

**Propuesta metodológica para evaluar
el comportamiento ambiental y
económico de los residuos de
construcción y demolición (RCD) en la
producción de materiales pétreos**

Sindy Sofía Suárez Silgado

Universitat Politècnica de Catalunya

Programa de doctorado en Ingeniería Ambiental



Propuesta metodológica para evaluar el comportamiento ambiental y económico de los residuos de construcción y demolición (RCD) en la producción de materiales pétreos

Sindy Sofía Suárez Silgado

Universitat Politècnica de Catalunya

Director de la Tesis: Xavier Roca

Programa de doctorado en Ingeniería Ambiental

Barcelona, diciembre 2015

**Tesis presentada para obtener el título de Doctor/Doctora por la
Universitat Politècnica de Catalunya**

Dedico esta tesis a mis padres y hermanos

Índice

1	Introducción	25
1.1	Justificación.....	29
1.2	Contenido de la tesis.....	31
1.3	Objetivos	33
1.3.1	Objetivo general	33
1.3.2	Objetivos específicos.....	33
2	Estado del arte	35
2.1	Problemática ambiental del sector de la construcción.....	35
2.1.1	Materiales de construcción e impactos ambientales asociados a su producción .	35
2.1.2	Residuos de construcción y demolición. Impactos medioambientales y sistemas de gestión	42
2.2	Producción secundaria o reciclaje de los RCD.....	52
2.2.1	Tipos de Reciclaje	52
2.2.2	Procesos de reciclaje de los materiales/residuos estudiados	53
2.2.3	Estudios efectuados que evalúan el reciclaje de los RCD.....	58
2.2.4	Estudios efectuados que incluyen la parte económica del reciclaje de RCD	66
2.3	Herramientas de evaluación	68
2.3.1	Metodología de análisis de ciclo de vida.....	69
2.3.2	Métodos de análisis multicriterio	71
2.3.3	Principales métodos multicriterio pertenecientes al método discreto.....	74
2.4	Conclusiones del estado del arte.....	78
3	Propuesta metodológica para evaluar el comportamiento ambiental y económico de los RCD en la producción de materiales pétreos.	83
3.1	Esquema de la metodología propuesta	83

3.2	Fases de la metodología propuesta.....	85
3.2.1	Fase 1: Definición y localización del estudio.....	85
3.2.2	Fase 2: Sistemas de producción.....	85
3.2.3	Fase 3: Criterios de evaluación.....	87
3.2.4	Fase 4: Evaluación de las alternativas.....	88
3.2.5	Fase 5: Definición de los indicadores.....	96
3.2.6	Fase 6: Clasificación y elección de alternativas. Análisis y discusión de resultados.....	97
3.2.7	Fase 7: Conclusiones.....	102
3.3	Aplicación general de la propuesta metodológica a los materiales considerados de interés para este estudio.....	102
3.3.1	Fase 1: Definición y localización del estudio.....	103
3.3.2	Fase 2: Sistemas de producción.....	104
3.3.3	Fase 3: Criterios de evaluación.....	110
3.3.4	Fases 4, 5, 6 y 7.....	110
4	Aplicación de la propuesta metodológica al material yeso.....	121
4.1	Fase 4: Evaluación ambiental y económica.....	121
4.1.1	Criterio ambiental. Metodología de análisis de ciclo de vida.....	121
4.1.2	Criterio económico.....	141
4.2	Fase 5: Definición de los indicadores.....	147
4.3	Fase 6: Clasificación y elección de alternativas. Análisis y discusión de resultados.....	148
4.3.1	Aplicación del método multicriterio y elección de las alternativas.....	148
4.4	Fase 5: Conclusiones.....	150
5	Aplicación de la propuesta metodológica al cemento.....	153
5.1	Fase 4: Evaluación ambiental y económica.....	153

5.1.1	Criterio ambiental. Metodología de análisis de ciclo de vida.....	153
5.1.2	Criterio económico	173
5.2	Fase 5: Definición de los indicadores.....	176
5.3	Fase 6: Clasificación y elección de las alternativas. Análisis y discusión de resultados	177
5.3.1	Aplicación del método multicriterio y elección de las alternativas.....	177
5.4	Fase 7: Conclusiones	180
6	Aplicación de la propuesta metodológica a los áridos	181
6.1	Fase 4: Evaluación ambiental y económica.....	181
6.1.1	Criterio ambiental. Metodología de análisis de ciclo de vida.....	181
6.1.2	Criterio económico	206
6.2	Fase 5: Definición de los indicadores.....	209
6.3	Fase 6: Clasificación y elección de las alternativas. Análisis y discusión de resultados	210
6.3.1	Aplicación del método multicriterio y elección de las alternativas.....	210
6.4	Conclusiones	211
7	Aplicación de la propuesta metodológica al hormigón	213
7.1	Fase 4: Evaluación ambiental y económica.....	213
7.1.1	Criterio ambiental. Metodología de análisis de ciclo de vida.....	213
7.1.2	Criterio económico	243
7.2	Fase 5: Definición de los indicadores.....	249
7.2.1	Hormigón estructural.....	249
7.2.2	Hormigón no estructural.....	249
7.3	Fase 6: Clasificación y elección de las alternativas. Análisis y discusión de resultados	250
7.3.1	Aplicación del método multicriterio y elección de las alternativas para el hormigón estructural	250

7.3.2	Aplicación del método multicriterio y elección de las alternativas para el hormigón no estructural	252
7.4	Fase 7: Conclusiones	254
8	Conclusiones finales y futuras líneas de investigación	257
8.1	Conclusiones generales	257
8.1.1	Conclusiones de la propuesta metodológica.....	259
8.1.2	Conclusiones de la aplicación de la propuesta metodológica.....	260
8.2	Contribución al conocimiento	266
8.3	Recomendaciones y futuras líneas de investigación.....	267
9	Referencias bibliográficas	269
10	Anexos	287

Índice de tablas

Tabla 2.1 Principales materiales usados en el sector de la construcción.....	36
Tabla 2.2 Tipos de yeso empleados en construcción de acuerdo al grado de humedad (Anaya y Chaoca, 2009).....	39
Tabla 2.3 Datos promedios (2009-2013) de la producción total de RCD en cada comunidad autónoma	48
Tabla 2.4 Residuos producidos según el tipo de construcción (FERCD, 2015).....	49
Tabla 2.5 Número de instalaciones de gestión de residuos dentro de Cataluña (ARC, 2015a)	50
Tabla 2.6 Dosificación del hormigón no estructural (Sánchez de Juan, 2011)	58
Tabla 2.7 Proporciones de las materias primas en la producción del clínker (Xie y Xi 2002)(Jani y Hogland, 2014).....	61
Tabla 2.8 Categorías de impacto medioambiental más usadas en el sector de la construcción (Fuente: Tabla 3.1)	70
Tabla 2.9 Métodos discretos de decisión multicriterio (García, 2004) (García, 2009)	74
Tabla 3.1 Categorías de impacto usadas en estudios.....	90
Tabla 3.2 Programas informáticos para el estudio de ACV generales (Aranda, 2008).....	91
Tabla 3.3 Métodos de evaluación de impactos (SimaPro 7, 2008)	92
Tabla 3.4 Coeficientes de peso para cada uno de los criterios	100
Tabla 3.5 Subproductos del reciclaje	104
Tabla 3.6 Productos del reciclaje	105
Tabla 3.7 Materiales a evaluar (producción primaria y secundaria)	106
Tabla 3.8 Alternativas de producción del yeso	109
Tabla 3.9 Alternativas de producción del cemento	109
Tabla 3.10 Alternativas de producción del árido.....	109
Tabla 3.11 Alternativas de producción del hormigón	110
Tabla 3.12 Emisiones al aire por km recorrido en camión de 32 t (Ecoinvent v2.2)	116
Tabla 3.13 Emisiones al aire por km recorrido en camión de 16 t-32 t (Ecoinvent v2.2).....	117

Tabla 4.1 Entradas del proceso de obtención de 1kg de yeso natural	127
Tabla 4.2 Emisiones al aire en el proceso de obtención de 1 kg de yeso natural (Ecoinvent v2.2)	128
Tabla 4.3 Entradas de la producción secundaria [YR (7 km) dp] (1 kg de yeso reciclado)	130
Tabla 4.4 Salidas del proceso de reciclaje del yeso [YR (7 km) dp] (1 kg de yeso reciclado) (Ecoinvent v2.2).....	130
Tabla 4.5 Salidas de la producción secundaria del yeso [YR (7 km) rp]	131
Tabla 4.6 Resultados de caracterización de las alternativas de producción del yeso	139
Tabla 4.7 Variables empleadas en los cálculos [YR (7 km) dp]	143
Tabla 4.8 Resultados obtenidos en los cálculos de producción de yeso reciclado [YR (7 km) dp]	144
Tabla 4.9 Variables empleadas en el cálculo de los valores [YR (7 km) rp]	144
Tabla 4.10 Resultados de los cálculos efectuados [YR (7 km) rp].....	145
Tabla 4.11 Parámetros empleados en el cálculo de los valores [YR (50 km) dp].....	145
Tabla 4.12 Resultados de los cálculos efectuados [YR (50 km) dp].....	146
Tabla 4.13 Resultados de los cálculos efectuados (A5) [YR (50 km) rp]	146
Tabla 4.14 Coste de referencia de los productos de yeso.....	146
Tabla 4.15 Carga medioambiental normalizada y valor del criterio económico para cada alternativa	148
Tabla 4.16 Lista de valores S, R y Q calculados en la producción de yeso	149
Tabla 5.1 Cantidad de materia prima por kg de clínker A obtenido	158
Tabla 5.2 Salidas del proceso de producción de 1 kg de clínker de CPO (Ecoinvent v2.2).....	159
Tabla 5.3 Entradas y salidas de la producción del CPO (kg de cemento).....	161
Tabla 5.4 Entradas y salidas del proceso de producción del CYR (kg de cemento).....	163
Tabla 5.5 Cantidad de materia prima por kg de clínker B obtenido.....	164
Tabla 5.6 Entradas y salidas en la obtención del vidrio triturado.....	164
Tabla 5.7 Entradas y salidas del proceso de producción del CVR (kg de cemento)	165
Tabla 5.8 Resultados de caracterización de las alternativas de producción de cemento (kg de cemento).....	170
Tabla 5.9 Coste de referencia de las diferentes alternativas de producción de cemento.....	176

Tabla 5.10 Carga normalizada y valor del criterio económico para cada una de las alternativas del cemento	177
Tabla 5.11 Lista de valores S, R y Q calculados en la producción del cemento	177
Tabla 5.12 Simulación de los ahorros anuales en las categorías por la producción de un 50 % del cemento en España con yeso reciclado	179
Tabla 6.1 Procesos de entrada en el árido natural (AN).....	188
Tabla 6.2 Emisiones por el uso de explosivos en la obtención de 1 kg de árido natural (Ecoinvent v2.2).....	189
Tabla 6.3 Emisiones al aire debido a la trituración de 1 kg de árido (Ecoinvent v2.2).....	189
Tabla 6.4 Residuos derivados del proceso de obtención de 1 kg de árido (Ecoinvent v2.2)	189
Tabla 6.5 Entradas del proceso de producción del árido de hormigón en planta (AHP).....	191
Tabla 6.6 Residuos para tratamiento del proceso de reciclaje del hormigón	192
Tabla 6.7 Entradas del proceso de obtención del árido de hormigón en obra (AHO).....	194
Tabla 6.8 Resultados de la caracterización de las alternativas de producción de áridos.....	201
Tabla 6.9 Coste de referencia de cada una de las alternativas de producción de árido	209
Tabla 6.10 Carga medioambiental normalizada y valor del criterio económico para cada alternativa	210
Tabla 6.11 Lista de valores S, R y Q calculados en la producción del árido	210
Tabla 7.1 Alternativas en la producción de hormigón estructural.....	216
Tabla 7.2 Alternativas en la producción de hormigón no estructural.....	216
Tabla 7.3 Principales características de las alternativas de producción del hormigón (m ³).....	216
Tabla 7.4 Entradas del hormigón estructural (1 m ³) con 100 % árido natural	219
Tabla 7.5 Salidas del proceso de producción de 1 m ³ hormigón estructural con 100 % árido natural.	219
Tabla 7.6 Composición típica del agua residual proveniente de la fabricación del hormigón (Ecoinvent v2.2).....	220
Tabla 7.7 Entradas en la producción de 1 m ³ hormigón con 20 % árido reciclado	221
Tabla 7.8 Entradas en la producción de 1 m ³ de hormigón no estructural con 100 % árido reciclado	223
Tabla 7.9 Entradas de la producción de 1 m ³ de hormigón no estructural con 75 % de árido mixto reciclado	224
Tabla 7.10 Resultados caracterizados de la producción de hormigón estructural.....	230

Tabla 7.11 Resultados de caracterización del hormigón no estructural	237
Tabla 7.12 Coste de referencia de cada una de las alternativas de producción de hormigón.....	248
Tabla 7.13 Carga medioambiental normalizada y valor del criterio económico para cada alternativa de HE.....	249
Tabla 7.14 Carga medioambiental normalizada para cada alternativa de HNE	250
Tabla 7.15 Lista de valores S, R y Q calculados en la producción del hormigón estructural	251
Tabla 7.16 Simulación de los ahorros anuales por la producción de un 40 % de hormigón preparado en España tipo HE20%AR-CYR	252
Tabla 7.17 Lista de valores S, R y Q calculados en la producción de hormigón no estructural	254

Índice de figuras

Figura 2-1 Clasificación de los materiales de construcción (Blanco, 2005)	37
Figura 2-2 Opciones de disposición de residuos	45
Figura 2-3 Cantidad de residuos generados dentro de la Unión Europea (EUROSTAT, 2012)	46
Figura 2-4 Composición en peso de los RCD producidos en obras de construcción en España (CEDEX, 2010).....	48
Figura 2-5 Gestión de los RCD en España entre los años 2009-2013 (FERCD, 2015)	49
Figura 2-6 Gestión de los RCD en Cataluña entre los años 2009-2013 (FERCD, 2015).....	49
Figura 2-7 Etapas de un proceso de decisión multicriterio	72
Figura 3-1 Esquema de la metodología propuesta	84
Figura 3-2 Categorías evaluadas en IMPACT 2002+ (Manual de base de datos Sima Pro 7, 2008).....	93
Figura 3-3 Límites del sistema de la producción primaria de materiales	111
Figura 3-4 Etapas consideradas en la producción secundaria de materiales	111
Figura 4-1 Límites del sistema en la producción primaria del yeso	123
Figura 4-2 Límites del sistema en la producción secundaria del yeso	124
Figura 4-3 Resultados de caracterización del proceso de obtención del yeso natural.....	132
Figura 4-4 Resultados de caracterización del proceso de obtención del yeso reciclado [YR (7 km) dp].....	134
Figura 4-5 Resultados de caracterización del yeso reciclado [YR (7 km) rp].....	136
Figura 4-6 Caracterización del yeso reciclado [YR (50 km) dp]	137
Figura 4-7 Resultados de la caracterización del yeso [YR (50 km) rp]	138
Figura 4-8 Resultados caracterizados del yeso natural y del yeso reciclado.....	139
Figura 5-1 Límites del sistema del cemento Pórtland ordinario.....	154
Figura 5-2 Límites del sistema del cemento con yeso reciclado	155
Figura 5-3 Límites del sistema del cemento con vidrio reciclado	155
Figura 5-4 Límite del sistema en la obtención del vidrio triturado	156
Figura 5-5 Caracterización de los impactos en CPO.....	167

Figura 5-6 Resultados de caracterización de impactos del CYR.....	169
Figura 5-7 Resultados caracterizados de la producción de CVR	170
Figura 5-8 Producción primaria y secundaria del cemento	172
Figura 6-1 Límites del sistema en la obtención del árido natural.....	182
Figura 6-2 Límites del sistema en árido reciclado (planta fija).....	183
Figura 6-3 Límites del sistema del reciclaje del árido en una planta móvil	184
Figura 6-4 Resultados caracterizados del AN	196
Figura 6-5 Resultados caracterizados del AHp	198
Figura 6-6 Resultados caracterizados del AHo	199
Figura 6-7 Resultados caracterizados del AMp.....	201
Figura 6-8 Resultados de caracterización de las alternativas de obtención del árido.....	203
Figura 6-9 Comparación de las alternativas de producción de árido (análisis de sensibilidad).....	204
Figura 7-1 Límites del sistema en la obtención del hormigón primario.....	214
Figura 7-2 Límites del sistema en la obtención del hormigón secundario	214
Figura 7-3 Resultados de la caracterización de HE100%AN.....	226
Figura 7-4 Resultados de caracterización del HE20%AR.....	228
Figura 7-5 Resultados caracterizados del HE20%AR-CYR	229
Figura 7-6 Resultados de caracterización del HNE100%AN.....	231
Figura 7-7 Resultados de caracterización del HNE100%AR.....	233
Figura 7-8 Resultados de caracterización del HNE75%AMR	234
Figura 7-9 Resultados de caracterización del HNE100%AR-CYR	236
Figura 7-10 Resultados de caracterización del HNE75%AMR-CYR.....	237
Figura 7-11 Alternativas de producción de hormigón estructural.....	239
Figura 7-12 Alternativas de producción de hormigón no estructural.....	240

Índice de anexos

Anexo A. Lista de las empresas consultadas.....	288
Anexo B. Lista de las empresas de reciclaje consultadas.....	289
Anexo C. Lista de organismos y asociaciones consultadas.....	290
Anexo D. Emisiones al aire por km recorrido en camión de 3.5-7.5t (Ecoinvent v2.2)	291
Anexo E. Lista de valores S, R y Q calculados en la producción de yeso (di hidrato) (Método VIKOR).....	291
Anexo F. Entradas del proceso de clínker A (1 kg)	292
Anexo G. Entradas del proceso de clínker B (1 kg).....	294
Anexo H. Entradas detalladas del hormigón estructural (1 m ³) con 100 % árido natural.....	295
Anexo I. Entradas detalladas en la producción de 1 m ³ hormigón con 20 % árido reciclado	296
Anexo J. Entradas detalladas en la producción de 1 m ³ de hormigón no estructural con 100 % árido reciclado	297
Anexo K. Entradas detalladas de la producción de 1 m ³ de hormigón no estructural con 75 % de árido mixto reciclado.....	298
Anexo L. Número de instalaciones de gestión de residuos y de producción de materiales en Cataluña.....	299
Anexo M. Instalaciones de gestión de RCD en Cataluña (ARC, 2015b).....	300
Anexo N. Instalaciones de gestión de residuos municipales (ARC, 2015b).....	300
Anexo O. Instalaciones de gestión de residuos industriales (ARC, 2015b).....	301
Anexo P. Plantas de hormigón en Cataluña (ANEFHOP, 2015)	301
Anexo Q. Plantas de cemento en Cataluña (OFICEMEN, 2015).....	302
Anexo R. Distancia entre planta de tratamiento de RCD y sitio de generación de residuos (ARC, 2015b)	302
Anexo S. Distancia entre planta de RCD y planta de reciclaje de papel (ARC, 2015b).....	303
Anexo T. Distancia entre planta de RCD y vertedero municipal (ARC, 2015b)	303
Anexo U. Distancia entre cantera de yeso y planta de cemento y entre planta de RCD y planta de cemento (ARC, 2015b; CIMENT CATALÁ, 2015)	304

Anexo V. Distancia entre planta de cemento y planta de hormigón (ARC, 2015b; CIMENT CATALÁ, 2015; ANEFHOP, 2015)	304
Anexo W. Distancia entre planta de hormigón y vertederos (ARC, 2015b; ANEFHOP, 2015).....	305
Anexo X. Distancia entre planta de RCD y planta de reciclaje de acero (ARC, 2015b)	305

Abreviaturas y siglas

A= acidificación

Ax= alternativa

ACA= Agencia Catalana del Agua

ACV= Análisis de Ciclo de Vida

ARC= Agència de Residus de Catalunya

AFA = Asociación de Fabricantes de Áridos de la Rioja

AN= árido natural

ANEFHOP= Asociación Nacional Española Fabricantes de Hormigón Preparado

AR= árido reciclado

AFN= árido fino natural

AGN=árido grueso natural

AGRH= árido grueso reciclado de hormigón

AGRM= árido grueso reciclado mixto

AHp= árido de hormigón en planta

AHo= árido de hormigón en obra

AMp= árido mixto en planta

C=carcinogénicos

CaO= óxido de calcio

CEN= Comité Europeo de Normalización

CG= calentamiento global

CH₄ = metano

CO₂= dióxido de carbono

COV= compuestos orgánicos volátiles

CPO= cemento Pórtland ordinario

CTE= Código Técnico de la Edificación

CPO= cemento Pórtland ordinario

CYR= cemento con yeso reciclado

CVR= cemento con vidrio reciclado

DCO= disminución de la capa de ozono

E= eutrofización

EM= extracción de mineral

ENR= energía no renovable

FERCD= Federación Española de gestores de Residuos de Construcción y Demolición

F_x = función de criterio

GEI= gases de efecto invernadero

HE= hormigón estructural

HNE= hormigón no estructural

H₂S= sulfuro de hidrógeno

ITEC= Instituto de Tecnología de la Construcción de Cataluña

NC= no carcinogénicos

NH₄ =amonio

NO_x= óxido de nitrógeno

OS= ocupación del suelo

OFICEMEN= agrupación de fabricantes de cemento de España.

PtM= planta móvil

PYL= placas de yeso laminado

RCD= residuo de construcción y demolición

RI= respiratorios inorgánicos

RO= respiratorios orgánicos

SO₂=óxido de azufre

YN= yeso natural

YR= yeso reciclado

Resumen

El sector de la construcción contribuye a la problemática ambiental actual. Por una parte, es responsable de los impactos generados en la producción de los materiales y, por otra, de los residuos generados en las obras constructivas. Por ello, se hace necesario buscar estrategias de producción de materiales de construcción alternativos en los que se empleen residuos provenientes de la construcción y demolición (producción secundaria), en lugar de materias primas originales (producción primaria).

Es cierto que se han efectuado varios estudios referidos a la gestión de los residuos de construcción y demolición (RCD), así como también estudios a nivel de laboratorio o de campo en los que se ha evaluado el comportamiento técnico del reciclaje de éstos mismos y su incorporación en la producción de materiales pétreos. Sin embargo, hay una notoria falta de pruebas estandarizadas para evaluar la viabilidad medioambiental de estos procesos, así como una carencia de estudios acerca de la viabilidad económica del uso de los RCD en la producción de nuevos materiales de construcción.

Teniendo en cuenta lo anteriormente mencionado y partiendo de la base de que el entorno económico es cada vez más competitivo y de que crece cada vez más la responsabilidad en lo referido a las obras de construcción, por una mayor exigencia de la legislación a nivel medioambiental, se ha visto la necesidad de contar con una herramienta de evaluación que permita comparar las alternativas más oportunas en relación a la producción y utilización de materiales de construcción a partir de materia prima original y/o a partir de material reciclado, en las que se tenga en cuenta —además del criterio técnico, que ya ha sido estudiado por otros autores— también, y no con menor peso, el criterio medioambiental y el económico.

Es por ello que en esta tesis se desarrolla una propuesta metodológica para la construcción de una herramienta de soporte a la toma de decisiones que permita evaluar la producción de materiales pétreos de construcción a partir de materia prima original y/o de material reciclado, con el fin de elegir la mejor alternativa teniendo en cuenta un enfoque multicriterio y distintos pesos o clasificaciones para los criterios evaluados.

En esta investigación doctoral también se aplica la propuesta metodológica desarrollada a algunos materiales pétreos fundamentales en construcción, escogiendo para estudiarlos —en el contexto de España— los siguientes: el yeso, el cemento, los áridos y el hormigón.

Los parámetros tenidos en cuenta para la elección de estos materiales fueron: su cantidad dentro de los RCD y su impacto medioambiental e importancia dentro de la industria de la construcción. Estos materiales fueron elegidos también, a su vez, por su potencialidad de ser empleados en la producción de nuevos materiales de construcción, como es el caso del uso del yeso en la producción de cemento, así

como del uso de los áridos y del cemento en la producción del hormigón. Es así como el hormigón, como material compuesto, acaba incluyendo finalmente a todos los demás materiales estudiados.

Aplicando la metodología propuesta al material yeso, se han estudiado diversas alternativas de producción (tanto primaria como secundaria). Estas alternativas fueron escogidas teniendo en cuenta distintos sistemas de gestión de los residuos generados durante el reciclaje y diferentes distancias de transporte. Las mayores ventajas medioambientales y económicas del reciclaje del yeso se han hecho presentes en las alternativas en que se aplica como sistema de gestión el reciclaje de papel proveniente de las placas de yeso laminado y, en contraste, las menores ventajas se han evidenciado en las que se disponen los residuos de papel en vertedero.

La distancia de transporte de los residuos de yeso desde el lugar de generación hasta la planta de reciclaje influye de manera poco notoria en comparación con el sistema de gestión aplicado a los residuos generados durante el reciclaje del yeso.

Los resultados del método multicriterio (ambiental y económico) aplicado al yeso han presentado como mejores opciones de producción las alternativas de reciclaje de yeso en las que se recicla también el papel proveniente de la placa de yeso laminado. Estas alternativas han resultado ser las opciones óptimas en todos los criterios de clasificación: igual importancia para ambos criterios, mayor importancia medioambiental y mayor importancia económica. La producción primaria del yeso ha resultado ser la propuesta tomada como última opción.

En el caso del cemento, las alternativas fueron escogidas teniendo en cuenta diferentes tipos de materia prima secundaria. La alternativa escogida como mejor opción para todas las clasificaciones de los criterios evaluados ha resultado ser la alternativa de producción de cemento con yeso reciclado. La alternativa valorada como segunda posición —cuando se le da mayor importancia al criterio medioambiental— ha sido la producción de cemento con vidrio reciclado; sin embargo, ésta ha pasado a ser la última opción en el caso en que se le ha concedido mayor importancia al criterio económico, o bien igual importancia tanto al criterio ambiental como económico.

Para el caso de los áridos reciclados se evaluó, por un lado, el tipo de residuo que entra a la planta de reciclaje: hormigón armado y residuo mixto (hormigón armado y cerámica); y, por otro lado, el sitio en el que se lleva a cabo el proceso de reciclaje; es decir, en planta fija o en la misma obra de construcción.

Las opciones escogidas como óptimas al aplicar el método multicriterio en la producción de los áridos en todas las clasificaciones de los criterios (igual importancia ambiental y económica o mayor importancia a uno de estos dos criterios) han sido: el árido mixto en planta y el árido de hormigón en obra. La alternativa ubicada en última posición ha sido la alternativa de producción de árido natural.

En la producción de hormigón se llevó a cabo, en primer lugar, una clasificación entre hormigón estructural y hormigón no estructural, con el fin de evaluar hormigones con la misma funcionalidad.

Para el hormigón estructural —además de evaluar el hormigón convencional— se evaluó, por una parte, el hormigón con 20% de árido reciclado y, por otro lado, el hormigón con 20% de árido reciclado y con 100% de cemento con yeso reciclado.

Para el hormigón no estructural —aparte del hormigón convencional— se evaluó el hormigón con 100% árido reciclado, el hormigón con 75% de árido mixto reciclado, así como éstos dos últimos pero con 100% de cemento con yeso reciclado.

La mejor opción de producción del hormigón estructural en todas las clasificaciones de los criterios evaluados ha sido el hormigón estructural con 20% de árido reciclado y con 100% de cemento con yeso reciclado.

Para el caso del hormigón no estructural las alternativas escogidas como óptimas han sido aquéllas en las que se ha empleado el árido y el cemento con yeso reciclado.

Los resultados de esta tesis demuestran, en primer lugar, que la herramienta desarrollada permite apoyar el proceso de toma de decisiones mediante la obtención de índices asociados a cada criterio evaluado y, también, a través de la elaboración de listas de preferencia de las alternativas con el fin de definir la óptima teniendo en cuenta diferentes puntos de vistas implicados.

Así mismo, esta herramienta permite la evaluación de diferentes escenarios de producción y distintas clasificaciones para los criterios: “ventaja medioambiental”, “ventaja económica” o “igual importancia a ambos criterios”. Esta herramienta es capaz de proporcionar datos numéricos; esto hace posible que la elección de la viabilidad de un material no esté basada en la simple intuición.

En segundo lugar, con la aplicación de esta propuesta metodológica —además de comprobar su funcionalidad y validez— se ha podido evaluar y comparar, tanto ambiental como económicamente, diferentes alternativas de producción primaria y secundaria de los principales materiales pétreos en España y escoger la mejor opción teniendo en cuenta distintas clasificaciones para los criterios.

Los resultados de la aplicación de esta propuesta a los materiales evaluados confirman que, en general, el reciclaje de los RCD en la producción de materiales pétreos es viable, tanto a nivel medioambiental como económico en España, con respecto a la producción primaria de los mismos.

Palabras clave: RCD, reciclaje, construcción, ambiental, económico, ACV, multicriterio.

Abstract

The construction sector contributes to current environmental problems. It is responsible for the impact of the production of building materials and for the waste generated in construction works. Strategies for alternative production of construction materials need to be found that use construction and demolition waste (secondary production), rather than original raw materials (primary production).

In the literature, there are several studies on the management of construction and demolition waste (CDW), as well as laboratory and field studies on the technical performance of recycled CDW products and their incorporation into stone materials. However, there is a noticeable lack of standardized tests to assess the environmental viability of these processes, and a lack of studies on the economic viability of CDW use in the production of new construction materials.

Considering the above, the increasingly competitive economic, and the growing demand for more responsibility in construction works to comply with environmental legislation, an assessment tool is required that can compare the alternatives of producing and using building materials from original raw material and/or from recycled material. The tool should take into account technical criteria, which have been studied by other authors, as well as environmental and economic criteria.

Consequently, this thesis develops a proposal for a tool that can support decision-making by assessing the production of building stone materials from original raw material and/or recycled material. The tool should help to choose the best alternative, considering a multi-criteria approach and different weights or rankings of the evaluated criteria.

In the doctoral research, the methodology was applied to some key stone materials in construction, specifically, in the context of Spain: gypsum, cement, aggregates and concrete.

The parameters taken into account for the choice of these materials were the quantity in CDW, the environmental impact of the material, and its significance in the construction industry. These materials were also chosen for their potential use in the production of new building materials, for example, gypsum can be used in cement production, and aggregate and cement in the production of concrete. Thus concrete, as a composite, was also included in the materials under study.

Various alternatives for gypsum production (both primary and secondary) were studied. These were selected taking into account different management systems for waste generated during recycling, and the range of transport distances. Greater environmental and economic benefits of recycling gypsum were related to the management system in which paper from the gypsum board was recycled. In contrast, lower benefits were found in processes in which paper waste was taken to landfill.

The distance that waste gypsum was transported from the point of generation to the recycling plant had less influence than the management system applied to the waste generated during the recycling of gypsum.

The results of the multi-criteria (environmental and economic) method applied to gypsum showed that the best alternative production options were gypsum recycling in which the paper from plasterboard was also recycled. These alternatives proved to be the optimal choice in all classification criteria: equal importance of the two criteria, greater environmental importance and greater economic importance. Primary production of gypsum was found to be the option that should be used as a last resort.

Cement production alternatives were chosen considering different types of secondary raw material. The best option in all classifications of the evaluated criteria was found to be recycled gypsum cement. In second place, when greater importance was given to environmental criteria, was cement produced with recycled glass. However, this option was ranked last when more importance was given to the economic criterion, or equal importance to environmental and economic criteria.

In the case of recycled aggregates, the type of waste going into the recycling plant was assessed, which was either reinforced concrete or mixed waste (concrete and ceramic). In addition, the place where the recycling process took place was included in the evaluation (either a specific plant or the construction site).

The multi-criteria method revealed that the best aggregate production options in all classification criteria (equal environmental and economic importance, or greater importance of one of these two criteria) were mixed aggregates produced in the plant, and concrete aggregates produced onsite. The worst alternative was production of natural aggregate.

Concrete was first classified as structural and non-structural, in order to evaluate materials with the same functionality.

The evaluation of structural concrete covered standard concrete, concrete with 20% recycled aggregate and concrete with 20% recycled aggregate and 100% recycled gypsum cement.

The evaluation of non-structural concrete included standard concrete, concrete with 100% recycled aggregate, concrete mixed with 75% recycled aggregate, and the latter two categories but with 100% recycled gypsum cement.

The best option for the production of structural concrete in all classifications of evaluated criteria was structural concrete containing 20% recycled aggregate and 100% recycled gypsum cement.

The best options for the production of non-structural concrete were those in which recycled aggregate and recycled gypsum cement were used.

The results of this thesis show, first, that the tool supports the decision-making process by obtaining indices associated with each criterion evaluated, and generates lists of preferred alternatives, which can help to define the best options from different perspectives.

The tool can be used to evaluate production scenarios and classifications for the criteria "environmental advantage", "economic advantage" or "equal importance to both criteria." It can provide numerical data, which means that the choice of a material is not simply based on intuition.

Besides checking the functionality and validity of materials, this tool can evaluate and compare, both environmentally and economically, primary and secondary production alternatives for the main stone materials in Spain, and choose the best option considering different classifications of the criteria.

The results of implementing this proposal for the materials under study confirm that, in general, CDW recycling for the production of stone materials is feasible in Spain, from an environmental and economic perspective, compared to primary production of the same kind of materials.

Keywords: CDW, recycling, construction, environmental, economical, LCA, multi-criteria.

Agradecimientos

Agradezco a mi director, Xavier Roca, por su constante paciencia y sus valiosas orientaciones aportadas en el transcurso del desarrollo de la Tesis.

También agradezco la ayuda y recomendaciones recibidas por parte del Prof. Santiago Gassó en importantes puntos temáticos de esta investigación.

Así mismo, quedo muy agradecida a la Prof. ^a Beatriz Amante y a todo el personal perteneciente al Departamento de Ingeniería de Proyectos y de la Construcción de Terrassa por las ayudas relacionadas, especialmente, con el software SimaPro 7.3.3.

Quiero agradecer también al personal de las empresas y plantas de reciclaje con quienes contacté directamente, por la paciencia y confianza al suministrarme la información solicitada.

No puedo dejar de expresar mi agradecimiento sentido a todas las amigas y personas cercanas que tanto me han apoyado, acompañado y animado durante los años de la elaboración de esta Tesis.

Expreso también mi sincero agradecimiento a una persona amiga por colaborarme en la revisión del texto redactado inicialmente por mí, ayudándome así, en buena medida, a expresar con mayor claridad y propiedad no pocas ideas importantes del lenguaje escrito final de mi Tesis.

Agradezco sumamente también el apoyo afectuoso y cargado de amor de mis padres y hermanos.

1 Introducción

A medida que las sociedades han evolucionado, la complejidad de sus sistemas productivos y la calidad de las materias primas empleadas han aumentado, lo que ha permitido desarrollar nuevas máquinas capaces de ofrecer las mismas prestaciones con rendimientos energéticos cada vez mayores. Desde la época de la Revolución Industrial la calidad de las máquinas ha mejorado significativamente, aunque ello —desafortunadamente— ha empeorado las condiciones ambientales. No ha sido hasta finales del siglo XX cuando la sociedad ha tomado conciencia de los impactos medioambientales locales (residuos radiactivos, suelos contaminados), regionales (generación de residuos, niebla de verano, niebla de invierno) y globales (calentamiento global, destrucción de la capa de ozono) que generan las actividades antropogénicas (Castells, 2005).

Concretamente la industria de la construcción ha contribuido en gran medida a estos impactos medioambientales. La fase de procesamiento y transformación de las materias primas, así como la producción de materiales conlleva a un consumo de energía intenso, a la generación de emisiones y a una gran cantidad de residuos.

A modo de ejemplo, el hormigón —el cual es el material de construcción más empleado en el mundo (se estima una producción anual de 1.5 m³ por habitante del planeta)— supone, a su vez, 1.6 billones de toneladas de cemento, 10 billones de toneladas de grava y arena y un billón de toneladas de agua. Cada tonelada de cemento, requiere 1.5 toneladas de roca caliza y del consumo de combustibles fósiles (González, 2012). Así mismo, Monahan y Powell (2011) destacan que los combustibles fósiles y la manufactura del cemento son responsables de más del 75 % del incremento del CO₂ atmosférico desde la pre-industria del siglo XVIII.

También Zabalza *et al.* (2011) afirman que, a nivel mundial, el trabajo civil y la construcción de edificios consumen el 60 % de las materias primas extraídas de la litosfera, destacando que de este volumen los edificios representan el 24 % de las extracciones globales. En España cada metro cuadrado habitable de una construcción convencional requiere un total de 2.3 toneladas de más de 100 tipos de material, teniendo sólo en cuenta los materiales que directamente forman parte del sitio de construcción (Zabalza *et al.*, 2011). La información anteriormente suministrada permite tener idea de la problemática asociada al uso de los materiales de construcción y a su potencial agotamiento.

Sin embargo, el sector de la construcción no sólo consume más materia prima y energía que cualquier otra actividad económica, sino que genera la más grande fracción de residuos en Europa. Cada año alrededor de 900 millones de toneladas de residuos de construcción son producidos dentro de la Unión Europea (Bravo *et al.*, 2015). Estos residuos llamados Residuos de Construcción y Demolición (RCD) en la mayoría de los casos no son bien gestionados, y por lo tanto, se disponen gran parte en vertederos, ocupando un volumen que claramente excede el ocupado por los residuos domésticos.

Concretamente en España, se producen alrededor de 35 millones de toneladas anuales de residuos de construcción (Instituto Nacional de Estadística, 2013).

Debido a la problemática ambiental del sector de la construcción referida por una parte a los impactos generados por la producción de materiales, y por otra a la generación de residuos, se hace necesario buscar estrategias de producción de materiales de construcción alternativos en los que se empleen residuos provenientes de la construcción y demolición, en lugar de materias primas originales.

Existen varias iniciativas a nivel europeo que apoyan el reciclaje de estos residuos y su incorporación en la producción de nuevos materiales de construcción con el fin de alcanzar una construcción sostenible. Muestra de ello son los avances dados a nivel internacional en materia de política y gestión ambiental. En materia de gestión de residuos de construcción y demolición la Directiva Europea de Residuos prevé que en el año 2020 un 70 % de los RCD deben valorizarse correctamente. El objetivo es conseguir niveles de reciclado mucho más altos minimizando la extracción de recursos naturales adicionales. La prevención y el reciclado son los elementos claves de la nueva política de residuos para convertir a Europa en una sociedad eficiente en el uso de los recursos, en un contexto de materias primas cada vez más escasas y costosas.

En este sentido, el programa para la investigación y la innovación en la Unión Europea para el período 2014-2020 llamado Horizonte 2020 (Reglamento UE, 2013), dedica una especial atención al desarrollo sustentable a través de la acción climática y la eficiencia de recursos que puede representar al menos el 60 % de total del presupuesto. También el desarrollo de materiales de construcción capaces de reutilizar un alto contenido de residuos es una importante línea de investigación dentro de los objetivos de la Unión Europea 2020 relacionados con la gestión de los residuos como un recurso (Pacheco-Torgal, 2014).

Siguiendo la misma línea de la Directiva Marco de Residuos, en España se ha dado también mayor énfasis a la prevención, la reutilización y al reciclaje de estos residuos. Es por esto que el Programa estatal de prevención de residuos (Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, 2013) tiene como objetivo último lograr en el 2020 la reducción en un 10 % en peso de los residuos generados en el 2010.

Con miras a alcanzar todos estos objetivos se han efectuado varios estudios referidos a la gestión de los RCD, tal es el caso de; Ortiz *et al.* (2010a); Blengini y Di Carlo (2010); Blengini y Garbarino (2010); Vossberg *et al.* (2014) y Butera *et al.* (2015).

A la par se han efectuado numerosos estudios a nivel de laboratorio o en campo en los que se ha evaluado el comportamiento técnico del reciclaje de los residuos de construcción y demolición teniendo en cuenta propiedades físicas, mecánicas, químicas y de durabilidad. A modo de ejemplo se puede citar a Godinho-Castro *et al.* (2012); Chandara *et al.* (2009); Morales (2010); Kacimi *et al.* (2006), De Castro y De Brito (2013); Rashad (2014); Oliveira *et al.* (2004); Correia *et al.* (2006); Evangelista y De Brito (2010); Matías *et al.* (2013); Coelho y De Brito (2013c); Ferreira (2013) y Bravo *et al.* (2015).

