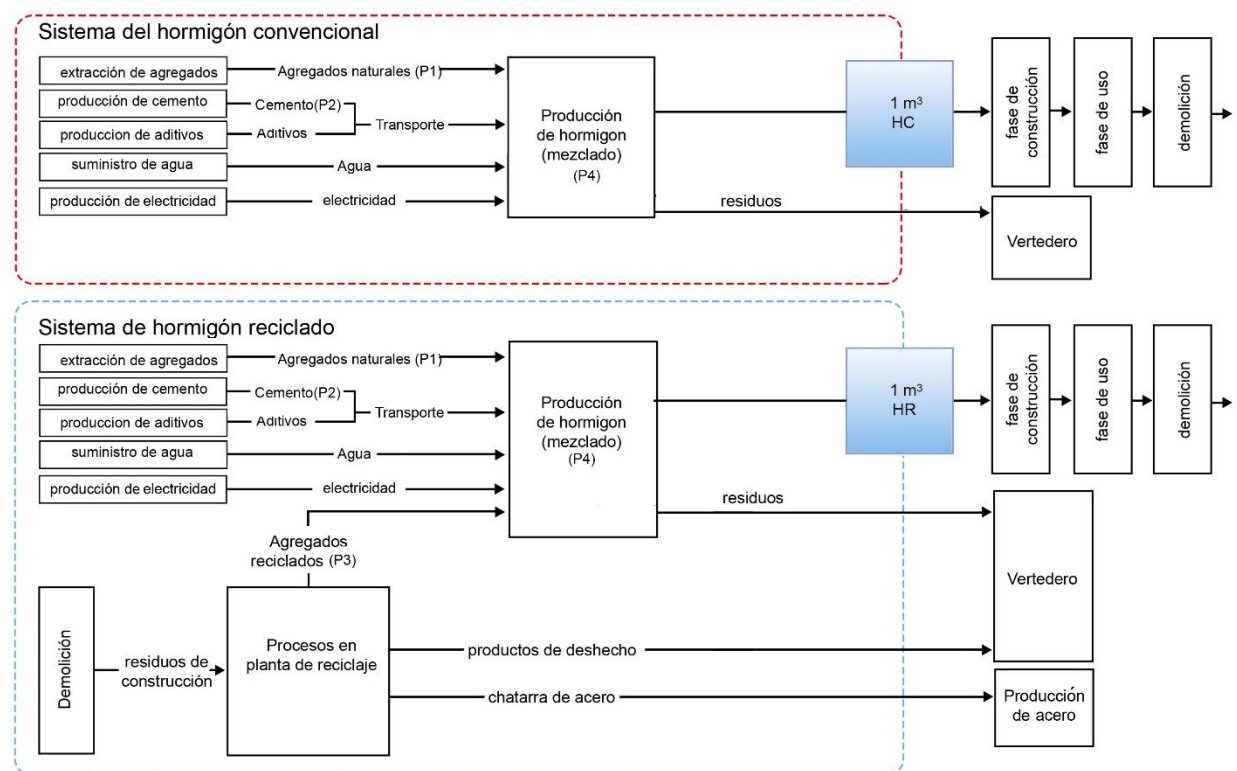
El sistema del producto se define como el conjunto de sistemas individuales que, relacionados en materia y energía, representan la existencia del producto en la tecnosfera y sus interacciones con el medio ambiente. Es el cómputo global de procesos lo que se utiliza como modelo para estudiar el ACV. Su representación es un diagrama de procesos interconectados por flujos.

El alcance del estudio es definido por los límites del sistema, en este caso se ha realizado un alcance de “cuna a puerta” en el cual se ha introducido dentro del estudio todos los procesos que se llevan a cabo desde la extracción de las materias primas hasta el producto como material de mercado.

Las decisiones seguidas para fijar estos límites radican en los objetivos del estudio, se decide estudiar una comparativa entre hormigones de distintas dosificaciones de árido grueso reciclado por sustitución al natural en porcentaje de masa y un hormigón convencional de las mismas propiedades prestacionales, esto hace irrelevante un alcance de “cuna a tumba” ya que los procesos de uso, mantenimiento y reciclado posterior son iguales para todos los casos y no aportarían diferencias sustanciales respecto a la vida útil del material.

En este diagrama del sistema se reflejan las dos tipologías del proceso del estudio y el alcance de estos en un marco grafiado con líneas discontinuas. Han quedado fuera del alcance también la producción de acero reciclado y la acumulación de residuos en el vertedero.

Gráfica 4.0 Diagrama del sistema y alcance:



4.2.2 FUNCIÓN DEL SISTEMA, UNIDAD FUNCIONAL Y FLUJO DE REFERENCIA

Al haber realizado un análisis comparativo, la función del producto es la cualidad principal comparativa, que es la razón de su producción, por ende, las capacidades operativas del producto tienen que ser descritas e identificadas. En este caso, solo son comparables las unidades funcionales que tengan la misma utilidad comparando únicamente hormigones estructurales de características mecánicas y físicas similares dentro de la instrucción del código estructural. Como unidad funcional se escoge el material hormigón (HC y HR) y se realizan las dosificaciones para la producción de este y como flujo de referencia se define un metro cubico para ambos.

4.2.3 DOSIFICACIONES

Tres tipos de mezclas de hormigón se clasificaron en relación a su composición: una primera de hormigón convencional con árido natural y dos mezclas de hormigón con árido grueso reciclado al 20% y al 100%). Se describieron de acuerdo a la norma europea EN206-1. [17]

Las dosificaciones se calcularon según el American Concrete Institute (ACI) [18], ampliamente utilizado a nivel global. Las mezclas obtenidas corresponden con un Hormigón HA-25/B/32/IIa

La dosificación calculada para el hormigón convencional fue usada como base para producir el hormigón con áridos reciclados reemplazando el porcentaje en peso escogido de árido natural calculado por árido reciclado. Cabe destacar que para que las dosificaciones superiores al 20% de árido grueso puedan llevarse a la práctica, las propiedades mecánicas no están recopiladas en la normativa y sería necesario realizar ensayos mecánico-físicos para definir las características precisas de la mezcla.

Los materiales usados para la elaboración de las mezclas de hormigones fueron cemento tipo: CEM I 32,5N, agua depurada, grava calcárea, arenas, árido grueso reciclado y aditivos superplastificantes. El árido reciclado se produjo totalmente por hormigón reciclado cumpliendo los estándares EN 933-11[19]

Según las recomendaciones del código estructural EHE-08 en relación a las propiedades de durabilidad, para la clase de exposición II se detalla una proporción de agua cemento (a/c) de como poco 0,6 y un mínimo contenido de cemento de 300 Kg/m³ para hormigón armado.

También se recomienda que el hormigón tenga una resistencia característica a compresión (f_{ck}) de al menos 25 N/mm². Las dosificaciones calculadas para un metro cubico de mezcla se muestran en la tabla y cumplen todas estas especificaciones. Las densidades fueron obtenidas de datos de la universidad de Cantabria [20]

Tabla 5.0 Dosificaciones calculadas

Tipo de Hormigon	Agua/ cemento	Cemento (kg)	Arido fino (kg)	Arido grueso (kg)	Arido reciclado	Superplast. (kg)	Agua (kg)
HC	0,6	300	480	1440	0	6	180
HR 20%	0,6	300	480	1152	288	6	180
HR 100%	0,6	300	480	0	1440	6	180
Densidad relativa (kg/dm ³)		3,1	2,6	2,6	2,4	1,3	1

4.3 ANÁLISIS DE INVENTARIO DE CICLO DE VIDA (ICV)

La producción del inventario de ciclo de vida imputa a cada proceso del sistema todos los aspectos ambientales originados por este. Con lo cual, en esta fase se recopilan todos los datos correspondientes a las entradas y salidas para cada uno de los procesos del sistema que estén incluidos dentro del alcance. Los aspectos medioambientales se cuantifican e identifican como cargas. Dando lugar a un sumario de sustancias y flujos elementales que estarán referenciados a la unidad funcional (1m³ de hormigón).

4.3.1 REGLAS DE ASIGNACIÓN

Muchos procesos dentro de un mismo sistema requieren la asignación de las cargas ambientales, con lo cual es conveniente generar unos criterios de asignación si estos se necesitan. Los procesos de forma regular, generan varios productos a la vez (sistemas de producción conjunta) por lo que no siempre es directa la asignación o imputación de estos. Con lo cual es necesaria la asignación de porcentajes de las cargas generales a cada producto.

Esto lleva a la problemática de las asignaciones en los ACV ya que es difícil determinar la asignación. La forma de modelar el sistema de los productos debe mantener intactos los balances de masa, energía y valor monetario para que sea aplicable.

En análisis de ciclo de vida debe quedar reflejando plenamente las causalidades físicas y económicas, sobre la base de relaciones empíricas en lugar de suposiciones normativas y puntos de corte arbitrarios. Esto también implica intentar evitar la asignación (particionamiento) de sistemas con producción conjunta de coproductos ya que este es un procedimiento que por sus características elimina del cómputo del sistema ciertos productos inherentes al procesado y, por lo tanto, puede arrojar resultados erróneos.

La norma ISO 14040 [16] establece las siguientes pautas: Se debe evitar o minimizar al máximo el uso de asignaciones subdividiendo los procesos en otros más elementales, redefiniendo la unidad funcional (incluyendo los coproductos o funciones adicionales en la unidad de análisis) o recurriendo a la expansión del sistema. Esta última opción consiste en usar las emisiones de un producto alternativo que comprende la misma unidad funcional que el coproducto para estimar las emisiones asignadas de este coproducto.

En el caso de este trabajo, la expansión del sistema ha consistido en imputar a la producción del hormigón todas las cargas ambientales de la producción de materias primas y restarle los impactos asociados a la producción de elementos que no entran dentro del sistema de estudio como por ejemplo el acero reciclado.

4.3.2 RECOPIACIÓN DE DATOS DE INVENTARIO

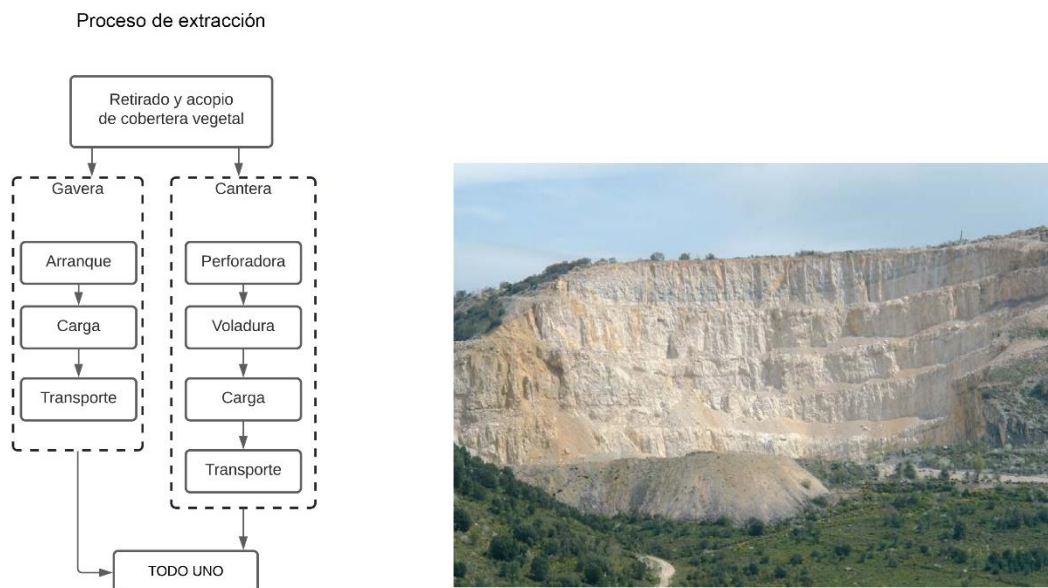
En este estudio se han utilizado dos tipologías de datos: datos de actividad y factores de emisión. Los datos de actividad corresponden a todos los insumos y productos del ciclo de vida de la mezcla de hormigón estudiada como materias primas materiales y energéticas, coproductos y transporte. A continuación, se detallarán todos los flujos que se han modelado en el sistema, así como todas las entradas y salidas de cada subgrupo.