Sin embargo, aunque la demanda en las prácticas de construcción sostenible crece y el interés en la recuperación de los residuos proveniente de los RCD también va en aumento, hay una falta de pruebas estandarizadas para evaluar la viabilidad medioambiental de este proceso (Godinho-Castro *et al.*, 2012).

Si bien las razones medioambientales tienen un gran peso en la decisión de reciclar los RCD y han constituido el motor de la legislación, especialmente en Europa, no hay que olvidar que las motivaciones económicas juegan un papel fundamental en la decisión final; es decir, el reciclaje de los RCD tiene que producir, de alguna forma, un beneficio económico a todas las partes implicadas (Bustillo, 2010). Por ello, desde hace años se están intentando desarrollar modelos económicos con el fin de que la legislación pueda establecer pautas que permitan asegurar, hasta cierto límite, la citada bondad económica del proceso. No obstante, aun siendo así, sigue existiendo una carencia de estudios acerca de la viabilidad económica del uso de residuos de construcción y demolición en la producción de nuevos materiales de construcción.

Partiendo de lo anteriormente apuntado, las empresas continúan teniendo la necesidad de tomar la mejor de las decisiones posibles en un entorno cada vez más competitivo con el fin de obtener buenos resultados —teniendo en cuenta a la vez diferentes criterios e intereses—. Es precisamente esto lo que hace necesario contar con una herramienta de evaluación que permita evaluar y comparar alternativas de producción de materiales de construcción a partir de materia prima original y, también, de material reciclado, en la que se incluya, además del criterio técnico que ya ha sido ampliamente estudiado por muchos, con igual rigor el criterio medioambiental y el económico.

En este sentido, la metodología de análisis de ciclo de vida juega un papel muy importante ya que ha sido usada por varios autores (González y García, 2006; Huberman y Pearlmutter, 2008; Blengini y Garbarino, 2010; Chong y Hermreck, 2010; Zabalza *et al.*, 2011; Monahan y Powell, 2011; Ortiz *et al.*, 2010a; Ortiz *et al.*, 2010b; Tošić *et al.*, 2015) con gran éxito para poder evaluar los impactos medioambientales en el ámbito de la construcción. Todo ello facilita las comparaciones entre sistemas,

ayudando al proceso de toma de decisiones. Sin embargo, conviene tener en cuenta que con dicha metodología se evalúa únicamente el criterio medioambiental.

Ahora bien, como es necesario tener en cuenta también el criterio económico para la elección de materiales sostenibles, es preciso el empleo de métodos multicriterio, que permitan evaluar y elegir la mejor alternativa a partir de distintos criterios e intereses. Siendo esto así, el análisis multicriterio se convierte en una forma de evaluación integrada de sostenibilidad adecuada para abordar problemas complejos con un alto grado de incertidumbre, objetivos conflictivos y múltiples intereses y perspectivas (Quijano, 2012). Dentro de los diferentes métodos discretos de decisión multicriterio existentes, se escoge en esta tesis el método VIKOR, ya que, debido a sus muchas ventajas, ha sido empleado en estudios científicos efectuados en el ámbito del medio ambiente y en el de ingeniería de los materiales con muy buenos resultados; entre otros, podemos citar los de Chatterjee *et al.* (2009); Jahan *et al.* (2011); Quijano Hurtado (2012); Vučijak *et al.* (2013); Liu *et al.* (2013); Civic y Vucijak (2014); Tošić *et al.* (2015); Sakthivel *et al.* (2015) y Suganthi *et al.* (2015); y todo ello nos permite sostener que ha tenido una buena acogida en la comunidad científica internacional.

Considerando todo lo anterior, en esta tesis se pretende desarrollar una propuesta metodológica para la construcción de una herramienta de soporte a la toma de decisiones que permita evaluar la producción de materiales de construcción a partir de materia prima original y a partir de material reciclado, y elegir —en consecuencia— la mejor alternativa teniendo en cuenta un enfoque multicriterio. Esta herramienta ha de permitir la asignación de diferentes pesos a los criterios con el fin de elegir la mejor alternativa razonable desde el punto de vista medioambiental, la mejor opción también desde el punto de vista económico y, por todo ello, la mejor de todas las posibles considerando igual peso para ambos criterios.

Otro de los objetivos de esta investigación doctoral consiste en aplicar la propuesta metodológica a los principales materiales pétreos en el ámbito de la construcción, en primer lugar, con el fin de validar su funcionalidad y, en segundo lugar, con el propósito de efectuar la evaluación ambiental y económica de diferentes alternativas de producción primaria y secundaria de los principales materiales pétreos en España, buscando definir la mejor alternativa para cada material, tras tener en cuenta los diferentes criterios y puntos de vista implicados.

Para aplicar la propuesta metodológica se han escogido cuatro materiales pétreos a estudiar: el yeso, el cemento, los áridos y el hormigón. Más concretamente, los parámetros tenidos en cuenta para considerar la mejor elección han sido su cantidad dentro de los RCD, su impacto medioambiental y su importancia dentro de la industria de la construcción. Estos materiales fueron elegidos también por el hecho de poder ser empleados, a su vez, en la producción de nuevos materiales de construcción, como es el caso del uso del yeso en la producción de cemento, así como del uso de los áridos y del cemento en la producción del hormigón. Es así, como el hormigón como material compuesto incluye finalmente todos los demás materiales estudiados. La cerámica aunque no se estudia como un material separado, se ha incluido

dentro del árido mixto proveniente de los residuos de hormigón y cerámica. Así mismo, el vidrio se ha incluido como materia prima reciclada en la producción del cemento, en lugar de la arcilla.

En esta tesis se emplean los términos producción primaria y producción secundaria para designar la obtención a partir de materia prima original y a partir de material reciclado respectivamente en todos los materiales estudiados. La producción primaria también suele llamarse producción “convencional”, mientras que a la producción secundaria se le acostumbra a denominar “reciclaje”; si bien en los últimos años, debido a la necesidad de producir materiales alternativos, para esta segunda se ha venido utilizando el término “materiales secundarios”. Este término ha sido usado por autores como Allacker *et al.* (2014) y Brogaard *et al.* (2014). En construcción, concretamente, este término ha sido usado también para referirse a “materiales reciclados” (Careddu *et al.*, 2013 y Schwab *et al.*, 2014).

Finalmente, parece oportuno advertir que, dado que, el objetivo de esta tesis es desarrollar una propuesta metodológica, en el estudio previo de esta tesis el lector no encontrará una metodología propiamente investigadora única –como en algunas otras suele darse el caso–; no obstante, como se mencionó anteriormente, sí que —de manera continua aunque indirectamente— en cada paso importante de esta tesis podrá notar que se han considerado solamente las premisas resultantes de otros estudios en los que se han aplicado variadas metodologías concretas reconocidas internacionalmente y de gran rigor científico-técnico.

1.1 Justificación

Debido a la problemática ambiental del sector de la construcción referida, por una parte, a los impactos generados por la producción de materiales y, por otra, a la generación de residuos, parece del todo necesario buscar estrategias de producción de materiales de construcción alternativos en los que se empleen residuos provenientes de la construcción y demolición, en lugar de materias primas originales.

Como se mencionó en la Introducción, existen varios documentos legislativos a nivel europeo que apoyan el reciclaje de estos residuos y su incorporación en la producción de nuevos materiales de construcción con el fin de alcanzar una construcción sostenible, como por ejemplo se propone en la Directiva Europea de Residuos y en los objetivos de la Unión Europea 2020, relacionados con la gestión de los residuos como un recurso (Pacheco-Torgal, 2014).

Aunque no se minusvalora la evaluación del comportamiento técnico del reciclaje de los RCD y su incorporación en materiales de construcción, dado que la demanda en las prácticas de construcción sostenible crece y el interés en la recuperación de los residuos proveniente de los RCD también va en aumento, también es cierto que se ha constatado una falta de pruebas estandarizadas para evaluar la viabilidad medioambiental de estos procesos (Godinho-Castro *et al.*, 2012). Es decir, se ha hecho

evidente la frecuente carencia de estudios acerca de la viabilidad económica del uso de residuos de construcción y demolición en la producción de nuevos materiales de construcción.

Teniendo en cuenta lo anteriormente comentado, partiendo de la base de que el entorno económico es cada vez más competitivo y también que crece cada vez más la responsabilidad en las obras constructivas por una mayor exigencia de la legislación a nivel medioambiental, se ha advertido que existía la necesidad de contar con una herramienta de evaluación que permitiera comparar alternativas de producción de materiales de construcción a partir de materia prima original y de material reciclado, gracias a la cual se pudiera tener en cuenta, además del criterio técnico que ya ha sido ampliamente estudiado, el criterio medioambiental y el económico.

Es por ello por lo que en esta tesis se pretende desarrollar una propuesta metodológica para la construcción de una herramienta de soporte a la toma de decisiones que permita evaluar la producción de materiales pétreos de construcción a partir de materia prima original y a partir de material reciclado, con el fin de poder elegir la mejor alternativa teniendo en cuenta un enfoque multicriterio. Esta herramienta habría de permitir la evaluación de diferentes escenarios de producción de materiales pétreos y la asignación de diversos valores a los criterios, con el fin de elegir la mejor alternativa desde el punto de vista medioambiental, por un lado, y desde el punto de vista económico, por otro, sin olvidar la concesión de igual peso a ambos criterios. Mediante la definición y el uso de indicadores asociados a estos criterios, esta herramienta ha de ser capaz de proporcionar datos numéricos, factor éste no de poca importancia, al evitar así que la elección de la viabilidad de un material no esté basada solo o principalmente en la simple intuición.

Se espera que esta propuesta metodológica sirva de guía a las partes implicadas —como es el caso de las empresas de fabricación de materiales de construcción y las empresas encargadas de su gestión— así como a quienes emplean estos materiales en obras constructivas, como son los arquitectos, ingenieros y constructores, tratando así de poder evaluar cualquier material pétreo y elegir la mejor alternativa teniendo en cuenta un enfoque multicriterio.

En esta metodología el criterio técnico es tenido en cuenta en el momento de definir las diferentes alternativas de producción de materiales, ya que se parte del hecho de que para evaluar la viabilidad ambiental y económica, las alternativas de materiales deben ser viables a nivel técnico. El criterio medioambiental se evalúa, mediante la metodología de ACV, y la metodología desarrollada para el cálculo del coste de ejecución de referencia está basada en el estudio económico de materiales de construcción efectuado por Tošić *et al.* (2015), al tratar de encontrar un coste aproximado que sirva de referencia para cada una de las alternativas de producción de material, algo que, a su vez, permita la comparación entre ellas. Finalmente, mediante el empleo del método multicriterio VIKOR se espera obtener la lista de preferencias que permite identificar con facilidad la mejor alternativa, teniendo en cuenta diferentes clasificaciones de los criterios.

Otro de los objetivos de esta investigación doctoral consiste en aplicar la propuesta metodológica a los principales materiales pétreos en construcción, en primer lugar con el fin de validar su funcionalidad y, en segundo lugar, con el propósito de efectuar una evaluación ambiental y económica de diferentes alternativas de producción primaria y secundaria de los principales materiales pétreos en España y definir la mejor alternativa para cada material, teniendo en cuenta los diferentes criterios y puntos de vista implicados.

Se espera, igualmente, que los resultados conseguidos con la implementación de dicha metodología a los principales materiales pétreos puedan ser un gran aporte a la hora de emplear la materia prima secundaria en la producción de materiales alternativos más sostenibles en España. Así mismo, se confía en que dichos resultados puedan influir en cambios positivos en la legislación acerca del empleo de materiales reciclados en las obras constructivas —como es el caso del uso del hormigón con árido mixto reciclado para uso estructural y del de hormigón con cemento reciclado en las construcciones concretas— y, por ende, estimular a la industria de la construcción, en general, hacia cambios cada vez más relevantes, adecuados y sostenibles.

1.2 Contenido de la tesis

Esta tesis se encuentra estructurada en 8 capítulos, los cuales se pasan a explicar a continuación.

El capítulo 1 tiene un carácter introductorio, cuya finalidad global es exponer la problemática y centrar al lector sobre el tema de esta investigación doctoral. En este capítulo se muestran las razones por las que se considera necesario llevar a cabo la investigación. Es por esto, que incluye la justificación de la tesis y los objetivos, tanto generales como específicos, que se pretenden alcanzar con el desarrollo de este estudio doctoral.

El estado del arte relacionado con la temática central propia de la tesis se efectúa en el capítulo 2.

En una primera parte —en la que se trata de la problemática ambiental del sector de la construcción— se definen los materiales pétreos a evaluar en la tesis, exponiéndose también los impactos medioambientales asociados a la producción de dichos materiales. En ese mismo apartado se destaca también la problemática ambiental de la generación de los residuos de construcción y demolición, así como los diferentes sistemas de gestión llevados a cabo para estos residuos en el ámbito mundial, nacional y local. En otro momento de ese mismo apartado, también se aborda la legislación más destacada en materia de residuos. Se vio necesario incluir toda esta temática dentro del estado del arte, ya que en los capítulos posteriores referidos a la aplicación práctica se hace alusión a los sistemas de gestión de residuos llevados a cabo en la zona de estudio.

Como dentro de la propuesta metodológica se requiere llevar a cabo una revisión bibliográfica con el fin de conocer la viabilidad técnica del uso de RCD en la producción de materiales pétreos, una segunda parte del estado del arte efectuado, se centra en los estudios llevados a cabo en este campo que evalúan el comportamiento técnico del reciclaje de estos residuos. Debido a que la propuesta metodológica incluye evaluar el aspecto económico, también se exponen en el capítulo 2 los diferentes estudios efectuados acerca del reciclaje de RCD en los que se tiene en cuenta, de manera concreta, la parte económica.

Finalmente, en la tercera parte del estado del arte, se exponen —a modo de resumen— las diferentes herramientas de evaluación empleadas en la tesis para el desarrollo de la propuesta metodológica. Se hace una introducción de la metodología de análisis de ciclo de vida como herramienta utilizada para la evaluación de los impactos medioambientales y se exponen los principales métodos multicriterio, dando mayor énfasis al método escogido para evaluar los materiales pétreos teniendo en cuenta el aspecto medioambiental y el económico.

En el capítulo 3, se desarrolla la propuesta metodológica para evaluar el comportamiento medioambiental y económico de los RCD en la producción de materiales pétreos. En esta herramienta metodológica de carácter propositivo se exponen y se explican las diferentes fases que se deben tener en cuenta para la evaluación ambiental y económica de los materiales pétreos en el ámbito de la construcción, así como los pasos seguidos para calcular los índices de cada uno de los criterios y para definir las alternativas a evaluar. También se explica, paso a paso, la aplicación del método multicriterio, el cual está llamado a permitir evaluar los materiales teniendo en cuenta los dos criterios definidos. Se indica, además, la forma de elegir la mejor alternativa empleando diferentes pesos o importancia para los criterios, dependiendo del punto de vista o de los intereses de las partes implicadas.

En este mismo capítulo se aplican las 3 fases primeras de la propuesta metodológica a los materiales elegidos, debido a que se consideran similares, y se exponen también los aspectos comunes de la fase 4 para todos los materiales pétreos estudiados.

En los capítulos 4, 5, 6 y 7 se aplica la propuesta metodológica al yeso, al cemento, al árido y al hormigón respectivamente. En estos capítulos se aplica el resto de fases de la propuesta metodológica para cada uno de los materiales elegidos, ya que estas fases, al ser más específicas, suelen variar en función de las particularidades de cada material estudiado. Dentro de la aplicación de la propuesta se incluyen el análisis y la discusión de los resultados.

En el capítulo 8, se presentan las conclusiones finales de la tesis y las futuras líneas de investigación.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Considerando la necesidad de emplear materiales alternativos en construcción que incluyan el uso de residuos de construcción, en lugar de únicamente materia prima original y partiendo de la base de que el entorno económico es cada vez más competitivo, el objetivo principal de esta tesis consiste en desarrollar una *propuesta metodológica, a modo de herramienta funcional, que permita evaluar la producción primaria y la producción secundaria de los materiales pétreos y elegir la opción óptima teniendo en cuenta el criterio medioambiental y el económico.*

1.3.2 Objetivos específicos

Con el fin de validar la efectividad de la propuesta metodológica desarrollada y con el propósito de evaluar tanto ambiental como económicamente los materiales pétreos —en el contexto de España— se pretende implementar dicha herramienta a los principales materiales pétreos escogidos para llevar a cabo este estudio doctoral. Por ello, los objetivos específicos de esta tesis son los siguientes:

- Aplicar la propuesta metodológica al material yeso, con el fin de evaluar diferentes alternativas de producción e identificar la mejor alternativa, teniendo en cuenta diferentes pesos para los criterios evaluados.
- Aplicar la propuesta metodológica desarrollada al cemento, con el propósito de evaluar diferentes alternativas de producción e identificar la mejor alternativa de producción de este material bajo un enfoque multicriterio.
- Aplicar la propuesta metodológica a los áridos, para evaluar diferentes alternativas de producción u obtención del árido y definir la mejor alternativa de producción tanto a nivel ambiental como económico, así como la mejor alternativa, dándole un mayor peso a uno de estos criterios.
- Aplicar la propuesta metodológica desarrollada al hormigón estructural y no estructural, con el fin de evaluar desde un enfoque multicriterio diferentes alternativas de producción y escoger para cada uno de estos tipos de hormigón la mejor opción, empleando diferentes clasificaciones para los criterios elegidos.

2 Estado del arte

2.1 Problemática ambiental del sector de la construcción

El sector de la construcción presenta impactos durante todas las fases del ciclo de vida. La fase de procesamiento y transformación de las materias primas, así como la producción de materiales conlleva a un consumo de energía intenso, así como la generación de emisiones y de una gran cantidad de residuos. La fase de final de vida se caracteriza, especialmente, por la generación de residuos.

Partiendo de la base de que dos materiales que presentan igual comportamiento técnico pueden cumplir con la misma función y pueden tener el mismo uso, en esta tesis se ha considerado dentro de todas las fases del ciclo de vida de un material, la fase de extracción y producción del material, y la fase de gestión del residuo, la cual ocurre cuando éste llega a la etapa de final de vida.

A continuación se hace referencia a cada una de estas fases. En la fase de producción se habla de materiales de construcción y, en la fase de final de vida, de residuos de construcción y demolición.

2.1.1 Materiales de construcción e impactos ambientales asociados a su producción

Los materiales de construcción engloban aquellos materiales que entran a formar parte de los distintos tipos de obras arquitectónicas o de ingeniería, cualquiera que sea su naturaleza, composición o forma. Estos abarcan un gran número y orígenes muy diversos, pudiéndose clasificar para su estudio en base a diferentes criterios, siendo los más habituales su función en la obra, su intervención y su origen.

De acuerdo con varios autores, los materiales más empleados en este sector se encuentran en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1 Principales materiales usados en el sector de la construcción

Materiales usados en construcción	Hormigón ^{a,d,g,h,i,j,l,m}
	Piedra natural ^{c,d,m,n,o}
	Tierra (arena y grava) ^{g,h,l,r,m,n,q}
	Ladrillo ^{a,d,f,g,i,j,m,n}
	Yeso ^{f,g,l}
	Materiales cerámicos ^{d,e,f,g,j,l,m,n}
	Vidrio ^{e,f,g,h,i,j,l,m,n}
	Plásticos ^{a,d,h,i,j,m,n}
	Madera ^{a,d,f,g,h,i,m,d,j,l,n}
	Aluminio ^{a,d,f,g,j,l,m,n}
	Acero ^{a,d,f,g}
	Cobre ^{d,m,f}
	Zinc ^m
	Hierro ^{d,j,m}
Bronce ^{d,m}	

a= Monahan y Powell (2011); b= Umaña (2011); c= Bustillo R. (2010); d= Tam y Tam (2006a); e= Blengini y Garbarino (2010); f= Ortiz *et al.* (2010a); g= Ortiz *et al.* (2010b); h=Tam y Tam (2006b); i= Bantias *et al.* (2011); j= CEDEX (2010); k= Catálogo Europeo de Residuos (2013); l= PNRCD (2008);m= Asokan *et al.* (2009); n= Conroy *et al.* (2006); o= Catàleg de Residus de Catalunya (1999); p= Barceló (2004).

Existen diferentes tipos de clasificaciones de los materiales de construcción. Blanco (2005) establece una clasificación para los materiales, que, si bien no es la única, la considera la más adecuada para el estudio de los materiales de construcción (Figura 2-1).

Los materiales de la construcción pueden causar efectos negativos en el medio ambiente durante todas las fases de su ciclo de vida. Si se toma en cuenta la fase de adquisición de las materias primas, los efectos más comunes son aquellos vinculados a la minería y las prácticas de explotación que pueden afectar los hábitats y a la eliminación de la vegetación que aumenta la escorrentía, la pérdida de la capa superior del suelo y la sedimentación de los cursos de agua. Las emisiones y residuos generados durante la fase de manufactura repercuten directamente sobre la calidad del aire, del agua y del suelo. Así mismo, el transporte de los materiales hasta el sitio de producción, utiliza combustibles no renovables y genera emisiones contaminantes al aire.

Centrándonos en los materiales pétreos mostrados en la Figura 2-1, se escogen para estudiar en esta tesis el yeso, el cemento, los áridos y el hormigón. Se escogieron estos materiales con el fin de estudiar cada una de las categorías de materiales pétreos; es decir, pétreos naturales (áridos), pétreos artificiales aglomerados (yeso y cemento) y, por último, pétreos artificiales conglomerantes (hormigón).

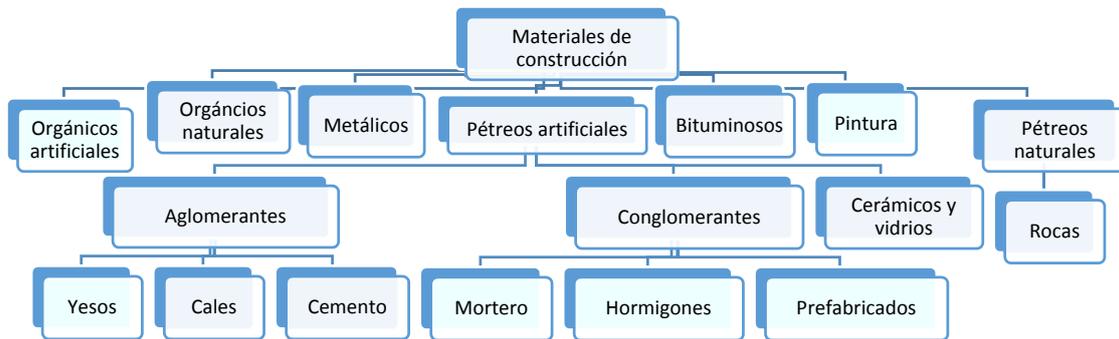


Figura 2-1 Clasificación de los materiales de construcción (Blanco, 2005)

Otros parámetros tenidos en cuenta para su elección han sido su cantidad dentro de los RCD (Figura 2-4) y su impacto medioambiental e importancia dentro de la industria de la construcción (explicados en los apartados siguientes 2.1.1.1 , 2.1.1.2 y 2.1.2.2).

También estos cuatro materiales fueron elegidos por el hecho de permitir ser empleados entre ellos como materia prima para la producción de nuevos materiales de construcción, como es el caso del uso del yeso en el cemento y/o el uso del árido y del cemento en el hormigón.

Se exponen a continuación las principales características y formas de obtención de los materiales pétreos vinculados con los objetivos de la tesis, así como los principales impactos asociados a su producción.

La cerámica, aunque no se estudia como un material separado, se incluye dentro del árido mixto proveniente de los residuos de hormigón y cerámica. Así mismo, el vidrio se incluye como materia prima reciclada en la producción del cemento, en lugar de arcilla.

2.1.1.1 Pétreos naturales

Aunque dentro de este concepto se incluye lo que se conoce por suelos y rocas, en este caso nos centramos en las rocas y materiales granulares como material de construcción. Las rocas naturales empleadas para la construcción son mayoritariamente las rocas sedimentarias.

Dentro de las rocas sedimentarias, una de las más extraídas para ser usada en construcción es el yeso natural o aljez, formada por la cristalización del sulfato cálcico hidratado con dos moléculas de agua. El aljez se encuentra abundantemente en la naturaleza, especialmente en España (Guillén, 2005).

Otras de las rocas sedimentarias empleadas abundantemente en construcción, ya sea como material o como materia prima para la producción de otro material, son las gravas, las arenas, los limos y las arcillas. La distinción o separación entre estas se efectúa básicamente por el tamaño del grano. De este modo, las gravas presentan un tamaño ≥ 2 mm, las arenas entre < 2 mm y ≥ 0.063 mm, los limos < 0.063 mm y ≥ 0.002 mm y las arcillas < 0.002 mm. Las gravas empleadas en el hormigón presentan un tamaño ≥ 4 mm (Crespo, 2010).

El proceso de obtención de los materiales pétreos naturales pasa normalmente por una serie de etapas que, según Yepes (2013), se pueden resumir en: eliminación de las capas no explotables (cubierta vegetal, estériles y rocas alteradas); extracción de los materiales consolidados (mediante explosivos normalmente) o sin consolidar (por vía seca o húmeda a través de máquinas excavadoras), y tratamiento (trituration, clasificación, limpieza).

El impacto ambiental de las operaciones extractivas está basado en la explotación de recursos no renovables y en la explotación minera, la cual puede dañar la calidad del medio ambiente. La actividad extractiva conlleva a la destrucción o perturbación de hábitats naturales, al impacto visual en el paisaje y diversas repercusiones en los niveles freáticos.

El proceso de extracción, perforación y voladura en las graveras produce consecuencias sobre el medio atmosférico, como es la generación de material particulado. Del mismo modo, por la disgregación del material rocoso y operaciones de carga, transporte, almacenamiento y trituración del material, se originan gran cantidad de partículas finas y emisiones gaseosas. También se puede presentar contaminación del aire debido a la emisión de sustancias que agotan la capa de ozono (gases como freones y halones, entre otros). El proceso de voladura y operaciones de trituración y clasificación del material puede ocasionar impacto por la generación de ruido y vibraciones (Brodtkom, 2002).

Muchos de los impactos de la industria de la construcción se atribuyen al proceso de extracción de las materias primas. Según Dixit *et al.* (2010), la industria de la construcción es una de las que requiere más recursos naturales. El trabajo civil y la construcción de edificios a nivel mundial consumen el 60 % de las materias primas extraídas de la litosfera; de este volumen los edificios representan el 24 % de las extracciones globales. El consumo de recursos lleva asociado también un gasto energético (Zabalza *et al.*, 2011). Además, la industria del sector de los áridos presenta un consumo de energía intenso a través de la energía eléctrica procedente de la red o generada en la propia explotación para la planta de tratamiento y dependencias auxiliares y debido al uso de combustible fósiles para los equipos móviles (Gremi d'Àrids de Catalunya, 2011).

También Limbachiya *et al.* (2012) refuerza esta idea al expresar que la extracción y trituración del árido virgen provoca el uso de grandes cantidades de energía y mayores emisiones de CO₂.

2.1.1.2 Pétreos artificiales

❖ Aglomerantes

➤ Yeso

El yeso de construcción es el producto en polvo obtenido por calcinación y molienda de la piedra de yeso o aljez, compuesto por varias fases anhidras o semi-hidratadas del sistema sulfato cálcico-agua y al amasarse con agua tiene la propiedad de poder endurecerse mediante un proceso físico-químico, denominado fraguado.

En la Tabla 2.2 se exponen los diferentes tipos de yeso usados en construcción dependiendo de la temperatura que se utilice para su deshidratación.

Tabla 2.2 Tipos de yeso empleados en construcción de acuerdo al grado de humedad (Anaya y Chaoca, 2009)

Temperatura	Tipo de yeso
Tempera ambiente	Piedra de yeso o sulfato de calcio bi-hidrato ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)
107° C	Formación de sulfato de calcio hemi-hidrato ($\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$)
107° C-200° C	Desecación del hemi-hidrato, con fraguado más rápido que el anterior (yeso comercial para estuco)
200° C-300° C	Yeso con ligero residuo de agua, de fraguado muy lento y de gran resistencia
300° C-400° C	Yeso de fraguado aparentemente rápido, pero de muy baja resistencia
500° C-700° C	Yeso anhidro o extra cocido, de fraguado muy lento o nulo (yeso muerto)
750° C-800° C	Empieza a formarse el yeso hidráulico
800° C-1000° C	Yeso hidráulico normal o de pavimento
1000° C-1400° C	Yeso hidráulico con mayor proporción de cal libre y fraguado más rápido
1450° C	Temperatura de fusión del yeso

En el proceso de obtención del yeso para construcción además de los impactos ocasionados por la industria extractiva, también influye en gran medida el consumo de combustible durante el proceso de cocción para el secado de ambos productos.

Dentro de los productos de construcción en los que se emplea el yeso, cabe destacar los moldes de yeso y las placas de yeso laminado. La cantidad de placas de yeso producidas a nivel mundial son 80 millones

de toneladas al año (Ragab, 2014). En Europa, específicamente, se instalan anualmente más de 1600 millones de metros cuadrados de placa de yeso en interiores (Proyecto IRCOW, 2011).

Estas placas de yeso laminado consisten en tableros formados por un alma de yeso íntimamente ligada a dos láminas de papel-cartón, las cuales son consideradas como un material básico de construcción por su versatilidad.

➤ *Cemento*

La fabricación del cemento se divide, de acuerdo con Medina (2007), en tres etapas básicas:

- Obtención y preparación de materias primas. La obtención de la proporción adecuada del óxido de calcio, óxido de silicio, óxido de aluminio y óxido de hierro, se realiza mediante la dosificación de los minerales de partida: caliza y marga para el aporte de CaO, y arcilla y pizarras para el aporte del resto de óxidos. Estas materias primas son transportadas a la fábrica de cemento donde se descargan para su almacenamiento.
- Molienda y cocción de materias primas. La finalidad de la molienda es reducir el tamaño de las partículas de materia prima para que las reacciones químicas de cocción en el horno puedan realizarse de forma adecuada. La molienda de materias primas (molienda de crudo) se realiza en equipos mecánicos rotatorios, en los que la mezcla dosificada de materias primas es sometida a impactos de cuerpos metálicos o a fuerzas de compresión elevadas. El material procesado en el horno rotatorio alcanza una temperatura en torno a los 1450° C.
- Molienda de cemento. El proceso de fabricación de cemento termina con la molienda conjunta de clínker, yeso y otros materiales denominados adiciones con el fin de conferir al hormigón diferentes propiedades. Una vez obtenido el cemento se almacena en silos para ser ensacado o cargado a granel.

En cuanto a los impactos medioambientales de la industria del cemento se tiene que esta es una de las que emiten más gases de efecto invernadero, especialmente la emisión de CO₂ (Li *et al.*, 2014). Esto es debido a las calcinaciones de la materia prima para la producción de cemento y quema de combustibles necesarios para mantener las altas temperaturas en el horno. Cantidades indirectas de CO₂ vienen del consumo de electricidad que es generado por la quema de combustibles (Ali *et al.*, 2011).

El carbón, los combustibles de petróleo y el coque de petróleo son las mayores fuentes de energía necesarias en el proceso de manufactura del cemento. También se usa el gas natural en muchas industrias cementeras del mundo (Ali *et al.*, 2011).

El impacto del cemento está principalmente condicionado por la producción del clínker. Este impacto es más grande que el del mortero de cemento (cemento y arena) y que el del hormigón (cemento, grava

y agua), ya que la mezcla de cemento con materiales de bajo impacto como la grava, la arena y el agua ayuda a reducir el impacto. Estos productos típicamente representan un 40 % -60 % del total de peso de un edificio convencional, lo que afecta en gran medida al impacto medioambiental. Como se ha mencionado anteriormente, la influencia del clinker en el proceso de producción en el ciclo de vida de todos los productos que usan cemento es altamente significativa. Por ello, para tratar de reducir el impacto de estos productos, es esencial alcanzar una mayor eco-eficiencia en la producción del clinker como material de partida para todos ellos (Zabalza *et al.*, 2011).

De acuerdo con Ali *et al.* (2011) y Matos y Sousa-Coutinho (2012), el subsector del cemento consume aproximadamente del 12 %-15 % del uso de la energía industrial, contribuyendo con un 7 % del total de las emisiones de CO₂ mundiales (1.8 Gt de emisiones de CO₂ anualmente). Así mismo, aproximadamente 0.9 t -1 t de CO₂ son producidas por una tonelada de clinker, dependiendo del tipo de combustible usado (carbón, combustible de petróleo, gas natural, coque de petróleo y combustibles alternativos) (Ali *et al.* 2011). El total de las emisiones de CO₂ depende principalmente del tipo de proceso de producción, del uso del combustible y de la relación clinker/cemento (Ali *et al.*, 2011).

Las herramientas y estrategias para remediar estos impactos ambientales consisten en usar materiales reciclados en lugar de recursos naturales (Aouad *et al.*, 2012).

❖ Conglomerantes

➤ Hormigón

El hormigón es un material de construcción constituido básicamente por la mezcla de cemento, árido fino, árido grueso y agua. También puede estar compuesto por aditivos que mejoran sus propiedades tanto en estado fresco como endurecido. Entre estos ingredientes, el árido juega un papel muy papel crucial en hormigón ya que ocupa alrededor de un 60 %-75 % del volumen total del hormigón (Behera *et al.*, 2014).

La gran popularidad del hormigón se debe a sus excelentes características, ofrece una buena resistencia a compresión, un buen comportamiento a fatiga, una excelente resistencia al agua, un buen comportamiento frente al fuego y requiere un bajo coste de mantenimiento.

Las estructuras de hormigón y hormigón armado son competitivas cuando se comparan con otros materiales como las estructuras metálicas, no solo por sus costos iniciales, sino incluyendo las necesidades de mantenimientos y reparaciones (González, 2012).

En cuanto a los costes ambientales, el uso del hormigón también acarrea unos grandes costes dentro de lo que se destaca, la gran cantidad de energía consumida y CO₂ liberado durante su fabricación, principalmente en el proceso de producción del cemento como uno de sus principales componentes. Además, la obtención de áridos y materias primas necesarias para la obtención del cemento, puede implicar la destrucción de ciertos hábitats así como causar problemas de contaminación en el aire y agua de la zona (González, 2012).

Por otro lado, el hormigón armado muy empleado en obras civiles y edificaciones está conformado además del hormigón, por el acero. El acero puede obtenerse por medio de la producción primaria o secundaria. El método empleado para la fabricación del acero depende de la materia prima. Si la materia prima es del arabio procedente del horno alto, lo que más se emplea son los convertidores (horno básico de oxígeno) (Rossi *et al.*, 2012), pero si lo que se utiliza es, básicamente, chatarra de origen muy variado (acero reciclado compuesto por diversos materiales debidamente triturados y clasificados), el horno eléctrico es la instalación adecuada (Bustillo y Calvo, 2005; Rossi *et al.*, 2012; Sodsai y Rachdawong, 2012).

Globalmente, la producción de acero contribuye a la más grande cantidad de gases de efecto invernadero de todos los metales, acerca del 7 % de la producción global de CO₂ producido por los combustibles fósiles. Esto es porque, a pesar de que el acero tiene un bajo contenido de energía incorporada, éste es producido en grandes cantidades (acerca de 1 billón de toneladas por año) (Rankin, 2012). Por ello, se intenta cada vez más producir acero a partir de material reciclado.

Algunos autores (Tam, 2009) han efectuado estudios de reciclaje de acero en los que se ha visto que por cada kilogramo de acero secundario producido (reciclaje de acero) se previene la emisión de 1.2 kg CO₂-Eq (74 %) con respecto a la producción de la misma cantidad de acero primario. Durante el reciclaje del acero se consume menos energía tanto en el uso de recursos como en las emisiones de CO₂, ya que no es necesario efectuar el proceso de reducción del hierro que se lleva a cabo durante la producción primaria del acero (Yellishetty *et al.*, 2011; Sodsai y Rachdawong, 2012). Sin embargo, es importante tener en cuenta que durante el proceso de fundición del acero se emiten sustancias que pueden provocar efectos carcinogénicos en la salud humana como son las dioxinas (Krishnaraj, 2015).

2.1.2 Residuos de construcción y demolición. Impactos medioambientales y sistemas de gestión

2.1.2.1 Generalidades de los residuos de construcción y demolición

De acuerdo con Ramesh *et al.* (2010), el término residuos de construcción y demolición, es usado para referirse a los residuos sólidos que se producen en el sector de la construcción. Más específicamente, el

término es definido como el residuo que surge de las actividades de construcción, renovación y demolición. En España según el Plan Nacional Integrado de Residuos (PNIR 2008-2015), el residuo de construcción y demolición (en adelante RCD), incluye cualquier sustancia u objeto que se genera en una obra de construcción y demolición, exceptuando:

- Las tierras y piedras no contaminadas por sustancias peligrosas.
- Los residuos que se generen en obras de construcción y/o demolición regulados por una legislación específica, cuando no estén mezclados con otros RCD. Es el caso de los residuos de aceites industriales usados, de los residuos peligrosos en general, de los residuos de envases, de los neumáticos fuera de uso, de las pilas y baterías o de los residuos de aparatos eléctricos y electrónicos.
- Los residuos de las industrias extractivas.

Entre los RCD se incluyen una variada serie de materiales como productos cerámicos, residuos de hormigón, material asfáltico y en menor medida otros componentes como madera, vidrio y plásticos (Yuan y Shen, 2011). En las obras civiles como carreteras se generan como principales residuos, los asfaltos y los hormigones (Toscano, 2008). Los componentes principales de estos residuos dependen de los materiales utilizados, de las prácticas constructivas y del desarrollo tecnológico del sector (CEDEX, 2010).

Cabe destacar también que los residuos de construcción y demolición varían dependiendo del año de construcción de la obra de la que provienen. De este modo, en las edificaciones del siglo XVIII y principio del XIX predomina el uso de la madera, la mampostería y la cerámica roja, mientras que en las de finales del siglo pasado y en la actualidad, predominan el hormigón, el metal y los plásticos (Toscano, 2008).

2.1.2.2 Impactos ambientales de la generación de los residuos de construcción y demolición

La mayor parte de los RCD se pueden considerar inertes o asimilables a inertes, es decir que no experimentan transformaciones físicas, químicas o biológicas significativas, y por lo tanto, su poder contaminante es relativamente bajo (Rao *et al.*, 2007). Sin embargo, éstos —al ser dispuestos en vertedero— pueden generar los siguientes efectos, según Elias (2000) y Yuan *et al.* (2011):

- Contribuir al deterioro del impacto visual urbano y del paisaje en general. Su impacto visual es con frecuencia alto por el gran volumen que ocupan y por el escaso control ambiental ejercido sobre los terrenos que se eligen para su depósito.
- Ocupar extensas áreas de tierras caracterizándolas como improductivas.

- Algunos materiales no inertes de los RCD (plomo, alquitrán, amianto, pintura) pueden provocar efectos adversos sobre el medio ambiente.
- Pérdida de materiales recuperables como escombros, plásticos y metales.
- Afectaciones económicas y ambientales debido al empleo de distintos equipos para mover y cubrir estos residuos.

La disposición final de residuos de la construcción y demolición (RCD) puede generar impactos ambientales negativos como la degradación y erosión de suelos, la destrucción de la vegetación y la pérdida de servicios ambientales (Mejía *et al.*, 2015).

Otro de los impactos que puede ocasionar la disposición de residuos en vertedero son los impactos asociados a la extracción u obtención de la materia prima por la necesidad de producir materiales o productos a partir únicamente de materia prima original.

En cuanto al yeso, la cantidad de este residuo llevada a vertedero a nivel mundial es de 15 millones de toneladas al año (Ragab, 2014). Si los residuos de yeso son aceptados en vertederos de residuos no peligrosos sin preverse un compartimento específico en el que no se admitan residuos biodegradables, su contenido en sulfatos puede descomponerse en sulfuro de hidrógeno (H₂S), el cual es un gas inflamable y peligroso que presenta efectos perjudiciales para el medioambiente y para la salud; aparte de lo anterior, incluso en pequeñas concentraciones puede generar problemas de olores (Chandara *et al.*, 2009).

2.1.2.3 Gestión de los residuos de construcción y demolición

De acuerdo con Tam (2009) existen diferentes opciones de gestión de residuos, cuya jerarquía depende de los impactos ambientales que estas generan. Los seis niveles de bajo a alto impacto medioambiental pueden ser: reducción, reutilización, reciclaje, compostaje, incineración y disposición final. Algunos autores (Yuan y Shen, 2011) han agrupado estos seis niveles en cuatro: reducción de residuos, reutilización, reciclaje y disposición.

Así mismo, la reutilización, el reciclaje y la reducción (llamadas también las “3Rs”), se constituyen en las tres principales estrategias de minimización de residuos que han sido usadas como principios básicos para la gestión de residuos de construcción y demolición, al ser las opciones ambientales más recomendables de acuerdo a los adelantos tecnológicos (Tam y Tam, 2006; Tam, 2009; Yuan y Shen, 2011).

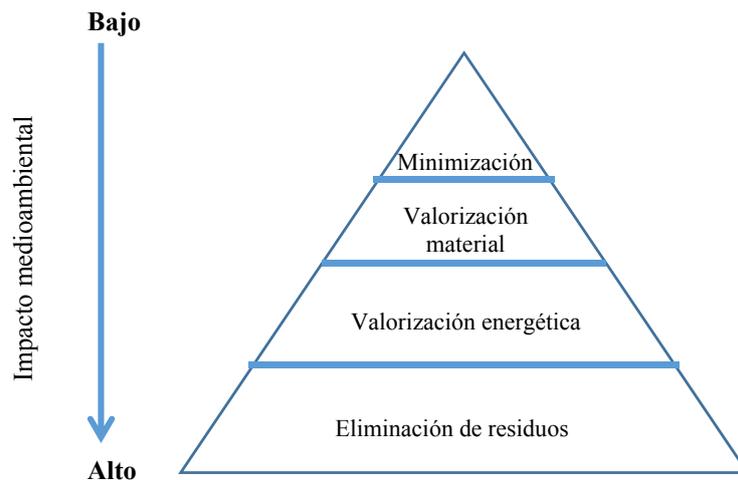


Figura 2-2 Opciones de disposición de residuos

Según la Directiva 2008/98/CE y la Ley Española de Residuos, el orden de prioridades de la gestión de los residuos es: prevención, reutilización, reciclaje, valorización energética y eliminación (vertedero, incineración sin recuperación energética o con baja recuperación energética). Estas estrategias se pueden agrupar para facilitar su empleo en 4 partes: minimización (prevención); valorización material (reutilización y reciclaje); valorización energética y estrategia de eliminación de residuos (Figura 2-2).

❖ Situación mundial

En el año 2012 la cantidad de residuos generados dentro de la UE- 28 teniendo en cuenta todas las actividades económicas y domiciliarias llegó a 2515 millones de toneladas. En la Figura 2-3 se puede ver que la industria de la construcción contribuye al 33 % del total con 821 millones de toneladas, seguido por la minería y las canteras (29 % o 734 millones de toneladas), fabricación (11 % o 270 millones de toneladas), hogares (8 % o 213 millones de toneladas) y energía (4 % o 96 millones de toneladas). A todo ello debe añadirse el 15 % que se debe a residuos generados por otras actividades económicas.

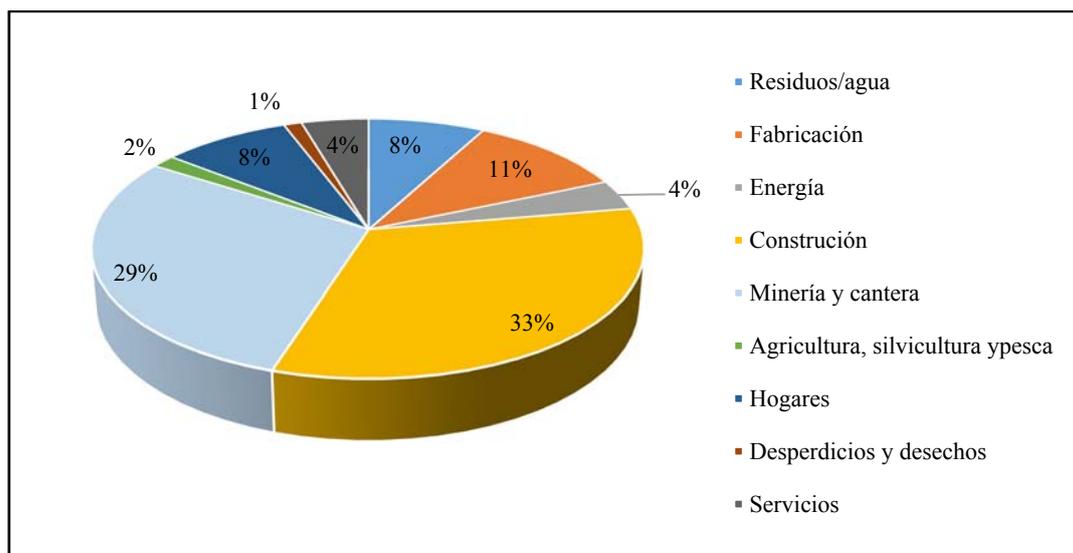


Figura 2-3 Cantidad de residuos generados dentro de la Unión Europea (EUROSTAT, 2012)

Para los países con escasos recursos naturales, el reciclaje de residuos de construcción y demolición resulta estratégicamente importante.

En países como Dinamarca, Países Bajos o Bélgica se está fomentando el reciclaje de estos residuos sobre otros destinos, como el vertido, y alcanzan porcentajes de reciclaje superiores al 75 %. Este hecho responde principalmente a la escasez de áridos naturales y de espacios para la ubicación de vertederos (Zabalza *et al.*, 2011).

Uno de los elementos para conseguir unas elevadas tasas de reciclaje ha sido el incremento del coste del vertido, o su prohibición en algunos casos, como en Dinamarca o Países Bajos. Sin embargo, en otros países todavía se reciclan pequeñas cantidades de residuos de construcción y demolición, destinando más de un 85 % de los mismos al vertedero. Entre estos países se encuentra España, el cual es uno de los países de la Unión Europea con menor número de plantas de reciclaje (CEDEX, 2010).

En Europa, existen países en los que además de los altos costes y tasas por el uso de depósitos controlados, también se imponen tasas por el uso de agregados vírgenes y se incentiva la investigación para las diferentes salidas de los residuos de construcción y demolición, para las instalaciones de reciclaje y para la producción y uso de los agregados reciclados (CEDEX, 2010). Sin embargo, se puede decir que dentro de la Unión Europea existe aún una insuficiente demanda de los residuos de construcción reciclados, además, la capacidad de reciclaje es muy limitada y la energía asociada al transporte muy significativa (Poon y Chan, 2007).

En otros lugares como Hong Kong, China y países en vías de desarrollo, existen según Poon y Chan (2007) un número de barreras que limitan el uso de agregados reciclados derivados de residuos de construcción y demolición como son:

- Ausencia de imposición de tasas por el uso de los agregados naturales, así como bajo precio de los agregados naturales comparados con el precio del reciclaje de los residuos de construcción y demolición.
- Especificaciones conservadoras en trabajos de ingeniería civil.
- Ausencia de políticas que lleven a diseñadores y contratistas a usar una adecuada proporción de agregados reciclados en los proyectos.
- Falta de conocimiento por parte de los profesionales de la industria de la construcción sobre el comportamiento de los agregados reciclados.

En varios estudios se ha podido comprobar que el estado de gestión de los residuos de construcción y demolición varía en cada país y región y estos dependen del uso de instrumentos de gestión y del grado en que sus contenidos han sido desarrollados (Chong y Hermreck, 2010). La energía total usada y la contaminación generada para reciclar materiales pueden ser drásticamente diferentes entre países por el tipo de transporte, la contaminación generada y las leyes medioambientales.

❖ **La gestión de RCD en España y Cataluña**

De acuerdo con los estudios hechos por el FERCD (2015) en algunas comunidades de España se han incrementado las toneladas gestionadas de RCD. Esto se debe al aumento de instalaciones autorizadas en la mayoría de los casos, y por tanto, al aumento del control de los RCD gestionados. Sin embargo, el control de estos residuos es muy bajo en comparación al resto de países europeos.

En España los datos más actuales de generación de RCD son los proporcionados por el FERCD (2015), los cuales provienen de datos suministrados por las comunidades autónomas entre los años 2009-2013. Estos datos incluyen las entradas en planta, entrada a los gestores y reciclaje en obra, entrada a vertederos y otros residuos generados de los que sólo se conoce su producción.

La producción de RCD en España en el periodo 2009-2013, teniendo en cuenta todos los residuos producidos, no sólo aquellos que son controlados oficialmente en las comunidades autónomas, llega a 155 millones de toneladas anuales. Así mismo, el reciclaje de RCD en España en el periodo 2009-2013 se sitúa en el 33 % de la producción total de RCD (FERCD, 2015).

La mayor parte de los residuos de construcción y demolición en España se generan en Cataluña, Andalucía Madrid y Valencia (63% del total). El resto de los residuos se distribuyen entre las restantes Comunidades Autónomas (Tabla 2.3).

Tabla 2.3 Datos promedios (2009-2013) de la producción total de RCD en cada comunidad autónoma

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

En la Figura 2-4 se establece la composición típica de los residuos en España, teniendo en cuenta los porcentajes en peso que representa cada fracción desagregada en el total de los escombros. Estos datos están basados en estudios estadísticos realizados en obras reales.

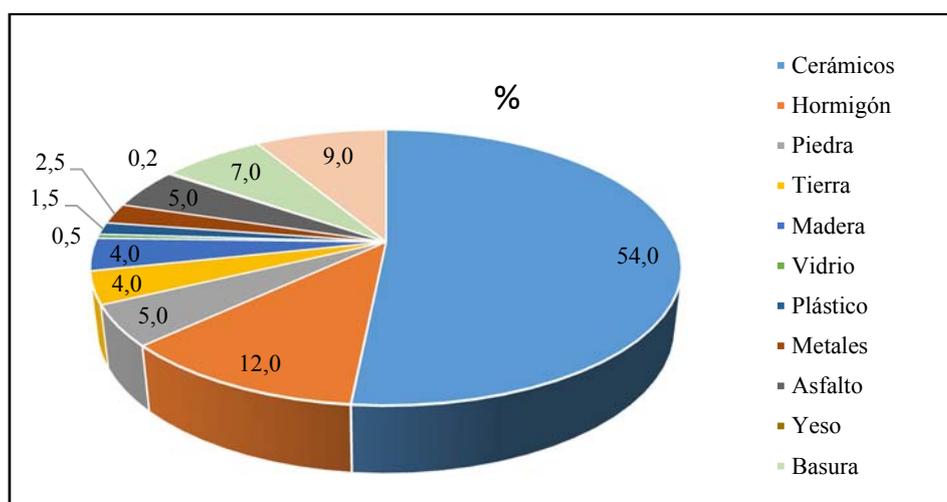


Figura 2-4 Composición en peso de los RCD producidos en obras de construcción en España (CEDEX, 2010)

Así mismo, en la Tabla 2.4 se muestra, de manera más concreta, la tipología de RCD de acuerdo al tipo de construcción.

Tabla 2.4 Residuos producidos según el tipo de construcción (FERCD, 2015).

Tipo de construcción	% RCD producido
Obra residencial	21
Obra de rehabilitación	43
Obra no residencial	13
Obra civil	23

En España, el sistema de gestión aplicado a estos residuos básicamente consiste en la disposición en vertedero y en el reciclaje. En la Figura 2-5 se observa la gestión llevada a cabo para los RCD en España para los años comprendidos entre 2009 y 2013.

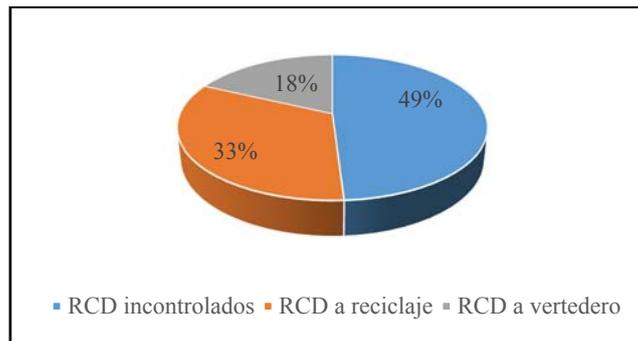


Figura 2-5 Gestión de los RCD en España entre los años 2009-2013 (FERCD, 2015)

Por otra parte, concretamente en Cataluña el sistema de gestión aplicado a los residuos de construcción y demolición entre los años 2009-2013 según datos del FERCD (2015) se muestran en la Figura 2-6.

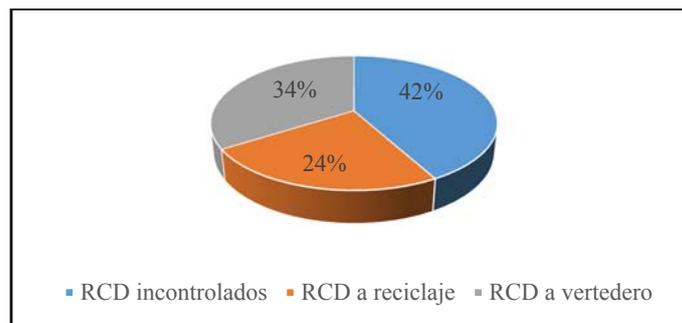


Figura 2-6 Gestión de los RCD en Cataluña entre los años 2009-2013 (FERCD, 2015)

De acuerdo a la ARC (2015a), dentro Cataluña existen en la actualidad 55 plantas de reciclaje de RCD distribuidas uniformemente en todo el territorio. El número de instalaciones de vertedero e incineradoras se muestran en la Tabla 2.5.

Tabla 2.5 Número de instalaciones de gestión de residuos dentro de Cataluña (ARC, 2015a)

Instalaciones	Nº
Plantas de reciclaje de RCD	55
Vertedero municipal	23
Vertedero de inertes	51
Incineradoras	16

2.1.2.4 Legislación en materia de residuos

❖ Unión Europea

A nivel Europeo existe una variedad de normativa relacionada con la gestión de los residuos. Entre estas sobresale la Directiva 2008/98/CE, la cual establece un marco jurídico para el tratamiento de los residuos en la Unión Europea teniendo como objetivo proteger el medio ambiente y la salud humana mediante la prevención de los efectos nocivos que suponen la producción y la gestión de residuos. Trata temas como la jerarquía y gestión de residuos, autorizaciones y registros para el tratamiento de residuos y planes y programas de gestión de residuos. De esta ha sido modificado el anexo II por la Directiva (UE) 2015/1127 de la comisión de 10 de julio de 2015. La Directiva Marco de Residuos constituye el principal instrumento normativo para cambiar el enfoque de la gestión de los residuos en Europa, al centrar su objetivo en la prevención y el reciclado.

Así mismo, en el marco de la Estrategia Europea (2020), la hoja de ruta hacia una Europa eficiente en el uso de los recursos, recoge los objetivos y los medios para transformar la economía actual (la cual está basada en el uso intensivo de los recursos), en un nuevo modelo de crecimiento basado en el uso eficiente de los mismos. La hoja de ruta citada establece varios objetivos intermedios para el año 2020, como son reducir la generación per cápita de los residuos, hacer que el reciclado y la reutilización sean opciones económicamente atractivas para los operadores y desarrollar mercados funcionales para las materias primas secundarias. Además, presenta como objetivos destacados el garantizar un reciclado de alta calidad, lograr que la recuperación de energía se limite a los materiales no reciclables, eliminar prácticamente el depósito de residuos en vertederos y la aplicación en su totalidad de la legislación sobre residuos.

También se encuentra la Directiva 1999/31/CE, la cual tiene como objetivo prevenir o reducir los efectos ambientales negativos del vertido de residuos. Enumera las distintas categorías de residuos y vertederos y establece un procedimiento de autorización de la explotación de un vertedero. Esta Directiva ha sido modificada por la Directiva 2011/97/UE del Consejo, de 5 de diciembre de 2011 en cuanto a los criterios específicos para el almacenamiento de mercurio metálico, considerado así residuo.

❖ España

En España, el Real Decreto 105/2008 incentiva nuevas tendencias en la gestión de residuos, como es la obligación del promotor o del productor de residuos de incluir en los proyectos de ejecución de las obras un estudio de gestión de los residuos de construcción y demolición. Así mismo, exige a las empresas una apuesta clara por la prevención en su generación de residuos y por el fomento de la reutilización y reciclado, junto con el desarrollo y potenciación del mercado de los subproductos obtenidos. Con este Real Decreto los gestores de residuos inertes, deberán adaptar sus instalaciones y procesos de tratamiento para dar respuesta a las disposiciones reglamentarias, mejorando el tratamiento ambiental de los residuos y fomentando la valorización de los mismos.

La Ley 22/2011, de 28 de julio, de residuos y suelos contaminados identifica la prevención como la primera opción de la política de residuos.

También en España, el Programa estatal de prevención de residuos (Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, 2013) tiene como objetivo último lograr en el 2020 la reducción en un 10 % en peso de los residuos generados en el 2010. Este programa estatal se configura en torno a cuatro líneas estratégicas destinadas a incidir en los elementos clave de la prevención de residuos: reducción de la cantidad de residuos, reutilización y alargamiento de la vida útil, reducción de la peligrosidad y reducción de los impactos ambientales.

❖ Cataluña

La Generalidad de Cataluña ha desarrollado un instrumento de planificación para el período 2013-2020, aprobado en el Consejo de Dirección de 16 de abril de 2014, denominado Programa general de Prevención y gestión de Residuos y Recursos de Cataluña 2013-2020 (PRECAT20). Como novedad, en el nuevo programa se pasa de tres programas basados en el origen de la generación de residuos a un único programa general orientado a tal fin. Dicha novedad introducida tiene el fin de vincular el binomio residuo-recurso y hacer posible la contribución de la correcta gestión de los residuos. Este programa tiene como objetivo —para el 2020— que la cantidad de residuos no peligrosos de la construcción y

demolición destinados a preparación para la reutilización, reciclaje y otra valorización material, alcancen como mínimo el 70 % en peso de los producidos.

2.2 Producción secundaria o reciclaje de los RCD

Normalmente el término producción primaria se emplea para designar toda actividad productiva que extrae materia prima directamente de la naturaleza.

En el ámbito de los materiales y de la industria, el término producción secundaria puede entenderse como aquel proceso productivo en el que se emplea materia prima secundaria, o lo que es lo mismo, aquel material que ya ha sido usado y que es considerado, en principio, como un residuo.

Estos términos han sido usados mayormente en la producción de metales, para definir la producción primaria y secundaria de los mismos. En la producción de metales, se llama producción primaria a la fabricación de distintos materiales metálicos a partir de material virgen y producción secundaria a la fabricación de dichos materiales a partir de material reciclado (Barroso e Ibáñez, 2014; Huang *et al.*, 2015; Jiang *et al.*, 2015).

También en los últimos años, debido a la necesidad de producir materiales alternativos, se ha usado el término “producción de materiales secundarios”. Este término ha sido usado por autores como Allacker *et al.* (2014) y Brogaard *et al.* (2014). En construcción, concretamente, este término ha sido usado también para referirse a materiales reciclados (Careddu *et al.*, 2013; Schwab *et al.*, 2014).

Es por ello por lo que en esta tesis se emplean los términos producción primaria y producción secundaria para designar la producción a partir de materia prima original o, en el segundo caso, a partir de material reciclado respectivamente en todos los materiales estudiados. La producción primaria también suele llamarse “producción convencional”... y la producción secundaria “reciclaje”.

2.2.1 Tipos de Reciclaje

En cuanto a los tipos de reciclaje existentes, la normativa internacional de evaluación del ciclo de vida (BS EN ISO 14044, 2006) distingue entre dos tipos de procesos de reciclaje: reciclaje de ciclo cerrado y reciclaje de ciclo abierto.

De acuerdo con Williams *et al.* (2010) y Allacker *et al.* (2014), el reciclaje de ciclo cerrado ocurre cuando el producto es reciclado al final de su vida en el mismo sistema de producto o cuando el producto es reciclado en un sistema diferente de producto, pero los materiales no cambian las propiedades inherentes de los materiales reciclados; es decir, un plástico de yogurt se puede reciclar en otro idéntico

plástico de yogurt o se puede reciclar en una caja de plástico, sin cambiar las propiedades inherentes de los materiales reciclados. Otro ejemplo es emplear hormigón triturado para fabricar hormigón regenerado (una masa de material particular vuelve a ser manufacturada dentro del mismo producto). En estos casos el material resultante del proceso de reciclaje reemplaza la producción a partir de material virgen en una proporción de 1:1.

Por el contrario, en el reciclaje de ciclo abierto el material reciclado se somete a un cambio en las propiedades inherentes (por lo general, con una pérdida de calidad). Los beneficios medioambientales se tienen en cuenta a partir del desplazamiento en la producción de otros productos. En este un producto hecho de un tipo de material es reciclado dentro de un tipo de producto diferente: por ejemplo, hormigón triturado dentro de cemento regenerado.

2.2.2 Procesos de reciclaje de los materiales/residuos estudiados

El estudio efectuado en esta tesis se centra en la producción secundaria o reciclaje de los residuos de construcción y demolición para ser introducidos en la producción de nuevos materiales pétreos. Por ello, a continuación, se expone en forma resumida el proceso de reciclaje de los residuos/materiales escogidos para ser estudiados.

2.2.2.1 Yeso

Uno de los problemas ambientales de este residuo reside en la mezcla del yeso con otros materiales; por ello, es importante llevar a cabo una separación selectiva de los materiales en la misma obra. Sin embargo, la ventaja del yeso es ser un material que se puede reciclar una y otra vez para fabricar productos de yeso, sin reducir sus prestaciones.

Para el reciclaje de este residuo se aplica la misma técnica de reciclaje de la cerámica y del hormigón; es decir, se somete a un proceso de trituración. Recientemente se están realizando ensayos de laboratorio en los que se estudian las propiedades del yeso reciclado, con el fin de poder ser empleado como enlucido de base en paredes y cielorrasos o como componente de nuevos cementos. Tal es el caso de Begliardo *et al.* (2007) quien siguió los siguientes pasos para el reciclaje de los residuos de yeso en construcción:

- Limpieza gruesa de contaminantes (madera, ladrillos y plástico)
- Secado en horno a 100° C para facilitar el tamizado
- Molienda y tamizado
- Nuevo secado a 110° C y 130° C

Dentro de los productos de construcción en los que se emplea el yeso, cabe destacar los moldes de yeso y las placas de yeso laminado. Por lo general, estas placas de yeso laminado se componen —en peso— por un 95 % de yeso y un 5 % de papel (WRAP, 2008). Este revestimiento de papel suele ser problemático durante el proceso de recuperación, por ello se intenta separar y reciclar de forma independiente. El yeso recuperado de estas placas puede reincorporarse para la producción de nuevas placas o para otros usos, entre los que se encuentra, por ejemplo, la producción de cemento.

Cuando la fibra de papel se encuentra en un porcentaje mayor del 1 % en el yeso reciclado, no sólo disminuye la proporción de material reciclado, sino que un alto contenido de éste puede ocasionar problemas en la producción del cemento, como es el bloqueo de los diafragmas en el proceso de molienda de las bolas de cemento... o el hecho de afectar a la viscosidad del cemento (WRAP, 2008). Por eso, se hace necesario hacer una adecuada separación del yeso y del papel.

Algunos estudios efectuados por WRAP (2008) identifican que el contenido de papel en el yeso reciclado se encuentra entre un 1 % - 2 %; sin embargo, algunos equipos son capaces de reducir el contenido de papel en el yeso reciclado hasta un 0.5 %, como es el caso de los equipos de Gypsum Recycling International (GRI, 2015). Esto comprueba que la tecnología necesaria para eliminar el contenido de papel a partir de residuos placas de yeso a menos del 1 %, es fácilmente disponible.

Por otra parte, el papel proveniente de las placas de yeso laminado puede ser también reciclado. En un proyecto cofundado por la iniciativa eco-innovación de la Unión Europea se ha alcanzado una tasa de reciclado de 100 % de este residuo mediante el desarrollo de una nueva tecnología que lo convierte en una valiosa materia prima para la industria del papel (GRI, 2015).

El reciclaje de papel presenta muchas ventajas medioambientales como son: la protección de recursos forestales, la reducción de la cantidad de residuos y la disminución de los costes de tratamiento de dichos residuos. Los recursos de madera ahorrados pueden ser utilizados para la generación de energía, lo cual evita el calentamiento global (Schmidt *et al.*, 2007).

La fabricación de papel a partir de fibra secundaria implica además importantes ahorros de energía y agua comparativamente a los procesos que involucran fibras vírgenes (López, 2007) (Area y Mastrantonio, 2012). La Confederación de Industrias Papeleras Europeas (CEPI, 2007) ha desarrollado un esquema de huella de carbono que involucra los diez elementos que cubren el ciclo de vida completo de los productos forestales. En este esquema se indica que una de las consecuencias positivas del reciclaje del papel sobre los gases de efecto invernadero es que no se emite el metano que se produciría si el papel se enviara a los vertederos de los rellenos sanitarios.

Por último, Cheung y Pachisia (2015) han encontrado ventajas en el reciclaje de los residuos de papel y ha efectuado una revisión de cómo éstos pueden ser reincorporados a través del reciclaje y la reutilización. Para esto, ha desarrollado un modelo para predecir las fluctuaciones de los costes bajo

diferentes restricciones de fabricación. Es importante destacar también, que la disposición de los residuos de papel en el vertedero genera impactos debido a que los compuestos de nitrógeno del vertedero se disuelven en el lixiviado y, como se asume la presencia de fugas, resulta ser un aporte a la eutrofización (Güereca, 2006).

2.2.2.2 Cemento

El cemento se puede reciclar e introducir en nuevos materiales, como es el caso de la producción de nuevo cemento o de la producción de hormigón; tratándose en este caso de un reciclaje cerrado. Gastaldi *et al.* (2015) y Kwon *et al.* (2015) han realizado estudios de este tipo de reciclaje. Sin embargo, en esta tesis se estudia la producción de cemento como producto a partir de material reciclado (vidrio y yeso) proveniente de los RCD y no la obtención de cemento triturado como subproducto de reciclaje.

Por ello, en este caso, el proceso de producción de cemento permanece igual al del cemento ordinario, de modo que sólo varía el tipo de materia prima empleada y los impactos asociados a su obtención.

2.2.2.3 Áridos y hormigón

Se entiende por árido reciclado a aquél que resulta del tratamiento de material inorgánico previamente utilizado en la construcción. Según el origen de los residuos pueden distinguirse áridos reciclados procedentes de hormigón, áridos reciclados procedentes de residuos cerámicos, y áridos reciclados mixtos, siendo estos últimos los obtenidos a partir de residuos de distinta naturaleza (López, 2008; Rueda, 2011).

Así mismo, se entiende por hormigón reciclado aquél que se fabrica con árido reciclado o con mezcla de árido reciclado y árido natural (López, 2008).

La principal diferencia entre los áridos reciclados y los áridos naturales se encuentra en la cantidad de mortero adherido que incorporan los primeros debido al hormigón original del que proceden (Gómez *et al.*, 2011). La cantidad de mortero adherido hace que los áridos reciclados presenten propiedades distintas a los naturales que se reflejan en un aumento de la absorción de agua, menor densidad, menor dureza y una menor resistencia a la fragmentación.

En general, la reducción de la cantidad de mortero adherido en los áridos puede lograrse mediante trituraciones sucesivas. Los áridos reciclados alcanzan un valor correspondiente al 90 % de la densidad del árido natural, después de haberlos sometido a dos etapas sucesivas de triturado mediante machacadora de mandíbulas y trituradora de impactos. Dicho valor alcanza el 95 % cuando se llevan a cabo cuatro etapas de trituración (López, 2008).

Es por esto por lo que la calidad del árido reciclado depende de la cantidad de mortero adherido y, en menor medida, de la resistencia del hormigón original (Sánchez de Juan, 2004). Las propiedades de los áridos reciclados que más control necesitan por su mayor diferencia respecto de las de los áridos naturales son: la densidad, la absorción y la porosidad (López, 2008).

En cuanto a las principales aplicaciones de los áridos procedentes de hormigón triturado pueden ser: árido grueso para hormigones, árido fino para morteros... y finos para cementos (CEDEX, 2010). Los escombros de mampostería pueden utilizarse en terraplenes y obras de tierra con las adecuadas condiciones de homogeneidad y limpieza, siendo muy recomendable eliminar el yeso por la posibilidad de causar reacciones expansivas (CEDEX, 2010).

El árido mixto puede utilizarse para la fabricación de un hormigón no ligero de aplicación en la construcción de estructuras de hormigón en masa y hormigón armado, tales como: muros de sótano, pilas de hormigón, chimeneas, todo tipo de productos de hormigón armado prefabricado, elementos para tejados, bloques de hormigón o tejas de hormigón para tejados (CEDEX, 2010).

❖ **Proceso de reciclaje del árido**

El proceso de producción de árido reciclado varía de unas plantas a otras según las necesidades y el destino final del producto obtenido.

En general, una vez los residuos llegan a la planta de reciclaje, éstos son pesados en una báscula y posteriormente son descargados en el suelo. En el caso en que los residuos lleguen mezclados, las piezas grandes de madera, plástico y metal se separan de manera manual y se ubican en un sitio aparte por medio de la misma maquinaria, que transporta los residuos hasta la trituradora. Los bloques de hormigón de gran dimensión se reducen con un martillo hasta conseguir el tamaño adecuado. Antes de triturar y clasificar el material se realiza un pre cribado del mismo. Dicho sistema consta de una criba de tamaño normal 160 mm dispuesta en serie con otras cuyos tamaños habituales son 80 mm y 40 mm. Los rechazos en las dos primeras alimentan el molino primario.

La trituración primaria, consta por lo general en las plantas fijas de un molino de impactos, un separador magnético, cabina de triaje, cribas y cintas transportadoras. A la salida del molino primario se encuentra un separador magnético, el cual separa los elementos metálicos que puedan haber quedado mezclados con el hormigón. El separador neumático permite eliminar los elementos de más baja densidad.

El material resultante pasa a una cabina de triaje donde, de manera manual, se eliminan los restos de plásticos, maderas, o metales no detectados en el separador magnético. El árido reciclado se introduce en una tolva con una criba de corte de 40 mm a través de una cinta transportadora. Todo lo que pasa se transporta a otras cribas dispuestas en serie y con luces de malla correspondientes a los cortes de la

grava, la gravilla y la arena formando los diferentes acopios. Lo que queda retenido pasa a la trituration secundaria donde se reduce el tamaño del material hasta obtener la granulometría deseada.

En el caso en que en una planta de reciclaje se emplee un tratamiento terciario, los pasos a seguir se mencionan a continuación:

- Tratamiento primario: Los materiales que tienen un tamaño inferior a 150 mm llegan a un silo y los que no han llegado a 150 mm sino que tienen un tamaño superior, vuelven a pasar por el molino hasta alcanzar un tamaño inferior a los 150 mm.
- Tratamiento secundario: Una vez los residuos con un tamaño inferior a 150 mm son depositados en el silo, luego pasan por una pantalla giratoria, donde se efectúan 4 cortes: 60 mm, 100 mm, 120 mm y 150 mm.
- Tratamiento terciario: Está compuesto por un silo, un molino y una criba en la cual se separa el material en tres fracciones: 0-20 mm, 20-40 mm y 40-60 mm. El material mayor a 60 mm vuelve a entrar a trituration terciaria.

❖ **Proceso de producción del hormigón a partir de material reciclado**

Al fabricar hormigón reciclado es importante tener en cuenta que la dosificación del hormigón se realiza de manera similar a la de un hormigón convencional (Sánchez de Juan, 2004; López, 2008). Sin embargo, hay que destacar, como se mencionó anteriormente, que el empleo de áridos reciclados en la fabricación de hormigón afecta a las propiedades del mismo.

Debido a la elevada absorción que tienen los áridos reciclados, si se utilizan en estado seco, absorberán un importante contenido de agua, produciendo una elevada consistencia del hormigón reciclado durante el amasado, por lo que se aconseja una modificación del contenido de agua en la dosificación.

Esta modificación puede realizarse mediante la pre-saturación o humectación del árido, o añadiendo el agua suplementaria directamente en la amasadora. De este modo, es el contenido de agua efectiva (después de haberse producido el proceso de absorción por parte de los áridos), lo que determinará el grado de consistencia del hormigón y sus propiedades finales.

Normalmente, los valores de relación agua/cemento (a/c) totales utilizados son mayores que los que se suelen utilizar para hormigones convencionales; sin embargo, si se realiza una adecuada corrección, se puede conseguir una relación a/c efectiva similar.

A continuación, se menciona la dosificación empleada en estudios efectuados en los que se evalúa la viabilidad técnica de la producción de hormigón reciclado.

López (2008) emplea para la obtención de un hormigón estructural con una resistencia a compresión de 35 N/mm² una relación a/c de 0.50. Para ello utiliza 187.5 l de agua y 375 kg de cemento.

Sánchez de Juan (2011) emplea tanto para el hormigón de control, como para el hormigón reciclado no estructural con 100 % árido reciclado (de resistencia a compresión de 15 N/mm²), una dosificación como la mostrada en la Tabla 4.3.

Tabla 2.6 Dosificación del hormigón no estructural (Sánchez de Juan, 2011)

Dosificación por m ³	Hormigón de control (HC)	Hormigón reciclado (HR)
Agua (l)	187.5	187.5
Cemento (kg) CEM I 42.5 R	250	250
a/c	0.75	0.75
Aditivo plastificante (kg)	1	0
Arena (0/4 mm)(kg)	886	998
Gravilla (4/8 mm) (kg)	400	0
Grava (8/32 mm)(kg)	707	0
Árido reciclado (4/32mm)(kg)	0	730

Poon y Chan (2006) estudian la producción de bloques de pavimento con árido reciclado de hormigón y árido de cerámica. En una de sus muestras emplearon una relación de a/c de 0.75 y una cantidad de árido reciclado mixto de 75 %, para lo cual alcanza una resistencia en el hormigón de alrededor de 20 N/mm².

Poon *et al.* (2004) utilizan aproximadamente un 10 % de agua adicional cuando utiliza un 100% de árido proveniente de hormigón en la producción de hormigón reciclado. Por otra parte, Geraldés (2013) encuentra que la absorción de agua por inmersión bajo vacío aumenta hasta un 10 % y 15 % en valor absoluto en hormigones con un 50 % y un 100 % de árido reciclado mixto, debido a la mayor porosidad de los materiales cerámicos.

2.2.3 Estudios efectuados que evalúan el reciclaje de los RCD

A continuación, se presentan las diferentes alternativas de reciclaje de los materiales pétreos elegidos y los resultados obtenidos a nivel de laboratorio o de proyectos, con el fin de conocer la viabilidad técnica del reciclaje de estos materiales.

2.2.3.1 Yeso

Godinho-Castro *et al.* (2012) han efectuado la incorporación de residuos de yeso en productos de bloque cerámico y ha evaluado la composición física y química de los bloques cerámicos, la resistencia a la compresión y la eco-toxicidad potencial de los mismos. Ha empleado diferentes proporciones de arcilla, de cemento y de residuos de yeso. En este estudio se demuestra la viabilidad del reemplazo de un 20 % de arcilla por yeso reciclado en la fabricación de este tipo de bloque en la industria cerámica.

Así mismo, en un estudio efectuado por Guillén (2005) se destaca el reciclaje del yeso a partir de moldes usados. Los fragmentos de los moldes, una vez separados de elementos plásticos y metálicos, pueden ser triturados y clasificados hasta obtener un tamaño adecuado para ser añadido al clínker de cemento como regulador de fraguado o en la agricultura como corrector de pH, enmienda cálcica y aditiva para plantas de compostaje.

Por otra parte, se han llevado a cabo diferentes pruebas de laboratorio para estudiar las propiedades del yeso reciclado para el uso del yeso en paredes y techo. Se ha podido comprobar que la incorporación al yeso comercial de residuos de yeso recuperado, previamente sometidos a un proceso de molienda y secado a temperaturas de 110° C y 130° C, en porcentajes variables de hasta el 15 % en peso, permite obtener mezclas que conservan sus propiedades aglomerantes (Begliardo *et al.*, 2007).

En España, concretamente, se recicla la placa de yeso laminado compuesta de una mezcla de yeso y aditivos la cual se encuentra envuelta en dos láminas de celulosa y papel (Fernández, 2010). La empresa Knauf GmbH, con sucursal en España, fabrica placas de yeso laminado y efectúa a la vez el reciclaje de la misma y la separación del yeso y del papel.

2.2.3.2 Cemento

En cuanto al reciclaje abierto del cemento se han dado grandes avances. Importantes investigaciones han empleado materiales cementantes suplementarios tales como ceniza volante, humo sílice y escoria en el hormigón para reducir los impactos (Usón *et al.*, 2013; Ioannou *et al.*, 2015; Morandeu *et al.*, 2015; Ma *et al.*, 2015; y Venkatanarayanan y Rangaraju, 2015).

Teniendo en cuenta que para producir cemento Pórtland ordinario es necesario añadir al clínker un retardador de fraguado, se han efectuado también estudios que incorporan residuos de yeso para este fin. Tal es el caso estudiado por Chandara *et al.* (2009), quien analiza el reciclaje del yeso para reemplazar el yeso natural en la producción de cemento Pórtland ordinario, llegando así a evaluar las propiedades mecánicas y químicas del cemento. Los esfuerzos de flexión y compresión encontrados fueron relativamente los mismos para ambos tipos de cemento. Los resultados de este estudio demuestran que

los residuos de yeso pueden ser usados como un material alternativo para el yeso natural en la producción de cemento Pórtland ordinario.

Se han efectuado otros ensayos para el uso de yeso reciclado en la producción de cemento (WRAP, 2008) y se ha encontrado que la química del sulfato cálcico del yeso reciclado no afecta las propiedades del cemento. Este mismo estudio indica que el uso del yeso reciclado en el cemento ofrece la oportunidad de minimizar los impactos medioambientales de la industria del cemento, a través de la reducción de las emisiones de CO₂ en el transporte del yeso (WRAP, 2008).

Por otra parte, el yeso se ha usado también en la producción del clinker de cemento. La adición de fosfoyeso en las mezclas de cemento muestra que la temperatura de combustión disminuye y por lo tanto mejora el proceso de combustión del clinker. La adición de 10 % de fosfoyeso permite una completa clinkerización a bajas temperaturas (1200° C) en lugar de 1470° C, lo cual incrementa la eficiencia de la fábrica de cemento a un 25 % y se alarga la vida útil del horno (Kacimi *et al.*, 2006).

También, Morales (2010) analiza la influencia que presenta la adición de diferentes proporciones de yeso reciclado frente al yeso natural en un sistema de mezcla de cemento ternario. Se determinan las resistencias mecánicas y se tiene como resultado que las adiciones de los residuos de yeso en los sistemas de mezclas estudiados muestran un comportamiento similar al sistema de referencia con adición de yeso comercial.

Por otro lado, el uso de vidrio reciclado en el cemento Pórtland ordinario ha cobrado mayor interés a nivel mundial debido a los altos costes de disposición y a la problemática ambiental asociada. El vidrio, al ser amorfo y contener grandes cantidades de silicio y calcio es de naturaleza puzolana, de forma que, al ser molido finamente, puede actuar como material cementante. La ventaja del reciclaje del vidrio consiste principalmente en que funde a una temperatura menor, por lo que requiere menos energía que si se emplea materia prima original. Como no todo el vidrio puede ser empleado para la producción de vidrio nuevo, debido a los altos requerimientos de calidad, el uso de vidrio reciclado proveniente de los RCD puede ser una opción atractiva para la producción de cemento debido a los bajos requerimientos de calidad que se exige en este caso (Jani y Hogland, 2014).

En este sentido, se han efectuado diferentes estudios en los que se ha usado vidrio reciclado en el cemento y en el hormigón. Algunos de estos han empleado vidrio reciclado como un árido (Tan y Du, 2013), otros lo ha usado como un reemplazo del cemento (Shao *et al.*, 2000; Idir *et al.*, 2011), y en algunos estudios se ha usado como árido y como reemplazo del cemento en la misma mezcla (De Castro y De Brito, 2013; Rashad, 2014).