4.3.3 ÁRIDOS NATURALES: se hace una distinción entre los áridos gruesos y finos que han salido como coproductos del proceso de producción de áridos. Los datos del subsistema han sido extraídos de estas bases de datos:

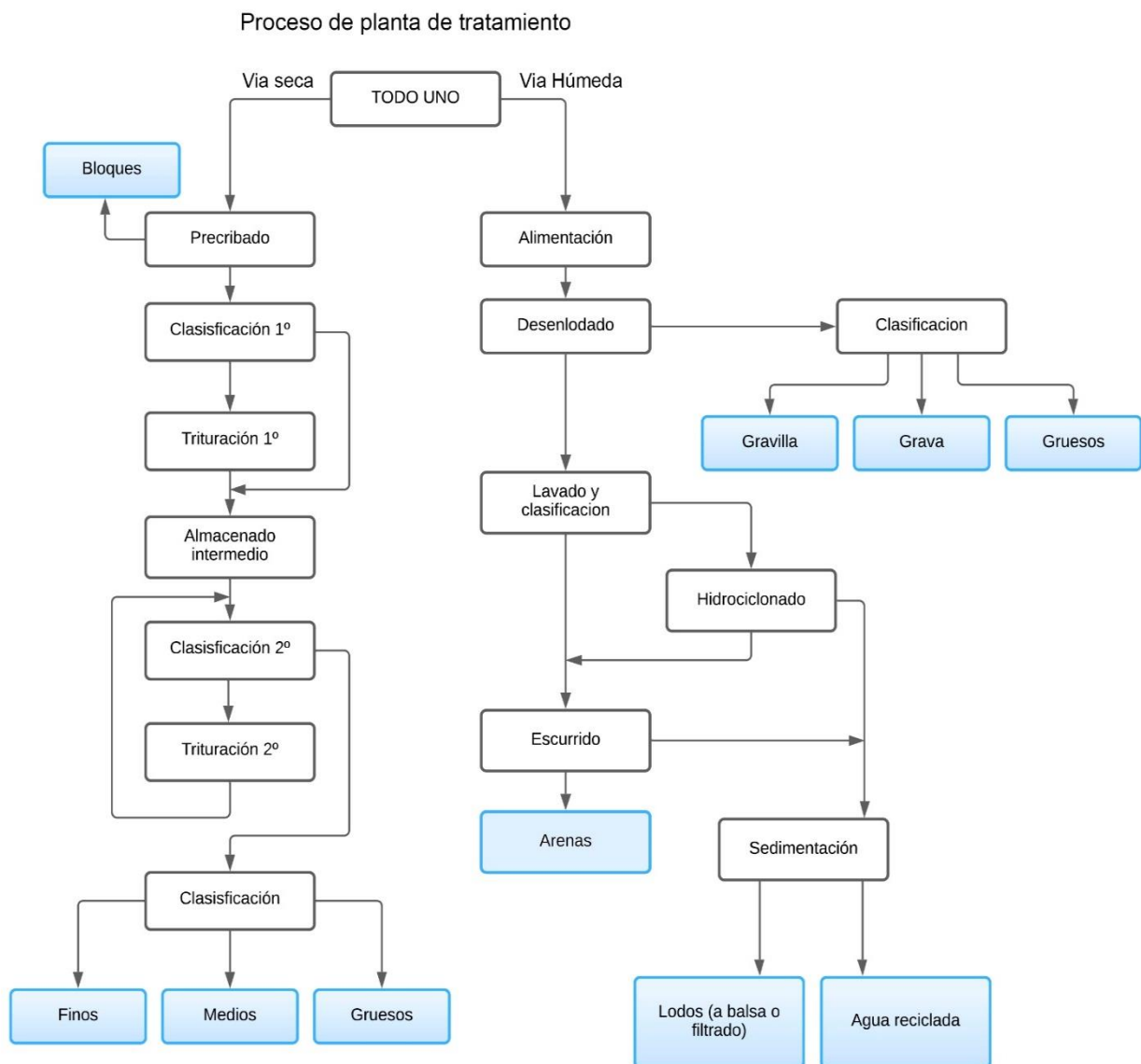
- *Ökologische Bilanzierung von Baustoffen und Gebäuden, 2000*[21]
- *Waschen und Entwässern. Immer wichtiger bei der Aufbereitung von Kies, Sand und Naturstein, 2000*[22]
- *Baustoff Atlas, 2005*[23]
- *Natürliche Zuschläge im Netzwerk Lebenszyklusdaten, 2007*[24]
- *GaBi databases*[25]

El sistema de producción se ha modelizado a través de los datos facilitados por la Sociedad de Investigación y Explotación Minera de Castilla y León (SIEMCALSA) [26]. En el diagrama de procesos se puede ver el alcance y los flujos que se han estudiado para este ACV en el apartado de áridos naturales:

Grafica 5.0 Proceso de extracción del arido natural y cantera



Grafica 6.0 Diagrama de subsistema de planta de tratamiento de áridos naturales estudiado:



Con relación a la procedencia, se han estudiado áridos naturales procedente del machaqueo siguiendo las etapas: arranque, trituración, molienda y clasificación de forma sintética.

Los procesos por vía húmeda aumentan la finura y el grado de calidad propia de los finos en cambio por vía seca se comercializan materiales con menos intensidad en el control de calidad y de granulometría superior esto hace tener en cuenta ambos procesos y sus aportaciones a la biosfera.

4.3.4 ÁRIDOS RECICLADOS: Los áridos reciclados estudiados han sido de procedencia única de hormigón reciclado y se ha modelado de forma manual específicamente para este estudio ya que el material no se encontraba en la base de datos utilizada (Gabi database) [25]. Para la modelización del subsistema se ha tenido en cuenta las emisiones recogidas y los impactos generados a continuación.[27], [28]

Tabla 6.0 Emisiones e Impactos generados por la producción de áridos reciclados

Flujo emisiones y insumos	Magnitud	Cantidad	Unidad
recycled aggregates [Minerals]	Mass		1 kg
Butane (n-butane) [Group NMVOC to air]	Mass	3,62E-07	kg
Carbon dioxide [Inorganic emissions to air]	Mass	0,00124	kg
Carbon monoxide [Inorganic emissions to air]	Mass	2,39E-06	kg
Dinitrogen monoxide [ecoinvent long-term to air]	Mass	1,55E-08	kg
Dust (PM2.5 - PM10) [Particles to air]	Mass	4,32E-07	kg
Nitrogen oxides [Inorganic emissions to air]	Mass	8,20E-06	kg
NMVOC (unspecified) [Group NMVOC to air]	Mass	4,32E-07	kg
Sulphur dioxide [Inorganic emissions to air]	Mass	2,09E-06	kg
Energy unpecific [Energy resources]	Energy (net calorific value)	0,008	MJ

Categorías de Impacto	Recepcion Residuos	Molienda	Separacion Magnetica	Lavado	Segunda molienda	Transporte almacenaje	Total
Global Warming kg CO2 eq	2,30E-01		7,72E-03	1,92E+00	6,59E-02	1,96E-01	2,42E+00
Eutrophication kg PO4 eq	7,22E-05		1,60E-06	5,25E-04	1,37E-05	9,27E-05	7,05E-04
Acidification kg SO2 eq	2,78E-04		6,16E-06	1,06E-02	5,26E-05	1,22E-03	1,21E-02
Photo-oxidant formation kg ethylene eq	1,70E-05		4,12E-07	6,05E-04	3,52E-06	1,74E-04	8,00E-04
Human toxicity kg 1,4-DB eq	1,08E-12	9,43E-02	4,39E-04	1,39E-01	2,14E-02	2,24E-02	2,77E-01
Freshwater Aquatic Ecotoxicity kg 1,4-DB eq	6,19E-12		4,65E-18	2,86E-03	3,97E-17	1,96E-03	4,81E-03
Marine Aquatic Ecotoxicity kg 1,4-DB eq	1,83E-10		2,59E-17	9,32E+01	2,21E-16	3,05E+01	1,24E+02
Terrestrial Ecotoxicity kg 1,4-DB eq	1,04E-12		4,40E-19	1,37E-03	3,76E-18	8,62E-04	2,23E-03
Ozone Layer Depletion kg R11 eq				2,80E-07			2,80E-07

Se han generado los flujos internos de procesado siguiendo el esquema de procesados de áridos reciclados facilitado por la empresa del Planta de Les Franqueses del Vallès.

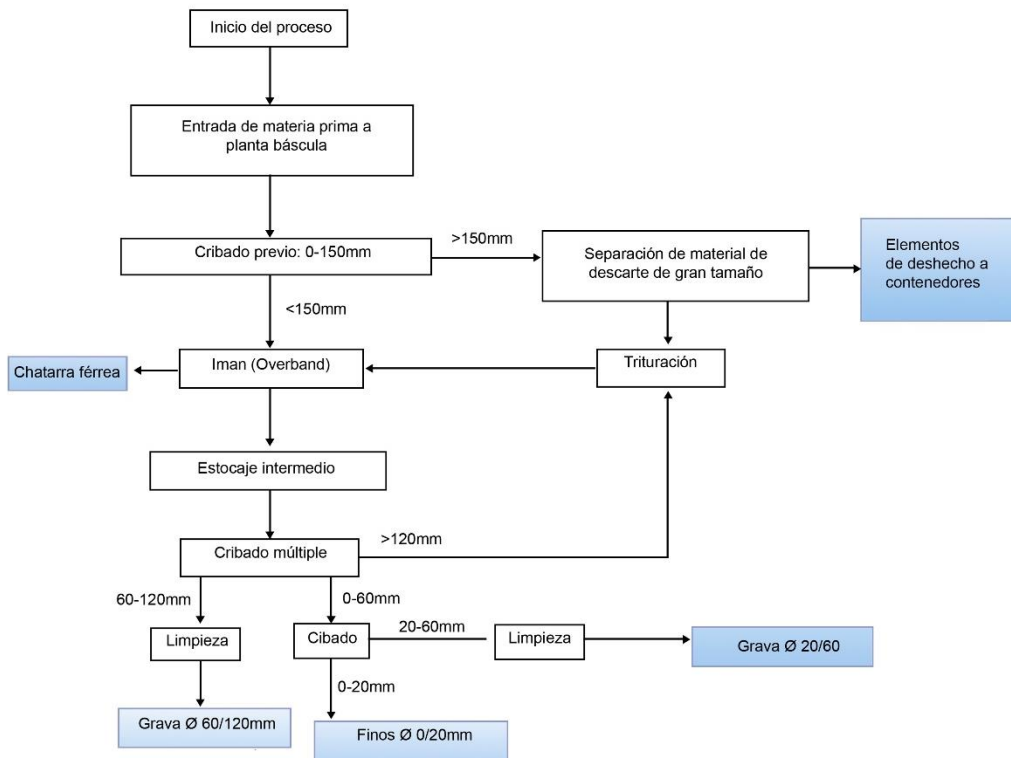
Esta se distribuye en tres zonas y cada estación se asocia a cada uno de los tres procesos comúnmente utilizados para la obtención de áridos reciclados.

Consta de una zona de recepción donde se sitúa la báscula que se encargara de cuantificar el peso de los productos de demolición. Después la zona de procesado se subdivide en un ámbito de procesado de tratamiento primario, donde se genera la alimentación, pre cribado, selección de voluminosos, área de trituración y separación de productos metálicos con Over-band.

Posteriormente se realiza el tratamiento secundario donde se utilizan dos cribados iniciales, uno manual a posterior y un tercer cribado final. Los procesos finales intervienen en limpieza. Con una separación por aire, otro por flotación y una cinta de transporte final. Este proceso se realiza en planta fija.

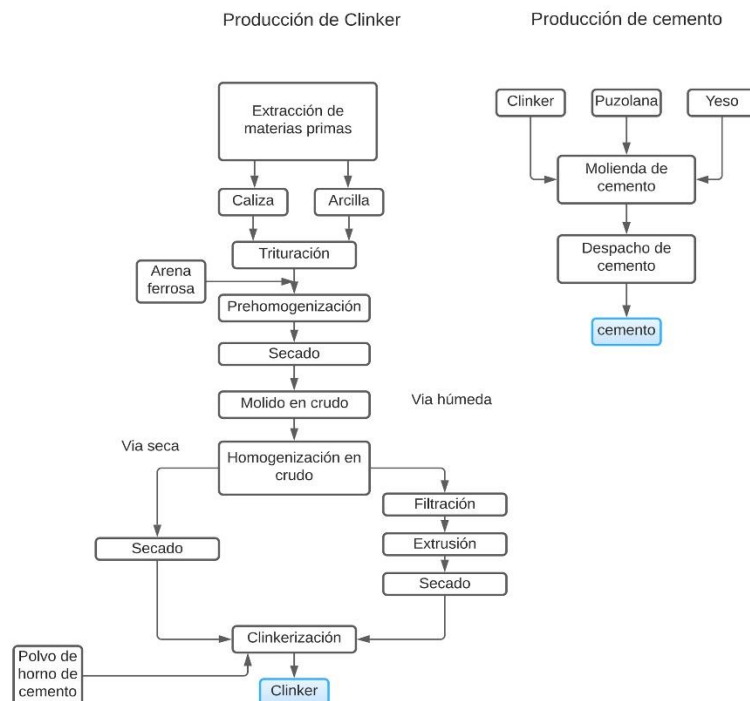
El alcance del subsistema no ha tenido en cuenta la producción de acero originado de chatarra y los elementos de deshecho. Se ha seguido los flujos que se pueden observar en diagrama:

Gráfica 7.0 Proceso de reciclaje del RDC



4.3.5 CEMENTO: Se ha realizado el estudio del material especificado Cemento Portland CEM I 32,5N. Los datos del subsistema han sido extraídos de la fuente: *CEMBUREAU, the European Cement Association*[29]. El subsistema ha seguido los flujos y alcance descritos [30].

Gráfica 10. Diagrama de producción de Cemento



4.3.6 ADITIVOS: Se ha realizado el estudio del material especificado para superplastificantes de base de sulfonatos y policarboxilatos. Los datos del subsistema han sido modelados ex profeso para el análisis a partir del ACV de la EFCA [15] y se ha realizado el inventario de este, descrito en la tabla:

Tabla 7.0 ACV de Superplastificantes aditivos del hormigone

Magnitud LCA Superplastizier production phase	Cantidad	Unidad
ReCiPe 2016 v1.1 Midpoint (I) - Marine Eutrophication	0,00192	kg N eq.
ReCiPe 2016 v1.1 Midpoint (I) - Freshwater Eutrophication	7,95E-07	kg P eq.
Primary energy from renewable resources (gross cal. value)	2,2	MJ
Primary energy from non renewable resources (gross cal. value)	28,5	MJ
EF 3.0 Eutrophication terrestrial	0,00592	Mole of N eq.
EF 2.0 Photochemical ozone formation - human health	0,00164	kg NMVOC eq.
CML2001 - Nov. 2010, Global Warming Potential (GWP 100 years)	1,53	kg CO2 eq.
CML2001 - Nov. 2010, Acidification Potential (AP)	0,00154	kg SO2 eq.
CML2001 - Jan. 2016, Ozone Layer Depletion Potential (ODP, steady state)	5,83E-15	kg R11 eq.
10 EN15804+A1 Use of net fresh water (FW)	0,00557	m3
07 EN15804+A1 Abiotic depletion potential for fossil resources (ADPF)	28,5	MJ
06 EN15804+A1 Abiotic depletion potential for non fossil resources (ADPE)	1,53E-07	kg Sb eq.
03 EN15804+A1 Radioactive waste disposed (RWD)	0,000696	kg
02 EN15804+A1 Non-hazardous waste disposed (NHWD)	0,0279	kg
01 EN15804+A1 Hazardous waste disposed (HWD)	1,35E-08	kg

4.3.7 TRANSPORTE: las distancias del transporte de la planta de producción del cemento y los aditivos a la planta de producción y mezclado del hormigón se han estimado de 75 a 100 km de media general cuantificado en base a estudios de transporte ACV. [31] [32]

El vehículo de transporte utilizado para el análisis se describe como modelo: Ttuck-trailer euro 4,28-34t/ capacidad de 22 ton

Los datos del subsistema han sido modelados ex profeso para el análisis a partir del ACV extraído de las fuentes [33] [34] [35] [36]

4.3.8 PLANTA DE PROCESADO Y MEZCLADO: La planta de procesado y mezclado del hormigón ha sido modelada tomando como referencia las emisiones estudiadas en la tesis: *Life Cycle Environmental Impact Assessment of Concrete* [37] y se ha generado el diagrama de procesos teniendo la misma fuente de referencia.

Gráfica 11. Diagrama de producción y mezclado del hormigón

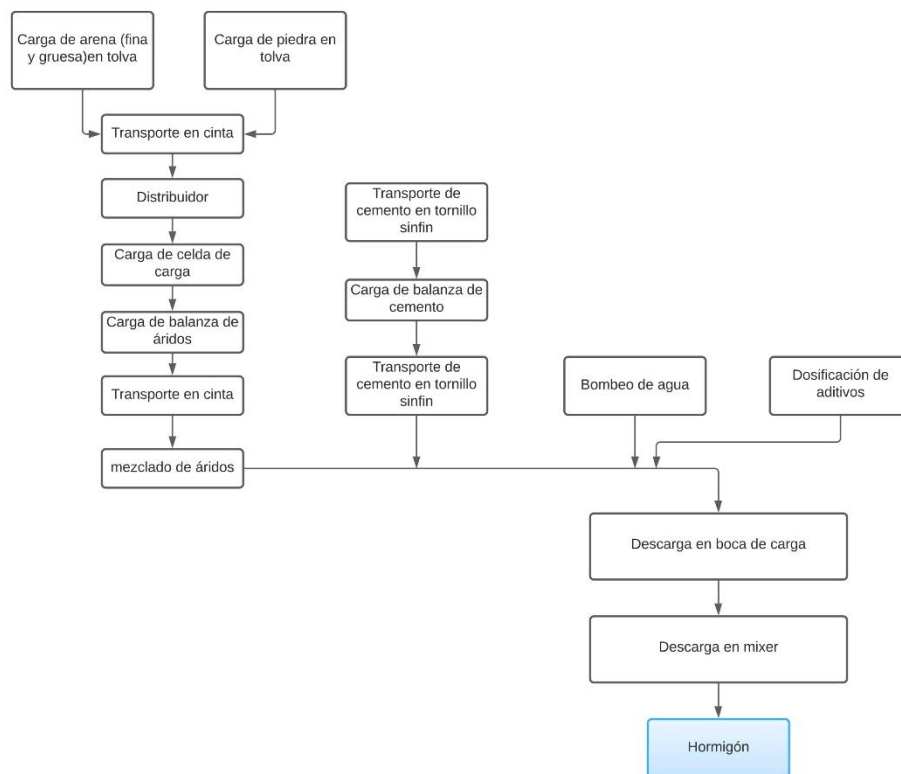


Tabla 8.0 Inventario de emisiones de planta de producción y mezclado de hormigón por 1m3 de mezcla:

Parametros de flujo	Magnitud	Cantidad	Unidad
Dust (> PM10) [Particles to air]	Mass	0,012	kg
Hydrocarbons (unspecified) [Organic emissions to air (group VOC)]	Mass	2,31E-05	kg
Sulphur oxides [Inorganic emissions to air]	Mass	0,0988	kg
Dinitrogen monoxide [ecoinvent long-term to air]	Mass	2,91E-05	kg
Butane (n-butane) [Group NMVOC to air]	Mass	0,000433	kg
Carbon dioxide [Inorganic emissions to air]	Mass	5,7	kg
Carbon monoxide [Inorganic emissions to air]	Mass	0,000723	kg
NMVOC (unspecified) [Group NMVOC to air]	Mass	7,10E-05	kg
Nitrogen oxides [Inorganic emissions to air]	Mass	0,0132	kg
Hydrogen chloride [Inorganic emissions to air]	Mass	0,00268	kg

4.3.9 SUMINISTRO ELÉCTRICO: La combinación de consumo de electricidad específico nacional o regional se obtiene mediante la conversión de los diferentes sectores energéticos a electricidad e importaciones de países vecinos. Los datos utilizados provenientes de combinación de proveedores de energía nacional/regional (excluidas las importaciones de electricidad) han sido extraídas de la base de datos del software para análisis de ciclo de vida GaBi (GaBi database)

La electricidad se produce en centrales eléctricas específicas de portadores de energía y/o centrales combinadas de calor y electricidad (CHP).

También se consideran los estándares tecnológicos específicos nacionales y regionales de las centrales eléctricas en lo que respecta a la eficiencia, la tecnología de combustión, la desulfuración de gases de combustión, la eliminación de NOx y la eliminación de polvo. La electricidad proporcionada por fuentes de energía renovables no combustibles también considera la situación nacional o regional, como la radiación solar (fotovoltaica), las horas anuales de carga completa (energía eólica) y la participación de las centrales hidroeléctricas por tipo (pasada, almacenamiento y almacenamiento por bombeo).

Grafica 12. Porcentaje de electricidad de mezcla en España en 2016 (Gabi database) [25]

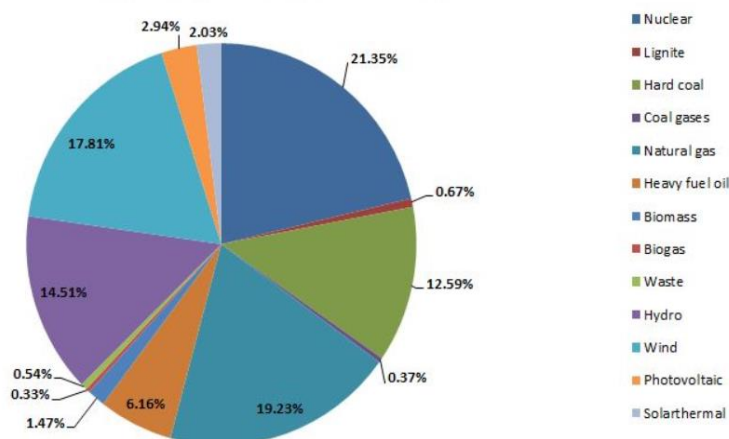


Tabla 09. Emisiones utilizadas para el cómputo global de salidas (Gabi database): [25]

Suministros de energía en España 2006	Antracita	Lignito	Gas de coque	Gas Natural
C02 Emisiones [kg/TJ fuel input]	96100,0	101000,0	225000,0	56185,0
CO Emisiones [kg/TJ fuel input]	14,0	45,0	35,4	19,0
S02 Emisiones [kg/TJ fuel input]	197,6	325,9	0,0	0,5
NoX Emisiones [kg/TJ fuel input]	162,0	163,0	29,0	24,0
Cuota de electricidad del plan CHP (%)	0,0	0,0	0,0	0,0
Eficiencia de planta electrica (%)	38,0	37,5	37,0	58,2
Eficiencia de plantas CHP plan J (%)	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
Porcentaje de la electricidad a la energía térmica dentro de la planta CHP (%)	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
Pérdidas de distribución de red relacionadas con un suministro eléctrico de	9,5	9,5	9,5	9,5
Pérdidas de distribución relacionadas con el suministro de electricidad de 1-60	30,0	30,0	30,0	30,0
Eficiencia energetica de plantas termicas (%)	100,0	100,0	100,0	100,0
Eficiencia termica de plantas termicas de produccion (%)	85.0 ; 90.0 ;	85.0 ; 90.0 ;	85.0 ; 90.0 ;	85.0 ; 90.0 ;
Proporción de centrales eléctricas refrigeradas de circuito cerrado (%)	64,1	64,1	64,1	64,1

4.3.10 SUMINISTRO DE AGUA:

Se modelaron las siguientes operaciones para la purificación de agua depurada: Cribado (eliminación de sólidos/rechazos): Partículas ásperas y finas, p. arena o plancton, son detenidos por rejillas y microfiltros. Sedimentación: Depósito de partículas solubles en balsas de sedimentación. Las partículas muy finas se depositan mediante el proceso de floculación.