Otros estudios que han efectuado el uso de vidrio reciclado para la producción de hormigón o de cemento son los de Shi *et al.* (2004); Dhir *et al.* (2004); y Shayan and Xu (2006). Todos estos autores estudian

bien sean las propiedades físicas o químicas del uso de este residuo en la producción de cemento u hormigón.

Shi y Zheng (2007), así como Matos y Sousa-Coutinho (2012), han comprobado que el uso de vidrio reciclado triturado en el hormigón fabricado con cemento Pórtland ordinario no presenta efectos negativos en las propiedades del hormigón. Debido a la similar composición química entre los residuos de vidrio y la arcilla se ha usado el vidrio reciclado como parcial reemplazo de la arcilla (Xie y Xi, 2002), o como reemplazo total de la arcilla en el cemento (Chen *et al.*, 2002).

Los porcentajes de materia prima y el análisis químico de la producción del clinker usado por Xie y Xi (2002) se muestran en la Tabla 4.2. El análisis de difracción de rayos X muestra que los residuos de vidrio no producen ningún nuevo material en el clinker y, por lo tanto, puede ser usado en la producción de cemento, pero en fracciones muy pequeñas por el alto contenido de álcali proveniente del residuo de vidrio.

Tabla 2.7 Proporciones de las materias primas en la producción del clinker (Xie y Xi 2002)(Jani y Hogland, 2014)

Relaciones en peso de las materias primas					
Mezcla	Arcilla	Mineral de hierro	Piedra caliza de bajo grado	Piedra caliza	Residuo de vidrio
1	6.2	0	63.29	77.14	0
2	3	0	62.53	76.68	4
3	0	0	63.29	74.36	7

Chen *et al.* (2002) también emplean los residuos de vidrio en lugar de la arcilla para la producción del clinker. De este modo los residuos de vidrio son mezclados con 80 % de caliza, 9 % de ceniza volante, 9 % de arena de sílice y 2 % de escoria de hierro. Los resultados muestran que no existen cambios significativos en los niveles de NO_x y SO₂ cuando se emplean los residuos de vidrio. Las propiedades físicas y químicas del cemento producido con residuos de vidrio son las mismas que en el cemento Pórtland ordinario. Se observa un incremento en el contenido de álcalis en el cemento con residuos de vidrio pero dentro de un valor aceptable (0.4 %).

Concretamente, Jani y Hogland (2014) estudiaron el uso de vidrio triturado como reemplazo de la arcilla en el cemento. En este estudio, el vidrio es triturado a un tamaño menor de 20 mm y adicionado en el horno rotatorio para la producción del clinker. Jani y Hogland (2014) encontraron que el tamaño de las partículas de los residuos de vidrio juega un papel importante en las propiedades puzolanas de este material.

Los residuos de vidrio triturado han sido empleados también en la producción de mortero como un parcial reemplazo del cemento (Matos y Sousa-Coutinho, 2012). Se han llevado a cabo programas experimentales en el laboratorio para estudiar las propiedades mecánicas y de durabilidad de este material como son: la actividad puzolánica, el tiempo de fraguado, la solidez, la gravedad específica, la distribución del tamaño de partículas, la resistencia a la reacción álcali-sílice, la resistencia a la penetración de iones cloruro, la absorción por capilaridad y la carbonatación. Los resultados del estudio efectuado por Matos y Sousa-Coutinho (2012) confirman que el vidrio puede ser considerado como material cementante, con el que se pueden alcanzar atractivos esfuerzos, además de buenos resultados en todas estas propiedades evaluadas.

También, Oliveira *et al.* (2013) al estudiar las propiedades del cemento con vidrio reciclado encontraron resultados muy positivos, ya que se mejoraron la mayoría de las propiedades mecánicas y físicas estudiadas al incorporar hasta un 20 % de árido de vidrio fino reciclado en el mortero. A los 28 días se alcanzaron mejores esfuerzos a flexión y a compresión en los morteros con 10 %, 15 % y 20 % de vidrio reciclado comparados con el mortero convencional. Los esfuerzos a flexión alcanzados en los morteros con 10 %, 15 % y 20 % de vidrio reciclado fueron un 29 %, 66 % y 86 % mayores con respecto al mortero convencional y un 31 %, 61 % y 91 % mayores los esfuerzos a compresión en relación al mortero de referencia. Aunque todos los morteros con vidrio reciclado son mejores que el mortero convencional, el que se efectuó con un 20 % de vidrio reciclado presentó los mejores resultados en todas las características evaluadas.

Aunque ciertas propiedades del vidrio hacen del mismo un buen agregado para el hormigón —entre las que se destaca su resistencia a la degradación, su elevada dureza y resistencia al desgaste— otras de sus propiedades pueden resultar perjudiciales, principalmente la baja tenacidad y la resistencia a la tracción, al igual que su elevada fragilidad. Muestra de ello es el estudio realizado por Hidalgo (2013) en el que emplea un 25 % de vidrio fino (tamaño máximo de 9.5 mm) y un 15 % de vidrio grueso (tamaño máximo de 25 mm), en el que se comprueba que aquéllos con un 25 % de vidrio de grano fino presentan una mayor resistencia a la compresión que aquellos con 15 % de vidrio de granulometría gruesa.

Existen otras iniciativas a nivel europeo como, por ejemplo, el Proyecto LIFE CLAYGLASS-LIFE 12/ENV/ES/000156. Éste es un proyecto piloto e innovador, seleccionado por la Comisión Europea dentro del Programa de Financiación LIFE+ (2013-2016), que trata sobre la adaptación al cambio climático de la industria cerámica estructural mediante el uso de vidrio reciclado como fundente. Dentro de los objetivos del Proyecto LIFE CLAYGLASS (2013) se encuentra aquél de alcanzar en la fabricación de cerámicas de gres un ahorro energético entre 10 % y 15 %, así como una disminución de las emisiones de CO₂ en torno a 2000 t/año para una fábrica de tamaño medio (capacidad de producción de 300 t/día).

2.2.3.3 Áridos y hormigón

En el tema de árido reciclado y hormigón reciclado se han efectuado numerosos estudios acerca de las diferentes propiedades y características tanto del árido como del hormigón, a nivel de laboratorio y a nivel de campo.

Por una parte se ha estudiado la durabilidad del hormigón con árido reciclado, la resistencia a la carbonatación, la absorción de agua por inmersión y capilaridad, y la resistencia a la penetración de iones cloruro en el hormigón.

Varios autores (Corinaldesi y Moriconi, 2009; Evangelista y De Brito, 2010; Sim y Park, 2011; Medina *et al.*, 2012; Anastasiou *et al.*, 2014; Bravo *et al.*, 2015) han evaluado la durabilidad mediante la determinación de la resistencia a la carbonatación y han concluido que el árido reciclado disminuye la calidad del hormigón endurecido en término de durabilidad.

En cuanto a la absorción de agua del hormigón, autores como Oliveira *et al.*, 2004; Correia *et al.*, 2006; Evangelista y De Brito, 2010; Matías *et al.*, 2013; Coelho y De Brito, 2013c; Ferreira, 2013; y Bravo *et al.*, 2015, han encontrado que es necesario incrementar la relación agua/cemento en algunas muestras cuando se reemplaza el árido reciclado por el árido natural.

La penetración de cloruros es junto con la carbonatación, el principal responsable de la oxidación del acero de refuerzo. Los autores que han evaluado la penetración de ion cloruro (Corinaldesi y Moriconi, 2009; Evangelista y De Brito, 2010; Ferreira, 2013; Bravo *et al.*, 2015), han encontrado que la penetración de los iones aumenta en aquellos hormigones en los que se reemplaza totalmente el árido natural por árido reciclado.

Por otro lado, se han efectuado estudios acerca del reciclaje del hormigón referidos a estudios de lixiviados. Del análisis de lixiviados del árido reciclado, realizado por Parra *et al.* (2006), se concluye que este árido y los lixiviados por él emitidos no son potencialmente peligrosos. Así mismo, los ensayos de lixiviación de áridos reciclados efectuados por la sociedad pública de gestión ambiental del Gobierno Vasco (IHOBE, 2011) validan ambientalmente la utilización de áridos reciclados mixtos en la fabricación de hormigones para aplicaciones en contacto con el terreno.

También se ha informado ampliamente una reducción de esfuerzo a compresión hasta de un 30 % para aquellos hormigones con 100 % de árido reciclado (Tam *et al.*, 2005; Butler *et al.*, 2011; Xiao *et al.*, 2012). Otros investigadores concluyen que la reducción en esfuerzo a compresión está entre 12 % y 25 % con 100 % de reemplazo de árido reciclado (Sánchez de Juan y Gutiérrez, 2004; Etxeberria *et al.*, 2007; Yang *et al.*, 2008; Rahal, 2007).

Otra propiedad mecánica inferior del hormigón con árido reciclado, frente al hormigón convencional, es el esfuerzo de tensión, el cual exhibe un comportamiento similar al esfuerzo de compresión cuando

se incrementa la cantidad de árido reciclado. Varias investigaciones acerca del hormigón con árido reciclado han mostrado que el efecto del contenido de árido reciclado en el esfuerzo a tensión es menor que en el efecto ocurrido en el esfuerzo a compresión. Algunos autores en su estudio han mencionado que la disminución en el esfuerzo a tensión llega a ser sólo un 10 % diferente cuando se reemplaza el árido natural por árido reciclado (Ajdukiewicz y Kliszczewicz, 2002; Yang *et al.*, 2008; Malešev *et al.*, 2010).

Así mismo, otro de los parámetros evaluados en el hormigón reciclado ha sido la influencia de diferentes condiciones de curado en el esfuerzo a compresión del hormigón de árido reciclado, y para esto se han empleado dos calidades de árido reciclado en la fabricación del hormigón, con una relación de agua cemento de 0.65. En este estudio, los áridos reciclados se añaden con su humedad natural a la mezcla de hormigón en diferentes proporciones (0 %, 20 %, 50 % y 100 %). Las muestras de hormigón se exponen a diferentes condiciones de curado durante 28 días (curado estándar y curado al aire libre). Los resultados del esfuerzo a compresión muestran que los resultados fueron similares para ambos tipos de hormigón cuando estos fueron expuestos bajo condiciones de curado estándar (Gayarre *et al.*, 2014).

Alaejos (2008) y Sánchez de Juan *et al.* (2011) concluyen que el límite del porcentaje de sustitución del árido grueso natural por árido reciclado —sin que se vean afectadas las características del hormigón endurecido— es un 20 %. A partir de dicho límite se observa un descenso en los valores de estas características, haciéndose más notable al aumentar el porcentaje de sustitución.

También se han obtenido hormigones de alto rendimiento al usar áridos finos de cerámica en el hormigón (Alves *et al.*, 2014; González-Corominas y Etxeberria, 2014). González-Corominas y Etxeberria (2014) utilizaron el 20 %, el 50 % y el 100 % de árido mixto grueso como reemplazo de árido grueso natural y el 15% y 30% de árido fino de cerámica como reemplazo de la arena natural. Las propiedades físicas, mecánicas y de durabilidad de los agregados reciclados fueron determinadas y comparadas con los resultados del hormigón convencional. Los resultados muestran que el hormigón producido con el 30 % de árido fino reciclado alcanza similares resultados y en algunos casos mejora las propiedades mecánicas y de durabilidad del hormigón de referencia. El hormigón fabricado con un 20 % de árido mixto grueso alcanza un esfuerzo a compresión similar al hormigón convencional de alto rendimiento (González-Corominas y Etxeberria, 2014).

Por otro lado, Marinković *et al.* (2010) comparan los impactos medioambientales del hormigón con árido natural y del hormigón con árido reciclado en un caso de estudio efectuado en Serbia, teniendo en cuenta dos escenarios de transporte para los áridos reciclados. En este caso se incluye también el transporte del hormigón desde la planta de producción hasta el lugar de construcción. El estudio de los impactos de la fase de producción del cemento y de los áridos resulta más grande para el caso del hormigón con árido reciclado que para el hormigón con árido natural. Por lo que se concluye que estos impactos medioambientales dependen del tipo y de la distancia de transporte.

Tošić *et al.* (2015) determinan la mejor opción del tipo de agregado y del escenario de transporte en la producción del hormigón, empleando un método de optimización multicriterio. Estos autores analizan varios tipos de hormigón con diferentes tipos de áridos usados (agregado de río, grava de cantera y agregado de hormigón reciclado) y diferentes escenarios de transporte. Los resultados presentan como opción óptima el hormigón con un 50 % de árido reciclado grueso. Este estudio identifica tasas para el agregado de río, tasas en vertedero y subsidios por el uso de árido reciclado como medidas viables para establecer igualdad de costes en agregado natural y agregado reciclado. Tošić *et al.* (2015) concluyen que el uso de árido reciclado en el hormigón resulta justificable y deseable cuando todos los aspectos técnicos, ambientales y económicos son tenidos en cuenta. Las alternativas con árido reciclado presentan ventajas medioambientales, en cambio la alternativa con árido natural presenta ventajas económicas.

Turk *et al.* (2015) evalúan el comportamiento medioambiental de diferentes tipos de hormigones: hormigón convencional, hormigón con árido reciclado y hormigón con árido reciclado y materiales alternativos, tales como ceniza volante, arena de fundición y escoria de acero. En este estudio los menores impactos se presentan en los hormigones en los que se emplea árido reciclado junto con dichos materiales alternativos. Los más grandes impactos ocurren en el hormigón convencional.

También Jiménez *et al.* (2015) evalúan tres tipos de hormigones producidos con diferentes métodos de dosificación. Estos autores comparan hormigones fabricados mediante el método ACI (instituto de hormigón americano), en el que emplea árido natural y árido reciclado..., y hormigones elaborados con la metodología de Bolomey (en el que sólo se utiliza árido natural) con hormigones con árido natural y árido reciclado en los que emplea un nuevo método de dosificación denominado volumen de mortero equivalente (EMV por sus siglas en inglés). Los resultados de este estudio confirman que los hormigones fabricados con el nuevo método de dosificación presentan mejor comportamiento medioambiental que los hormigones elaborados con los métodos convencionales de dosificación ampliamente reconocidos y utilizados.

Por otro lado, es importante tener en cuenta que, dentro del reciclaje del hormigón armado —además de la obtención de árido reciclado—, se incluye el reciclaje del acero, ya que se considera la mejor forma de valorizar este residuo. Uno de los atributos más importantes del acero o de cualquier otro metal es que este es infinitamente reciclable sin que pierda las propiedades claves tales como esfuerzo y ductilidad (Yellishetty *et al.*, 2011).

El reciclaje de metales resulta beneficioso frente a la producción de un nuevo material, ya que en muchos de ellos la materia prima para su producción es el mismo residuo metálico. Además, es menor el consumo energético al producir la misma cantidad de metal utilizando material reciclado que producirlo con materia prima nueva.

Según Zabalza *et al.* (2011), cada kilogramo de acero secundario previene la emisión de 1.2 kg CO₂ eq (74 %) con respecto a la misma cantidad de acero primario producido. Esto demuestra que la fabricación de acero en un horno de arco eléctrico (utilizado en el reciclaje de acero) consume menos energía cuando se compara con un horno de oxígeno básico (producción primaria), tanto en el uso de recursos como en las emisiones de CO₂ (Yellishetty *et al.*, 2011; Sodsai y Rachdawong, 2012). Por lo tanto, para la producción de acero, el horno eléctrico es la instalación adecuada (Bustillo y Calvo, 2005; Rossi *et al.*, 2012; Sodsai y Rachdawong, 2012).

Sin embargo, después de la mitad del siglo XX, la comunidad mundial ha comenzado a darse cuenta de que las prácticas de fundición de metales emiten contaminantes que afectan a la salud humana. Aunque para superar esta situación varios países del mundo han promulgado leyes que estimulan el nivel máximo de contaminantes que se pueden emitir en las fundiciones, es importante mencionar que en el proceso de fundición de los metales se emiten sustancias que pueden llegar a tener efectos adversos sobre la salud humana, como son las dioxinas (Krishnaraj, 2015). Por ello, también se han dado avances en las tecnologías de producción más limpias, tecnologías de fundición eficientes y dispositivos de control de la contaminación.

2.2.4 Estudios efectuados que incluyen la parte económica del reciclaje de RCD

Si bien las razones medioambientales tienen un gran peso en la decisión de reciclar los RCD y, por ello, han constituido el motor de la legislación, especialmente en Europa no hay que olvidar, que las motivaciones económicas juegan un papel fundamental en la decisión final. Es decir, el reciclaje de los RCD tiene que producir de alguna forma un beneficio económico a todas las partes implicadas. Por ello, desde hace años se están intentando desarrollar modelos económicos con el fin de que la legislación pueda establecer pautas que permitan asegurar, hasta cierto límite, la citada bondad económica del proceso (Bustillo, 2010).

De acuerdo con varios autores (Tam y Tam, 2006a; Toscano, 2008; Blengini y Di Carlo, 2010), el reciclaje ayuda a reducir los costes de producción de energía y transporte asociados a la producción de materiales. No obstante, en términos generales, existen diferentes versiones en cuanto a las ventajas económicas del reciclaje de los RCD.

Según Tam (2009), el reciclaje beneficia tanto al medioambiente como a las empresas constructoras en términos de reducción de costes. También ayuda a incrementar la competitividad de los contratistas a través de bajos costes de producción y mejor imagen (Tam, 2008). De acuerdo con Yuan *et al.* (2011), el reciclaje presenta también ventajas debido a que mantiene un mayor número de puestos de trabajo que cuando se envían los residuos al vertedero.

Así mismo, según datos del CEDEX (2010), el precio del hormigón fabricado con cemento reciclado con áridos finos procedentes de hormigón triturado resulta aproximadamente un 4 % menor que el del hormigón normal.

Sin embargo, en un estudio efectuado en Serbia por Tošić et al. (2015) resulta un coste menor para el hormigón producido a partir de árido natural con respecto al hormigón con árido reciclado, debido —en este caso— al mayor coste del árido reciclado y a un mayor coste de transporte de las materias primas para el caso del hormigón con árido reciclado.

También Hidalgo (2013) emplea vidrio reciclado en la fabricación de adoquín y encuentra que se incrementan los costes de producción comparado con el adoquín tradicional. El incremento en los costes del producto reciclado es un resultado del gasto que implica el transporte y procesamiento del vidrio. En este estudio los costes se consideraron para una producción a pequeña escala; eso implica que tales costes pueden ser disminuidos en caso de implementar la fabricación de este tipo de adoquines a gran escala, empleando así menos personal, molinos de gran capacidad y procesos automatizados.

Por otro lado, según Shi y Zheng (2007), los beneficios económicos del uso del vidrio reciclado en el cemento y en el hormigón pueden resultar muy significativos, dependiendo de las tasas impuestas por el vertido de los residuos en un país. Por ejemplo, en Estados Unidos la tasa de vertedero puede variar entre los \$40-\$100 por tonelada de residuos, mientras que los áridos de hormigón cuestan entre \$5-\$15 la tonelada, y los materiales cementantes suplementarios alrededor de \$30-\$80 la tonelada. Así mismo, el coste de la molienda por tonelada puede variar entre \$15-\$30, dependiendo de la escala de producción. Jani y Hogland (2014) apoyan también la idea de que el reciclaje de los residuos de vidrio puede ayudar al ahorro de energía y dinero.

Por otra parte, González (2012) encontró un ahorro del 7 % al producir hormigón con árido reciclado empleando un nuevo el método de dosificación basado en el A.C.I (*American Concrete Institute*), que permite una reducción del consumo de cemento a la hora de diseñar las mezclas. Como el cemento acarrea el 56 % del coste total de las materias primas, un ahorro de 7 % de este componente provoca un ahorro aproximado de 2.4 €/m³ en el precio final. Esta cifra, que no parece muy elevada, si se tiene en cuenta en las obras mayormente estructurales, puede suponer un importante ahorro presupuestario.

Así mismo, en los ensayos efectuados por WRAP (2008), los resultados indican que la máxima utilización de los suministros de yeso reciclado en el cemento podrían alcanzar casi los £2000000 ahorros anuales en el Reino Unido. Estos estudios identifican, por otro lado, que en el Reino Unido el coste por tonelada del yeso natural y del yeso reciclado resulta estar entre £8-£12 y £5-£8 respectivamente. El coste anual del producto de yeso en la industria del cemento podría potencialmente alcanzar £7200000 cuando el yeso empleado es el natural y potencialmente podría ser tan bajo como £3000000 cuando se obtiene como yeso reciclado, lo que indica un claro beneficio económico a favor

del yeso reciclado. Aunque los costes de transportes pueden representar una parte significativa de los costes globales de yeso, éstos no han sido considerados en detalle en este estudio.

Por otra parte, se ha comprobado la viabilidad económica de las plantas de reciclaje de RCD. Coelho y De Brito (2013a) y Coelho y De Brito (2013b) han constatado que, incluso en ausencia de intervención pública gubernamental, existe una clara alineación entre la viabilidad económica y los beneficios ambientales de la operación de una planta de reciclaje de RCD.

También Tam (2008) ha efectuado un estudio comparativo de costos y beneficios entre la actual práctica de obtención de áridos y los métodos de reciclaje de hormigón. Los resultados de este estudio ponen en evidencia que existe un beneficio neto negativo para la actual práctica de obtención de áridos, mientras que hay un beneficio neto positivo para el método del reciclaje del hormigón. Por lo tanto, los áridos de hormigón reciclados para la producción de nuevo hormigón puede proveer un método de coste efectivo significativamente más favorable para la industria de la construcción.

Como la valorización del papel está incluida dentro del reciclaje del yeso proveniente de las placas de yeso laminado (PYL), se ha efectuado una revisión acerca del coste económico de la producción de papel a partir de residuos y a partir de madera. A partir de ella, se ha encontrado que el uso de papel reciclado conlleva ahorros económicos con respecto al uso de la madera como materia prima virgen para dicha producción (Pati *et al.*, 2006).

Por lo anteriormente expuesto, se observa que los costes del reciclaje dependen de cada región; por ello deben tenerse en cuenta prudente y ponderadamente los gastos de recolección de materia prima, transporte, inventario, fabricación, segregación, eliminación (durante el reciclado), consecuencias económicas de la utilización de estas fuentes de material alternativo sobre el ambiente... y calidad del producto final.

2.3 Herramientas de evaluación

Para llevar a cabo la evaluación de diferentes alternativas de producción de materiales pétreos, existen diferentes herramientas. A continuación se exponen las herramientas de evaluación empleadas en esta tesis. En primer lugar, se hace una introducción de la metodología de *análisis de ciclo de vida* como herramienta de evaluación de los impactos medioambientales, y posteriormente se exponen los principales métodos de análisis multicriterio empleados para la evaluación y elección de alternativas discretas.

2.3.1 Metodología de análisis de ciclo de vida

Según la norma ISO 14040, el ACV se define como una técnica para determinar los aspectos ambientales e impactos potenciales asociados a un producto (o servicio) mediante un inventario de las entradas y las salidas relevantes del sistema, una evaluación de los impactos ambientales potenciales asociados a esas entradas y salidas y, finalmente, una interpretación de los resultados de las fases de inventario e impacto en términos de los objetivos del estudio.

El ACV ha sido una herramienta muy utilizada para evaluar los impactos ambientales en el sector de la construcción (González y García, 2006; Huberman y Pearlmutter, 2008; Blengini y Garbarino, 2010; Chong y Hermreck, 2010; Zabalza *et al.*, 2011; Monahan y Powell, 2011; Ortiz *et al.*, 2010a; Ortiz *et al.*, 2010b; Cabeza *et al.*, 2014; Tošić *et al.*, 2015). Permite conocer toda la energía consumida en una edificación y el consumo energético de cada una de las fases constructivas. Giama y Papadopoulos (2015) han demostrado también, por medio de la determinación de los impactos medioambientales de diferentes materiales de construcción, el potencial de la metodología de ACV como herramienta eficaz para construcciones sostenibles.

De acuerdo con la UNE-EN ISO 14040 (2006) en el estudio del ACV existen 4 fases:

- a) Definición del objetivo y el alcance. En esta etapa se definen los objetivos generales, la finalidad, el destinatario previsto y el alcance del estudio. También se establece la unidad funcional.
- b) Análisis del inventario. Esta fase comprende la obtención de datos y los procedimientos de cálculo para identificar y cuantificar todos los efectos ambientales adversos asociados a la unidad funcional.
- c) Evaluación del impacto ambiental. La evaluación del impacto del ciclo de vida tiene como propósito evaluar lo significativos que son los impactos ambientales utilizando los resultados del inventario. Este proceso implica la asociación de los datos de inventario con las categorías de impactos ambientales específicos, aunque tratándose solamente los asuntos ambientales especificados en el objetivo y en el alcance.
- d) Interpretación. Es la fase de un ACV en la que se combinan los resultados del inventario con los de la evaluación del impacto. Esta fase debe proporcionar resultados que sean coherentes con el objetivo y alcance definidos, que lleguen a conclusiones, y que expliquen las limitaciones y proporcionen recomendaciones.

Cuando se aplican estas fases del ciclo de vida se tiene una idea más acertada de los impactos medioambientales que ocasiona un producto. De este modo, se puede llegar a saber qué tipo de productos pueden presentar altos costes por mantenimiento o por la gestión de residuos, aunque sean económicos a corto plazo, y qué productos altamente tecnológicos presentan altos costes de producción que nunca serán ya recuperados. Además, se puede llegar a conocer qué materiales con significativas emisiones de CO₂, como el hormigón, pueden reducir sus emisiones, al ser reutilizados como material de relleno en infraestructuras.

Dentro de la fase de evaluación del impacto ambiental se encuentran tres fases consideradas obligatorias:

- Fase 1: selección. Se seleccionan las categorías de impacto, indicadores de categorías y modelos. Dentro de las categorías de impacto existentes, las más destacadas en el sector de la construcción, que ya han sido recomendadas por el Comité Europeo de Normalización en el campo de la gestión integral del comportamiento medioambiental de los edificios (CEN/TC350, 2013) y por otros autores relacionados con la construcción como Álvarez (2010); Ortiz *et al.* (2010a) y Ortiz *et al.* (2010b) y que se muestran en la Tabla 2.8 (confrontar con Tabla 3.1).
- Fase 2: clasificación. Se asignan los datos procedentes del inventario a cada categoría de impacto según el tipo de efecto ambiental esperado.
- Fase 3: caracterización. Consiste en la modelización, mediante los factores de caracterización y de los datos del inventario, para cada una de dichas categorías de impacto.

Tabla 2.8 Categorías de impacto medioambiental más usadas en el sector de la construcción (Fuente: Tabla 3.1)

Categorías de impacto	Unidad
Calentamiento global	kg CO ₂ eq/kg
Disminución de la capa de ozono	kg CFC-11 eq/kg
Acidificación	kg SO ₂ eq/kg
Eutrofización	kg PO ₄ p-lim/kg
Ozono troposférico	kg C ₂ H ₄ eq/kg
Agotamiento recursos abióticos	kg Sb eq
Toxicidad humana	kg 1.4-DB eq
Energía no renovable	MJ primaria/kg
Efectos respiratorios	kg PM 2.5 eq/kg
Uso del suelo	m ² org.arable/kg

Todas las fases obligatorias anteriormente mencionadas, fueron consideradas en esta tesis.

2.3.2 Métodos de análisis multicriterio

En proyectos de ingeniería la toma de decisión es una actividad intelectual esencial, sin la cual el proyecto no puede progresar. Durante el desarrollo de un proyecto se toman decisiones complejas; según García (2009), esta complejidad viene marcada por la trascendencia que muchas de estas decisiones tienen para el proyecto, por las responsabilidades que ello implica para los proyectistas o directores de proyecto, para los agentes implicados o afectados por la decisión adoptada, y por los diferentes criterios o puntos de vista que hay que tener en cuenta y que, a menudo, están en conflicto.

El análisis multicriterio es una forma de evaluación integrada de sostenibilidad, adecuada para abordar problemas complejos con un alto grado de incertidumbre, objetivos conflictivos y múltiples intereses y perspectivas (Quijano, 2012).

Anteriormente, los enfoques de un único criterio tenían como objetivo identificar las opciones de mayor eficiencia al menor costo; sin embargo, a partir de una mayor concienciación ambiental se ha modificado poco a poco la estructura del modelo de análisis de único criterio. En la actualidad, el enfoque en la protección ambiental ha convertido el análisis multicriterio en una herramienta de gran ayuda para la toma de decisiones (Quijano, 2012).

Las situaciones en que un decisor se ve confrontado con una elección, en presencia de criterios múltiples, son muy numerosas. El decisor se encuentra en disposición de escoger entre varias posibilidades denominadas alternativas, el conjunto de las cuales constituye el llamado conjunto de elección. Para escoger en este conjunto de elección el decisor tiene diversos puntos de vista, denominados criterios. Estos criterios son, al menos parcialmente, contradictorios en el sentido de que si el decisor adopta uno de dichos puntos de vista, no escogerá la misma alternativa que si se basa en otro criterio (García, 2004).

Todo problema de toma de decisiones incluye las siguientes etapas de acuerdo con Quijano (2012):

- Identificación de metas. Para tomar una buena decisión primero se debe tener claro a qué objetivo se está apuntando. Estos deben ser específicos, medibles, realistas y concertados de acuerdo con el tiempo en el que se desean lograr. Es el paso inicial para la toma de decisión; sin un problema bien definido, no hay objetivo definido y no hay una solución veraz (García, 2009).
- Formulación de alternativas. Se identifican diferentes opciones que ayudan al cumplimiento de los objetivos propuestos.
- Selección de criterios. Es necesario definir criterios que permitan comparar las alternativas. Los criterios constituyen los ejes fundamentales a partir de los cuales el decisor justifica, transforma y argumenta sus preferencias. A partir de aquí, su selección es sumamente importante en cualquier

proceso de toma de decisiones, ya que un planteamiento inadecuado puede llevar a resultados no satisfactorios o invalidar el proceso (García, 2004).

- Asignación de importancia relativa a los criterios. Todos los criterios tienen un impacto relativo en el proceso de decisión, pudiendo —además— ser medido mediante una escala de valores. Este impacto también se conoce como peso y permite determinar la importancia relativa que cada criterio tiene dentro de la toma de decisiones en un proyecto determinado. Estos pesos deben ser evaluados de manera razonable y veraz, teniendo en cuenta el grado de variación del criterio, su independencia y la preferencia subjetiva del decisor.
- Evaluación de alternativas. Depende del método de evaluación utilizado en cada caso. En función de la evaluación de las alternativas, se obtiene una alternativa con mejor perspectiva que otras.

Estas etapas expuestas anteriormente se pueden ver representadas en la Figura 2-7.

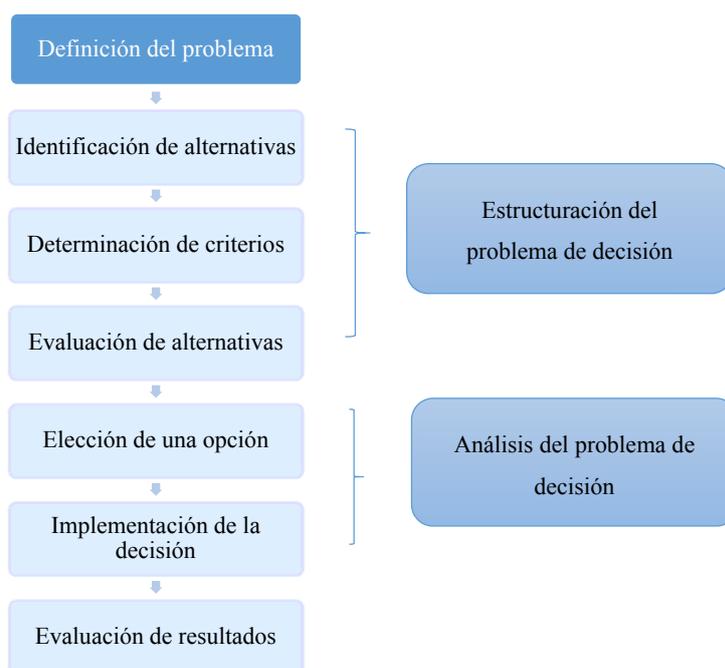


Figura 2-7 Etapas de un proceso de decisión multicriterio

Según Quijano (2012), el análisis multicriterio de decisión se puede caracterizar de acuerdo a los siguientes factores:

- Número de decisores. De acuerdo al número de decisores, los métodos de Análisis Multicriterio de Decisión pueden ser implementados a nivel individual, donde una sola persona es la encargada de

tomar una decisión, o a nivel grupal, quedando en este caso involucrados múltiples individuos u organizaciones en la decisión.

- Precisión de los datos. La incertidumbre por no cumplir esta condición es inherente en cierto grado a la mayoría de los problemas de decisión.
- Cantidad de alternativas. Conjunto discreto o conjunto continuo de alternativas. A modo ilustrativo, en una evaluación de impactos ambientales, el conjunto de alternativas posibles se pueden enumerar y no son demasiadas, por lo que el problema de decisión normalmente es discreto (García, 2004).

Por otro lado, los métodos de Análisis Multicriterio de Decisión se pueden clasificar también según Quijano (2012) en tres escuelas o líneas de pensamiento:

- Modelos de optimización o de medida del valor. Estos métodos asumen que la estructura de preferencia del decisor puede ser representada formal y matemáticamente por una función de valor si el problema es determinístico, o por una función de utilidad si hay alguna consideración de riesgo en el problema. Así, se construyen puntajes numéricos con el fin de representar el grado en el cual se prefiere una opción de decisión sobre otra. La intención de esta técnica es construir una forma de asociar un número real con cada alternativa con el fin de producir un orden de preferencia consistente con los juicios del decisor. Dentro de esta clasificación se encuentra el método *Analytic Hierarchy Process (AHP)*.
- Modelos por nivel de metas o aspiraciones. Los métodos basados en distancias, en general, definen primero el punto de referencia al cual se desea relacionar la solución buscada, y luego mediante algún procedimiento definen o escogen la solución más factible según su proximidad con el punto de referencia. Este punto estará definido por la solución ideal para el decisor y respecto a él se medirán las distancias entre los logros de las alternativas reales. Dentro de ese modelo se encuentra el método multicriterio escogido para ser empleado en esta tesis (VIKOR).
- Modelos de clasificación. Estos modelos son apropiados cuando la métrica de los criterios no permite que estos puedan ser agregados fácilmente, cuando las escalas de medición varían en rangos muy grandes o cuando las unidades son inconmensurables o incomparables. Este modelo incluye el método ELECTRE III.

Los métodos multicriterio en los que el conjunto de alternativas es discreto se muestran en la Tabla 2.9.

Tabla 2.9 Métodos discretos de decisión multicriterio (García, 2004) (García, 2009)

Métodos discretos	Descripción	Origen
Suma Ponderada	Asume que la función valor buscada se puede descomponer y asimilar a un modelo aditivo	
Método de jerarquías analíticas (AHP)	Utiliza una estructura jerárquica	Escuela americana
SMART	Se juzga la actuación de la alternativa mediante la elección de un límite inferior y un límite superior	
TOPSIS	Identifica soluciones que se encuentran lo más cerca posible a una solución ideal aplicando para ello alguna medida de distancia	
VIKOR	Para sistemas complejos de optimización multicriterio	
ELECTRE	Pertenece a una familia de métodos basados en relaciones de superación	Escuela europea
PROMETHEE	Incorpora conceptos y parámetros que poseen alguna interpretación física o económica fácilmente comprensibles	
MACBETH	Mide el grado de preferencia de un decisor sobre un conjunto de alternativas	
ZAPROS	Proporciona un orden parcial y no garantiza una ordenación completa	Escuela asiática

2.3.3 Principales métodos multicriterio pertenecientes al método discreto

A continuación, se explica de forma resumida los principales métodos multicriterio pertenecientes al método discreto según Quijano (2012), dando mayor énfasis al método VIKOR, que es el propuesto y empleado en esta tesis.

2.3.3.1 Proceso de Análisis Jerárquico

El Proceso de Análisis Jerárquico —en inglés, *Analytic Hierarchy Process (AHP)*— es un método cuyo resultado final es una lista jerarquizada (de mejor a peor) de las alternativas que se están evaluando según unos criterios definidos. Como el problema es la selección de una alternativa de un conjunto discreto, la regla de decisión consiste en elegir la alternativa con mayor valor relativo; es decir: que la alternativa seleccionada como la mejor tenga el máximo valor calculado a partir de los pesos de los criterios (Quijano, 2012).

2.3.3.2 TOPSIS

Es una técnica para la clasificación y selección de una serie de alternativas determinadas externamente a través de medidas de distancia. Se basa en el concepto de que la alternativa elegida debe tener la distancia geométrica más corta desde la solución ideal positiva y la distancia geométrica más larga de la solución ideal negativa. Es un método de agregación compensatoria que compara un conjunto de alternativas mediante la identificación de los pesos para cada criterio, la normalización de las puntuaciones para cada criterio y el cálculo de la distancia geométrica entre cada alternativa y la alternativa ideal (Shih *et al.*, 2007).

2.3.3.3 ELECTRE

Pertenece a una familia de métodos basados en relaciones de superación o clasificación para decidir acerca de la determinación de una solución, que sin ser óptima pueda considerarse satisfactoria. En este se obtiene una jerarquización de las acciones o alternativas bajo análisis (García, 2009).

Está basado en los conceptos de concordancia y discordancia, pero trata de describir el comportamiento racional del decisor, incorporando la naturaleza “difusa” del proceso subjetivo de la decisión. Existe una relación de mejor rango que es validada por el índice de concordancia y el índice de discordancia. La relación entre dos alternativas será relativa y dependerá en gran parte de la preferencia del decisor, quien define los valores del umbral de preferencia y el umbral de indiferencia. Los métodos ELECTRE pueden hacer frente a las escalas de criterios heterogéneos, preservan las puntuaciones originales de las alternativas en cada criterio, sin la necesidad de técnicas de normalización o la estimación de una función de valor. Ahora bien, esta heterogeneidad de las escalas es, por lo general, un inconveniente para muchos sistemas de apoyo a las decisiones, que, a menudo, requieren una escala de medición común para todos los criterios (Vasto-Terrientes *et al.*, 2015).

2.3.3.4 PROMETHEE

Su nombre viene de las siglas en inglés: Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluations. Este método trata de establecer, mediante la evaluación en función de “ k ” criterios: $f_1, f_2, f_3 \dots f_k$, una ordenación jerarquizada en el conjunto “ a ” de alternativas. Este método consiste en enriquecer la relación de dominio existente entre las distintas alternativas, para lo cual se requiere que a cada criterio “ f_j ” se le asocie un criterio generalizado para poder así, posteriormente, definir un índice de preferencia multicriterio. Por último, se consideran dos flujos de ordenación, el saliente y el entrante, que reflejan el grado en que una alternativa “ i ” que domina o es dominada por las restantes. El flujo de

orden saliente representa el carácter dominante de una alternativa, su poder dominador; por ello será mejor aquella alternativa que tenga mayor flujo de orden saliente. Este método ha sido empleado también en temas relacionados con la hidrología y la gestión del agua (Behzadian *et al.*, 2010).

2.3.3.5 VIKOR

El método VIKOR es una herramienta efectiva en el Análisis Multicriterio de Decisión, particularmente en situaciones donde el decisor no está capacitado, o no sabe cómo expresar su preferencia desde el principio (Quijano, 2012). El método VIKOR fue introducido por Opricovic (1998) como una técnica aplicable para implementar dentro de los métodos multicriterio.

Este método resuelve el problema de elegir una solución óptima entre un número discreto de alternativas y múltiples funciones de criterios. Se centra en jerarquizar y seleccionar la mejor solución de compromiso a partir de un conjunto de alternativas en presencia de criterios en conflicto. Una de las principales ventajas que ofrece VIKOR es la posibilidad de determinar una solución de compromiso; es decir, la más cercana a la ideal, que refleja la posición de la mayoría de decisores involucrados.

El desarrollo del método VIKOR empezó con la siguiente forma métrica del método de Programación Lineal (Ecuación 2-1).