Para la coagulación/floculación se utilizaron sales de aluminio y hierro: $FeCl_3$, $Fe_2(SO_4)_3$, $AlCl_3$, $12(SO_4)_3$ y $An(OH)_mCl_{3n-m}$ Ablandamiento del agua (descarbonización) y ozonificación.

Los datos utilizados para generar el subsistema provienen del software para análisis de ciclo de vida GaBi (GaBi database) [25]

4.3.11 INVENTARIO GLOBAL DEL SISTEMA

Para la producción de un metro cubico de las mezclas de hormigón se cuantificaron las cantidades de material primas o insumos descritos en la siguiente tabla:

Tabla 10. Inventario global del sistema

Tipo de mezcla de hormigón		HC	HR 20%	HR 100%	
Parametros de flujo	Magnitud	Cantidad			Unidad
Cemento (CEM I) [Mineral]	Mass	300	300	300	kg
Planta de mezclado de hormigon [industria]	Number of pieces	4,60E-07	4,60E-07	4,60E-07	pcs.
Aditivos de hormigon [aditivos]	Mass	6,00	6,00	6,00	kg
Electricidad [Energia electrica]	Energy	20,00	20,00	20,00	MJ
Aridos Naturales [Mineral]	Mass	1.920,00	1.632,00	480,00	kg
Arido grueso reciclado [Mineral]	Mass	-	288,00	1.440,00	kg
Water (Agua depurada) [Materiales operativos]	Mass	180,00	180,00	180,00	kg
Transporte Diesel [Productos de refinado]	Mass	0,55	0,55	0,55	kg

5. EVALUACIÓN DE IMPACTO DE CICLO DE VIDA (EICV)

En este apartado se realizará la fase de evaluación de impacto de ciclo de vida (EICV) en el cual, se buscará cuantificar el potencial de los impactos basados en los anteriores resultados del cálculo del ICV. Se especificarán los siguientes puntos de intervención:

- Selección de categorías de impacto, indicadores y modelos
- Clasificación según asignaciones de ICV
- Caracterización de los resultados

5.1 SELECCIÓN DE CATEGORIAS DE IMPACTO

A continuación, se describen las categorías y metodología que se ha considerado en este apartado. Dentro de la metodología utilizada, se han analizado los efectos intermedios o midpoints (H).

ReCiPe 2016 v1.1 [38] ha sido el método utilizado para la descripción de las categorías de impacto, ya que es uno de los métodos más reciente y actualizado. Los factores de caracterización en el nivel de punto medio o midpoints, suelen ubicarse en algún lugar a lo largo de la trayectoria del impacto.

Los factores de caracterización a nivel de punto final corresponden a tres áreas de protección, es decir, la salud humana, la calidad del ecosistema y los recursos escasez. Los dos enfoques son complementarios en el que el punto medio de caracterización tiene una relación más fuerte con los caudales ambientales y una incertidumbre relativamente baja, mientras que la caracterización del punto final proporciona mejor información sobre la relevancia ambiental de los flujos, pero también es más incierto que la caracterización del punto medio.

5.1.1 MECANISMOS MEDIOAMBIENTALES

Cambio climático:

Para la categoría de impacto de cambio climático, el modelo de daño está subdividido en varias fases: una emisión de un gas de efecto invernadero (kg) llevará a una mayor concentración atmosférica de estos gases (ppb) que, a su vez, aumentarán el forzamiento radiactivo (w/m^2), lo que lleva a un aumento de la temperatura media global ($^{\circ}C$).

El aumento de la temperatura finalmente resultara en un daño para la salud humana y los ecosistemas. En este estudio se estima el daño a la salud humana, ecosistemas terrestres y ecosistemas de agua dulce.

El factor de caracterización de punto medio para el cambio climático es el ampliamente utilizado potencial de calentamiento global (GWP). El GWP expresa la cantidad de forzamiento radiactivo durante un periodo de tiempo (20, 100 o 1.000 años) provocada por una emisión de 1 kg de gas de efecto invernadero.

Para imponer un factor común, se realiza la equivalencia de todas las moléculas que causan este efecto al forzamiento radiactivo adicional generado en ese mismo lapso de tiempo causado por la liberación de 1 kg de CO₂.

La cantidad de forzamiento radiactivo integrado en el tiempo causado por la emisión de 1 kg de GEI se denomina Potencial de Calentamiento Global Absoluto (AGWP) y se expresa en la unidad $W m^{-2} año kg^{-1}$. El factor de caracterización del punto medio, el cual es el estudiado, deriva directamente de esta equivalencia. [38]

Esto produce un GWP específico de unidad $kg CO_2 eq/kg GEI$.

Reducción del ozono estratosférico:

Las emisiones de sustancias que agotan la capa de ozono (SAO) generan en un punto último, daños a la salud humana debido al aumento resultante de la radiación ultravioleta.

Los productos químicos como los Clorofluorocarbonos CFCs que agotan el ozono, son relativamente persistentes en la atmósfera por tener grupos de cloro o bromo en sus moléculas que interactúan con el ozono (principalmente) en la estratosfera.

Después de la emisión de un SAO, las concentraciones troposféricas individuales de todas las SAO aumentan y esto genera a largo plazo que la concentración total también se incremente. Este aumento en el potencial de agotamiento del ozono conduce a una disminución en la concentración de ozono atmosférico, que a su vez provoca que una mayor parte de la radiación UVB incida contra la tierra. Este aumento de la radiación afecta negativamente a la salud humana, aumentando así la incidencia de cáncer de piel y cataratas.

El Potencial de Agotamiento del Ozono (ODP), expresado en $kg CFC-11$ equivalentes, se utiliza como factor de caracterización en el nivel de punto medio. Los ODP cuantifican la cantidad de ozono que una sustancia puede eliminar en relación con el químico CFC-11 para un lapso de tiempo específico y, por lo tanto, está relacionado en gran medida con la estructura molecular de las SAO y especialmente al número de cloro y grupos bromo en la molécula, así como el tiempo de vida atmosférico del químico.

Radiaciones ionizantes:

Las emisiones antropogénicas de radionucleidos se generan en las centrales nucleares, durante el ciclo de combustibles (minería, procesamiento y eliminación de desechos), así como durante otras actividades humanas, como la quema de carbón y la extracción de roca fosfórica.

En primer lugar, se modela el entorno en el cual se produce la dispersión del elemento. Este paso se cuantifica por un modelo de exposición; en el que se determina la cantidad de radiación (dosis colectiva efectiva) recibida por la población. Como daño final, la exposición a la radiación ionizante causada por estos radionúclidos puede dar lugar a un daño de las moléculas de ADN.

Durante el análisis del efecto del impacto, se distinguirían la incidencia de cánceres no fatales de cánceres mortales, de los hereditarios. Como paso final, se cuantificarían para calcular los daños a la salud humana en años de vida ajustados por discapacidad (AVAD). [38]

Actualmente no existen metodologías de evaluación de impacto para cuantificar daños causados a los ecosistemas, solo se estudia en el impacto humano.

El factor de caracterización de punto medio de las radiaciones ionizantes se mide en (kBq Co-60 al aire eq/kBq).

Formación de partículas finas:

La contaminación del aire que provocan los aerosoles primarios y secundarios en la atmósfera puede tener un impacto negativo sustancial en la salud humana, que van desde síntomas respiratorios hasta ingresos hospitalarios y muerte [39]. Las partículas finas con un diámetro inferior a 2,5 μm (PM2.5) representan una mezcla compleja de sustancias orgánicas e inorgánicas. Estas causan problemas de salud humana a medida que llegan a la parte superior de las vías respiratorias.

Estos Aerosoles PM2.5 secundarios se forman en el aire a partir de las emisiones de dióxido de azufre (SO₂), amoníaco (NH₃), y óxidos de nitrógeno (NO_x), entre otros elementos.

Para el factor de caracterización del punto medio del daño a la salud humana debido al PM2.5, Se mide la generación del contaminante equivalente a la partícula PM2.5 (kg PM2.5 eq.)

Formación de ozono fotoquímico:

La contaminación del aire que provocan aerosoles primarios y secundarios en la atmósfera puede tener un impacto negativo sustancial en la salud humana.

El ozono no se emite directamente a la atmósfera, pero se forma como resultado de reacciones fotoquímicas de NO_x, Non y Compuestos Orgánicos Volátiles del Metano (COVNM).

Este proceso de formación es más intenso en verano. El ozono a nivel troposférico es un peligro para la salud de los seres humanos porque puede inflamar las vías respiratorias y dañar los pulmones. Además, el ozono puede tener un impacto negativo en la vegetación, incluyendo una reducción del crecimiento y producción de semillas, una aceleración de la caída de la hoja y una capacidad reducida para resistir los factores estresantes. La formación de ozono no es lineal con lo cual, el proceso depende de las condiciones meteorológicas y las concentraciones de NO_x y COVDM. [40]

Para poder modelizar el análisis de impacto, el software GaBi calcula estos procesos; las moléculas como el NO_x o COVDM se vierten a la atmosfera y se mezclan con los elementos presentes en el aire. Estas moléculas actúan como precursores en las reacciones de formación de ozono.

Posteriormente, el ozono puede ser inhalado por la población humana o absorbido por las plantas, lo que lleva a un aumento del número de casos de daño a la salud entre los seres humanos y perjudiciales efectos sobre las especies vegetales.

Su unidad es los kg NO_x eq. Calculando el factor de punto medio de la misma forma que en los casos anteriores.

Acidificación terrestre:

La deposición atmosférica de sustancias inorgánicas al terreno, como sulfatos, nitratos y fosfatos, provocan un cambio en la acidez del suelo. Casi todas las especies de plantas exigen un nivel óptimo de acidez muy específico. La desviación grave de este nivel óptimo es perjudicial para ese específico tipo de especie y se conoce como acidificación.

Como resultado, los cambios en niveles de acidez generan cambios en la vida de esa especie. Las principales emisiones acidificantes son NO_x, NH₃, o SO₂.

Los pasos para el análisis de este impacto empiezan con una emisión de NO_x, NH₃ o SO₂ a la atmosfera. Posteriormente, se lixiviará en el suelo mediante lluvia acida, cambiando la concentración de H⁺ de la solución del suelo. Este cambio de acidez afectara a las especies vegetales que viven en el suelo generando el impacto y provocando su deterioro. La unidad de medición es kg SO₂ eq.