Ecuación 2-1

$$L_{pj} = \sum_{i=1}^n ([wi(f^*_i - f_{ij})/(f^*_i - f^-_i)]^p)^{1/p}, 1 \leq p \leq \infty; j = 1, 2, \dots, j$$

La medida L_{pj} representa la distancia entre la alternativa a_j a la solución ideal. En VIKOR, L_{pj} equivalente a S_j , y $L_{\infty j}$, correspondiente a R_j , se utilizan para formular la lista ordenada. La solución de compromiso $F^c = (f^c_1, \dots, f^c_n)$ es una solución factible que es la más “próxima” a la solución ideal f^* . Aquí, compromiso significa un acuerdo establecido por concesiones mutuas, representado por $\Delta f_i = f^*_i - f^c_i$, $i=1, \dots, n$. La solución obtenida por $\min_j S_j$ es la solución con máxima utilidad de grupo, y la solución obtenida mediante $\min_j R_j$ expresa la solución de mínimo arrepentimiento individual.

Este método se enfoca en jerarquizar y seleccionar de un conjunto de alternativas en presencia de criterios en conflicto. Este introduce el índice jerárquico multicriterio basado en la medida particular de la “cercanía” a la solución “ideal” (Opricovic, 1998).

❖ **Aplicación a la evaluación ambiental y económica**

En esta tesis se pretende desarrollar una propuesta metodológica que permita evaluar —además del criterio medioambiental— el criterio económico en la producción de materiales pétreos. Se trata de una evaluación que considera múltiples criterios con un número discreto de alternativas.

El método multicriterio que más se adapta a las necesidades de esta tesis doctoral es el método VIKOR, ya que éste ofrece las siguientes ventajas según Quijano (2012):

- Determina una solución de compromiso reflejando la actitud de los decisores frente al riesgo a través de la introducción de un valor de utilidad “ v ”.
- Permite la combinación de métodos cuantitativos y de análisis cualitativos para mejorar los resultados de la evaluación ambiental y económica.
- Normaliza las unidades de los criterios en conflicto para facilitar la comparación entre ellos.
- La sencillez de su algoritmo permite hacer modificaciones que optimicen el método para un caso específico.
- Permite la calificación de criterios para asignar importancia relativa a estos durante el proceso de decisión.

Debido a las ventajas mencionadas —teniendo en cuenta también que el método de VIKOR ha sido empleado en estudios científicos efectuados en el ámbito del medio ambiente y en ingeniería de los materiales con muy buenos resultados, siguiendo a Chatterjee *et al.* (2009); Jahan *et al.* (2011); Quijano (2012); Vučijak *et al.* (2013); Liu *et al.* (2013); Civic y Vucijak (2014); Tošić *et al.* (2015); Sakthivel *et al.* (2015) y Suganthi *et al.* (2015)— se ha escogido este método para llevar a cabo la evaluación de las diferentes alternativas de producción de materiales pétreos en función del criterio medioambiental y económico (ver apartado 3.2.6.1 para ampliar justificación del método elegido).

2.4 Conclusiones del estado del arte

En el estado del arte efectuado se destaca que la industria de la construcción es una de las principales responsables de los problemas medioambientales actuales. La mayoría de los impactos se deben a la fase de adquisición de materias primas, que incluye las actividades de explotación, minería, perforación, dragado y recolección. En esta fase son numerosas las emisiones al aire y los residuos en el agua y en el suelo. Así mismo, el proceso de voladura y operaciones de trituración y clasificación del material ocasiona impactos por la generación de ruido y vibraciones (Brodtkom, 2002).

Según Dixit *et al.* (2010), el sector de la construcción es uno de las que más requiere recursos naturales. El trabajo civil y la construcción de edificios a nivel mundial consumen el 60 % de las materias primas extraídas de la litosfera, de este volumen los edificios representan el 24 % de las extracciones globales. Este consumo de recursos lleva asociado también un gasto energético (Zabalza *et al.*, 2011).

De acuerdo con Ali *et al.* (2011) y Matos y Sousa-Coutinho (2012), el subsector del cemento consume aproximadamente del 12 % al 15 % del uso de la energía industrial, contribuyendo con un 7 % del total de las emisiones de CO₂ mundiales (1.8 Gt de emisiones de CO₂ anualmente). Una tonelada de clínker de cemento genera aproximadamente 0.9 t -1 t de CO₂, dependiendo del tipo de combustible usado (Ali *et al.*, 2011).

Así mismo, el hormigón —el cual es el material de construcción más empleado en el mundo— emplea 1.6 billones de toneladas de cemento y 10 billones de toneladas de grava y arena (González, 2012). Esto demuestra que la influencia del cemento y del clínker en el ciclo de vida de los productos que usan cemento es muy significativa; por ello, si se quiere reducir el impacto en la producción de estos productos, es esencial alcanzar una mayor eco-eficiencia en la producción del clínker o del cemento como material de partida para todos ellos.

Se destaca también en el estado del arte que el sector de la construcción no sólo consume más materia prima y energía que cualquier otra actividad económica, sino que genera la mayor fracción de residuos en toda Europa. Cada año, alrededor de 900 millones de toneladas de residuos de construcción son producidos dentro de la Unión Europea (Bravo *et al.*, 2015). Estos residuos en la mayoría de los casos no son bien gestionados y, por ello, se disponen gran parte en vertederos, ocupando un volumen que claramente excede al ocupado por los residuos domésticos.

La disposición final de los residuos de la construcción y demolición (RCD) puede generar impactos ambientales negativos como la degradación y erosión de suelos, la destrucción de la vegetación y la pérdida de servicios ambientales (Mejía *et al.*, 2015).

Dentro de los RCD generados, la mayor cantidad la conforman los residuos cerámicos y el hormigón —66 % en total según datos del CEDEX (2010)— los cuales fácilmente pueden ser convertidos en áridos reciclados por medio de un proceso de trituración.

Los residuos de yeso se constituyen —después de la cerámica y el hormigón— en los más grandes contribuyentes a la corriente de residuos de construcción de tipo residencial (Godinho-Castro *et al.*, 2012). Así mismo, la cantidad de placas de yeso que se producen anualmente en Europa son 80 millones de toneladas y la cantidad de yeso que se lleva a vertedero se encuentra alrededor de los 15 millones de toneladas por año (Ragab, 2014).

Si los residuos de yeso son aceptados en vertederos de residuos no peligrosos, sin preverse un compartimento específico en el que no se admitan residuos biodegradables, su contenido en sulfatos puede descomponerse en sulfuro de hidrógeno (H_2S), el cual es un gas inflamable y peligroso con efectos perjudiciales para la salud humana y el medioambiente. Cuando este gas es inhalado, incluso en pequeñas concentraciones, genera problemas de olores. De allí, la importancia de efectuar una buena gestión de este residuo.

Ante la problemática ambiental del sector de la construcción relacionada, por un lado, con producción y consumo de materiales, y por otro, con la generación de los residuos, se hace necesario revisar y modificar la actual práctica de construcción, mediante nuevos diseños y métodos de ingeniería, técnicas de construcción y tecnologías de producción de materiales y de gestión de residuos.

Es por esto que se han dado avances a nivel internacional en materia de política y gestión ambiental. En materia de gestión de residuos de construcción y demolición, la Directiva Europea de Residuos prevé que en el año 2020 un 70 % de los RCD deben valorizarse correctamente. La prevención y el reciclado son los elementos claves de la nueva política de residuos, la cual pretende alcanzar un uso eficiente de los recursos en un contexto de materias primas cada vez más escasas y costosas.

También el desarrollo de materiales de construcción capaces de reutilizar un alto contenido de residuos es una importante línea de investigación dentro de los objetivos de la Unión Europea 2020 relacionados con la gestión de los residuos como un recurso (Pacheco-Torgal, 2014).

Con el fin de alcanzar todos estos objetivos, se han efectuado varios estudios a nivel de laboratorio o en campo para evaluar las propiedades físicas, químicas y mecánicas del reciclaje de los residuos de construcción y demolición.

Para el caso del yeso, Godinho-Castro *et al.* (2012) han efectuado la incorporación de estos residuos en productos de bloque cerámico y han evaluado la composición física y química, la resistencia a compresión y la eco-toxicidad potencial de los mismos.

En cuanto al reciclaje abierto del cemento se han dado grandes avances. En importantes investigaciones se han empleado materiales cementantes suplementarios tales como ceniza volante, humo sílice y escoria en el hormigón para reducir los impactos (Usón *et al.*, 2013; Ioannou *et al.*, 2015; Morandea *et al.*, 2015; Ma *et al.*, 2015; Venkatanarayanan y Rangaraju, 2015).

También se ha usado el yeso reciclado en la producción de cemento (Chandara *et al.*, 2009; Morales, 2010) y en la producción del clínker (Kacimi *et al.*, 2006), con buenos resultados en las propiedades físicas, químicas y mecánicas.

Por otro lado, en el estado del arte efectuado se detecta que el uso de vidrio reciclado en el cemento Portland ordinario ha cobrado mayor interés a nivel mundial debido a los altos costes de disposición y la problemática ambiental asociada. Es así como se han efectuado diferentes estudios en los que se ha usado vidrio reciclado en el cemento y en el hormigón. Algunos de éstos han empleado vidrio reciclado como un árido (Tan y Du, 2013), otros lo ha usado como reemplazo del cemento (Shao *et al.*, 2000; Idir *et al.*, 2011), y en algunos estudios se le ha usado como árido y como reemplazo del cemento en la misma mezcla (De Castro y De Brito, 2013; Rashad, 2014). Todos estos investigadores han estudiado bien sean las propiedades físicas o químicas del uso de este residuo en la producción de cemento u hormigón.

En el tema del árido y del hormigón reciclado también se han llevado a cabo numerosos estudios acerca de las diferentes propiedades y características a nivel de laboratorio y a nivel de campo. Se ha estudiado la durabilidad del hormigón con árido reciclado (Medina *et al.*, 2012; Anastasiou *et al.*, 2014; Bravo *et al.*, 2015), la resistencia a la carbonatación, la absorción de agua por inmersión y capilaridad (Oliveira *et al.*, 2004; Correia *et al.*, 2006; Evangelista y De Brito, 2010; Matías *et al.*, 2013; Coelho y De Brito, 2013c; Ferreira, 2013; Bravo *et al.*, 2015), la resistencia a la penetración de iones cloruro en el hormigón (Corinaldesi y Moriconi, 2009; Evangelista y De Brito, 2010; Ferreira, 2013; Bravo *et al.*, 2015) y se han evaluado también la resistencia a compresión y a flexión (Ajdukiewicz y Kliszczewicz, 2002; Sánchez de Juan y Gutiérrez, 2004; Etxeberria *et al.*, 2007; Rahal, 2007; Yang *et al.*, 2008; Malešev *et al.*, 2010).

Otro de los parámetros evaluados en el hormigón reciclado ha sido la influencia de diferentes condiciones de curado en el esfuerzo a compresión del hormigón con árido reciclado (Gayarre *et al.*, 2014).

Sin embargo, aunque la demanda en las prácticas de construcción sostenible crece y el interés en la recuperación de los residuos proveniente de los RCD también va en aumento, hay una falta de pruebas estandarizadas para evaluar la viabilidad medioambiental de este proceso (Godinho-Castro *et al.*, 2012). Se ha evaluado en la mayoría de los casos la viabilidad *técnica* del uso de residuos, pero no se ha evaluado a fondo la viabilidad *medioambiental* de la producción de materiales de construcción a partir

de materia prima reciclada. También se detecta un vacío en cuanto a la viabilidad *económica* del reciclaje de los RCD, ya que son escasos los estudios que incluyen el aspecto económico.

Por lo mencionado anteriormente, se detecta la necesidad de emplear materiales sostenibles en construcción, en los que se tenga en cuenta no sólo el criterio técnico, sino, también el criterio medioambiental y económico. Por ello, se hace necesario contar con herramientas que ayuden a la evaluación y la toma de decisiones y que, a la vez, tengan en cuenta diversos criterios y puntos de vista implicados.

En este sentido, la metodología de ACV se constituye en una herramienta efectiva para el estudio de los impactos medioambientales de un proceso o de un producto en todo su ciclo de vida; por otra parte, el Análisis de Decisión Multicriterio (en inglés, *Multicriteria Decision Analysis*) se presenta como una valiosa herramienta para ayudar al decisor durante el proceso de toma de decisiones en el que se tiene en cuenta varios criterios en conflicto, en este caso, fundamentalmente, tanto el criterio ambiental como el económico.

3 Propuesta metodológica para evaluar el comportamiento ambiental y económico de los RCD en la producción de materiales pétreos.

Debido a la necesidad de conocer y emplear materiales alternativos en construcción que sean sostenibles se propone en este capítulo una metodología de enfoque multicriterio que permita a las partes implicadas con su producción y gestión —como es el caso de las empresas de fabricación de materiales de construcción y las empresas encargadas de su gestión y quienes emplean estos materiales en obras constructivas, como son los arquitectos, ingenieros y constructores— evaluar diferentes alternativas de producción de materiales pétreos y elegir la mejor desde un enfoque multicriterio.

3.1 Esquema de la metodología propuesta

En la Figura 3-1 se puede ver el esquema de la propuesta metodológica.

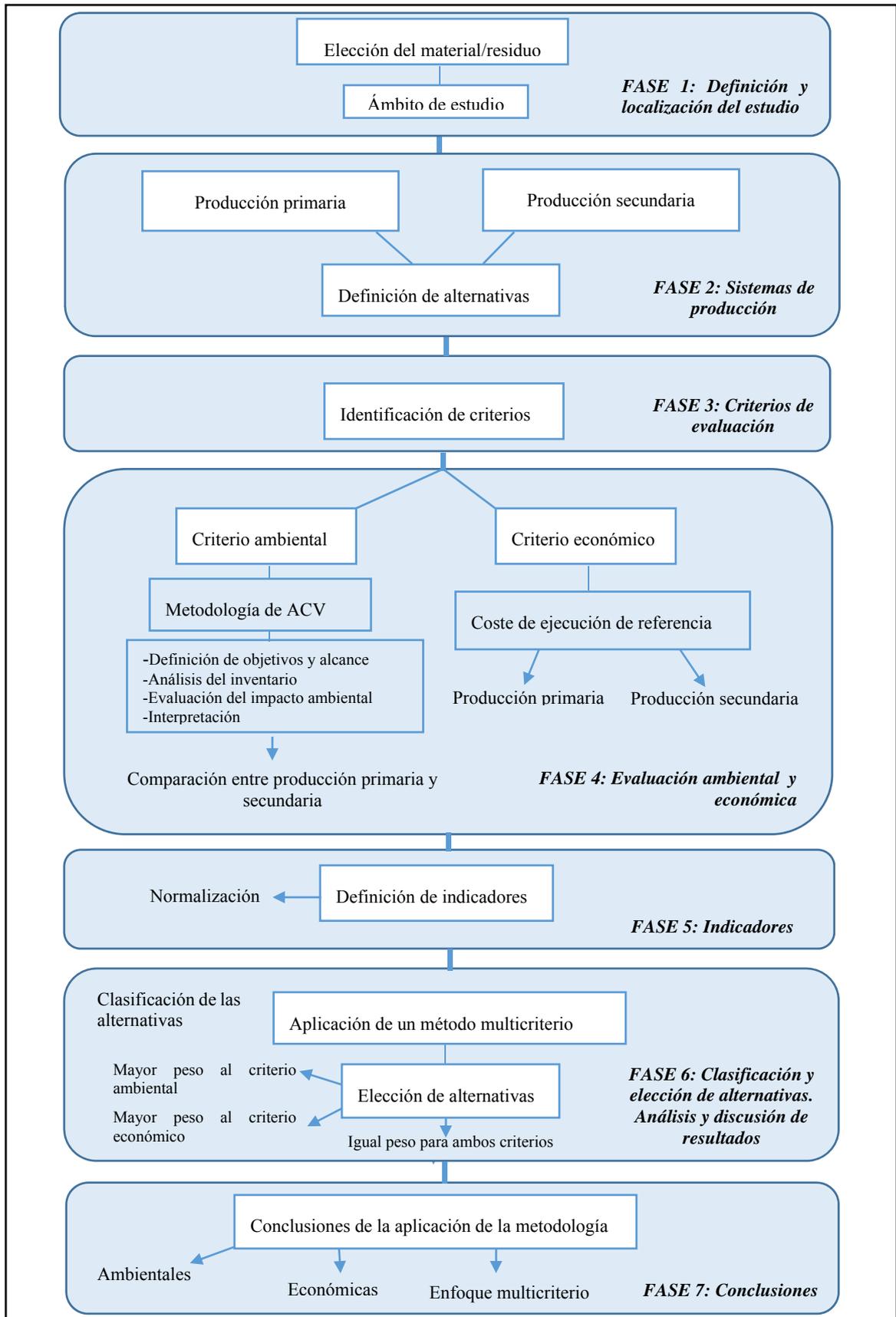


Figura 3-1 Esquema de la metodología propuesta

3.2 Fases de la metodología propuesta

A continuación se muestra en forma detallada cada uno de las fases propuestas en esta metodología.

3.2.1 Fase 1: Definición y localización del estudio

3.2.1.1 Elección del material/residuo

El primer paso propuesto consiste en definir el material/residuo a ser estudiado bajo un enfoque multicriterio. Para esto se recomienda tener en cuenta aspectos básicos como son el porcentaje dentro del total de RCD generados o su importancia como material de construcción.

3.2.1.2 Ámbito de estudio

En esta fase se determinará igualmente el ámbito o zona de estudio para dicho material. La zona de estudio condicionará las distancias de transporte, los sistemas de reciclaje y los costes de producción.

3.2.2 Fase 2: Sistemas de producción

3.2.2.1 Producción primaria y producción secundaria

Una vez elegido el material se efectuará un estudio detallado acerca de la producción primaria y producción secundaria del mismo.

En este estudio, se debe obtener, por un lado, información acerca de las diferentes etapas del proceso de producción o reciclaje, las diversas tecnologías empleadas y, también, el tipo de materias primas, combustibles y distintos métodos de reciclaje existentes. Para esto resultará del todo conveniente la lectura de la declaración ambiental del producto (DAP) —en inglés, *Environmental Product Declaration (EPD)*—, la consulta de documentos publicados sobre las tecnologías disponibles en la producción de los materiales, así como la revisión bibliográfica en estudios y proyectos efectuados con dicho material.

Para el caso de la producción secundaria, deberá efectuarse un estudio detallado de los diferentes tipos de reciclaje —sea abierto o cerrado— para el material elegido. También, debe realizarse una oportuna revisión bibliográfica de estudios llevados a cabo a nivel experimental —bien sea a nivel de laboratorio

o de campo— en los que se haya obtenido este material a partir de residuos de construcción y demolición.

El estado del arte permitirá conocer el comportamiento técnico, es decir: mecánico, físico y químico de los materiales reciclados. Dentro del comportamiento mecánico se tendrán en cuenta propiedades como son la resistencia a la compresión y a la flexión. Por lo que hace referencia al comportamiento químico, se examinará el tipo de estructura o compuesto químico formado, así como también el comportamiento físico, la durabilidad (resistencia a la carbonatación), la absorción de agua, la manejabilidad y la dureza del material.

Será también recomendable obtener también información primaria para ambos sistemas de producción. Para ello será conveniente el contacto directo con empresas pertenecientes al gremio de producción del material, empresas de reciclaje, así como plantas de reciclaje de residuos provenientes de la construcción y de la demolición de la zona de estudio.

3.2.2.2 Definición de alternativas

Dado que se pretende comparar la producción primaria con la producción secundaria, convendrá comenzar por definir una primera alternativa, esto es: la producción primaria. Para ello, se sugiere escoger la alternativa de producción más habitual en la zona de estudio.

Para la definición de las alternativas referidas a la producción secundaria, se habrá de tener en cuenta que tales disyuntivas sean comparables a la producción a partir de la materia prima original. Para esto, es indispensable tener en cuenta toda la información obtenida en la fase anterior; es decir, la referida a los diferentes tipos de reciclaje de ese material, tanto al reciclaje abierto como al reciclaje cerrado y a la tecnología de reciclaje para dicho material.

Antes de definir las alternativas se sugiere hacer una clasificación entre subproductos y productos del reciclaje, según la transformación del residuo, con el fin de definir mejor el tipo de reciclaje.

Se designa como subproducto de reciclaje aquel material que resulta una vez se efectúa la tecnología o método de reciclaje, sin ninguna otra transformación. Por otra parte, se considera producto reciclado aquél resultado de la transformación del subproducto del reciclaje; es decir, el dirigido a la conformación de un nuevo producto.

Una vez efectuada esta clasificación, se establecerá para cada material evaluado las diferentes posibilidades de producción primaria y secundaria, teniendo en cuenta el tipo de reciclaje abierto o cerrado.

A partir de esta primera clasificación de los sistemas de producción, se definirán las diferentes alternativas de producción. Para esto es recomendable tener en cuenta diferentes parámetros revisados e identificados anteriormente en el estado del arte, como son:

- La distancia de transporte: sea desde el sitio de generación del residuo hasta la planta de reciclaje, o sea desde el sitio de la obtención de la materia prima hasta la planta de producción.
- El sistema de gestión aplicado a los residuos generados durante el proceso.
- Diferentes tipos de materias primas empleadas en la obtención de un mismo producto.
- La forma en que llegan los residuos a la planta de reciclaje; es decir, separados o mezclados.
- El tipo de residuo que entra a la planta de reciclaje.
- El sitio en el que se lleva a cabo el proceso de reciclaje; es decir, en planta fija, o en la misma obra de construcción.
- El tipo y la cantidad de residuo que puede ser empleado como reemplazo de la materia prima original.

Es de esperar que las alternativas de producción definidas tengan el mismo comportamiento técnico, lo cual garantizará el mismo uso o funcionalidad.

3.2.3 Fase 3: Criterios de evaluación

Una vez seleccionadas las diferentes alternativas de producción del material —a partir de la viabilidad técnica del mismo— será del todo conveniente definir los tipos de criterios a evaluar.

Teniendo en cuenta el impacto medioambiental derivado de los procesos de producción de los materiales de construcción, así como el interés a nivel mundial de emplear de materiales alternativos en construcción provenientes de los RCD, además de la clara necesidad de gestionar adecuadamente estos residuos, se considerará muy importante tener en cuenta el criterio medioambiental, con el fin de conocer los impactos de esta tipología por parte de los diferentes sistemas productivos.

Otro criterio significativo a tener en cuenta, es el criterio económico, ya que las empresas de producción o reciclaje, al encontrarse envueltas generalmente en un entorno cada vez más competitivo, muchas de sus decisiones están basadas en la eficiencia y, por lo tanto, pretenden conseguir un determinado nivel de producción, con el mínimo consumo de factores productivos.

3.2.4 Fase 4: Evaluación de las alternativas

En esta fase se trata de efectuar una evaluación ambiental y económica de las diferentes alternativas de producción de un material pétreo y hacer una comparación entre las diferentes posibilidades. Incluye el análisis y la discusión de los resultados obtenidos. Para llevar a cabo esta evaluación se parte de los dos criterios establecidos en la fase anterior. La forma de evaluar cada uno de estos criterios se describen a continuación.

3.2.4.1 Criterio medioambiental

Con el fin de conocer los impactos medioambientales de los diferentes sistemas de producción, se propone emplear la metodología de análisis de ciclo de vida para cada tipo de material.

Para esto, en primer lugar, se debe definir e identificar los objetivos y el alcance del estudio. En segundo lugar, la información obtenida en el estado del arte efectuado en la fase 2 servirá para definir los límites del sistema.

Las alternativas o escenarios evaluados en esta etapa deben coincidir con las definidas anteriormente en la fase 2 de esta propuesta metodológica.

Posteriormente, para el análisis del inventario se recomienda efectuar una búsqueda exhaustiva de información primaria a través del contacto directo con los gremios de las empresas del sector de la construcción en la zona de estudio. El método para la consulta a las empresas, organismos y plantas de reciclaje puede consistir en entrevistas oportunas a personal especializado a través de vía telefónica, correo electrónico o, siempre que sea posible, mediante visitas a las mismas empresas u organismos en concreto.

Los datos de producción primaria que deben obtenerse de las empresas se refieren a:

- Proceso de producción
- Tipos de materias primas y combustibles empleados
- Distancia de transporte de las materias primas desde el sitio de generación hasta la planta de producción.
- Tipo de transporte empleado
- Consumo energético
- Capacidad de producción de la planta
- Tipo de maquinaria y equipos
- Emisiones de CO₂ y residuos generados

La información obtenida de las plantas de reciclaje de RCD, deben estar relacionadas con:

- Proceso de reciclaje
- Tipo de residuo que entra a la planta de reciclaje
- Distancia de transporte desde el sitio de generación del residuo hasta la planta de reciclaje
- Tipo de transporte empleado
- Capacidad anual de la planta
- Tipo y cantidad de combustible consumido
- Maquinaria empleada
- Consumo energético
- Tipo y gestión de los residuos generados. Distancia de transporte hasta el sitio de gestión.

Para aquellos datos que no puedan obtenerse de manera directa se puede recurrir a fuentes secundarias, tales como proyectos realizados en este campo, estudios científicos, o mediante la lectura de la declaración medioambiental de las empresas de materiales de construcción o de la DAP.

Los datos que no puedan ser obtenidos a partir de las mismas empresas, plantas de reciclaje o fuentes secundarias pueden ser completados y confrontados con bases de datos existentes bien fundadas y convenientemente adaptados al contexto de la zona de estudio.

A partir de los datos de inventario, se lleva a cabo la evaluación del impacto de ciclo de vida. Para esto, hace falta determinar las categorías de impacto que deben evaluarse para los materiales pétreos de construcción.

Las categorías se escogieron teniendo en cuenta el mayor consenso científico existente, expresado en las recomendaciones de categorías de impacto a evaluar para llevar a cabo estudios de ACV en edificios según el CEN/TC350.

De este modo, las categorías elegidas para ser estudiadas serían las siguientes:

- Calentamiento global (kg CO₂ eq)
- Disminución de la capa de ozono (kg CFC-11 eq)
- Acidificación (kg SO₂ eq)
- Eutrofización (kg PO₄ p-lim)
- Respiratorios orgánicos (kg C₂H₄ eq)
- Extracción de mineral (MJ surplus)
- Efectos carcinogénicos (kg C₂H₃Cl eq)

- Efectos no carcinogénicos (kg C₂H₃Cl eq)
- Energía no renovable (MJ primaria)
- Respiratorios inorgánicos (kg PM 2.5 eq)
- Ocupación del suelo (m²org.arable)

También se tienen en cuenta otros estudios sobre el ACV de la gestión de RCD, mostrados en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1 Categorías de impacto usadas en estudios

Autores	CG	DCO	A	E	RO	EM	C y NC	ENR	RI	OS
Ortiz <i>et al.</i> (2009)	X	X	X			X	X			
Ortiz <i>et al.</i> (2010a)	X		X	X			X	X		
Álvarez (2010)	X		X	X	X		X		X	X
Blengini y Di Carlo (2010)	X	X	X	X	X					
Castell <i>et al.</i> (2013)	X	X	X	X				X	X	X
Rincón <i>et al.</i> (2014)	X	X	X	X				X	X	X
Lasvaux <i>et al.</i> (2014)	X				X					
Li <i>et al.</i> (2010)	X	X	X	X				X	X	
CEN/TC350 (2013)	X	X	X	X	X	X				
Jolliet <i>et al.</i> (2014)	X		X	X			X	X	X	X
Zabalza (2012)	X	X	X	X	X	X				
Benveniste <i>et al.</i> (2011)	X	X	X	X	X	X		X		

CG=calentamiento global; DCO=disminución de la capa de ozono; A=acidificación; E=eutrofización; RO=respiratorios orgánicos; EM=extracción de mineral; C= carcinogénicos; NC=no carcinogénicos; ENR=energía no renovable; RI=respiratorios inorgánicos; OS=ocupación del suelo.

Para obtener los resultados de caracterización de las diferentes categorías de impacto seleccionadas, existen diferentes herramientas informáticas. Estos instrumentos ayudan al usuario a ahorrar tiempo y a lograr cálculos y conclusiones fiables. Permiten además, disponer de bases de datos ambientales para numerosos productos y procesos. A pesar de que cada uno de ellos tiene sus propias características, casi todos se basan en la misma metodología y presentan rasgos comunes. En la Tabla 3.2 se observan algunas de estas herramientas informáticas que pueden emplearse.

Tabla 3.2 Programas informáticos para el estudio de ACV generales (Aranda, 2008)

Programas	Compañía
Boustead	Boustead consulting (Reino Unido)
Eco-it	Pré Consultants (Países Bajos)
Ecopro	Sinum A.G. EcoPerformance Systems (Suiza)
EcoScan	TNO Industrial Technology (Países Bajos)
Uukdid	Fraunhofer-Institut (Alemania)
KCL Eco	Finnish Pulp and Paper Research Institute (Finlandia)
LCAit	Chalmers Industriteknik (Suecia)
Miet	Universidad de Leiden (Países Bajos)
Gabi	Universidad de Stuttgart (Alemania)
Pems	Pira International (Reino Unido)
SimaPro	Pré Consultants (Países Bajos)
TEAM	Ecobilan (Francia)
Wisard	Pricewaterhouse Coopers (Francia)
Umberto	Ifu-Institut Hamburgo (Alemania)

Estos programas informáticos incluyen varios métodos de evaluación de impactos. Los métodos más comunes en los diferentes software empleados para hallar los resultados del ACV se muestran en la Tabla 3.3.

En esta metodología se propone como método de evaluación de impactos, el IMPACT 2002+, ya que es el que más se adapta a todas las categorías de impacto escogidas, además, con él se pueden evaluar todas estas categorías sin necesidad de emplear otro método de evaluación.

El método IMPACT 2002+ ha sido desarrollado por la Universidad Politécnica de Lausanne (Suiza), las categorías de impacto, los indicadores de categoría y los modelos de caracterización están aceptados internacionalmente, es decir, basados en un acuerdo internacional o aprobados por un organismo internacional competente (Jolliet *et al.*, 2003). Este método ha sido evaluado también por otros autores como Yáñez (2008); García O. (2008); Raluy (2009) y Colombani (2014).

IMPACT 2002+ permite obtener resultados a dos niveles: punto medio (14 categorías) y punto final (4 categorías) (Figura 3-2). Aunque las categorías de punto final son más fáciles de interpretar, estas presentan una mayor incertidumbre, dada la dificultad de modelar las complejas relaciones causa-efecto. Por ello, se propone evaluar sólo las categorías de punto medio.

Tabla 3.3 Métodos de evaluación de impactos (SimaPro 7, 2008)

Métodos de evaluación	Entidad que lo ha desarrollado
BEES	Instituto Nacional de Estándares y Tecnología (NIST)
CML 1992	Universidad de Leiden, Holanda
CML 2001	Universidad de Leiden, Holanda
CUMULATIVE ENERGY DEMAN	Ecoinvent 1.01
CUMULATIVE EXERGY DEMAND (CE _x D)	Ecoinvent 2.0.
ECO-INDICATOR 95	Consultora PRé (SimaPro)
ECO-INDICATOR 99	Consultora PRé (SimaPro)
ECOLOGICAL FOOTPRINT	Ecoinvent 2.0.
EPS 2000	Universidad Tecnológica de Chalmers
IMPACT 2002+	Instituto Federal de Tecnología de Suiza - Lausana
IPCC 2001 GWP	Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático
IPCC 2007	Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático
TRACI 2	Agencia de Protección Ambiental de EE.UU
RECIPE	Universidad de Leiden, Holanda
ECOPOINTS 97 (CH)	Ministerio de medioambiente de Suiza (BUWAL)
ECOSYSTEM DAMAGE POTENTIAL (EDP)	Instituto Suizo Federal de Tecnología (ETH), Zurich
EPD 2007	Consejo de Gestión Ambiental de Suecia (SEMC)
EDIP/UMIP 97- EDIP 2003	Agencia de protección de medioambiental de Dinamarca
ECOLOGICAL SCARCITY 2006	Ecoinvent 2.0.

En IMPACT 2002+, la categoría toxicidad humana evaluada en otros métodos, corresponde a efectos carcinogénicos (C) y no carcinogénicos (NC); la formación de ozono fotoquímico, a efectos respiratorios orgánicos (RO); y la disminución de recursos abióticos, a la extracción de minerales (EM). Otras categorías evaluadas por el método IMPACT 2002+ son calentamiento global (CG), disminución de la capa de ozono (DCO), acidificación (A), eutrofización (E), ocupación del suelo (OS), energía no renovable (ENR) y efectos respiratorios inorgánicos (RI) (Figura 3-2).

Finalmente, los resultados de caracterización de impactos de las diferentes alternativas de producción del material se analizan y se comparan. De este modo, se puede conocer también la contribución de los diferentes procesos unitarios en los impactos finales de cada sistema de producción, bien sea primaria o secundaria. Hecho esto, los resultados de los impactos obtenidos se analizan y se discuten.

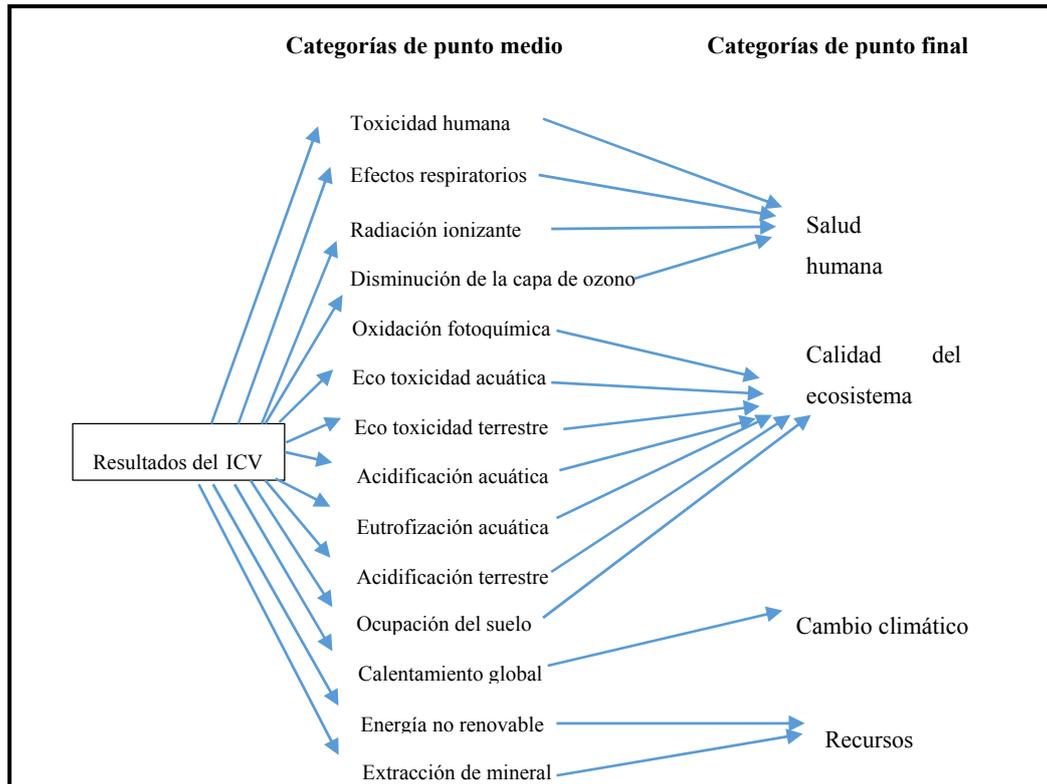


Figura 3-2 Categorías evaluadas en IMPACT 2002+ (Manual de base de datos Sima Pro 7, 2008)

3.2.4.2 Criterio económico

El criterio económico para el material se evalúa teniendo en cuenta el coste de ejecución de los diferentes productos obtenidos. La metodología propuesta para el cálculo de este coste está basada en el estudio económico de materiales de construcción efectuado por (Tošić *et al.*, 2015). Se trata con esto de encontrar un coste aproximado que sirva de referencia para cada una de las alternativas de producción de material que, a su vez, permita la comparación entre ellas.

Para la consecución de datos más fiables se sugiere contactar directamente con las empresas de fabricación de los materiales y plantas de reciclaje de la zona de estudio. Para ello, es recomendable que tales datos correspondan a diferentes años y a distintas empresas o plantas de similar capacidad de producción; datos que, posteriormente, deberán ser promediados.

El coste de ejecución de los materiales incluye los costes directos y los indirectos. Los costes directos están conformados por los importes económicos de la mano de obra, de los materiales, de la maquinaria, así como de otros gastos auxiliares. Los costes indirectos —vinculados con la gestión de las plantas— corresponden normalmente a un 5% de aquellos otros directos (dato promedio obtenido del trabajo de campo).

En el caso de que no se obtengan datos de referencia suficientes a partir de las empresas o plantas de reciclaje, se puede acudir a bases de datos existentes sobre los costes de ejecución de los materiales pétreos de la zona de estudio, de manera que éstos puedan ser contrastados con los costes suministrados de forma directa.

Para el coste de referencia de los materiales o productos pétreos a partir de materia prima reciclada o secundaria, se habrá de tener en cuenta además el coste del proceso de reciclado, aquél del transporte del residuo hasta la planta de reciclaje y, finalmente, el coste de gestión de los residuos generados. De este modo, se tendrán en cuenta las Ecuaciones 3-1, 3-2 y 3-3.

Ecuación 3-1

$$C_{pr} = ct + cr + cg$$

Ecuación 3-2

$$ct = dr * cdr$$

Ecuación 3-3

$$cdr = pc * cc$$

Donde,

C_{pr} = coste del producto reciclado (€/t)

ct = coste de transporte de los residuos (€/t)

dr = distancia recorrida por tonelada (km/t)

cdr = coste de distancia recorrida (€/km)

pc = precio de combustible (€/l)

cc = consumo de combustible (l/km)

cr = coste del proceso de reciclaje (€/t)

cg = coste de gestión de los residuos (€/t)

El coste de transporte se calcula teniendo en cuenta los kilómetros recorridos por toneladas y el tipo de vehículo empleado. Partiendo de estos datos —y conociendo el precio medio del gasóleo de automoción y el consumo de combustible— se pasará a calcular el coste de transporte del residuo.

Para la obtención del coste del proceso de reciclaje se deberá obtener información de plantas de reciclaje de estos residuos o, en su defecto, obtener información secundaria proveniente de otros estudios o

proyectos fiables ya realizados. Para el caso en el que no existan datos directos del producto reciclado, por no comercializarse el producto en la zona de estudio, se calculará por medio del coste de estos productos en otros países potencialmente comparables, considerando el coste de cada materia prima por separado dentro del coste global de producción del material.

Para calcular el coste de ejecución de un mismo producto —en el caso de que se utilicen diferentes materias primas— se habrá de calcular por separado el coste de las materias primas que varían de un producto a otro, sin olvidar, posteriormente, incluir dentro del coste del resto de procesos que permanecen similares en ambos procesos productivos. De este modo, se podrán obtener las diferencias económicas entre las alternativas de producción de un material a partir de materia prima original o a partir de materia prima reciclada. En cualquier caso, se tendrá en cuenta, además del coste de cada materia prima, los diferentes costes de transporte de las mismas desde el sitio de obtención hasta la planta de producción.

Por otro lado, cuando se generan diferentes residuos en los procesos productivos o se les aplica a estos residuos diferentes sistemas de gestión, se deberá calcular el coste económico de dicho proceso.

El coste de gestión de los residuos podrá variar dependiendo del tipo de gestión aplicado. Si los residuos se vierten en vertedero, el cálculo global se realizará teniendo en cuenta la tasa de vertido del residuo y el transporte desde la planta de reciclaje hasta el vertedero (Ecuación 3-4).

Ecuación 3-4

$$C_{gv} = ct + t$$

C_{gv} = coste de gestión del residuo vertido (€/t)

ct = coste de transporte (€/t)

t = tasa del vertedero (€/t)

Si, por el contrario, los residuos se reciclan, se tendrán en cuenta los ingresos debido al reciclaje o valorización de la materia prima y los ahorros debidos a la no disposición de los residuos (Ecuación 3-5).

Ecuación 3-5

$$C_{gr} = -ir - cvr$$

C_{gr} = coste de gestión del residuo reciclado (€/t)

ir = ingreso por el reciclaje, incluyendo el transporte (€/t)

c_{vr} = coste de vertido del residuo, incluyendo igualmente el transporte (€/t)

Cuando se trate del coste de gestión de residuos líquidos o, lo que es lo mismo, del coste por el tratamiento del agua residual, en el cálculo final se tendrá en cuenta el canon del agua que pagan las industrias de la zona de estudio.

Finalmente, los resultados obtenidos en esta etapa se analizan y se discuten.

3.2.5 Fase 5: Definición de los indicadores

En esta fase se definen indicadores relacionados con los criterios económicos y ambientales. Para esto se propone definir tres funciones de criterio, dos relativas al aspecto medioambiental y una al aspecto económico.

Dentro de las funciones de criterio relativas al aspecto medioambiental, se recomienda hacer dos clasificaciones. La elección de los indicadores y las categorías medioambientales asociadas a cada indicador deberán estar basadas en la clasificación que hace el método de evaluación IMPACT 2002+ para estas categorías (Figura 3-2).

Una primera clasificación, F1, está relacionada con las categorías referidas a la salud humana (efectos carcinogénicos y no carcinogénicos, respiratorios inorgánicos e orgánicos). Por otra parte, una segunda clasificación, F2, está relacionada con la calidad del ecosistema, el cambio climático y el consumo de recursos (eutrofización, acidificación, disminución de la capa de ozono, calentamiento global, consumo de energía, ocupación del suelo y extracción de minerales). Para cada una de tales clasificaciones será necesario normalizar los datos de caracterización con el fin de obtener un índice.

Para el caso del criterio económico, se habrá de tener en cuenta la función de criterio F3, debiéndose tomar como índice el mismo valor del criterio, correspondiente al coste de referencia aproximado del material (€/t).

La carga normalizada para las funciones de criterio referidas al aspecto medioambiental será el resultado de tener en cuenta la Ecuación 3-6.

Ecuación 3-6

$$f = \sum_{ic=1}^n w(f_{ic}^* - f_{icj}) / (f_{ic}^* - f_{-ic}^-)$$

Donde,

ic = categoría de impacto

f = función de criterio

n = número de categorías de impacto

f_{ic}^* = corresponde al valor ideal, en este caso al valor mínimo de la categoría de impacto entre todas las alternativas.

f_{ic}^- = corresponde la valor anti-ideal, el máximo valor de la categorías de impacto entre todas las alternativas.

w = factor de ponderación.

En esta metodología se recomienda el empleo de un factor de ponderación, que le asigne igual peso a todas las categorías de impacto evaluadas. Este factor de ponderación ha sido empleado también por otros autores como Álvarez del Castillo (2014) en temas de gestión de residuos. Partiendo de esto, y teniendo en cuenta además el estudio efectuado por Tošić *et al.* (2015), se considerará un factor $w = 0.25$ para las categorías de impacto de punto medio relacionadas con la salud humana, y para las categorías de impacto de punto medio relacionadas con el ecosistema, el cambio climático y el consumo de recursos, se considerará un factor de ponderación de $w = 0.14$.

3.2.6 Fase 6: Clasificación y elección de alternativas. Análisis y discusión de resultados

En esta fase se lleva a cabo la evaluación de las alternativas en términos de criterio. Como en esta metodología se propone la evaluación de varios criterios, se hace necesario efectuar dicha evaluación mediante la aplicación de un método multicriterio que permita escoger para cada material la opción óptima, haciendo una selección de alternativas en las que se tengan en cuenta diferentes clasificaciones para los criterios, según la prioridad que se le dé al criterio ambiental o económico.

3.2.6.1 Aplicación del método multicriterio

Los métodos multicriterio son adecuados para abordar problemas complejos con un alto grado de incertidumbre, objetivos conflictivos y múltiples intereses y/o perspectivas (Quijano, 2012).

En esta metodología se propone emplear el método VIKOR como procedimiento multicriterio para la elección de las alternativas óptimas en la producción de materiales pétreos en construcción.

El método escogido forma parte de los métodos multicriterio con un conjunto discreto o un conjunto continuo de alternativas (García, 2004). Este método es adecuado para la evaluación de impactos

ambientales, donde el problema de decisión normalmente es discreto, debido a que el conjunto de alternativas posibles se puede enumerar y no son demasiadas.

La ventaja del método VIKOR —frente a otros comúnmente usados en el campo de la toma de decisiones— es que implementa elementos de otros métodos discretos de decisión multicriterio, con el fin de optimizar el proceso de selección de alternativas y de incluir también las preferencias del decisor. Conviene recordar que, además, recoge la combinación de métodos cuantitativos y de análisis cualitativo para mejorar los resultados, así como la calificación de criterios para asignarles importancia relativa durante el proceso de decisión.

Otras de las ventajas del método VIKOR es que presenta una estructura simple, basada en una programación lineal y admite hacer modificaciones para su optimización, debido a la sencillez de su algoritmo. Además, ofrece la posibilidad de determinar una solución de compromiso, es decir, la más cercana a la ideal, que refleja la posición de la mayoría de decisores involucrados (Quijano, 2012).

Con respecto a otros métodos como ELECTRE III y PROMET-HEE, VIKOR tiene la ventaja de establecer un punto de referencia y compararlo con las alternativas que se tienen. En los otros métodos se hace una comparación entre las mismas alternativas, sin saber que tan cerca están éstas de cumplir con el propósito deseado (Quijano, 2012). Además, el método VIKOR facilita la comparación entre los criterios por medio de la normalización de las unidades de una manera más sencilla de comprender y operar que otros métodos como TOPSIS.

La elección de este método también se debe a que ha sido empleado en estudios científicos efectuados en el ámbito del medio ambiente y en ingeniería de los materiales con muy buenos resultados como es el caso de Chatterjee *et al.* (2009); Jahan *et al.* (2011); Quijano (2012); Vučijak *et al.* (2013); Liu *et al.* (2013); Civic y Vucijak (2014); Tošić *et al.* (2015); Sakthivel *et al.* (2015) y Suganthi *et al.* (2015), lo que indica que ha tenido una buena acogida en la comunidad científica internacional.

En general para el cálculo de VIKOR se deben seguir los siguientes pasos:

❖ Paso 1

Asumiendo que cada alternativa es evaluada de acuerdo a cada función de criterio, la jerarquía de compromiso puede ser desarrollada mediante la comparación de la medida de cercanía a la solución “ideal” F^* . Se determinan los mejores f_i^* y los peores f_i^- valores para cada una de las funciones de criterio: $i=1, 2, \dots, n$. Si la i -ésima función de criterio representa un beneficio, entonces $f_{ij}^* = \max f_{ij}$ y $f_{ij}^- = \min f_{ij}$.

❖ Paso 2

Teniendo la identificación de los mejores y peores valores para cada función de criterio, se determinan los valores S_j y R_j : $j = 1, 2, \dots, J$ mediante la Ecuación 3-7 y Ecuación 3-8.

Ecuación 3-7

$$S_j = \sum_{i=1}^n w_i (f_i^* - f_{ij}) / (f_i^* - f_i^-)$$

Ecuación 3-8

$$R_j = \max_i (w_i (f_i^* - f_{ij}) / (f_i^* - f_i^-))$$

Donde:

j = alternativa

n = número de criterios

S_j = representa las distancias de las alternativas a la mejor solución

R_j = representa la distancia entre las alternativas y la peor opción

w_i = son los pesos de criterio, expresando la preferencia de los decisores como la importancia relativa del criterio.

Para el caso de los criterios elegidos, se asigna la relevancia o el peso de cada uno, dependiendo de los distintos puntos de vista de los actores implicados en la toma de decisiones. Con esta metodología se pretende conocer los resultados a partir de los diferentes pesos dados a los criterios evaluados. En primer lugar, los resultados cuando se le da la misma importancia al criterio medioambiental y económico, y en segundo y tercer lugar dándole mayor importancia a uno de estos dos criterios.

Los factores de ponderación y la clasificación para los criterios a emplear en esta tesis se definen a partir del método de ponderación por orden de rango seguido por Tošić *et al.* (2015), debido a que en este método se tiene en cuenta la importancia relativa entre los diferentes criterios.

De este modo, siguiendo este proceso de ponderación, se emplea el mismo coeficiente de peso, cuando se le da igual prioridad a ambos criterios.

Si se le da prioridad al criterio medioambiental, se emplea un coeficiente de peso mayor para este criterio. En este caso, las funciones de criterio F1 y F2, correspondientes al criterio medioambiental, se encuentran en una relación de 2:1 con respecto a la función de criterio F3.

Por el contrario, si se le da prioridad al criterio económico, se emplea un coeficiente mayor para esta función de criterio. En esta ocasión, la función de criterio F3 se encuentra en una relación 2:1 con respecto a las funciones de criterio F1 y F2.

Es así como se eligen tres criterios de clasificaciones en esta metodología (Tabla 3.4):

- a) Clasificación "igual importancia", donde todos los criterios son igualmente importantes. En este caso a cada función de criterio se le asigna un peso $w_i = 0.33$.
- b) Clasificación "ventaja medioambiental", donde los criterios medioambientales presentan ventajas con respecto al criterio económico. Es decir, F1 y F2 presentan ventajas con respecto a F3, en una relación de 2:1.
- c) Clasificación "ventaja económica", donde el criterio económico presenta ventajas en comparación con los criterios medioambientales. Así, F3 se encuentra en una relación 2:1, con respecto a F1 y F2.

Tabla 3.4 Coeficientes de peso para cada uno de los criterios

Clasificación de los criterios	F1 (w1)	F2(w2)	F3(w3)
Todos los criterios igual importancia	0.33	0.33	0.33
Ventaja medioambiental	0.4	0.4	0.2
Ventaja económica	0.25	0.25	0.5

❖ **Paso 3**

Calcular los valores de Q, mediante la Ecuación 3-9.

Ecuación 3-9

$$Q_j = v (S_j - S^*) / (S^- - S^*) + (1 - v)(R_j - R^*) / (R^- - R^*)$$

$$S^* = \min_j S_j, S^- = \max_j S_j$$

$$R^* = \min_j R_j, R^- = \max_j R_j$$

La "distancia" a la "solución ideal" es aquella que se da en un espacio dimensional "n"; es decir, la diferencia entre cada valor de la función criterios (para todas las alternativas) y el valor "ideal", que es un componente del vector "distancia" para cada alternativa.

Entonces, la solución que se obtiene de $\min_j S_j$ se puede ver como la alternativa con el valor mínimo de la suma de todas las componentes del vector "distancia". Además, todas las alternativas tienen un componente del vector "distancia" con un máximo valor, es decir, siempre hay una función criterio más distante de su valor ideal que todos los demás. La solución obtenida de $\min_j R_j$ es la alternativa con el menor valor de su componente máxima distancia.

En este método, la medida Q es una interpolación lineal de las medidas S_j y R_j . El coeficiente de interpolación "v" puede tomar valores entre 0 y 1.

Si $v = 0$ entonces la medida Q será igual a la medida R_j .

Si $v = 1$, Q es igual a la S_j .

En esta metodología se propone adoptar igual que Tošić *et al.* (2015), el valor de $v=0.5$. De esta manera, se le da igual peso a ambas medidas para evitar dar preferencia a uno de ellos.

3.2.6.2 Elección de las alternativas

Una vez aplicado el método VIKOR, se jerarquizan las alternativas organizando según los valores de S, R y Q en orden decreciente, teniendo en cuenta que la alternativa más óptima es la más cercana a cero y la peor opción la más cercana a uno. Los resultados obtenidos son tres listas ordenadas.

Para la elección de la alternativa óptima en cada una de las clasificaciones de los criterios, se tienen en cuenta los resultados de la lista de Q.

Se propone una sola alternativa si se cumplen las condiciones a) y b) (Ecuación 3-10 - Ecuación 3-12).

- a) Ventaja aceptable

Ecuación 3-10

$$Q(a'') - Q(a') \geq DQ$$

Donde a'' es la alternativa en segunda posición en la lista ordenada por valor de Q.

Ecuación 3-11

$$DQ = \min \left(\frac{1}{j-1}; 0.25 \right)$$

j = número de alternativas

- b) Estabilidad estable en la decisión. La alternativa a' deberá ser también la mejor en las listas S y/o R.

Si no se cumplen estas condiciones, se proponen múltiples alternativas:

1. Alternativa a' y alternativa a'' si sólo la condición b) no es satisfecha.
2. Alternativa a' , a'' ,... $a^{(M)}$ si la condición a) no se satisface. La alternativa $a^{(M)}$ es determinada por la Ecuación 3-12.

Ecuación 3-12

$$Q(a)^M - Q(a)' < DQ$$

A partir de las condiciones anteriormente nombradas, se escoge la mejor alternativa al darle igual importancia el criterio medioambiental y económico, y la mejor alternativa cuando se le da mayor peso al criterio ambiental o económico. Los resultados obtenidos en esta etapa se analizan y se discuten.

3.2.7 Fase 7: Conclusiones

En esta etapa se lleva a cabo el análisis y las conclusiones de los resultados obtenidos con la aplicación de esta metodología. Se presentan las conclusiones ambientales y económicas por separado, también las conclusiones obtenidas teniendo en cuenta el enfoque multicriterio. Finalmente, se puede ver si hay algún tipo de compatibilidad entre los diferentes resultados.

3.3 Aplicación general de la propuesta metodológica a los materiales considerados de interés para este estudio

En este apartado se exponen las fases primeras (1, 2, 3) de la propuesta metodológica aplicada a los principales materiales pétreos evaluados que presentan aspectos comunes en este estudio. De este modo, se hará una explicación más detallada de las fases restantes de la propuesta metodológica de cada uno de los materiales elegidos: yeso, cemento, áridos y hormigón. El objetivo de este proceder no es otro sino el de agilizar la descripción de estas fases, que son, en realidad, prácticamente casi similares en todos los materiales objeto de evaluación. Posteriormente, en los capítulos 4, 5, 6, y 7, se presentarán en detalle las fases restantes de la metodología propuesta a cada uno de los materiales elegidos.

3.3.1 Fase 1: Definición y localización del estudio

3.3.1.1 Elección del material/residuo

Para aplicar la metodología se escogen en esta tesis cuatro materiales pétreos a estudiar: el yeso, el cemento, los áridos, y el hormigón. Los parámetros tenidos en cuenta para su elección son: su cantidad dentro de los RCD y su impacto medioambiental e importancia dentro de la industria de la construcción. Los materiales fueron elegidos también de tal forma que estos puedan, a su vez, ser empleados en la producción de nuevos materiales de construcción, como es el caso del uso del yeso en la producción de cemento, así como del uso de los áridos y del cemento en la producción del hormigón. Es así, como el hormigón —como material compuesto— incluye finalmente todos los demás materiales estudiados.

3.3.1.2 Localización del estudio

El ámbito de estudio considerado para la producción primaria y secundaria de los materiales pétreos escogidos corresponde a España. Sin embargo, como se mencionó en el estado del arte, es en Cataluña donde actualmente se genera la mayor cantidad de residuos de construcción y demolición en toda España; además, esta es una de las comunidades pioneras en el reciclaje de estos residuos en todo el territorio español. Por ello, para efecto de las distancias y con el fin de tener datos más concretos se toma como base a Cataluña y se considera que los residuos se generan en el centro de Barcelona, donde se produce la mayor cantidad. Se toma también como base las plantas de reciclaje más cercanas al núcleo urbano de Barcelona.

En general, se consideran dos distancias de transporte de los residuos pétreos hasta la planta de reciclaje: una de 7 km que corresponde a la distancia promedio de las plantas de reciclaje más cercanas al centro de Barcelona, que es el sitio donde se generan la mayor cantidad de residuos dentro de Cataluña; y otra de 50 km, que corresponde a la distancia máxima a la que serían transportados los residuos producidos en cualquier otro sitio hasta las plantas de reciclaje, debido al número y distribución de las plantas de este tipo dentro del territorio catalán según el Servidor de mapas de la Agència de Residus de Catalunya (ARC, 2015b) (Anexo L, Anexo M y Anexo R).

3.3.2 Fase 2: Sistemas de producción

3.3.2.1 Producción primaria y producción secundaria

Para el caso de esta tesis, en esta etapa se estudia en detalle los diferentes casos de reciclaje de los materiales pétreos elegidos y los resultados obtenidos a nivel de laboratorio o en proyectos, con el fin de conocer el comportamiento técnico de estos materiales y por lo tanto tener en cuenta este criterio en el momento de definir las diferentes alternativas a evaluar. Esta fase se encuentra desarrollada en el capítulo 2 de esta tesis correspondiente al estado del arte.

3.3.2.2 Definición de alternativas

Antes de definir las alternativas y con el objeto de hacer la comparación entre producción primaria y producción secundaria, se efectúa la clasificación entre subproductos y productos de reciclaje según la transformación de los residuos.

Para efecto de esta tesis en la Tabla 3.5 se pueden observar los subproductos de reciclaje de los materiales/residuos estudiados, con su respectivo método de reciclaje. En España, el método de reciclaje más común para los residuos pétreos es la trituración.

Tabla 3.5 Subproductos del reciclaje

Categoría	Residuo	Método de reciclaje	Subproducto del reciclaje
Material pétreo	Hormigón	Trituración	Árido reciclado de hormigón
	Cerámica	Trituración	Árido reciclado de cerámica
	Yeso	Trituración	Yeso en polvo
	Vidrio	Trituración	Vidrio triturado

En la Tabla 3.6 se observa el listado de los productos reciclados provenientes de los materiales/residuos estudiados.

Tabla 3.6 Productos del reciclaje

Categoría	Residuo	Subproducto del reciclaje	Producto reciclado (transformación)
Material pétreo	Hormigón	Árido reciclado de hormigón	Hormigón con árido de hormigón
	Cerámica	Árido reciclado cerámica	Hormigón con árido mixto (hormigón y cerámica)
	Vidrio	Vidrio triturado	Cemento con vidrio triturado
	Yeso	Yeso en polvo	Cemento con yeso reciclado

Para la mayoría de los materiales se considera un reciclaje cerrado debido a que no se cambian las propiedades de los materiales reciclados y normalmente se reciclan en el mismo sistema de producto. Sin embargo, para el caso del cemento con vidrio triturado se considera un reciclaje abierto, ya que el material reciclado se somete a un cambio en las propiedades inherentes.

En el cemento, se tiene en cuenta como producción primaria la obtención de cemento a partir de materia prima original y como producción secundaria, la misma producción de cemento, pero a partir de material reciclado... y no se tiene en cuenta el reciclaje del cemento como tal.

La cerámica y el vidrio, aunque no se evalúan como dos materiales separados, se encuentran incluidos bien sean dentro de la producción de cemento, como materia prima en el caso del vidrio, o como productos de la trituración de la cerámica. Este árido de cerámica mezclado con árido triturado proveniente del hormigón, da origen al árido mixto.

Finalmente, en la Tabla 3.7 se muestra la producción primaria y secundaria de los materiales elegidos. Dicha elección está basada en estudios efectuados en este campo, en los que se evalúa únicamente la parte técnica o química del material.

Tabla 3.7 Materiales a evaluar (producción primaria y secundaria)

Categoría	Material/residuo	Producción (materia prima)	Producción (R. Abierto)	Producción (R. Cerrado)	Fuente
Material pétreo	Yeso	Yeso natural		Yeso reciclado	Begliardo <i>et al.</i> (2007); Guillén (2005); Godinho-Castro <i>et al.</i> (2012); WRAP (2008); GRI (2015).
	Cemento	Cemento		Cemento con yeso reciclado	Morales (2010); Chandara <i>et al.</i> (2009); WRAP (2008).
			Cemento con vidrio reciclado		Shao <i>et al.</i> (2000); Xie y Xi (2002); Shi y Zheng (2007); Idir <i>et al.</i> (2011); Matos y Sousa-Coutinho (2012); Tan y Du (2013); De Castro y De Brito (2013); Hidalgo (2013); Oliveira <i>et al.</i> (2013); Jani y Hogland (2014).
	Árido	Árido natural		Árido de hormigón	Sánchez de Juan (2004); López (2008); Wagih <i>et al.</i> (2013); Vossberg <i>et al.</i> (2014); Jani y Hogland (2014).
				Árido de cerámica	
	Hormigón	Hormigón			Hormigón a partir de árido reciclado de hormigón
				Hormigón a partir de cemento con yeso reciclado y árido reciclado	Trabajo realizado en esta tesis

A partir de los resultados de la Tabla 3.7 se escogen las diferentes alternativas de producción de materiales. Como algunos de estos constituyen un componente principal de otro material evaluado, las alternativas están definidas también en función de los resultados obtenidos en la producción de estos

materiales. Por ello, las alternativas se han establecido a medida en que se han ido estudiando los diferentes materiales y se han ido encontrando resultados. En todos los materiales se hace una comparación de la producción primaria con la producción secundaria.

En el caso de la producción primaria y secundaria del yeso, para que ambos procesos sean comparativos, la etapa de extracción de materia prima en el yeso natural, corresponde a la etapa de transporte de los residuos en el caso del yeso reciclado. En la obtención del yeso natural se considera sólo un mínimo de transporte interno, ya que por lo general las minas de extracción están muy cerca del resto de infraestructuras. Por lo tanto, en el caso del yeso reciclado es necesario tener en cuenta la distancia del transporte de los residuos. Se consideran dos distancias, una de 7 km que como se mencionó antes corresponde a la distancia promedio de las plantas de reciclaje más cercanas al centro de Barcelona, y otra, de 50 km, que corresponde a la distancia máxima a la que serían transportados los residuos producidos en cualquier otro sitio hasta las plantas de reciclaje.

Otro criterio importante tenido en cuenta en el caso de la producción secundaria del yeso es la gestión del papel que proviene de las placas de yeso laminado, el cual pasa a ser un residuo generado durante el proceso de reciclaje del yeso. Por esto, es necesario tener en cuenta diferentes sistemas de gestión de este residuo. Se escogió por una parte un tratamiento finalista (disposición de los residuos de papel), y por otro, el reciclaje para conocer la influencia de ambos sistemas de gestión en los resultados finales. Es necesario destacar que para este primer material se estudia un yeso comercial calcinado en polvo, por ello, en ambos casos tanto el yeso natural como el yeso proveniente de los RCD requieren de un proceso de secado que los convierta en sulfato de calcio hemi hidrato ($\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2} \text{H}_2\text{O}$).

Para el caso del cemento, las alternativas de producción secundaria están basadas en los resultados encontrados en el estado del arte, donde se hace necesario, por una parte, hacer una buena gestión de los residuos de yeso provenientes de la construcción, y por otra parte, disminuir los impactos medioambientales de la producción del cemento, el cual es uno de los materiales más empleados en construcción. De este modo, el yeso como material indispensable en la producción de cemento Pórtland ordinario, se convierte en un residuo con grandes posibilidades de ser reincorporado al cemento. En esta ocasión se tiene en cuenta que, a nivel técnico, la cantidad máxima de yeso empleado en el cemento es un 5 %. Para el uso del yeso en cemento es suficiente un sulfato de calcio di-hidrato ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) por lo que no es necesario calcinar el yeso, sino únicamente triturarlo. De este modo, se emplean los mismos procesos del yeso calcinado en polvo, pero sin tener en cuenta la etapa de cocción del yeso en el horno. La alternativa de producción de yeso reciclado que resulta como mejor opción es la que se emplea en la producción de cemento con yeso reciclado.

Conociendo la necesidad de disminuir el factor clínker, se han llevado a cabo otros estudios en los que emplean en sustitución de la arcilla en el cemento, residuos de construcción y demolición como es el caso del vidrio triturado (Jani y Hogland, 2014). Por ello, se utiliza también el vidrio triturado reciclado

como materia prima secundaria en la producción de cemento y se considera esta como otra alternativa de producción. La cantidad de arcilla a reemplazar por vidrio triturado está basada en estudios efectuados en los que se ha comprobado la viabilidad técnica del uso de este residuo en la producción del cemento (Jani y Hogland, 2014 ; Xie y Xi, 2002). En esta alternativa de producción de cemento, se emplea el yeso natural usado también en el CPO, lo que se modifica son las materias primas necesarias para la producción del clínker.

Las etapas involucradas en los procesos de producción de cemento son similares, sólo varía el proceso de obtención del yeso, bien sea natural o reciclado y el proceso de obtención del vidrio triturado. Por ello varía la distancia para cada una de las materias primas empleadas. Los residuos generados en todos los procesos de producción del cemento se consideran similares, lo mismo que el sistema de gestión llevado a cabo para cada uno de ellos.

Por otro lado, las alternativas del proceso de obtención del árido reciclado fueron escogidas en función de los estudios efectuados en este campo. Para el caso del árido reciclado, al igual que en el yeso reciclado, es necesario tener en cuenta la distancia de transporte de los residuos de hormigón y cerámica desde el sitio de origen hasta la planta de reciclaje, ya que este proceso corresponde a la extracción de árido natural en cantera. En el caso del árido reciclado se tiene en cuenta como distancia de transporte de los residuos 7 km, ya que, como se mencionó anteriormente, es la distancia promedio desde el centro de Barcelona hasta las plantas de reciclaje más cercanas. En este caso interesa evaluar dos factores que se consideran importantes. Por un lado, el tipo de residuo que entra a la planta de reciclaje: hormigón armado y residuo mixto (hormigón armado y cerámica), y por otro, el sitio en el que se lleva a cabo el proceso de reciclaje; es decir, en planta fija o en la misma obra de construcción.

Por último, para el caso de la producción secundaria de hormigón, se lleva a cabo en primer lugar una clasificación entre hormigón estructural y hormigón no estructural, ya que si se quiere comparar la producción primaria y secundaria del hormigón es importante tener en cuenta que los hormigones tengan la misma funcionalidad. De este modo, para ambos tipos de hormigón se tuvieron en cuenta los estudios efectuados y la normativa nacional e internacional que permiten el tipo y la cantidad de árido reciclado y también la adecuada dosificación de los hormigones.

Para el caso del hormigón estructural, además de la producción de hormigón convencional, se evalúa la producción con 20 % de árido reciclado de hormigón, ya que, según Alaejos (2008); Sánchez de Juan *et al.* (2011) y la instrucción de hormigón estructural en España (EHE 2008), en España se recomienda emplear como contenido máximo de árido grueso reciclado un 20 % para el hormigón estructural. También se evalúa la influencia del cemento reciclado en el hormigón.

Para el hormigón no estructural, se tienen en cuenta también estudios efectuados. Además del hormigón convencional, se evalúa el hormigón con un 100 % de árido reciclado de hormigón de acuerdo con

Alaejos (2008), Sánchez de Juan *et al.* (2011) y la instrucción de hormigón estructural en España (EHE 2008). Aunque la normativa española aún no permite el uso del árido mixto en hormigón para uso no estructural, en otros países como Reino Unido, Brasil y Alemania la normativa permite el uso de este material reciclado en la producción de nuevo hormigón no estructural. Por ello, y por estudios efectuados que garantizan su viabilidad técnica (Poon y Chan, 2006), se estudia en una de las alternativas un 75 % de árido mixto reciclado. En el caso del hormigón no estructural también se evalúa la influencia del uso del cemento reciclado, en lugar del cemento convencional.

En las Tabla 3.8 - Tabla 3.11, se muestran las diferentes alternativas elegidas de producción de los materiales.

Tabla 3.8 Alternativas de producción del yeso

Material/residuo	Producción primaria	Producción secundaria			
		A1 (YN)	A2 (YR-7km-dp)	A3 (YR-7km-rp)	A4 (YR-50km-dp)
Yeso	Yeso natural	Yeso reciclado (7km), disposición del papel	Yeso reciclado (7km), reciclaje del papel	Yeso reciclado (50km), disposición del papel	Yeso reciclado (50km), reciclaje del papel

Tabla 3.9 Alternativas de producción del cemento

Material/ residuo	Producción primaria	Producción secundaria	
		A1 (CPO)	A2 (CYR)
Cemento	Cemento con yeso natural	Cemento con yeso reciclado	Cemento con vidrio reciclado

Tabla 3.10 Alternativas de producción del árido

Material/residuo	Producción primaria	Producción secundaria		
		A1(AN)	A2(AHp)	A3(AHo)
Árido	Árido natural	Árido de hormigón en planta	Árido de hormigón en obra	Árido mixto en planta

Tabla 3.11 Alternativas de producción del hormigón

Material/ residuo	Producción primaria	Producción secundaria			Producción primaria	Producción secundaria			
		Uso estructural				Uso no estructural			
	A1	A2	A3	A1	A2	A3	A4	A5	
Hormigón	(HE100%AN)	(HE20%AR)	(HE20%AR - CYR)	(HNE100%AN)	(HNE100% AR)	(HNE75% AMR)	(HNE100 % AR- CYR)	(HNE75% AMR- CYR)	
	Hormigón estructural, 100% árido natural	Hormigón estructural, 20% árido de hormigón	A2, 100% cemento reciclado	Hormigón no estructural, 100% árido natural	Hormigón no estructural, 100% árido de hormigón	Hormigón no estructural, 75% árido mixto	A2, 100% cemento reciclado	A3, 100% cemento reciclado	

3.3.3 Fase 3: Criterios de evaluación

Los criterios identificados para ser estudiados son el criterio *medioambiental* y el *económico*. El criterio medioambiental se efectúa por medio de la metodología de ACV y el criterio económico por medio del coste de ejecución de referencia de los materiales de construcción en España.

3.3.4 Fases 4, 5, 6 y 7

Estas fases se explican en detalle para cada material en los capítulos siguientes. Sin embargo, a continuación se presentan los aspectos comunes de la fase 4, tanto para el criterio medioambiental, como para el económico en todos los materiales evaluados.

3.3.4.1 Criterio medioambiental

❖ Definición de objetivos y alcance

➤ *Objetivo*

El objetivo del ACV de todos los materiales evaluados consiste en conocer los impactos medioambientales del proceso de producción primaria y secundaria, teniendo en cuenta tanto el reciclaje abierto, como el reciclaje cerrado.

➤ *Alcance*

La etapa del ciclo de vida considerada en la producción primaria de los materiales es, como su nombre lo indica, el proceso de producción. En este se tienen en cuenta las entradas que corresponden, básicamente, a las materias primas y energía, las salidas que equivalen principalmente a las emisiones atmosféricas, las aguas residuales y los residuos sólidos (Figura 3-3). Se tiene en cuenta en forma general la obtención de las materias primas, su transporte hasta el sitio de producción, y el transporte y proceso de gestión de los residuos generados.

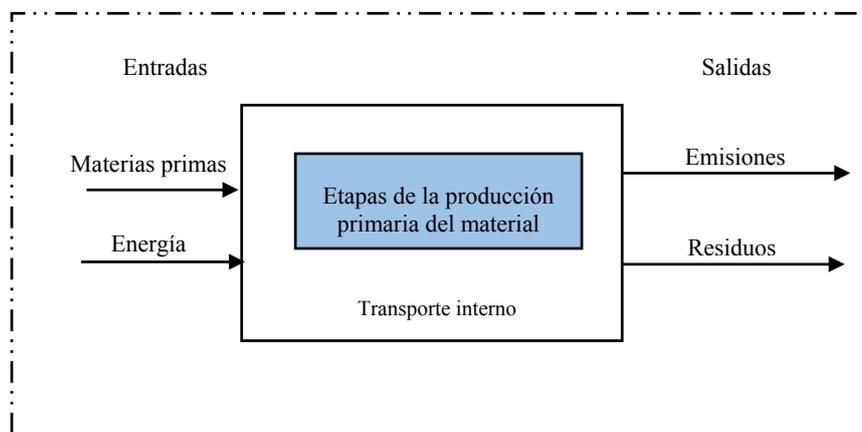


Figura 3-3 Límites del sistema de la producción primaria de materiales

Con respecto a la producción secundaria de los materiales las etapas son similares, sólo varía la entrada de residuos (Figura 3-4).

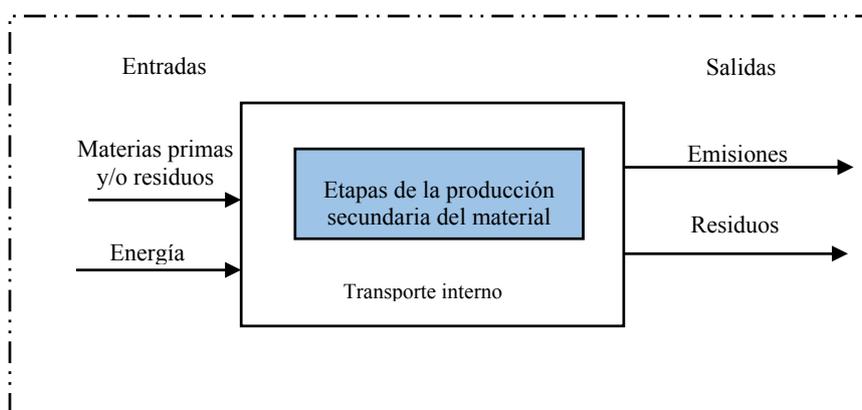


Figura 3-4 Etapas consideradas en la producción secundaria de materiales

En cada uno de los procesos de producción de materiales se incluye el transporte interno. El transporte externo es considerado dependiendo de cada material.

En cuanto a la producción secundaria, se tiene en cuenta el transporte de los residuos desde el sitio de generación hasta la planta de reciclaje. Se considera que los residuos son separados selectivamente en la obra.

En ambos sistemas de producción se incluyen los procesos de fabricación de maquinarias empleadas e infraestructuras territoriales.

➤ *Unidad funcional*

La unidad funcional escogida para el yeso, el cemento y los áridos corresponde a 1 kg de residuo o material. Para el caso del hormigón se ha empleado 1 m³, por ser lo más habitual para este material.

❖ **Alternativas o escenarios propuestos**

Se emplean las alternativas escogidas en la fase 3 de la metodología propuesta.

Los diferentes criterios seguidos en las alternativas de producción secundaria de los materiales evaluados se deben a las propiedades mismas del material y a los aspectos más importantes tenidos en cuenta en estudios efectuados (estado del arte). Dependiendo de cada material, se evalúa la distancia de transporte de los residuos hasta la planta de reciclaje, el lugar donde se efectúa el reciclaje, la gestión de los residuos provenientes del proceso de reciclaje de los residuos y diferentes tipos y porcentajes de sustitución de la materia prima.

❖ **Análisis de inventario**

Para efectuar el estudio, se llevó a cabo, en primer lugar, una búsqueda exhaustiva de información primaria a través del contacto directo con gremios de empresas del sector de la construcción en España. El método seguido para la consulta a las empresas y plantas de reciclaje consistió en entrevista a personal especializado a través de visitas a las mismas, vía telefónica o correo electrónico.

Se estableció contacto directo con 45 empresas y organismos nacionales. Treinta y tres de los cuales correspondían a empresas de fabricación primaria o secundaria de materiales de construcción y doce a organismos u asociaciones nacionales. También se llevó a cabo la lectura detallada de la Declaración medioambiental de empresas relacionadas con la producción o reciclaje de materiales o residuos.

En la elección del tipo de empresas a consultar para la obtención de los datos de fabricación de materiales se tuvo en cuenta que fueran empresas representativas asociadas a los diferentes gremios relacionados con los materiales de construcción en España.

En la elección de las plantas de reciclaje escogidas para visitar se tuvo en cuenta que fueran plantas pertenecientes a Gestora de Runes de Cataluña cercanas al área metropolitana de Barcelona, con una alta actividad y por lo tanto plantas con gran interés dentro del sector. Las plantas elegidas para visitar fueron la planta de reciclaje del Puerto de Barcelona y la planta de reciclaje *Les Franqueses del Vallés* (Tecnocatalana de Runes). Estas plantas han sido también estudiadas por otros autores debido a sus características (Álvarez, 2010; Etxeberria, 2011; Fueyo, 2012).

La planta del Puerto de Barcelona es una planta de un nivel tecnológico intermedio (nivel 2) y de una alta capacidad de producción, ya que presenta varias líneas de producción de áridos. Se trata de una planta de maquinaria móvil establecida en un emplazamiento fijo. Esta planta trabaja con 2 conjuntos de máquinas: árido mixto y árido de hormigón reciclado, y produce alrededor de los 450000 t/año. Considerando el nivel de aceptación del RCD que entra a la planta, esta planta se considera de categoría 2, debido a que permite la entrada de residuos con un contenido de impureza superior al 10 %, pero nunca estas impurezas presentan un contenido de materia orgánica mayoritario.

La planta de reciclaje *Les Franqueses del Vallés* se clasifica como planta fija y estacionaria, presenta un nivel alto de automatización (nivel 3) y, por tanto, es capaz de tratar materiales de naturaleza variada. Estos materiales variados que entran en la planta hacen que se encuentre también dentro de la categoría 2 según el grado de admisión, ya que el material, a pesar de ser variado, presenta un mayor porcentaje de material pétreo. La capacidad de producción de la planta es de 200000 t/año. Además de contar con una línea de tratamiento completa cuenta con elementos de eliminación de purezas adicionales.

En general, los datos obtenidos de las empresas de fabricación y plantas de reciclaje son datos comprendidos entre los años 2009-2013, de los que se obtuvo un dato promedio para llevar a cabo el estudio. Estos datos obtenidos de fuentes primarias fueron completados con información secundaria referidos a plantas de reciclaje en España (Mercante *et al.*, 2010). La información obtenida de las plantas de reciclaje de RCD se refieren al tipo de residuo que entra a la planta, capacidad anual de la planta, tipo y cantidad de combustible consumido, maquinaria empleada, consumo eléctrico, tipo y gestión de los residuos generados, coste de reciclaje y en general datos relacionados con todo el proceso de reciclaje.

Por otra parte, los datos de producción primaria de materiales de construcción referentes a tipos de materias primas, tipos de combustibles, consumo energético, capacidad de producción, maquinaria y equipos, emisiones de CO₂, residuos generados, los cuales fueron obtenidos de las empresas o de fuentes secundarias, fueron completados y confrontados con la base de datos Ecoinvent v2.2 y adaptados al contexto español. La energía tenida en cuenta tanto en la base de datos Ecoinvent v2.2, al igual que la

energía suministrada por las empresas, corresponde a la energía final, es decir, a la energía refinada y apta para ser empleada en los procesos.

Debido a un tema de confiabilidad de datos con las empresas se habla de datos promedios de empresas o plantas de reciclaje, sin especificar exactamente qué dato pertenece a cada una. Finalmente, en los Anexos se muestra la lista de empresas y/o plantas de reciclaje consultadas (Anexo A- Anexo C). Para el caso de los Organismos y Asociaciones, como son datos genéricos del sector, sí que son expuestos los datos directamente.

Para el caso de las distancias desde el lugar de generación de RCD hasta la planta de reciclaje y desde las plantas de reciclaje de RCD hasta el lugar de gestión de los residuos generados, así como el trayecto recorrido desde la obtención de las materias primas hasta las plantas de fabricación, se obtuvieron del Servidor de mapas de la ARC (2015b) y de la información suministrada por las empresas y organismos consultados (Anexo S-Anexo X).

➤ **Base de datos Ecoinvent v2.2**

Un material de construcción es producido a través de múltiples unidades de proceso con aportaciones que provienen tanto de la naturaleza como de la industria. Estos procesos tienen como resultado salidas que se incorporan nuevamente a la naturaleza y la tecnosfera. Las entradas incluyen materias primas, ya sea de recursos vírgenes o reciclados, la energía y el agua. Las salidas incluyen las emisiones al aire, los efluentes del agua, las emisiones al suelo y, en general, cualquier otro tipo de desechos.

La base de datos Ecoinvent, que incluye inventarios de ciclo de vida de los materiales de construcción, trabaja con procesos unitarios. Estos procesos unitarios presentan dos tipos de entradas. Las entradas desde la naturaleza, como su mismo nombre lo indica, se refieren al uso de recursos naturales tomados directamente de la naturaleza, sin ningún tipo de transformación, y las entradas desde la tecnosfera, que son aquellas que se emplean en los procesos que provienen de recursos o materiales que ya han sido transformados por el hombre.

Existen varios procesos unitarios que son comunes en la producción o en el reciclaje de los materiales pétreos estudiados. El inventario de estos procesos unitarios comunes se detalla a continuación.