Eutrofización del agua dulce:

La eutrofización del agua dulce se genera debido a la descarga de nutrientes en el suelo o en depósitos de agua dulce, esto genera un aumento en los niveles de nutrientes, es decir, fósforo y nitrógeno.

Los impactos ambientales relacionados con eutrofización de agua dulce son numerosos como el caso de la eutrofización del Llobregat.

Este aumento de nutrientes aumenta la absorción de estos por parte de organismos autótrofos como como cianobacterias y algas, y especies heterótrofas como peces e invertebrados, En la fase final, esto conduce a una pérdida relativa de especies por superpoblación de los anteriores.

El impacto estudiado se basa en los cambios que generan las emisiones al agua dulce cuantificando la transferencia de fósforo del suelo a los cuerpos de agua dulce, su tiempo de residencia en sistemas y el tiempo de eliminación tras un aumento de las concentraciones en kg P eq.

Eutrofización del agua marina:

De la misma forma que en el caso anterior, Los impactos ambientales relacionados con la eutrofización marina se deben al enriquecimiento de nutrientes en el agua derivados del fosforo y nitrógeno. El aumento de algas u otros organismos genera un enturbiamiento del agua que obstaculiza el paso de la luz hasta el fondo del ecosistema.

Como consecuencia, la vegetación no puede realizar la fotosíntesis y muere, propiciando que otros microorganismos, como bacterias, se alimenten de la materia muerta, consumiendo el oxígeno que necesitaban los organismos del ecosistema. En este caso se ve más afectada el vertido de nitrógeno y se calcula en base a kg N eq.

Toxicidad:

El factor de caracterización de las mediciones de toxicidad humana y ecotoxicidad mide la persistencia ambiental (destino), acumulación en el ser humano en la cadena alimentaria (exposición) y toxicidad (efecto) de una sustancia química. Se estudia la vía causa-efecto, desde la emisión al medio ambiente, a través del destino y la exposición, a las especies afectadas y la incidencia de enfermedades, lo que lleva finalmente al daño a los ecosistemas y la salud humana.

La persistencia ambiental y los factores de exposición que evalúan el punto medio se pueden calcular por medio de métodos evaluativos como los modelos de destino y exposición.

En este apartado se incluyen: Ecotoxicidad, marina, de agua dulce y terrestre; y toxicidad humana no cancerígena y cancerígena. Con la unidad global de kg 1,4-DB equivalentes [38]

El químico 1,4-diclorobenceno (1,4-DCB) se utiliza como sustancia de referencia en los cálculos del punto medio dividiendo el impacto potencial calculado del producto químico entre el impacto potencial del 1,4-DCB emitido al aire urbano para la toxicidad humana, para agua dulce para la ecotoxicidad del agua dulce, al agua de mar para la ecotoxicidad marina y al suelo industrial por ecotoxicidad terrestre.

Consumo de agua:

El Impacto de consumo de agua es el uso del agua de tal manera que el agua se evapore, se incorpore en productos, se transfiera a otras cuencas hidrográficas o se elimine del mar.

El agua que ha sido consumida ya no estará disponible en la cuenca de origen para los humanos ni para los ecosistemas que se abastecen de ella. Los impactos generados derivan de la escasez de agua para riego, reducción de diversidad vegetal y cambio de caudales de cuencas.

Lo que produce implicaciones en la salud humana, en especies vegetales y especies animales acuáticas.

El factor de caracterización (FC) en el punto medio se mide en m³ de agua consumido por m³ de agua extraída. La extracción de agua es la extracción de agua de masas de agua superficiales o la extracción de aguas subterráneas de acuíferos.

Uso del Suelo:

La vía de impacto del uso de la tierra incluye el impacto local directo del uso de la tierra en especies terrestres a través de cambios en la cobertura del suelo y el uso real de la nueva tierra. El cambio de cobertura terrestre afecta directamente al hábitat original y la composición original de especies con lo que el uso de la tierra en sí (es decir, actividades agrícolas y urbanas) reduce el valor aún más de la tierra como hábitat adecuado para muchas especies. Este factor se mide en cosechas anuales eq.x año esta unidad se basa en la pérdida relativa de especies causada por el tipo de uso de la tierra, proporcional a la relativa pérdida de especies resultante de la producción anual de cultivos.

Reducción de recursos minerales:

Para la categoría de impacto de escasez de recursos minerales, el daño se genera en varios pasos.

El primero se produce con la extracción de un recurso mineral, esto llevará a una disminución general en mineral a nivel global, lo que a su vez aumentará en la producción por kilogramo de recurso mineral extraído.

Esto, cuando se combina con la extracción futura esperada de ese recurso mineral, conduce a un promedio potencial excedente de mineral, que es el indicador de punto medio para esta categoría de impacto. Un aumento en el potencial excedente de mineral conducirá entonces a un potencial problema de coste de excedentes.

Estos dos indicadores siguen el principio de que sitios mineros con leyes menos restrictivas o con costos más bajos, serán los primeros en ser explorados. En el análisis de impacto entonces, se estima los daños a la escasez de recursos naturales.

El factor de caracterización de punto medio para la escasez de recursos minerales se denomina Potencial Excedente del Mineral (SOP). El SOP expresa la cantidad extra promedio de mineral que se producirá en el futuro debido a la extracción de 1 kg de un recurso mineral, considerando toda la producción futura de ese recurso mineral en relación con la cantidad extra promedio de mineral producido en el futuro por la extracción de 1 kg de cobre (Cu), considerando toda la producción futura de cobre. [41]

Reducción de recursos fósiles:

Para la categoría de impacto de reducción de recursos fósiles, el modelo de daño se subdivide en varias etapas. Se supone en el modelado de punto final que los combustibles fósiles con los costos más bajos se extraerán primero. En consecuencia, el aumento de la extracción de combustibles fósiles provocara un aumento de los costes debido a un cambio en la técnica de producción o al abastecimiento desde una ubicación más costosa.

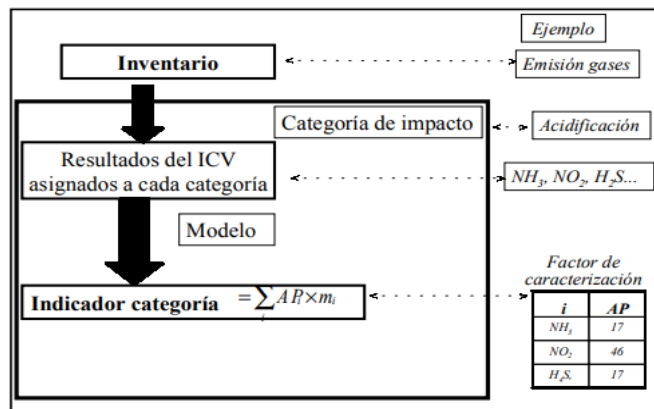
Por ejemplo, cuando todo el petróleo convencional se agote, se aplicarán procesos alternativos, como la recuperación mejorada de petróleo, o se extraerá petróleo en ubicaciones geográficas alternativas con costos más altos, como las regiones árticas [42]. Este impacto, cuando se combina con la extracción futura esperada de un recurso fósil, conduce a un potencial de costo excedente de igual forma que el anterior apartado, que es el indicador para esta categoría de impacto.

El indicador de punto medio para el uso de recursos fósiles, denominado kg oil-eq. Se define como la relación entre el contenido de energía del recurso fósil y el contenido energético del estándar del petróleo crudo.

5.2 CLASIFICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN

En este apartado se asignarán los datos recopilados del inventario a cada categoría de impacto descrito anteriormente, según el tipo de efecto ambiental generado y se llegará al resultado de los indicadores de cada categoría. Esto se ha calculado mediante el software informático GaBi siguiendo los procesos descritos en la norma ISO 40040 [16].

Grafica 13. Esquema de la clasificación y caracterización de la fase del AICV



5.3 RESULTADOS DE LOS INDICADORES DE CATEGORÍA (Perfil AICV)

En este apartado se muestran los resultados obtenidos en el ACV de las distintas mezclas de hormigón para las diferentes categorías de impacto descritas con anterioridad.

Para una forma práctica y teniendo en cuenta los objetivos del estudio se han recopilado todos los datos en forma de tablas y gráficos para una mejor lectura y comprensión.

Los resultados se dividirán en: resultados por porcentaje de atribuciones en el impacto total de cada mezcla individual, comparativa de resultados totales de cada mezcla y graficas comparativas por cada categoría.

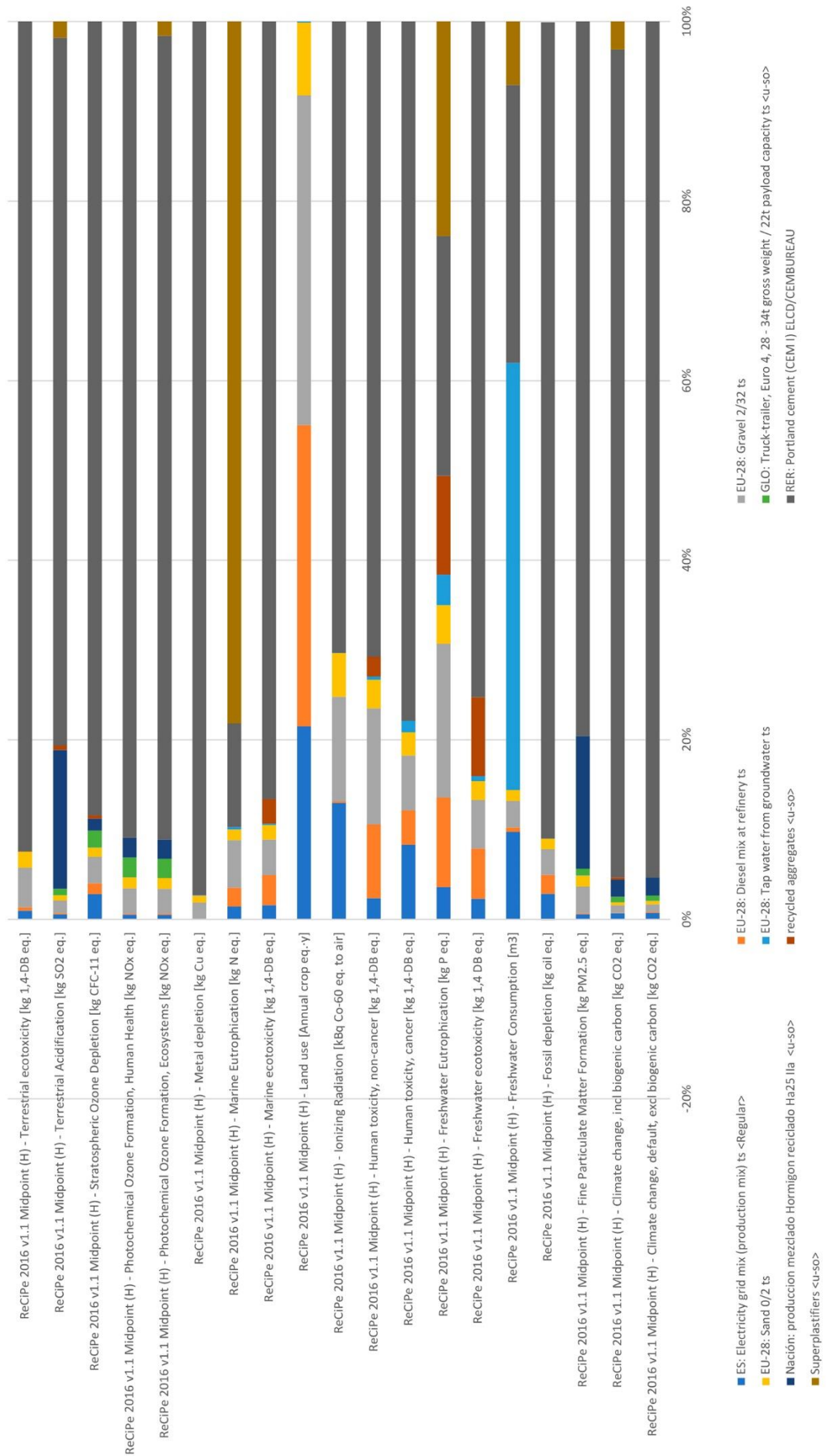
5.3.1 RESULTADOS POR PORCENTAJE DE ATRIBUCIONES

Dada la disparidad de cifras y medidas entre las diferentes categorías, se plantea una visualización en la que se pueden observar los porcentajes de atribución de impacto de cada elemento utilizado en la producción de la unidad funcional de un metro cubico de mezcla de hormigón. Se ha diferenciado cada mezcla según su dosificación. En esta fase la comparativa es entre los insumos generadores del producto y no entre productos.