- **Electricidad**

En este proceso se toma como base el proceso de electricidad de Ecoinvent v2.2 “*Electricity, medium voltage, at grid /ESU*”, adaptado al mix eléctrico español, que incluye la producción de electricidad en

España y su importación. Se incluyen las emisiones debidas a este proceso. También, la transmisión a medio voltaje y la red de distribución.

- *Transporte*

En Ecoinvent v2.2, el proceso de transporte se especifica como tonelada-kilómetro (tkm). Una tonelada-kilómetro, significa el transporte de 1 tonelada en 1 km o 1 kg alrededor de 1000 km u otra combinación con la que se obtenga el mismo producto de distancia y peso. El proceso de transporte incluye la producción, mantenimiento, operación y disposición del vehículo. También se tiene en cuenta la construcción, mantenimiento y disposición de las carreteras. Se emplean datos genéricos europeos.

El transporte de los RCD normalmente se efectúa en camiones de carga pesada; es decir, de 32 t. Por ello, se escogió para el transporte, el proceso llamado en Ecoinvent v2.2 “*Transport lorry >23 t, EURO 5/RER U*”. Se escoge EURO 5 ya que representa las emisiones más restrictivas inventariadas en Ecoinvent v2.2., según la normativa europea. La operación de este tipo de vehículo en 1 km recorrido consume 0.26 kg de diésel. Las emisiones al aire debidas a un 1 km recorrido se presentan en la Tabla 3.12.

Otro tipo de camión empleado para el transporte de los residuos es un camión de 16 t-32 t, cuya operación en 1 km recorrido consume 0.21 kg de diésel. Las emisiones al aire se detallan en la Tabla 3.13. Para el transporte interno se emplea un camión de 3.5 t -7.5 t, el cual consume en 1 km recorrido, 0.09 kg de diésel (Anexo D).

Por otra parte, en Ecoinvent v2.2, se emplean diferentes códigos en los procesos, los cuales representan la situación en cada país. De este modo, ES=España; GLO=global; RER=Europa y CH=Suiza. En los procesos de infraestructura se utiliza p, la cual equivale a una unidad.

Para el estudio de cada proceso de producción se toma como base el proceso existente en Ecoinvent v2.2 y se crea un nuevo proceso en el que se adicionan nuevas entradas y salidas de acuerdo a los resultados del estado del arte referidos a las etapas de cada proceso de producción o reciclaje. También se tiene en cuenta la información obtenida por las empresas, plantas de reciclaje, organismos y asociaciones consultados en forma directa.

Los datos obtenidos del inventario se introducen en los nuevos procesos creados. Se intenta que estos datos sean lo más representativos posibles de la zona de estudio. Los procesos unitarios o datos tomados como referencia de la base de datos de Ecoinvent v2.2 deben coincidir con las características de las plantas de producción de la zona de estudio. En caso de que no coincidan, los parámetros o unidades de cada proceso unitario deben adaptarse al contexto estudiado.

Para el caso de la producción secundaria es necesario crear nuevos procesos de reciclaje de residuos, empleando los datos suministrados por empresas, plantas de reciclaje, organismos nacionales y fuentes secundarias, y complementando con datos de la base de datos Ecoinvent v2.2.

Tabla 3.12 Emisiones al aire por km recorrido en camión de 32 t (Ecoinvent v2.2)

Emisiones	Unidad	Cantidad
Etano	2.29E-06	kg
Dióxido de carbono	8.15E-01	kg
Dióxido de sulfuro	2.57E-05	kg
Cadmio	3.11E-09	kg
Cobre	2.08E-06	kg
Cromo	3.58E-08	kg
Níquel	3.43E-08	kg
Zinc	8.65E-07	kg
Plomo	1.05E-07	kg
Selenio	2.57E-09	kg
Mercurio	5.14E-12	kg
Cromo VI	2.57E-11	kg
Monóxido de carbono	6.96E-05	kg
Óxidos de nitrógeno	2.81E-03	kg
Partículas <2.5 µm	6.13E-05	kg
Partículas >10 µm	5.66E-05	kg
Partículas >2.5 µm y <10 µm	6.23E-05	kg
Compuestos orgánicos volátiles, distintos del metano	4.09E-07	kg
Metano	4.58E-06	kg
Benceno	2.86E-13	kg
Tolueno	4.09E-14	kg
Xileno	3.60E-12	kg
Formaldehído	3.44E-11	kg
Acetaldehído	1.87E-11	kg
Amoniaco	5.00E-06	kg
Monóxido de di nitrógeno	3.00E-05	kg
PAH (hidrocarburos poli cíclicos aromáticos)	1.00E-09	kg
Calor residual	1.17E+01	MJ

Tabla 3.13 Emisiones al aire por km recorrido en camión de 16 t-32 t (Ecoinvent v2.2)

Emisiones	Unidad	Cantidad
Etano	2.29E-06	kg
Dióxido de carbono	6.62E-01	kg
Dióxido de sulfuro	2.09E-05	kg
Cadmio	2.63E-09	kg
Cobre	2.00E-06	kg
Cromo	3.33E-08	kg
Níquel	3.09E-08	kg
Zinc	8.16E-07	kg
Plomo	1.05E-07	kg
Selenio	2.08E-09	kg
Mercurio	4.18E-12	kg
Cromo VI	2.08E-11	kg
Monóxido de carbono	5.76E-05	kg
Óxidos de nitrógeno	2.21E-03	kg
Partículas <2.5 µm	5.85E-05	kg
Partículas >10 µm	5.66E-05	kg
Partículas >2.5 µm y <10 µm	6.23E-05	kg
Compuestos orgánicos volátiles, distintos del metano	3.71E-06	kg
Metano	5.02E-06	kg
Benceno	2.60E-12	kg
Tolueno	3.71E-13	kg
Xileno	3.26E-11	kg
Formaldehído	3.12E-10	kg
Acetaldehído	1.69E-10	kg
Amoníaco	5.00E-06	kg
Monóxido de di nitrógeno	2.99E-05	kg
PAH (hidrocarburos poli cíclicos aromáticos)	1.00E-09	kg
Calor residual	9.48E+00	MJ

❖ Evaluación de impacto de ciclo de vida

➤ *Selección de las categorías de impacto*

Las categorías de impacto escogidas para evaluar están explicadas y justificadas en el apartado 3.2.

➤ *Software empleado y método de evaluación de impactos*

Para obtener los resultados de caracterización de las diferentes categorías de impacto seleccionadas y de este modo evaluar los impactos medioambientales de las diferentes alternativas elegidas se emplea el software llamado Sima Pro 7.3.3, versión PhD (doctorado) especialmente diseñado para proyectos de investigación.

SimaPro es una herramienta profesional para el cálculo de los impactos ambientales, sociales y económicos, asociados a un producto o servicio a lo largo de todo su ciclo de vida. Es el software de análisis del ciclo de vida de referencia en todo el mundo. Posee una base de datos de materiales y procesos muy completa que incluye bases de datos científicas de reconocido prestigio internacional entre las que destacan Ecoinvent y la European Life Ciclo Database (ELCD). El programa contiene también las principales metodologías de evaluación de impacto (CML 2001 baseline, Ecoindicator 99, Recipe, IMPACT 2002 +, IPCC 2007, GWP 100a).

El resultado del inventario de datos obtenido con SimaPro, es una larga lista de emisiones y consumos de recursos. Para interpretar esta lista, existen varios métodos implementados en este software. El método que más se adapta a todas las categorías de impacto escogidas en esta tesis es el método IMPACT 2002+, con él se pueden evaluar todas las categorías de impacto elegidas sin necesidad de emplear otro método de evaluación. La justificación de la elección de este método se encuentra en el apartado 3.2.

3.3.4.2 Criterio económico

El criterio económico para todos los materiales fue evaluado teniendo en cuenta el coste de ejecución de los diferentes productos obtenidos. Esta metodología empleada para el cálculo del coste económico está basada en el estudio económico de materiales de construcción efectuado por Tošić *et al.* (2015). Se trata de encontrar un coste aproximado que sirva de referencia para cada una de las alternativas de producción de un material y que, a su vez, permita la comparación entre ellas.

De este modo, para el caso del coste de ejecución de los productos pétreos de construcción se tomó como base el coste obtenido de las empresas, organismos y plantas de reciclaje consultadas. La obtención de los datos corresponde a diferentes años y a diferentes empresas o plantas de similar capacidad de producción.

Estos datos se completaron con los de la base de datos BEDEC del ITEC (Instituto de Tecnología de la Construcción en Cataluña), los cuales corresponden también al coste de ejecución del material, el cual incluye los costes directos y los costes indirectos. El coste de ejecución, obtenido de la base de datos BEDEC del ITEC, tiene como ámbito el territorio español y corresponde al año 2015.

En el caso de un mismo producto en el que se emplean diferentes materias primas —como es el caso del cemento— se calculó por separado el coste de las materias primas que varían de un producto a otro y, posteriormente, éste se incluyó dentro del coste del resto de procesos que permanecen similares en los sistemas de producción. Se tuvo en cuenta, además del coste de cada materia prima, los diferentes costes de transporte de las mismas desde el sitio de obtención hasta la planta de producción.

4 Aplicación de la propuesta metodológica al material yeso

En este capítulo, al igual que en los capítulos 5, 6 y 7 se aplican el resto de fases (4, 5, 6 y 7) a los materiales estudiados. A continuación, se detallan las fases de la propuesta metodológica aplicada al material yeso.

4.1 Fase 4: Evaluación ambiental y económica

En esta se efectúa la evaluación ambiental y económica de las diferentes alternativas de producción del yeso en España —teniendo en cuenta la producción primaria y producción secundaria o reciclaje— para posteriormente hacer una comparación entre las diferentes posibilidades. Incluye el análisis y la discusión de los resultados obtenidos. La forma de evaluar cada uno de estos criterios se describen a continuación.

4.1.1 Criterio ambiental. Metodología de análisis de ciclo de vida

4.1.1.1 Definición de objetivos y alcance

❖ Objetivo

El objetivo de este análisis de ciclo de vida consiste en conocer los impactos medioambientales del proceso de producción primaria y secundaria del yeso; es decir, los impactos en todo el ciclo de vida del proceso de obtención del yeso en polvo a partir del yeso extraído en cantera y el proceso de obtención del yeso en polvo a partir de material reciclado proveniente de residuos de construcción y demolición. Ambos tipos de yeso son sometidos a un proceso de cocción hasta obtener sulfato de calcio hemi-hidrato ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$).

❖ Alcance

Para llevar a cabo la evaluación de los impactos, se escoge como ámbito de estudio España (Cataluña). El alcance para cada uno de los procesos de obtención del yeso se explica a continuación.

➤ *Producción primaria del yeso*

En este caso se trata de la producción de yeso en polvo calcinado a partir del mineral de la mina. Para la obtención del yeso natural, se parte del hecho de que la mina de extracción se sitúa cerca de la planta de obtención del árido; es por ello, por lo que se considera sólo el transporte interno.

Para la obtención del yeso en polvo a partir del yeso extraído en cantera —66 % yeso o sulfato cálcico dihidrato ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) y 34 % anhidrita o sulfato cálcico en forma de anhidro (CaSO_4)— se siguen las siguientes etapas:

- Extracción de la materia prima. El mineral es extraído mediante voladura. Este explosivo compuesto de amonio y nitrato de metilamonio presenta varias ventajas con respecto a otro tipo de explosivos debido a una más baja toxicidad, así como a la seguridad en el transporte y almacenamiento.
- Trituración del material. Posteriormente el yeso es triturado hasta obtener unas dimensiones máximas que permitan su deshidratación en el horno (20 mm).
- Secado del yeso (cocción). La cocción del yeso natural se realiza en el horno. En este caso el yeso se hace pasar por un proceso de calcinación, por lo que resulta un sulfato de calcio hemihidrato ($\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2} \text{H}_2\text{O}$).

Dentro del sistema de estudio se tiene en cuenta la maquinaria y la infraestructura de la mina de extracción. Se incluye también el proceso de restauración de la zona afectada (transformación del sitio de extracción de la mina).

En la Figura 4-1 se muestra un esquema de las etapas seguidas en la producción primaria del yeso.

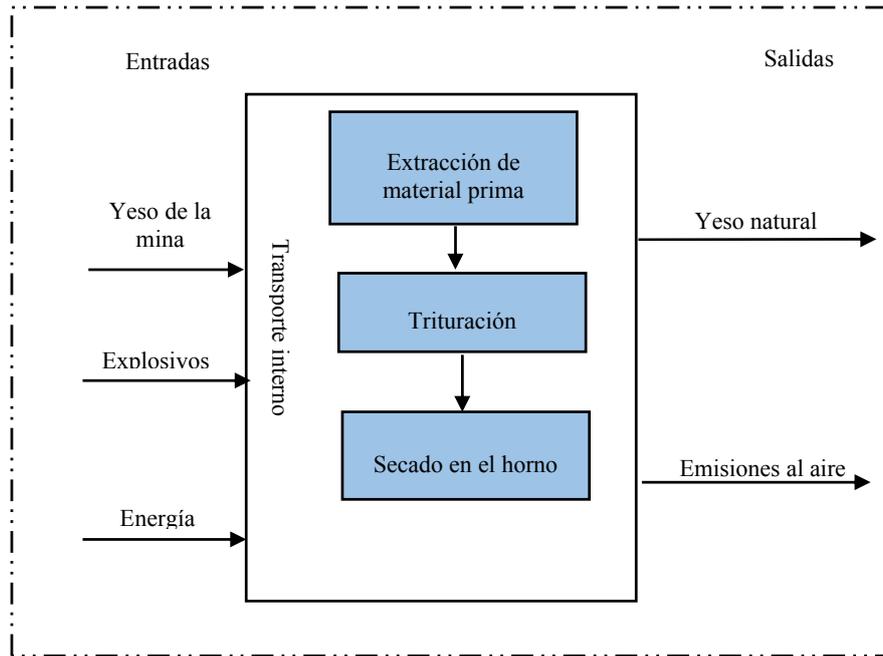


Figura 4-1 Límites del sistema en la producción primaria del yeso

➤ **Producción secundaria del yeso**

Se trata de la obtención de yeso en polvo calcinado a partir de residuos RCD. Para el caso de la obtención del yeso reciclado, se considera que los residuos de yeso se originan en el centro de la ciudad de Barcelona (apartado 3.3.1.2).

Teniendo en cuenta el sistema de gestión de los RCD en España, se considera que los residuos de yeso —tanto las placas de yeso, como los moldes de yeso— se separan selectivamente del resto de RCD en la misma obra, para luego ser transportados de manera conjunta hasta la planta de tratamiento. En dicha planta se lleva a cabo la trituración de los residuos y posteriormente la separación de los residuos de yeso y de papel provenientes de la placa de yeso laminado. En el proceso de obtención del yeso reciclado se incluye el transporte de los residuos desde el sitio de generación, hasta la planta de reciclaje, el cual corresponde al proceso de extracción en el caso de los áridos. También se incluye el transporte interno.

En el caso del reciclaje o producción secundaria del yeso, se omite el proceso de obtención de la materia prima, pues ya se dispone del residuo. Tampoco se tiene en cuenta la restauración necesaria en la explotación de yeso natural. Es así como los pasos seguidos en el proceso de obtención del yeso reciclado son:

- Recolección y transporte del residuo.

- Trituración y separación del residuo de yeso.
- Secado de yeso en el horno, hasta obtener sulfato de calcio hemi-hidrato ($\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2} \text{H}_2\text{O}$).

Dentro del sistema de estudio se tiene en cuenta la maquinaria y la infraestructura de la planta de reciclaje. En la Figura 4-2 se muestran las etapas de este proceso.

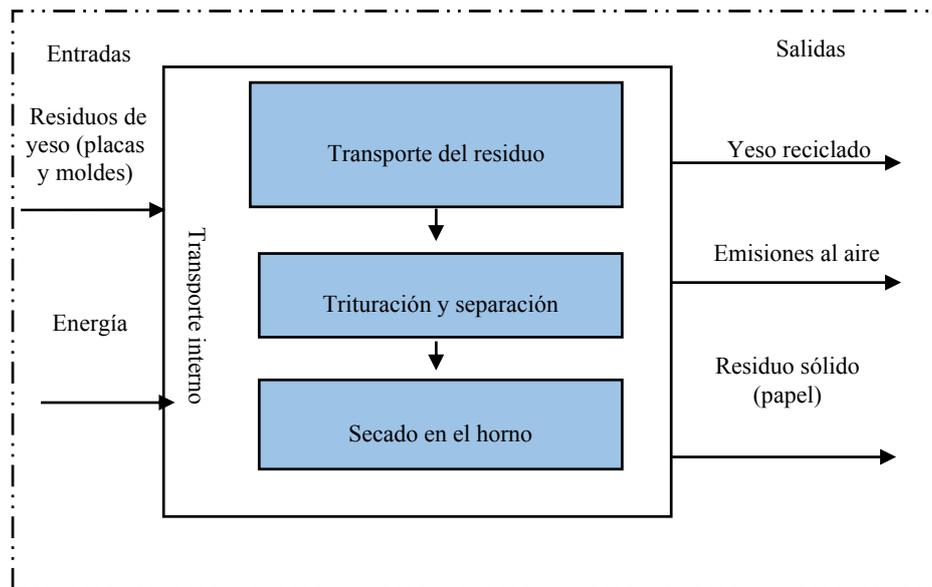


Figura 4-2 Límites del sistema en la producción secundaria del yeso

❖ Unidad funcional

La unidad funcional es definida como 1 kg de yeso.

4.1.1.2 Descripción de las alternativas propuestas

Con el objetivo de comparar los impactos medioambientales del yeso, se escogen las alternativas definidas en el apartado 3.3.2.2. Una primera alternativa se refiere a la producción de yeso a partir de materia prima original, mientras que el resto de alternativas se refieren a la producción de yeso a partir de residuos de yeso proveniente de construcción y demolición. En estas alternativas se evalúan diferentes distancias de transporte desde el punto de generación del residuo hasta la planta de reciclaje. Como se mencionó anteriormente, en el caso del yeso natural este transporte no existe, ya que normalmente las canteras se sitúan cerca al sitio de producción, de manera que el único transporte existente corresponde al transporte interno dentro de la mina de extracción.

A continuación se enumeran las alternativas de producción del yeso:

A1 = Producción primaria del yeso (YN).

A2 = Producción secundaria del yeso (7 km), disposición del papel (YR-7 km-dp).

A3 = Producción secundaria del yeso (7 km), reciclaje del papel (YR-7 km-rp).

A4 = Producción secundaria del yeso (50 km), disposición del papel (YR-50 km-dp).

A5 = Producción secundaria del yeso (50 km), reciclaje del papel (YR-50 km-rp).

4.1.1.3 *Análisis del inventario*

Los datos obtenidos de fuentes primarias fueron completados y/o confrontados con la base de datos Ecoinvent v2.2 y con fuentes secundarias con el fin de crear nuevos procesos de producción y reciclaje adaptados al contexto español. La información sobre las consideraciones tenidas en cuenta en el cálculo de los procesos han sido tomadas, fundamentalmente, del manual de Ecoinvent v2.2 y del manual de Sima Pro 7.3.3 (apartado 3.3.4.1).

De todas las 45 empresas y organismos consultados en forma directa —bien sea a través de entrevista telefónica, correo electrónico, o visita a las mismas— para llevar a cabo el estudio de todos los materiales escogidos se obtuvo información general y útil para todos los materiales evaluados. Sin embargo, fue necesario, también, obtener información específica para cada uno.

En el caso del yeso se consultaron 10 empresas y organismos en forma directa y la información restante se completó con información secundaria extraída de la declaración medioambiental de otras empresas españolas o de las bases de datos existentes, como es el caso de la base de datos BEDEC del ITEC.

La información obtenida se refiere a datos generales sobre el sistema de producción; a la capacidad de producción de la planta; al tipo de maquinaria y combustible empleado; al consumo energético en todo el proceso de obtención del yeso (diésel, electricidad, gas natural); a la cantidad y al tipo de explosivo empleado en la extracción del yeso en cantera; y a las distancias y tipo de transporte.

A continuación, se explica en detalle el inventario de entradas y salidas para cada uno de los procesos de obtención del yeso.

❖ Yeso natural (YN)

En el caso de la producción de yeso natural, se emplea como base el proceso existente en la base de datos Ecoinvent v2.2 llamado “*Gypsum, mineral, at mine/CH U*” y se crea un nuevo proceso (obtención de yeso natural), en el que se incluyen las siguientes entradas:

- Consumo de materias primas, que corresponde al yeso natural proveniente de la cantera.
- La infraestructura de la mina, la cual incluye: oficinas, talleres y zona pavimentada. Se considera una infraestructura de mediana capacidad con un rendimiento anual de aproximadamente 400000 t. Se basa en la infraestructura de una mina de extracción de áridos que se encuentra inventariada en Ecoinvent v2.2.
- Extracción de la materia prima mediante explosivo (Tovex). La materia prima en este caso está conformada por un 65 % de yeso, un 34 % de anhidrita y un 1 % de otros componentes minoritarios.
- Maquinaria para trituración y cinta transportadora. Los datos de fabricación de la maquinaria y cinta transportadora fueron tomados de la base de datos Ecoinvent v2.2.

El proceso de maquinaria incluye la obtención de los materiales hasta la planta de fabricación. La maquinaria empleada en este proceso está basada en una trituradora de roca. No se considera la disposición de los residuos, ya que se asume que el material es reciclado.

El proceso de cinta transportadora incluye la obtención de los materiales y su transporte hasta el sitio de fabricación. Se tiene en cuenta, en este caso, sólo la disposición del hormigón empleado en la base. Los metales no se disponen, ya que se considera que son reciclados.

- El consumo de combustible empleado en los procesos de extracción y trituración del yeso en la mina, se extrajeron de la información suministrada por el Ministerio de Industria, Energía y Turismo (2013). Este consumo de combustible (diésel, electricidad y fuelóleo) incluye las emisiones al aire tomadas de la base de datos Ecoinvent v2.2.
- Proceso de cocción en el horno. Esta etapa fue añadida al proceso de producción de árido natural de la base de datos Ecoinvent v2.2. Para la cocción del yeso, el dato se extrajo de empresas consultadas y se hizo un promedio de los datos comprendidos entre los años 2009 y 2012: 282 kWh/t igual a 1.015 MJ/kg. La capacidad de producción de dichas empresas se encuentra cercana a las 400000 t/año, similar a la capacidad de la mina inventariada en Ecoinvent v2.2. El proceso de cocción en el horno con gas natural incluye las emisiones al aire inventariadas en la base de datos Ecoinvent v2.2.
- Restauración (transformación del sitio de extracción). El consumo de diésel de dicho proceso fue tomado también de la base de datos Ecoinvent v2.2 (7.44 MJ/m²).

Los datos tomados de Ecoinvent v2.2 se adaptan al contexto español a través de la modificación del mix eléctrico.

Las entradas del proceso de obtención del yeso natural se muestran en la Tabla 4.1. En esta se expone claramente la correspondencia entre los procesos empleados en el estudio y los de la base de datos.

Tabla 4.1 Entradas del proceso de obtención de 1kg de yeso natural

Entradas				
Proceso básico	Nombre del proceso en Ecoinvent v2.2	Unidad	Cantidad	Fuente
Yeso	Gypsum, in ground	kg	1.01E+00	Ecoinvent v2.2
Extracción con explosivos	Blasting/RER U	kg	7.81E-05	Ministerio de Industria, Energía y Turismo (2013)
Cinta transportadora	Conveyor belt, at plant/RER/I U	m	1.06E-08	Ecoinvent v2.2
Diésel empleado en maquinaria	Diesel, burned in building machine/GLO U	MJ	2.11E-02	Ministerio de Industria, Energía y Turismo (2013)
Electricidad	Electricity, medium voltage, at grid/ ES U	kWh	1.02E-03	Ministerio de Industria, Energía y Turismo (2013)
Gas natural empleado en horno	Natural gas, burned in industrial furnace >100kW/RER U	MJ	1.02E+00	Promedio de empresas consultadas años (2009-2013)
Infraestructura de la mina	Mine, gravel/sand/CH/I U	P	5.00E-11	Ecoinvent v2.2
Restauración de la mina	Recultivation, limestone mine/CH U	m ²	1.87E-05	Ecoinvent v2.2
Gas natural empleado en caldera	Natural gas, burned in boiler modulating >100kW/RER U	MJ	4.50E-02	Ecoinvent v2.2
Fuelóleo en caldera	Light fuel oil, burned in boiler 10kW, non-modulating/CH U	MJ	2.46E-03	Ministerio de Industria, Energía y Turismo (2013)
Maquinaria	Industrial machine, heavy, unspecified, at plant/RER/I U	kg	4.68E-06	Ecoinvent v2.2

En el proceso de obtención del yeso natural se tienen en cuenta las siguientes salidas:

- Emisiones al aire debido al uso de explosivo en la extracción del yeso. Se incluyen las emisiones debidas al uso de 7.81E-05 kg de explosivo para la obtención de 1 kg de yeso natural (Tabla 4.2).
- Emisiones al aire debido al proceso de trituración de 1 kg de yeso natural (Tabla 4.2).

Tabla 4.2 Emisiones al aire en el proceso de obtención de 1 kg de yeso natural (Ecoinvent v2.2)

Salidas			
Proceso básico	Nombre del proceso en Ecoinvent v2.2	Unidad	Cantidad
Calor	Heat, waste	MJ	3.34E-03
Emisión de partículas < 2.5 µm	Particulates, < 2.5 µm	kg	8.13E-05
Emisión de partículas > 10 µm	Particulates, > 10 µm	kg	1.13E-03
Emisión de partículas > 2.5 µm y < 10µm	Particulates, > 2.5 µm, and < 10 µm	kg	4.04E-04
Aluminio	Aluminium	kg	1.18E-05
Amoniaco	Ammonia	kg	4.61E-06
Monóxido de carbono	Carbon monoxide, fossil	kg	6.016E-06
Óxido de nitrógeno	Nitrogen oxides	kg	2.586E-05
Agua	Water	kg	1.813E-05
COV	NMVOC, non-methane volatile organic compounds	kg	4.688E-06

❖ **Yeso reciclado [YR (7 km) dp]**

Para llevar a cabo el estudio del reciclaje del yeso se localiza también como sitio de generación de residuos el centro de la ciudad de Barcelona (apartado 3.3.1.2). La información suministrada por las empresas y organismos consultados acerca del proceso de reciclaje se anexó a la base de datos Ecoinvent v2.2, con el fin de crear un nuevo proceso llamado “reciclaje del yeso”. Este nuevo proceso incluye las siguientes entradas:

- Residuo de yeso. Corresponde a moldes de yeso y placas de yeso laminado. Del peso total de los residuos de yeso recolectados, un 5 % corresponde a papel proveniente de la placa de yeso laminado. Se emplea este porcentaje, ya que es la cantidad máxima de papel que se genera cuando todo el residuo de yeso corresponde a placa de yeso (LIFE GYPSUM, 2011). Por ello, en la obtención de 1 kg de yeso reciclado es necesario 1.05 kg de residuos de yeso.
- Transporte. Los residuos de yeso, tanto los moldes de yeso como las placas de yeso laminado, se transportan hasta la planta de reciclaje donde son triturados, y posteriormente separados del papel. Para evaluar el transporte se toma como base el proceso inventariado en Ecoinvent v2.2 llamado: “*Transport, lorry>32 t EURO 5/RER U*”, el cual se emplea normalmente para obras de construcción. Como la distancia promedio a la que se encuentran las plantas de reciclaje de residuos más cercanas es de 7 km (apartado 3.3.1.2), los 1.05 kilogramos de material se transporta en 7 km. De este modo, el valor de 0.007 tkm se adiciona a la base de datos Ecoinvent v2.2.

- Infraestructura de la planta de reciclaje. Se toman como referencia los datos de la infraestructura de la planta de clasificación de residuos de construcción que se encuentra inventariada en Ecoinvent v2.2, cuya capacidad de producción es de 200000 t/año. Como la capacidad de producción es la mitad de la empleada en la producción de yeso natural, se utilizan los datos referentes a dos plantas de clasificación de residuos, con el fin de lograr una producción anual de 400000 t, equivalente a la producción de yeso natural (5E-11 p).

La infraestructura de la planta de reciclaje empleada incluye el reemplazo de las piezas durante su operación (en el caso del yeso natural estas piezas no se incluyen dentro de la planta de reciclaje, apareciendo como entradas o procesos independientes), el transporte, la disposición de la infraestructura, y el uso del suelo.

También se tiene en cuenta la demanda de fuelóleo de las oficinas. En el yeso reciclado esta entrada se considera dentro de la infraestructura de la planta de reciclaje. Para el caso del yeso natural se encuentra como un proceso aparte, fuera de la infraestructura de la mina. El tiempo de operación considerado para la infraestructura es de 50 años y la tecnología empleada es una trituradora de cono.

- Coste energético por trituración. Se considera aquí el consumo de diésel en la planta de reciclaje, el cual corresponde a trituración y separación del yeso y del papel. Éste fue obtenido del consumo energético de plantas de reciclaje residuos de yeso con una eficiencia de operación entre 65 %- 80 %. El consumo de diésel corresponde a $3.60E-02$ MJ/kg (GRI, 2015).
- Cocción en el horno. El coste energético de cocción en el horno con gas natural se extrajo del estudio de Guillén (2005), quien destaca en su investigación que el secado de 1 tonelada de yeso con un 10 % de humedad asciende a $1.30E+05$ kcal, equivalentes a 151 kWh/t= $5.44E-01$ MJ/kg. Se incluyen los datos de la infraestructura del horno que aparecen en Ecoinvent v2.2.

En la Tabla 4.3, aparecen las entradas al proceso reciclaje del yeso creado en Ecoinvent v2.2.

En el proceso de reciclaje del yeso se incluyen las siguientes salidas:

- Emisiones al aire. En este caso las emisiones de partículas al aire son debidas al proceso de trituración del yeso (Tabla 4.4). Las emisiones al aire correspondientes al proceso de transporte se encuentran ya incluidas dentro del proceso de transporte inventariado en Ecoinvent v2.2 (Tabla 3.12).
- Residuos de papel proveniente de la placa de yeso laminado, corresponden a 0.05 kg de papel por kg de yeso reciclado (Tabla 4.4).

Tabla 4.3 Entradas de la producción secundaria [YR (7 km dp)] (1 kg de yeso reciclado)

Entradas				
Proceso básico	Nombre del proceso en Ecoinvent v2.2	Unidad	Cantidad	Fuente
Residuo de yeso	Residuo	kg	1.05E+00	Ecoinvent v2.2
Transporte	Transport, lorry >32 t, EURO 5/RER U	tkm	7.00E-03	ARC (2015b); Plantas de reciclaje visitadas (2014)
Infraestructura de la planta de reciclaje	Sorting plant for construction waste/CH/I U	p	5E-11	Cálculo hecho en base al manual de Ecoinvent v2.2
Diésel consumido en proceso reciclaje	Diesel, burned in building machine/GLO U	MJ	3.60E-02	GRI (2015)
Gas natural usado en el horno	Natural gas, burned in industrial furnace >100kW/RER U	MJ	5.44E-01	Guillén (2005)

Tabla 4.4 Salidas del proceso de reciclaje del yeso [YR (7 km dp)] (1 kg de yeso reciclado) (Ecoinvent v2.2)

Proceso básico	Nombre del proceso en Ecoinvent v2.2	Unidad	Cantidad	Fuente
Calor	Heat, waste	MJ	3.34E-03	Ecoinvent v2.2
Emisión de partículas < 2.5 µm	Particulates, < 2.5 µm	kg	8.08E-05	Ecoinvent v2.2
Emisión de partículas > 10 µm	Particulates, > 10 µm	kg	1.13E-03	Ecoinvent v2.2
Emisión de partículas > 2.5 µm y < 10 µm	Particulates, > 2.5 µm, and < 10 µm	kg	4.04E-04	Ecoinvent v2.2
Residuo de papel	Disposal, paper 11,2 % water to sanitary landfill/CH U	kg	5.00E-02	Ecoinvent v2.2

Los residuos de papel provenientes de la placa de yeso laminado se gestionan llevándolos al vertedero controlado de residuos municipales. Para ello, se toma como base el proceso existente en la base de datos Ecoinvent “*Disposal, paper 11.2 % water to sanitary landfill*”, y se adapta al contexto español. Se tiene en cuenta el transporte del residuo de papel desde la planta de reciclaje, hasta el vertedero ubicado a 21 km. Esta distancia se consideró de acuerdo con el número de instalaciones de este tipo ubicadas en Cataluña (23 vertedero municipales) según el Servidor de mapas de la ARC (2015b) (Anexo L y Anexo T). El tipo de transporte escogido es un camión de 16 t-32 t EURO 5, inventariado en la base de datos Ecoinvent v2.2. Este proceso de disposición del papel en vertedero considera las emisiones de lixiviado a corto plazo (0-100 años).

❖ Yeso reciclado [YR (7 km) rp]

La alternativa [YR (7 km) rp] es similar a la alternativa [YR (7 km) dp], de modo que solo varía el sistema de gestión aplicado a los residuos de papel provenientes de la placa de yeso laminado. En este caso, los residuos de papel, en vez de ser dispuestos en vertedero, son reciclados y por lo tanto se tienen en cuenta las cargas evitadas por la no producción de papel a partir de materia prima original. De este modo, las entradas son las mismas que en la alternativa [YR (7 km) rp] y las salidas se muestran en la Tabla 4.5.

Tabla 4.5 Salidas de la producción secundaria del yeso [YR (7 km) rp]

Proceso básico	Nombre del proceso en Ecoinvent v2.2	Unidad	Cantidad	Fuente
Calor	Heat, waste	MJ	3.34E-03	Ecoinvent v2.2
Emisión de partículas < 2.5 µm	Particulates, < 2.5 µm	kg	8.08E-05	Ecoinvent v2.2
Emisión de partículas > 10 µm	Particulates, > 10 µm	kg	1.13E-03	Ecoinvent v2.2
Emisión de partículas > 2.5 µm y < 10µm	Particulates, > 2.5 µm, and < 10µm	kg	4.04E-04	Ecoinvent v2.2
Residuo de papel	Recycling paper/RER U	kg	5.00E-02	Ecoinvent v2.2

El proceso de reciclaje de papel fue creado a partir del proceso existente en la base de datos de Ecoinvent v2.2 llamado “*Waste paper, sorted for further treatment/RER U*”. Este proceso se adaptó al contexto español y se empleó para el transporte un camión de 3.5 t EURO 5, tomando como distancia promedio 3 km entre la planta de reciclaje de yeso y la planta de reciclaje de papel de acuerdo con el Servidor de mapas de la ARC (2015b) (Anexo S). Como producto evitado se usó 1 kg de producción primaria de papel “*Paper, wood containing LWC, at plant/RER U*”. Se escogió este proceso debido a que el papel proveniente de las placas de yeso laminado es un papel de celulosa especial multicapas, de bajo peso, hecho a base de madera y con características similares al proceso existente en Ecoinvent v2.2.

❖ Yeso reciclado [YR (50 km) dp]

En este caso se considera que los residuos de yeso no serán transportados a distancias mayores de 50 km hasta la planta de reciclaje, debido al número de plantas de este tipo localizadas en todo el territorio catalán, así como al elevado coste económico derivado del transporte de estos residuos a largas distancias (apartado 3.3.1.2).

El resto de procesos son similares a la alternativa [YR (7 km) dp] (Tabla 4.4).

❖ **Yeso reciclado (A5) [YR (50 km) rp]**

Esta alternativa es similar a la alternativa [YR (50 km) dp] por el hecho de que la distancia recorrida desde el punto de generación de residuo hasta la planta de reciclaje es de 50 km; sin embargo, cambia el sistema de gestión aplicado a los residuos de papel. En esta alternativa, el papel proveniente de la placa de yeso laminado es sometido a un proceso de reciclaje igual que en la alternativa [YR (7 km) rp]. Las emisiones al aire referentes al proceso de trituración del yeso y la cantidad de residuo de papel coinciden con la alternativa [YR (7 km) rp] (Tabla 4.5).

4.1.1.4 Evaluación del impacto del ciclo de vida

❖ **Resultados caracterizados y discusión de la evaluación del impacto del ciclo de vida**

A continuación, se presentan y se discuten los impactos potenciales resultantes para cada una de las alternativas de producción de yeso y las contribuciones porcentuales de los procesos que conforman cada sistema de producción.

➤ **Yeso natural (YN)**

En la Figura 4-3, se observan los resultados de caracterización del proceso de obtención de un 1 kg de yeso natural.

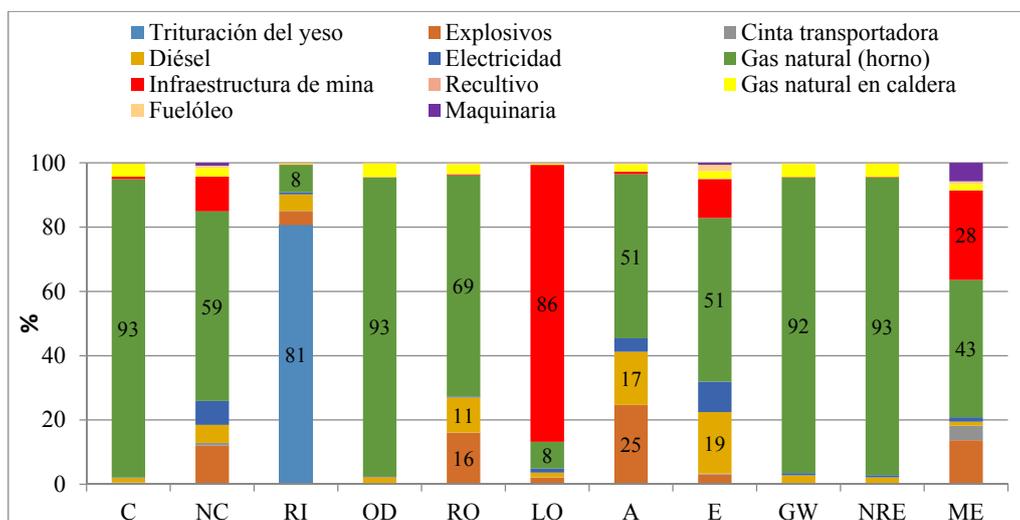


Figura 4-3 Resultados de caracterización del proceso de obtención del yeso natural

Si para cada valor de impacto se representan los valores en una escala relativa de 0 % a 100 %, se obtienen los datos que se muestran en la Figura 4-3 —en la que se observa que en todas las categorías de impacto evaluadas, a excepción de efectos respiratorios inorgánicos y ocupación del territorio— el proceso que presenta mayor impacto ambiental es el proceso de cocción en el horno con gas natural.

Los mayores impactos se presentan en las categorías siguientes: disminución de la capa de ozono, efectos carcinogénicos y energía no renovable, con un 93 %, así como y en la categoría potencial de calentamiento global, con un 92 %. Esto se explica, principalmente, por el uso de gas natural, ya que, además de consumir un recurso energético, se generan emisiones que disminuyen la capa de ozono y emisiones de gases de efecto invernadero. El uso del gas natural en el horno emite sustancias carcinogénicas como hidrocarburos poli aromáticos, benceno y formaldehído. Estos resultados concuerdan con lo investigado y expuesto por Dylewski y Adamczyk (2014) y Giama y Papadopoulos (2015).

También en la Figura 4-3 se observa que el uso de gas natural genera los mayores impactos en la categoría energía no renovable. Así mismo, la trituración del yeso genera impactos en las categorías efectos respiratorios (81 %). Estos impactos, según Garraín *et al.* (2009), pueden atribuirse principalmente, a la emisión de partículas.

Otro de los procesos que genera impactos considerables en las categorías estudiadas es el empleo de explosivos, principalmente en la categoría acidificación (25 %), debido a las emisiones de óxido de nitrógeno generadas. También el uso de explosivos presenta impactos en la categoría efectos respiratorios orgánicos (16 %), extracción de minerales (14 %) y efectos no carcinogénicos (12 %). Los impactos en la categoría efectos respiratorios orgánicos se atribuyen, según Garraín *et al.* (2009), a la emisión de óxidos de nitrógeno y compuestos orgánicos volátiles durante el uso de explosivos; y los efectos en la salud humana, se deben a la emisión de partículas.