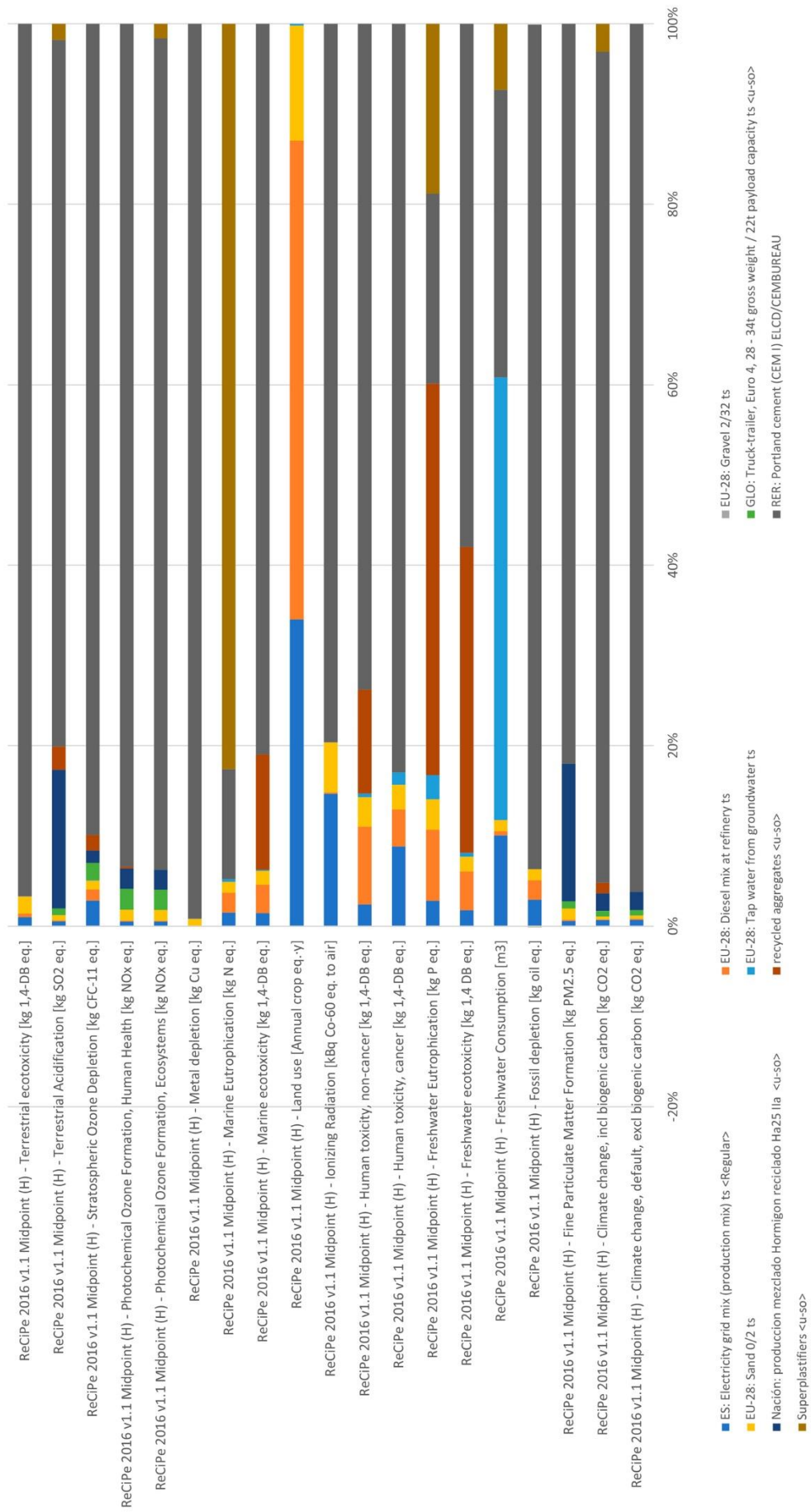
Esto se realiza para ver qué elementos de cada mezclan influyen más al impacto global del ACV y posteriormente generar reflexiones específicas para cada categoría de impacto.

Graficas 14,15,16. Resultados por porcentajes de atribuciones

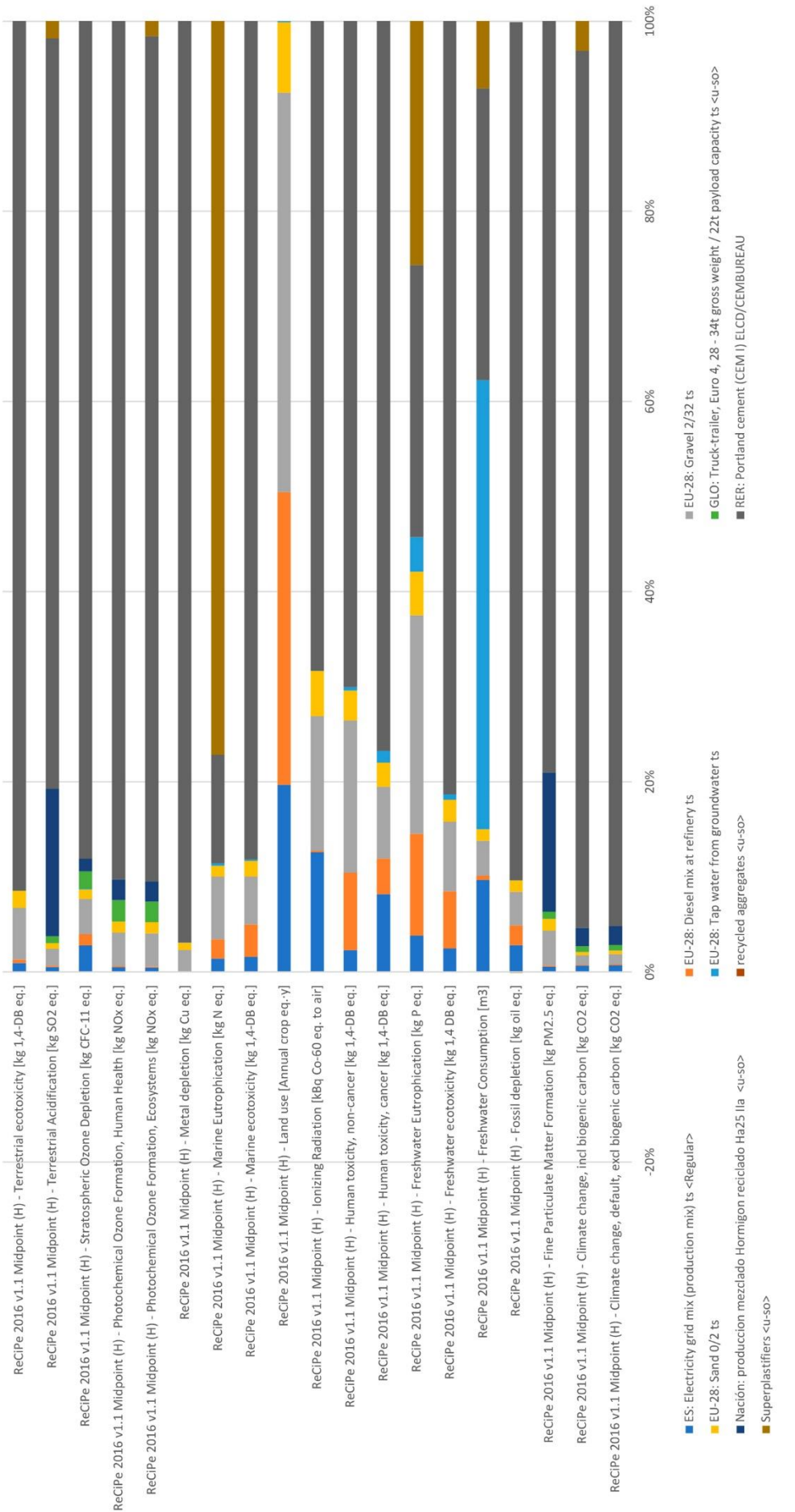
Porcentaje de atribuciones en el impacto total HR 20%



Porcentaje de atribuciones en el impacto total HR 100%



Porcentaje de atribuciones en el impacto total HC



5.3.1 INVENTARIO DE IMPACTOS TOTALES

Para poder estudiar las prestaciones ambientales de las 3 mezclas de hormigones, HR 20%, con un 20% de árido grueso reciclado sobre el total de árido grueso en peso. HR 100%, con un 100% de árido grueso reciclado y HC que corresponde a un hormigón convencional sin áridos reciclados. Se ha realizado la comparativa total en las diferentes categorías de impacto.

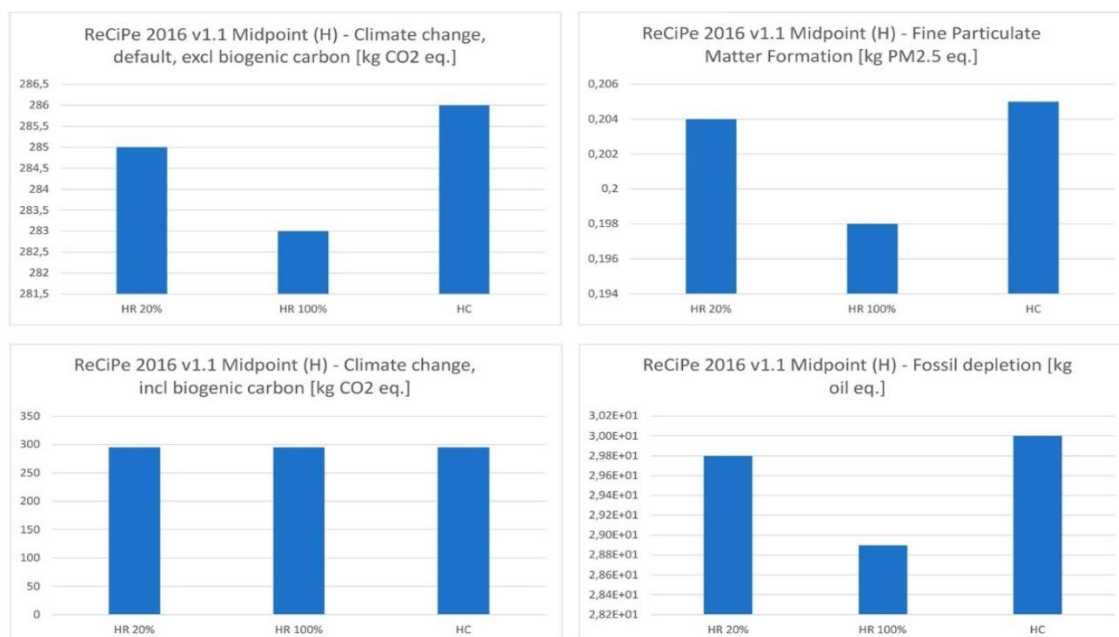
Tabla 11. Inventario de impactos totales

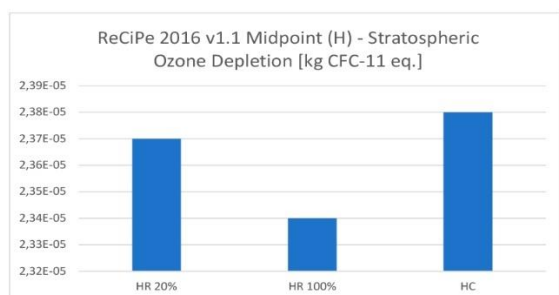
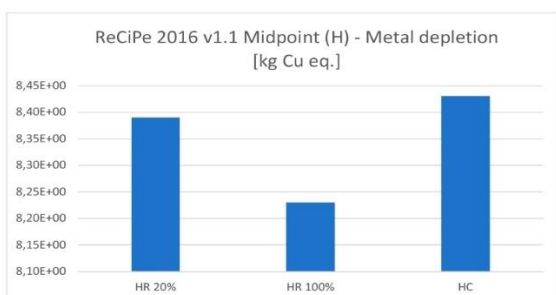
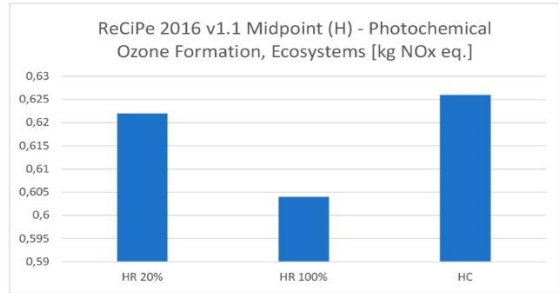
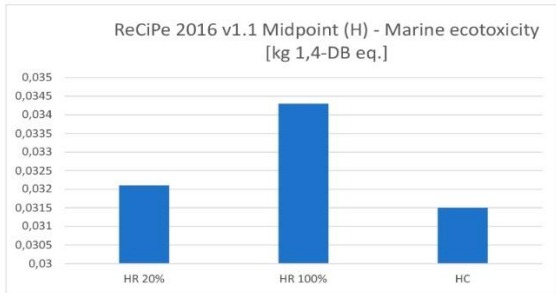
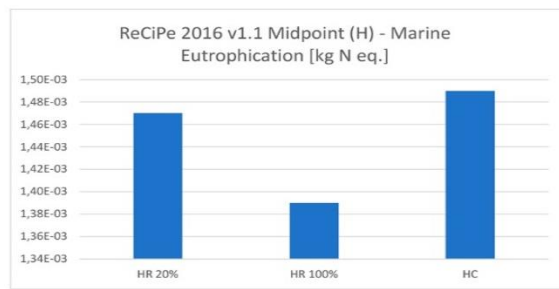
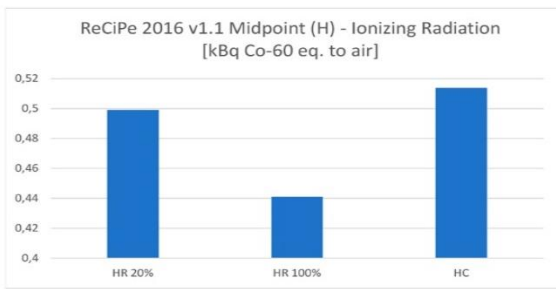
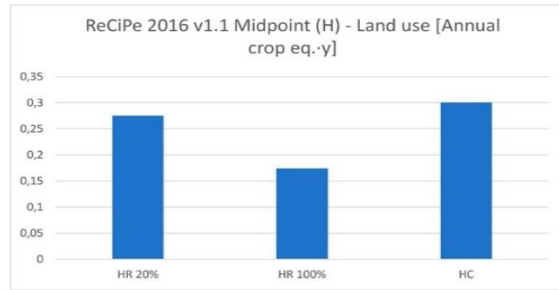
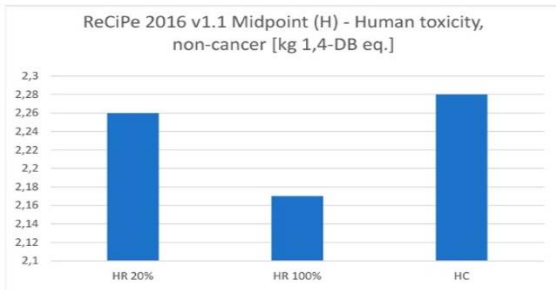
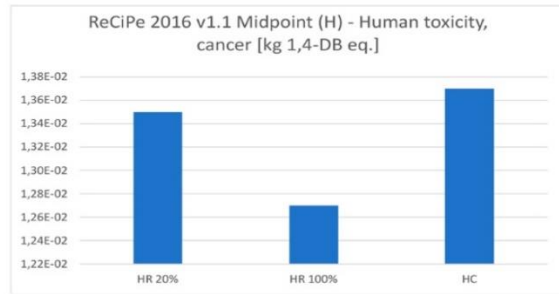
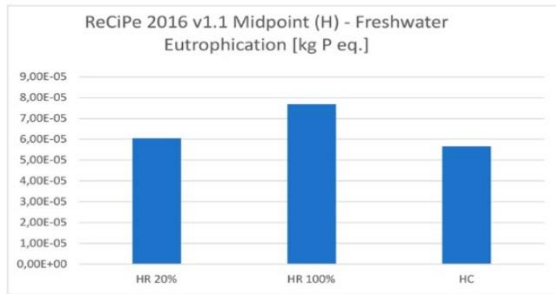
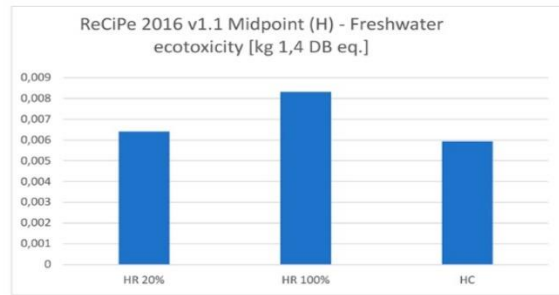
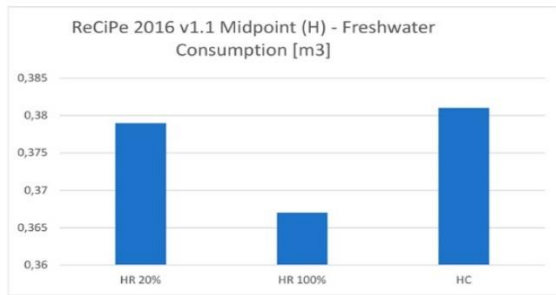
Unidades Medioambientales	HR 20%	HR 100%	HC
ReCiPe 2016 v1.1 Midpoint (H) - Climate change, default, excl biogenic carbon [kg CO2 eq.]	285	283	286
ReCiPe 2016 v1.1 Midpoint (H) - Climate change, incl biogenic carbon [kg CO2 eq.]	295	295	295
ReCiPe 2016 v1.1 Midpoint (H) - Fine Particulate Matter Formation [kg PM2.5 eq.]	0,204	0,198	0,205
ReCiPe 2016 v1.1 Midpoint (H) - Fossil depletion [kg oil eq.]	2,98E+01	28,9	30
ReCiPe 2016 v1.1 Midpoint (H) - Freshwater Consumption [m3]	0,379	0,367	0,381
ReCiPe 2016 v1.1 Midpoint (H) - Freshwater ecotoxicity [kg 1,4 DB eq.]	0,0064	0,00831	0,00593
ReCiPe 2016 v1.1 Midpoint (H) - Freshwater Eutrophication [kg P eq.]	6,06E-05	7,70E-05	5,65E-05
ReCiPe 2016 v1.1 Midpoint (H) - Human toxicity, cancer [kg 1,4-DB eq.]	1,35E-02	0,0127	0,0137
ReCiPe 2016 v1.1 Midpoint (H) - Human toxicity, non-cancer [kg 1,4-DB eq.]	2,26	2,17	2,28
ReCiPe 2016 v1.1 Midpoint (H) - Ionizing Radiation [kBq Co-60 eq. to air]	0,499	0,441	0,514
ReCiPe 2016 v1.1 Midpoint (H) - Land use [Annual crop eq. · y]	0,275	0,174	0,3
ReCiPe 2016 v1.1 Midpoint (H) - Marine ecotoxicity [kg 1,4-DB eq.]	0,0321	0,0343	0,0315
ReCiPe 2016 v1.1 Midpoint (H) - Marine Eutrophication [kg N eq.]	1,47E-03	0,00139	0,00149
ReCiPe 2016 v1.1 Midpoint (H) - Metal depletion [kg Cu eq.]	8,39E+00	8,23	8,43
ReCiPe 2016 v1.1 Midpoint (H) - Photochemical Ozone Formation, Ecosystems [kg NOx eq.]	0,622	0,604	0,626
ReCiPe 2016 v1.1 Midpoint (H) - Photochemical Ozone Formation, Human Health [kg NOx eq.]	6,04E-01	0,588	0,608
ReCiPe 2016 v1.1 Midpoint (H) - Stratospheric Ozone Depletion [kg CFC-11 eq.]	2,37E-05	2,34E-05	2,38E-05
ReCiPe 2016 v1.1 Midpoint (H) - Terrestrial Acidification [kg SO2 eq.]	6,72E-01	0,677	0,671
ReCiPe 2016 v1.1 Midpoint (H) - Terrestrial ecotoxicity [kg 1,4-DB eq.]	4,43E+01	42,4	44,8

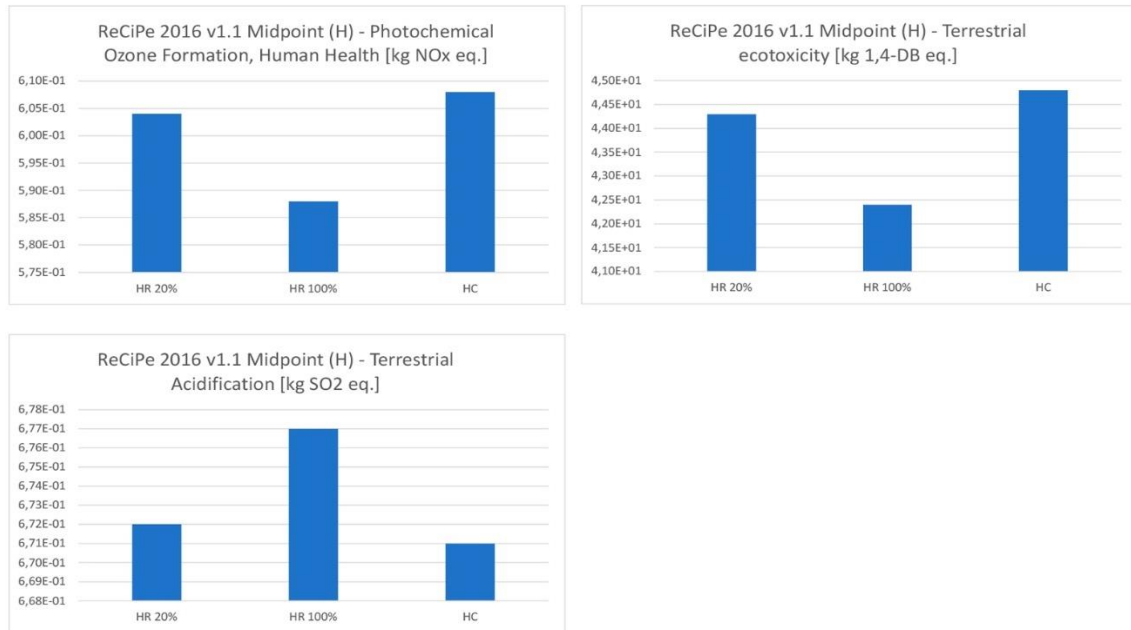
5.3.2 COMPARATIVA GRAFICA POR CATEGORÍAS

Los resultados del inventario de impactos se han ordenado y formalizado en graficas por categorías para facilitar la comparativa.

Grafica 17 Comparativa por categorías de impacto







6. CONCLUSIONES FINALES

En este estudio se ha considerado 1m^3 de hormigón con diferentes dosificaciones de árido grueso reciclado, y se ha realizado el estudio de impacto medioambiental mediante la metodología del ACV de las diferentes categorías de impacto. Después de todo el desarrollo se han podido extraer distintas conclusiones.

La incorporación de árido grueso reciclado no cambia significativamente los resultados de los impactos estudiados. Obteniendo una mejora máxima del 7% en el ámbito de la eutrofización y solo en 4 de todos los impactos estudiados (pertenecientes al grupo de impacto en ecosistema acuático) tiene un peor comportamiento, debido al alto contenido de impactos generados durante la fase de lavado del árido reciclado.

Aun así, si se ha visto a nivel global una mejoría, que varía según el porcentaje de árido grueso reciclado, en las cualidades medioambientales. De forma reducida pero presente en las categorías de impactos más significantes para la biosfera como el calentamiento global, eutrofización y reducción de materias primas.

El hormigón con 20% de árido grueso reciclado que es el máximo porcentaje admitido por la normativa actual ha obtenido mejoras máximas del 1%.

Respecto a los impactos producidos por cada elemento que constituyen la mezcla, en la mayoría de los impactos estudiados, la producción de cemento ha generado de media, el 80% del impacto total. Siendo la contribución media del árido reciclado de un 5%.

Los hormigones con áridos reciclados tanto finos como gruesos pueden obtener mejores prestaciones medioambientales, reduciendo los impactos en su proceso de fabricación. Una mejora de las plantas de reciclaje y específicamente en los trenes de lavado primario y secundario, y la posterior depuración de las aguas residuales reduciría el impacto generado por este material. Aun así, el porcentaje del árido grueso utilizado no genera unas modificaciones lo suficientemente satisfactorias para considerarla como una vía de actuación aislada.

Confirmando el estudio *Life cycle assessment of concrete made with high volume of recycled concrete aggregates and fly ash* [2], la sustitución total de áridos por agregados reciclados proporciona una mejora medioambiental superior. Pero tiene la penalización de una reducción drástica de sus capacidades mecánicas, que se deben de cuantificar.

El aumento de aditivos tal y como marca la normativa respecto al hormigón convencional para controlar el exceso de absorción que generan los áridos reciclados también producen un aumento del impacto medioambiental dirigido a la eutrofización marina ya que este elemento es el que más contribuye en todas las mezclas con una atribución del 80% en esta categoría.

Como punto más positivo de la utilización de áridos reciclados es la bajada del impacto de uso del terreno y materias minerales. Utilizando la economía circular y la gestión de los puntos de acopio de material derruido de la construcción, se puede reducir el impacto sobre la geosfera y la explotación de recursos naturales, favoreciendo una relación con el medioambiente más sana y sostenible.

6.1 FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

Respecto al TFG realizado, sería preciso que los estudios posteriores se centrasen en la investigación de nuevas formas de reducir el impacto ambiental del hormigón ya que es un material con una fuerte presencia hoy en día y sus cualidades medioambientales deben ser mejoradas para equipararse a nuevos materiales que están apareciendo en el mercado de la construcción.

La producción de hormigones sin cemento reduciría drásticamente los impactos totales ya que, como se mostrado anteriormente, es el punto determinante respecto a las capacidades de generación de impacto. Actualmente hay vías de investigación que estudian hormigones en base de cal, viejos materiales optimizados que están dando resultados satisfactorios. También, hay vías de desarrollo que implicarían la reducción de gases de efecto invernadero que favorecerían la reducción del impacto en este ámbito.

Y poniendo el foco en los áridos reciclados; dosificaciones que mejorasen los efectos medioambientales sin perder capacidades mecánicas como son hormigones con fibras de acero o vidrio recicladas, sumarían este producto al material final en vez de desecharlo del cómputo global tanto de la producción de áridos reciclados como la del hormigón reduciendo el impacto global.

7. REFERENCIAS

- [1] Mesa, Jaime A & Fúquene, Carlos & Maury-Ramirez, Anibal. (2021). Life Cycle Assessment on Construction and Demolition Waste: A Systematic Literature Review. *Sustainability*. 13. 7676. 10.3390/su13147676.
- [2] Kurda, Rawaz & Silvestre, José & Brito, Jorge. (2018). Life cycle assessment of concrete made with high volume of recycled concrete aggregates and fly ash. *Resources Conservation and Recycling*. 139. 407-417. 10.1016/j.resconrec.2018.07.004.
- [3] Barra Marilda, Aponte Diego, H. Piellarisi Sergio, Valls Susanna, Vazquez Enric (2011). Utilización de áridos reciclados “Una oportunidad frente a la situación actual”.
- [4] GUÍA ESPAÑOLA DE ÁRIDOS RECICLADOS PROCEDENTES DE RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN (RCD). (n.d.). Apabcn.Cat. Retrieved June 22, 2022,
- [5] Recomendaciones Técnicas para la Utilización de RCD en Firmes de Carreteras (2011) Agencia de obra publica de la Junta de Andalucía
- [6] Real Decreto 470/2021, de 29 de junio, por el que se aprueba el Código Estructural. *Boletín Oficial del Estado*, 190, de 10 de agosto de 2021.
- [7] 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, de 22 de agosto de 2008
- [8] Siilgado, S. S. 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*.
- [9] Ley 5/2020, de 29 de abril, de medidas fiscales, financieras, administrativas y del sector público y de creación del impuesto sobre las instalaciones que inciden en el medio ambiente. *Boletín Oficial del Estado*, 155, de 2 de junio de 2020
- [10] Guia per al compliment de l'ús del 5% d'àrids reciclats als projectes de construcció Gencat.cat. 22 de junio de 2022, https://residus.gencat.cat/web/.content/home/ambits_dactuacio/tipus_de_residu/runes_i_altres_residus_de_la_construccio/arids_reciclats/guia_arids_reciclats.pdf
- [11] Kasai, Y.: “Guidelines and the Present State of the Reuse of Demolished Concrete in Japan”. *Demolition and Reuse of Concrete and Masonry. Proceedings of the Third International RILEM Symposium*, Edited by Lauritzen, E.K., Published by E&FN Spon, 2-6 Boundary Row, London SE 1 8HN, First Edition, 1994: 93-104

- [12] Vincke, J.; Rousseau, E.: “Recycling of Construction and Demolition Waste in Belgium: Actual Situation and Future Evolution”. Demolition and Reuse of Concrete and Masonry. Proceedings of the Third International RILEM Symposium, Edited by Lauritzen, E.K., Published by E&FN Spon, 2-6 Boundary Row, London SE 1 8HN, First Edition, 1994: 57-69.
- [13] UNE-EN 12620:2003+A1:2009, Áridos para hormigón, 27 de mayo de 2009
- [14] BS 8500-2:2002: “Concrete-Complementary British Standard to BS EN 206-1. Part2: Specification for Constituent Materials and Concrete”. 2002.
- [15] Environmental product declaration EFCA -concrete admixtures -plasticisers and superplasticisers.. Finnsementti.fi. el 22 de junio de 2022, de https://finnsementti.fi/wp-content/uploads/EFCA-model-EPD_plasticisers_superplasticisers_final_2026-12-15.pdf
- [16] ISO 14040:2006(es) Gestión ambiental — Análisis del ciclo de vida — Principios y marco de referencia [17] UNE-EN 206-1:2008. Hormigón. Parte 1: Especificaciones, prestaciones, producción y conformidad, 27 de febrero de 2008
- [18] ACI 306R-16: Guide to Cold Weather Concreting (2016). American Concrete Institute, ACI
- [19] UNE-EN 933-11:2009/AC:2010, Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 11: Ensayo de clasificación de los componentes de los áridos gruesos reciclados.20 de enero de 2010
- [20] Andrea Blanco. E (2014). Tecnología Mineralúrgica. BLOQUE III CAPÍTULO 11. PLANTAS DE ÁRIDOS Editorial de la Universidad de Cantabria.
- [21] Ökologische Bilanzierung von Baustoffen und Gebäuden, 2000
- [22] Waschen und Entwässern. Immer wichtiger bei der Aufbereitung von Kies, Sand und Naturstein, 2000
- [23] Baustoff Atlas, 2005
- [24] Natürliche Zuschläge im Netzwerk Lebenszyklusdaten, 2007
- [25] GaBi databases 2021
- [26] Consejería de Economía y Empleo de la Junta de Castilla y León. Los Áridos en Castilla y León. 2008. de <http://www.siemcalca.com/images/pdf/Los%20aridos.pdf>
- [27] Durucan, A., 2010. EVA025 –Final Report: Aggregates Industry Life Cycle Assessment Model: Modelling Tools and Case Studies, American Ceramic Society. Retrieved from <https://policycommons.net/artifacts/1719885/eva025-final-report/2451558/> on 22 Jun 2022. CID: 20.500.12592/bkn0b6.
- [28] Imtiaz, Lahiba & Rehman, Sardar & Alaloul, Wesam & Nazir, Kashif & Faisal, Arbab & Aslam, Fahid & Musarat, Muhammad Ali. (2021). Life Cycle Impact Assessment of Recycled

Aggregate Concrete, Geopolymer Concrete, and Recycled Aggregate-Based Geopolymer Concrete. Sustainability. 13. 13515. 10.3390/su132413515.

[29] CEMBUREAU, *the European Cement Association* 2020

[30] León-Velez, Ana, & Guillén-Mena, Vanessa. (2020). Energía contenida y emisiones de CO₂ en el proceso de fabricación del cemento en Ecuador. *Ambiente Construído*, 20(3), 611-625. Epub July 03, 2020. <https://doi.org/10.1590/s1678-86212020000300448>

[31] Mendoza J-M, Oliver-Solá J, Gabarrell X, Rieradevall J, Josa A. *Planning strategies for promoting environmentally suitable pedestrian pavements in cities. Transp Res Part D* 2012;17:442–50.

[32] Gabarrell X, Josa A, Rieradevall J. *Life cycle assessment of granite application in sidewalks. Int J Life Cycle Assess* 2012;17:580–92

[33] TREMOVE 2.7 / EMISSIONS, 2007

[34] Spezifischer Energieeinsatz im Verkehr, Ermittlung und Vergl. der spezifischen Energieverbräuche, 2006

[35] Umweltlexikon: Betankungsverlust, 2006

[36] Umweltlexikon: Betankungsverlust, 2006

[37] S. Marinkovic, V. Radonjani, M. Malesev, I. Lukic. 2013 *Life Cycle Environmental Impact Assessment of Concrete*. del Dept. for Civil Engineering, Faculty of Technical Sciences, University of Novi Sad,

[38] ReCiPe 2016 v1.1 2017 National Institute for Public Health and the Environment of the Netherlands

[39] OMS, Guías de calidad del aire relativas al material particulado, el ozono, el dióxido de nitrógeno y el dióxido de azufre, 2005.

[40] El Medio Ambiente en Europa: Segunda evaluación Ozono troposférico. Agencia Europea de Medio Ambiente, 2008

[41] Report of normalization of metal depletion. National Institute for Public Health and the Environment of the Netherlands 2016

[42] Ponsioen, Tommie & Vieira, Marisa & Goedkoop, Mark. (2013). Surplus cost as a life cycle impact indicator for fossil resource scarcity. *The International Journal of Life Cycle Assessment*. 19. 872-881. 10.1007/s11367-013-0676-z.