El uso de combustible diésel presenta impactos en todas las categorías evaluadas, principalmente en las categorías eutrofización (19 %) y acidificación (17 %), debido a las emisiones de óxido de azufre y óxido de nitrógeno derivadas de su uso. Los mayores impactos por la infraestructura (parte construida de la mina y los lugares de producción) se presentan en la categoría uso del suelo (86 %), por la ocupación del territorio.

Por último, en la Figura 4-3 se aprecia que el proceso de electricidad —el cual incluye la generación de electricidad en España y la electricidad importada, así como la red de transmisión— genera impactos en las categorías evaluadas, principalmente en la categoría eutrofización (9 %), efectos no carcinogénicos (7 %) y acidificación (4 %). El impacto en estas categorías, según Juárez *et al.* (2008) y Roy *et al.* (2014), se debe a las emisiones derivadas por la electricidad (óxido de nitrógeno [NO_x] y dióxido de

azufre [SO₂]). Estas mismas emisiones presentan efectos no carcinogénicos en la salud humana. Estos resultados concuerdan con lo reportado por Dylewski y Adamczyk (2014) y Melià *et al.* (2014).

➤ **Yeso reciclado [YR (7 km) dp]**

En la Figura 4-4, se pueden observar los resultados caracterizados del proceso de obtención del yeso reciclado cuando los residuos son separados selectivamente en la obra de construcción y llegan limpios del resto de RCD a la planta de reciclaje.

Los residuos de yeso, una vez separados del resto de RCD, se transportan hasta la planta de tratamiento. Posteriormente, estos residuos de yeso se someten a un proceso de trituración y separación del yeso y del papel en la planta de reciclaje. El yeso es reciclado en la planta de reciclaje de RCD y el papel se transporta a un vertedero de residuos municipales.

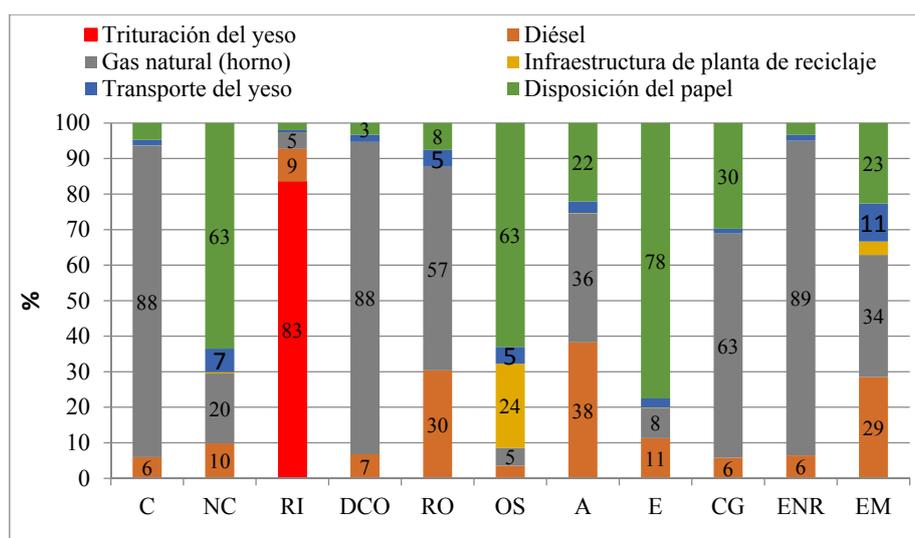


Figura 4-4 Resultados de caracterización del proceso de obtención del yeso reciclado [YR (7 km) dp]

Como se observa en la Figura 4-4, los más grandes impactos en la mayoría de categorías evaluadas se deben al proceso de cocción en el horno con gas natural. Los mayores impactos debido a este proceso se presentan en las categorías: energía no renovable (89 %), efectos carcinogénicos (88 %), disminución de la capa de ozono (88 %) y calentamiento global (63 %). Estos impactos son ocasionados por el consumo de un recurso energético, por las emisiones de gases de efecto invernadero y por las emisiones que disminuyen la capa de ozono derivadas de la cocción en el horno con gas natural (Garraín *et al.*, 2009; Güereca, 2006). Los efectos carcinogénicos en la salud humana son debidos a la emisión de hidrocarburos poli-aromáticos, benceno y formaldehído durante el proceso de cocción con gas natural.

Los resultados de estos impactos coinciden con los trabajos de Dylewski y Adameczyk (2014) y Melià *et al.* (2014).

Por otra parte, el proceso de trituración del yeso reciclado presenta los mayores impactos en la categoría efectos respiratorios inorgánicos (84 %), debido a la emisión de material particulado durante la trituración. Así mismo, el proceso de disposición del papel proveniente de la placa de yeso laminado genera los mayores impactos en la categoría eutrofización (78 %); esto puede deberse, según Güereca (2006), a que los compuestos de nitrógeno del vertedero se disuelven en el lixiviado. La disposición del papel en vertedero contribuye, además, a impactos en la categoría efectos no carcinogénicos en la salud humana (63 %) por la emisión de sustancias como el molibdeno y mercurio, así como a efectos ambientales en la categoría ocupación del suelo (63 %) y calentamiento global (30 %). Los impactos en la categoría calentamiento global —por la disposición del papel— coinciden con los resultados encontrados por Ortiz *et al.* (2010a).

El consumo de combustible diésel en maquinaria genera los mayores impactos en las categorías acidificación (38 %), efectos respiratorios orgánicos (30 %), extracción de mineral (29 %) y eutrofización (11 %). Esto se debe a que el uso de este combustible genera emisiones de óxido de nitrógeno y óxido de azufre que contribuyen al aumento de la acidificación y eutrofización y genera, además, emisiones de partículas (<2.5 µm, 2.5-10 µm y > 2.5-10 µm) que causan efectos en la salud humana (Ferrís y Tortajada *et al.*, 2003 ; Juárez *et al.*, 2008; Garraín *et al.*, 2009). Los efectos respiratorios orgánicos ocurren debido a las reacciones fotoquímicas entre los óxidos de nitrógeno y los compuestos orgánicos volátiles (COV) generados por el uso de combustible diésel.

El más grande impacto en la categoría “energía no renovable” es debido a la quema de gas natural en el horno por el secado del yeso (89 %).

Por último, el proceso de transporte tiene el más grande impacto medioambiental en las categorías extracción de mineral (11 %), efectos no carcinogénicos (7 %), ocupación del suelo y efectos respiratorios orgánicos (5 %). El mayor impacto por la infraestructura de la planta de reciclaje se presenta en la categoría ocupación del territorio (24 %).

➤ **Yeso reciclado [YR (7 km) rp]**

En la alternativa [YR (7 km) rp] el sistema de gestión aplicado a los residuos de papel provenientes de la placa de yeso laminado es el reciclaje.

En la Figura 4-5, se muestran los resultados de caracterización de esta alternativa.

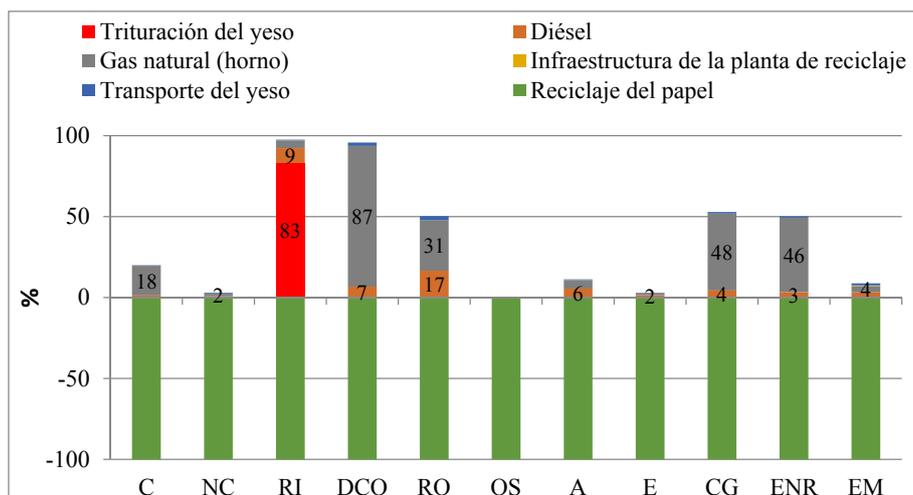


Figura 4-5 Resultados de caracterización del yeso reciclado [YR (7 km) rp]

En la Figura 4-5, se muestra claramente que el proceso de reciclaje de papel presenta ventajas en todas las categorías evaluadas. Estas ventajas se traducen en beneficios medioambientales, al evitar la producción de papel a partir de materia prima original; es decir, se observan los impactos evitados debido al reciclaje.

Así mismo, la categoría efectos respiratorios inorgánicos se ve mayoritariamente afectada por el proceso de trituración del yeso (83 %). También el uso de gas natural en el horno contribuye a la disminución de la capa de ozono (87 %), al calentamiento global (48 %) y al consumo de energía no renovable (46 %). El uso de diésel afecta principalmente a la categoría efectos respiratorios inorgánicos (17 %); esto se debe, según Ferrís y Tortajada *et al.* (2003), a la emisión de material particulado durante la quema de este combustible. Los procesos correspondientes a la infraestructura de la planta de reciclaje y al transporte de los residuos desde el sitio de generación a la planta de reciclaje tienen muy poco impacto medioambiental en las categorías evaluadas. Al sumar los impactos en cada una de las categorías se aprecia que el proceso de reciclaje contribuye a que los impactos totales en cada una de las categorías sean negativos.

➤ **Yeso reciclado [YR (50 km) dp]**

En esta alternativa el sistema de gestión aplicado a los residuos de papel es la disposición en vertedero. Los resultados de caracterización se muestran en la Figura 4-6.

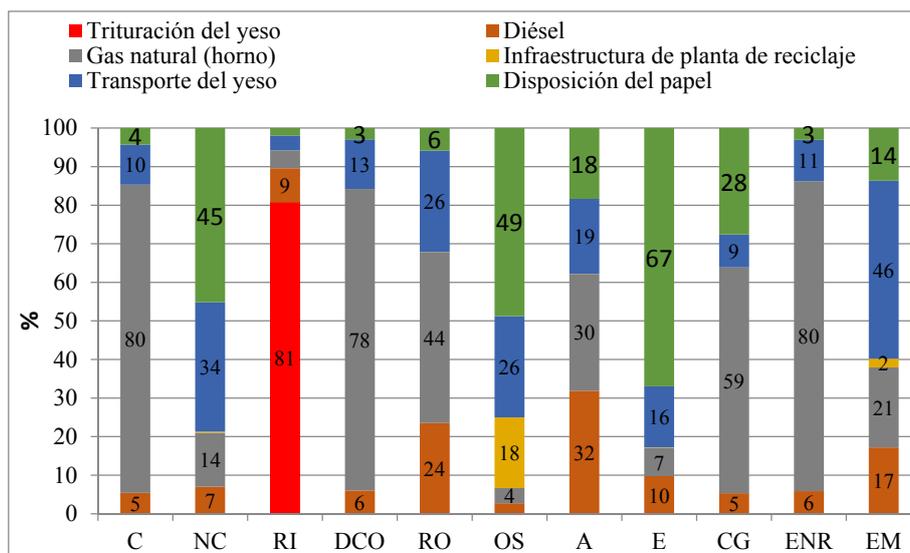


Figura 4-6 Caracterización del yeso reciclado [YR (50 km) dp]

Se observa en la Figura 4-6 que el proceso de trituración del yeso presenta un gran impacto en la categoría efectos respiratorios inorgánicos, debido a la emisión de material particulado (81 %). Otro aspecto a destacar es el impacto debido a la disposición del residuo de papel. Los mayores impactos debido a este proceso se presentan en la categoría eutrofización (67 %), ocupación del suelo (49 %) y efectos no carcinogénicos (45 %). Otro de los procesos que contribuye a los impactos en la mayoría de las categorías evaluadas es el uso de gas natural en el horno, principalmente en la categoría energía no renovable (80 %). El transporte de los residuos afecta en mayor medida a la extracción de mineral (46 %) y a los efectos no carcinogénicos (34 %) por el uso y la quema de combustible en este proceso.

➤ *Yeso reciclado [YR (50 km) rp]*

En esta alternativa, los residuos de papel provenientes del reciclaje del yeso, son llevados a una planta de reciclaje para su valorización. En la Figura 4-7 se pueden observar los resultados de la caracterización.

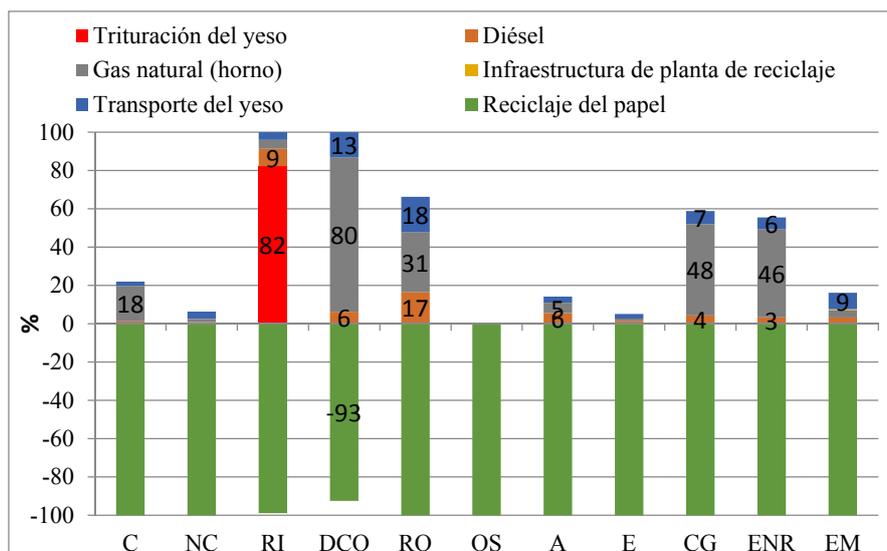


Figura 4-7 Resultados de la caracterización del yeso [YR (50 km) rp]

Tal y como se observa en la Figura 4-7, el proceso de reciclaje del yeso presenta beneficios medioambientales en la mayoría de categorías evaluadas, esto se refleja en los resultados negativos de los impactos totales de la mayoría de las categorías (Tabla 4.6).

Las únicas categorías que presentan impactos positivos, aunque mínimos, son: efectos respiratorios inorgánicos y disminución de la capa de ozono. La razón de esto es, principalmente, la emisión de partículas en el proceso de triturado del yeso y al uso del gas natural durante el secado del yeso en el horno. A su vez, los menores ahorros por el reciclaje del papel se presentan en estas mismas categorías.

Por último, los impactos de los procesos que intervienen en esta alternativa de producción del yeso, son muy mínimos en la categoría ocupación del suelo.

➤ ***Comparación entre alternativas de producción primaria y secundaria***

En la Tabla 4.6 y Figura 4-8, se observan los resultados de caracterización de los impactos evaluados tanto en la producción del yeso natural, como en la producción de yeso reciclado.

Tabla 4.6 Resultados de caracterización de las alternativas de producción del yeso

Categorías	Yeso natural (YN)	Yeso reciclado [YR (7 km) dp]	Yeso reciclado [YR (7 km) rp]	Yeso reciclado [YR (50 km) dp]	Yeso reciclado [YR (50 km) rp]
C	6.79E-04	3.85E-04	-1.47E-03	4.23E-04	-1.43E-03
NC	7.66E-05	1.23E-04	-1.46E-03	1.73E-04	-1.41E-03
RI	1.00E-04	9.68E-05	-2.33E-06	1.00E-04	1.05E-06
DCO	1.07E-08	6.06 E-9	2.60E-10	6.81E-09	4.96E-10
RO	1.78E-05	1.15 E-5	1.05E-05	1.48E-05	-7.12E-06
OS	1.40E-04	1.22E-04	-2.56E-02	1.58E-04	-2.56E-02
A	1.12E-04	8.40E-05	-5.15E-04	1.01E-04	-4.98E-04
E	9.76E-07	3.14E-06	-2.29E-05	3.64E-06	-2.24E-05
CG	7.26E-02	5.66E-02	-3.55E-02	6.11E-02	-3.10E-02
ENR	1.37E+00	7.70E-01	-7.39E-01	8.49E-01	-6.61E-01
EM	1.11E-04	7.39E-05	-5.97E-04	1.23E-04	-5.48E-04

C=(kg C₂H₃Cl eq); NC=(kg C₂H₃Cl eq); RI=(kg PM 2.5 eq); DCO=(kg CFC-11 eq); RO=(kg C₂H₄ eq); OS=(m²org.arable); A=(kg SO₂ eq); E=(kg PO₄ p-lim); CG=(kg CO₂ eq); ENR=(MJ primaria); EM=(MJ surplus)

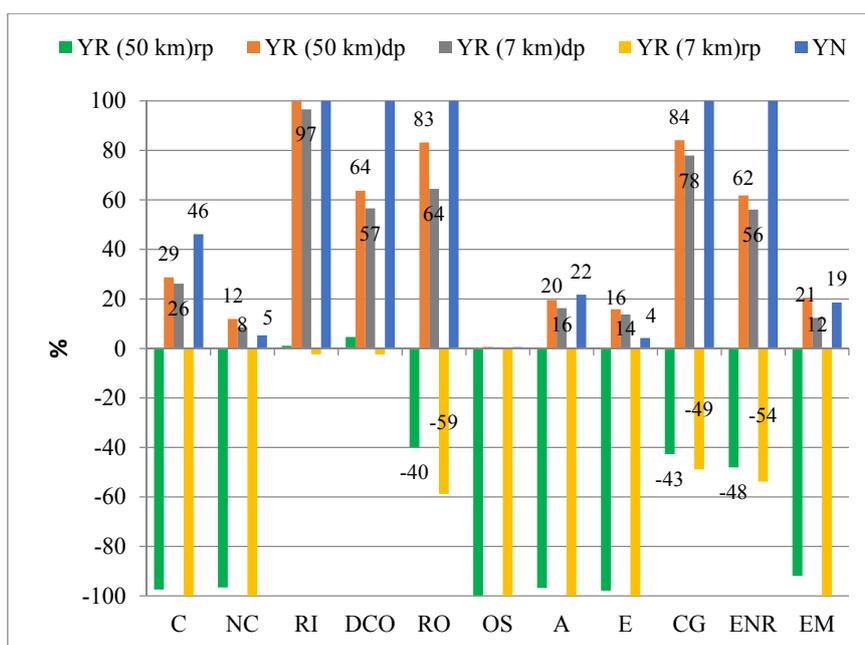


Figura 4-8 Resultados caracterizados del yeso natural y del yeso reciclado

En la Figura 4-8, se observa que la alternativa del YN presenta impactos en todas las categorías evaluadas. Esta alternativa es la que impacta en mayor medida a las categorías medioambientales; significativamente menor a ocupación del territorio, efectos no carcinogénicos, eutrofización y extracción del mineral. Los mayores impactos de esta alternativa (100 %) se presentan en las categorías

efectos respiratorios orgánicos e inorgánicos, disminución de la capa de ozono, calentamiento global y energía no renovable.

Por otro lado, la alternativa YR (50 km) dp presenta los más grandes impactos en las categorías: ocupación del territorio, efectos no carcinogénicos, eutrofización y extracción del mineral y, por otro lado —considerando todas las categorías evaluadas— los menores impactos se presentan en la alternativa YR (7 km) rp.

Las alternativas YR (7 km) dp y YR (50 km) dp —referentes a la producción de yeso reciclado, con igual sistema de gestión de los residuos de papel (disposición en vertedero)— presentan los mayores impactos en las categorías efectos respiratorios inorgánicos y calentamiento global, como consecuencia del proceso de trituración del yeso reciclado, del consumo de gas y de la disposición del residuo de papel. Si se compara la influencia de transporte en ambas alternativas, se observa que la alternativa YR (50 km) dp con mayor distancia de transporte recorrida presenta mayores impactos en relación a la alternativa YR (7 km) dp. De este modo, se comprueba nuevamente la influencia del transporte en los impactos medioambientales. La más grande diferencia entre estas alternativas, debido al transporte, se presenta en la categoría respiratorios orgánicos (19 %).

Así mismo, las alternativas YR (7 km) rp y YR (50 km) rp, con igual sistema de gestión —en las que los residuos de papel son reciclados— presentan los mayores ahorros o ventajas medioambientales en todas las categorías de impacto evaluadas. Ambas alternativas presentan mayores ahorros en la categoría ocupación del territorio con respecto al resto de alternativas, debido —por un lado— al reciclaje del papel; y por otro, a que en este caso no es necesaria la extracción de yeso natural. Con el reciclaje del papel se evitan los impactos producidos en el suelo por la tala de árboles en la producción de papel virgen (López, 2007; Cheung y Pachisia, 2015). Al comparar la influencia del transporte en ambas alternativas, se comprueba que la alternativa YR (7 km) rp —con menor distancia recorrida— da como resultado mayores ahorros medioambientales en relación a la alternativa YR (50 km) rp.

Si se comparan las alternativas con el fin de ver la influencia del sistema de gestión para el residuo de papel, se observa en la Figura 4-8 que las alternativas que emplean como sistema de gestión la disposición [YR (7 km) dp y YR (50 km) dp] presentan impactos medioambientales; en cambio, las alternativas en las que se recicla el papel [YR (7 km) rp y YR (50 km) rp] presentan ahorros en todas las categorías evaluadas. Esto se refleja en los resultados negativos obtenidos de la caracterización de las diferentes categorías medioambientales. El reciclaje del papel lleva implícito los impactos evitados por no producir papel a partir de materia prima original (CEPI, 2007; Area y Mastrantonio, 2012).

4.1.1.5 Interpretación de la evaluación del impacto del ciclo de vida

Tanto en la obtención del yeso natural, como en la obtención del yeso reciclado, el proceso de cocción en el horno con gas natural presenta grandes impactos en la mayoría de las categorías evaluadas. Cabe resaltar que el proceso de trituración genera efectos considerables en la categoría efectos respiratorios inorgánicos para ambos procesos de producción del yeso, por la emisión de partículas.

Por otra parte, la producción primaria de yeso (YN) tiene como resultado unos mayores impactos en todas las categorías evaluadas, aunque menos en: ocupación del territorio, efectos no carcinogénicos, eutrofización y extracción del mineral, donde la alternativa YR (50 km) dp presenta los más grandes impactos por la disposición del papel en vertedero y por el transporte de los residuos desde el sitio de generación hasta la planta de reciclaje. Los menores impactos en estas categorías para el caso del yeso natural se debe a que, al estar situadas las minas de yeso muy cerca de la planta de trituración, sólo se considera un mínimo de transporte interno.

Por otro lado, la influencia del transporte de los residuos desde el punto de generación hasta la planta de reciclaje presenta poca influencia en los resultados finales, comparados con la influencia que tiene el sistema de gestión aplicado a los residuos de papel provenientes de las placas de yeso laminado.

Las alternativas de producción de yeso que emplean como sistema de gestión la disposición del papel presentan impactos medioambientales; por el contrario, las alternativas que emplean el reciclaje como sistema de gestión del papel presentan ahorros en todas las categorías.

Los mayores impactos medioambientales debido a la disposición del papel se presentan en las categorías: efectos respiratorios inorgánicos y calentamiento global, y los mayores ahorros por el reciclaje del papel se presentan en las categorías: efectos carcinogénicos y no carcinogénicos, ocupación del suelo, acidificación, eutrofización y extracción de mineral.

La alternativa YR (7 km) rp presenta los mayores ahorros en todas las categorías evaluadas debido a los efectos positivos del reciclaje del papel y a los impactos evitados al no ser necesario producir el papel a partir de materia prima virgen.

4.1.2 Criterio económico

El sistema empleado para conocer el criterio económico del yeso consiste en conocer el coste de referencia de la producción del yeso, teniendo en cuenta las diferentes alternativas evaluadas.

4.1.2.1 Resultados y discusión del criterio económico

❖ Yeso natural (YN)

El coste de ejecución del YN fue obtenido de la base de datos del BEDEC (2015), el cual se refiere a un yeso de designación A, según la norma UNE-EN 13279-1 (2009), que corresponde a productos de yeso en polvo calcinado. El coste de ejecución de 1 tonelada de este yeso equivale a 105 €. Este coste fue contrastado con el coste dado por las empresas consultadas las cuales suministraron datos comprendidos entre los años 2012-2013.

❖ Yeso reciclado [YR (7 km) dp]

Para calcular el coste de esta alternativa de reciclaje del yeso, se tuvo en cuenta además del coste del proceso de reciclado del yeso, el coste de transporte del residuo de yeso hasta la planta de reciclaje de RCD y el coste de gestión de los residuos generados, que en este caso es el papel. Se sigue la Ecuación 3-1 explicada anteriormente en la propuesta metodológica.

De este modo, para la alternativa YR (7 km) dp, el coste de transporte del residuo de yeso desde el sitio de generación hasta la planta de reciclaje de RCD se calcula teniendo en cuenta los kilómetros recorridos por tonelada. La distancia recorrida por un camión de 32 t con carga completa se halla partiendo de que este tipo de camión consume 0.25 kg diésel/km, equivalente a 0.31 l diésel/km recorrido (Ecoinvent v2.2).

En esta alternativa el trayecto desde el origen del residuo hasta la planta de reciclaje es de 7 km. Según la base de datos de Ecoinvent v2.2, 1 tkm corresponde a 0.085 km para este tipo de vehículo. De este modo, 0.007 tkm, corresponden 5.96E-04 km. Si 1.05 kg de residuos se transportan en 5.96E-04 km, entonces la distancia recorrida es equivalente a 0.57 km/t.

Partiendo de este dato, y sabiendo que el precio medio del gasóleo de automoción en España del año 2014 es de 1.28 €/l (coste directo, que incluye mano de obra, materiales, maquinaria y costes auxiliares) según el Ministerio de Fomento (2015), se calcula el coste del transporte del residuo de yeso hasta la planta de reciclaje igual a 0.22 €/t según la Ecuación 3-2.

Como en España no se lleva a cabo actualmente la práctica del reciclaje del yeso proveniente de los RCD, el coste del proceso de reciclaje fue calculado con base en estudios efectuados en otros países donde se recicla el yeso proveniente de las construcciones o demoliciones. Segatto (2007) efectuó un estudio detallado acerca de la viabilidad económica del yeso reciclado proveniente de los RCD y encontró que el coste de producción está un 34.4 % más bajo que el del yeso natural. Teniendo en cuenta

también la información suministrada por Jiménez (2015) en el inventario de prácticas actuales relacionadas con el reciclaje de productos de yeso en Europa, donde afirma que el yeso reciclado se adquiere en países de la Unión Europea a un menor coste que el yeso natural, y también los datos suministrados por el WRAP (2008), donde se afirma que el coste de yeso reciclado se encuentra por debajo del yeso natural en un 35 %, se calcula como coste aproximado de producción del yeso reciclado en España en 68.25 €/t.

El coste de gestión de la alternativa YR (7 km) dp, referente a la disposición del papel, se calcula teniendo en cuenta la tasa de vertido del residuo de papel en Cataluña. Según la Ley 2/2014 sobre “medidas fiscales, administrativas, financieras y del sector público”, el tipo de gravamen por tonelada de residuos industriales destinados a disposición controlada es de 15.80 €/t. Sabiendo que 1 t de yeso genera aproximadamente 0.05 t de papel, el coste de disposición del papel generado en la producción de 1 tonelada de yeso resulta ser de 0.79 €.

Siguiendo el mismo procedimiento para el cálculo del coste de transporte de la Ecuación 3-2, se tiene que el coste de transporte desde la planta de reciclaje de RCD hasta el vertedero de papel es de 1.17 €/t. Por lo tanto, el transporte de 0.05 t de papel cuesta 0.05 €. El tipo de vehículo empleado para el transporte de los residuos de papel es un camión de 16 t-32 t, el cual se encuentra inventariado en Ecoinvent v2.2. Este tipo de vehículo consume 0.25 l/km en una distancia de 3.64 km/t.

La Tabla 4.7 resume las variables empleadas en los cálculos.

Tabla 4.7 Variables empleadas en los cálculos [YR (7 km) dp]

Variable (por tonelada de yeso reciclado)	Cantidad	Fuente
Consumo de combustible (camión de 32 t)	0.31 l diésel/km	Ecoinvent v2.2
Distancia recorrida (camión 32 t), trayecto (7km)	0.57 km/t	Ecoinvent v2.2 y ARC (2015b)
Precio medio del gasóleo	1.28 €/l	Ministerio de Fomento (2015)
Consumo de combustible (camión de 16 t-32 t)	0.25 l diésel/km	Ecoinvent v2.2
Distancia recorrida (camión de 16 t-32 t), trayecto (21 km)	3.64 km/t	Ecoinvent v2.2 y ARC (2015b)

Finalmente, al aplicar la Ecuación 3-1, se tiene que el coste del yeso reciclado para la alternativa YR (7 km) dp es igual a 69.31 €/t.

En la Tabla 4.8, se observan los resultados obtenidos en los cálculos.

Tabla 4.8 Resultados obtenidos en los cálculos de producción de yeso reciclado [YR (7 km) dp]

Variable	Cantidad (€/t de yeso reciclado)
Coste de transporte (ct _y)	0.22
Coste de reciclaje (cr _y)	68.25
Coste de gestión (incluye transporte) (cg _p)	0.84
Coste total de producción del yeso reciclado (C _{yr})	69.31

❖ **Yeso reciclado [YR (7 km) rp]**

El coste de transporte del yeso y el coste por el reciclaje del yeso permanecen igual con respecto a la alternativa YR (7 km) dp, aunque cambia el coste de la gestión de los residuos de papel, que en este caso corresponde al reciclaje.

En esta alternativa la distancia de transporte de los residuos de papel hasta la planta de reciclaje es de 3 km (Anexo S).

En el cálculo del coste de gestión del papel se incluyen los ingresos por la venta del papel reciclado, además de los ahorros por no disponer el papel en vertedero, gracias al reciclaje. Estos ahorros se representan con un signo negativo. De este modo, se aplica la Ecuación 3-5 explicada anteriormente en la propuesta metodológica y se tiene en cuenta —en este caso— que el trayecto recorrido desde la planta de reciclaje de RCD hasta el vertedero es de 21 km (Anexo L y Anexo T).

Para el cálculo del coste de transporte se emplea como en los casos anteriores la Ecuación 3-2. Así mismo, las variables empleadas para el cálculo de los valores en esta alternativa se muestran resumidas en la Tabla 4.9.

Finalmente, el coste de la alternativa YR (7km) rp se calcula por medio de la Ecuación 3-1, encontrando un coste total de 63.77 €. Los resultados de todos los cálculos efectuados se resumen en la Tabla 4.10.

Tabla 4.9 Variables empleadas en el cálculo de los valores [YR (7 km) rp]

Variable (por tonelada de yeso reciclado)	Cantidad	Fuente
Coste por vertido de papel (cvp)(€)	0.79	Ley 2/2014
Ingreso por la venta del papel para reciclar (ivp)	3.87	ASPAPPEL (2015)

Tabla 4.10 Resultados de los cálculos efectuados [YR (7 km) rp]

Cálculos obtenidos (por tonelada de yeso reciclado)	Cantidad
Coste de gestión del papel (cgp)(€)	-4.70
Coste de transporte del papel hasta planta de reciclaje (ct _p) (€)	0.0085
Coste de transporte del papel hasta el vertedero (ct _p) (€)	0.058
Coste de transporte del yeso (ct _y)(€)	0.22
Coste de reciclaje del yeso (cry)(€)	68.25
Coste del yeso reciclado (P _{Yr}) [YR (7 km) rp] (€)	63.77

❖ **Yeso reciclado [YR (50 km) dp]**

El procedimiento seguido para el cálculo del coste de la alternativa YR (50 km) dp, es similar a los anteriores, cambiando solamente el trayecto desde la generación del residuo de yeso hasta la planta de reciclaje de RCD. En este caso se emplea una distancia de 50 km (apartado 3.3.1.2). El sistema de gestión de los residuos de papel es la disposición en vertedero, ubicado a 21 km de la planta de reciclaje de RCD (Anexo L y Anexo T).

Los parámetros empleados en esta alternativa se observan resumidos en la Tabla 4.11.

Tabla 4.11 Parámetros empleados en el cálculo de los valores [YR (50 km) dp]

Variable (por tonelada de yeso reciclado)	Cantidad	Fuente
Consumo de combustible (camión de 32 t)	0.31 l diésel/km	Ecoinvent v2.2
Distancia recorrida (camión 32 t), trayecto (50 km)	4.04 km/t	Ecoinvent v2.2 y ARC (2015b)
Precio medio del gasóleo	1.28 €/l	Ministerio de Fomento (2015)
Consumo de combustible (camión de 16 t-32 t)	0.25 l diésel/km	Ecoinvent v2.2
Distancia recorrida (camión de 16 t-32 t), trayecto (21 km)	3.64 km/t	Ecoinvent v2.2 y ARC (2015b)

Los resultados del cálculo de la Ecuación 3-1, de la Ecuación 3-2 y de la Ecuación 3-3 se muestran en la Tabla 4.12.

Tabla 4.12 Resultados de los cálculos efectuados [YR (50 km) dp]

Variable	Cantidad (€/t de yeso reciclado)
Coste de transporte (ct_y)	1.60
Coste de reciclaje (cr_y)	68.25
Coste de gestión (incluye transporte) (cg_p)	0.84
Coste del yeso reciclado (Py_r) [YR (50 km) dp]	70.69

❖ **Yeso reciclado [YR (50 km) rp]**

El coste de la alternativa YR (50 km) rp se calculó con base en la siguiente secuencia de ecuaciones: Ecuación 3-1 - Ecuación 3-4. En esta alternativa, la distancia desde el origen del residuo de yeso hasta la planta de reciclaje de RCD es de 50 km, y el sistema de gestión aplicado a los residuos de papel es el propio del reciclaje. La planta de reciclaje de papel —como se mencionó anteriormente— se encuentra ubicada a 3 km de la planta de reciclaje de RCD.

Las variables empleadas para el cálculo de los valores son las mismas empleadas en la alternativa YR (7km) rp (Tabla 4.9). En la Tabla 4.13 se muestran los resultados de dichos cálculos.

Tabla 4.13 Resultados de los cálculos efectuados (A5) [YR (50 km) rp]

Cálculos obtenidos (por tonelada de yeso reciclado)	Cantidad
Coste de gestión del papel (cg_p)(€)	-4.70
Coste de transporte del yeso (ct_y)(€)	1.60
Coste de reciclaje del yeso (cr_y)(€)	68.25
Coste del yeso reciclado (Py_r) [YR (50 km) rp] (€)	65.15

Finalmente, en la Tabla 4.14 se muestra, en forma resumida, el coste de los productos obtenidos en cada una de las alternativas.

Tabla 4.14 Coste de referencia de los productos de yeso

Material	(A1)	(A2)	(A3)	(A4)	(A5)
	(YN)	[YR (7 km) dp]	[YR (7 km) rp]	[YR (50 km) dp]	[YR (50 km) rp]
Yeso	105 €/t	69.31 €/t	63.77 €/t	70.69 €/t	65.15 €/t

Al comparar el coste económico de cada una de las alternativas, se observa que la alternativa que presenta mayor coste es la alternativa referente a la producción de yeso natural. En cuanto a las

alternativas de reciclaje del yeso, las que presentan mayor beneficio económico son la alternativa YR (7 km) rp y YR (50 km) rp, en las que se recicla también el papel proveniente de la placa de yeso laminado. En cambio, las alternativas de reciclaje de yeso en las que se dispone el papel presentan mayor coste económico [YR (7 km) dp y YR (50 km) dp].

Si se tiene en cuenta el trayecto de los residuos de yeso hasta la planta de reciclaje, se observa que las alternativas con mayor trayecto recorrido presentan —como era de esperar— un mayor coste económico; sin embargo, el sistema de gestión empleado (bien sea reciclaje o disposición del papel), resulta ser un parámetro que influye más notoriamente en los resultados económicos comparados con el transporte de los residuos de yeso. Los resultados del menor coste económico del yeso reciclado frente al yeso natural están en concordancia con los datos del ensayo WRAP (2008).

Las alternativas de producción de yeso: YR (7 km) rp y YR (50 km) rp en las que se recicla el papel, presentan menores costes, lo que se debe a los ingresos por el reciclaje del papel.

4.2 Fase 5: Definición de los indicadores

Para evaluar las alternativas en términos de criterios, fue necesario, en primer lugar, obtener el valor normalizado de las categorías de impacto de punto medio relacionadas con la salud humana y el valor normalizado de las categorías relacionadas con la calidad del ecosistema, así como también el cambio climático y el consumo de recursos.

Las categorías relacionadas con la salud humana son: efectos carcinogénicos, no carcinogénicos, respiratorios inorgánicos y orgánicos. Las categorías relacionadas con la calidad del ecosistema, el cambio climático y el consumo de recursos son: eutrofización, acidificación, disminución de la capa de ozono, calentamiento global, energía no renovable, ocupación del suelo y extracción de minerales.

La carga medioambiental normalizada se halló teniendo en cuenta la Ecuación 3-6.

Los resultados de este cálculo se muestran en la Tabla 4.15.

Tabla 4.15 Carga medioambiental normalizada y valor del criterio económico para cada alternativa

Alternativas	F1	F2	F3 Económico
	(normalizada)	(normalizada)	€/t
A1: YN	0.985	0.964	105
A2: YR (7km) dp	0.894	0.839	69.31
A3: YR (7km) rp	0.000	0.000	63.77
A4: YR (50km) dp	0.943	0.876	70.69
A5: YR (50 km) rp	0.050	0.031	65.15

4.3 Fase 6: Clasificación y elección de alternativas. Análisis y discusión de resultados

4.3.1 Aplicación del método multicriterio y elección de las alternativas

El método VIKOR se llevó a cabo mediante la siguiente secuencia de ecuaciones: Ecuación 3-7- Ecuación 3-12. Los resultados de estos cálculos se muestran en la Tabla 4.16.

Para el ranking de alternativas, se clasificaron los valores S, R y Q en orden decreciente; es decir de mayor a menor ventaja medioambiental y/o económica (Tabla 4.16). Se tuvieron en cuenta también diferentes clasificaciones para los criterios. Para el criterio de igual importancia se consideró un factor de ponderación de 0.33 para cada función de criterio (F1, F2 y F3).

Siguiendo el método de ponderación por orden de rango aplicado por Tošić *et al.* (2015) —donde se tiene en cuenta la importancia relativa entre los diferentes criterios— en este estudio doctoral se consideró para el criterio de ventaja medioambiental un factor de 0.4 para F1 y F2, y un factor de 0.2 para F3. Por último, para el criterio de ventaja económica se consideró un factor de 0.25 para F1 y F2, y un factor de ponderación de 0.5 para F3 (ver apartado 3.2.6.1 y Tabla 3.4)

Como no se cumplen las condiciones: Ecuación 3-10- Ecuación 3-11, se proponen múltiples alternativas. Como la Ecuación 3-10 tampoco es satisfecha, pero se cumple la Ecuación 3-12, se proponen las alternativas YR (7km) rp y YR (50 km) rp en primera y segunda posición como las óptimas.

En la Tabla 4.16, se observa que, para el caso en que a todos los criterios se les da la misma importancia, la diferencia porcentual entre ellas es de sólo un 4 %. La ventaja de la alternativa YR (7km) rp frente a la alternativa YR (7km) dp es de un 77 %, de la alternativa YR (7km) rp frente a la alternativa YR (50km) dp de un 82 % y de la alternativa YR (7km) rp frente a la alternativa YN, un 100 %.

Tabla 4.16 Lista de valores S, R y Q calculados en la producción de yeso

Clasificación de los criterios	Alternativas	Qj	Sj	Rj
Igual importancia	A3: YR (7km) rp	0.00	0.00	0.00
	A5: YR (50 km) rp	0.04	0.04	0.02
	A2: YR (7km) dp	0.77	0.63	0.30
	A4: YR (50km) dp	0.82	0.67	0.32
	A1: YN	1.00	0.99	0.33
Ventaja medioambiental	A3: YR (7km) rp	0.00	0.00	0.00
	A5: YR (50 km) rp	0.05	0.04	0.02
	A2: YR (7km) dp	0.82	0.74	0.36
	A4: YR (50km) dp	0.87	0.78	0.38
	A1: YN	1.00	1.00	0.40
Ventaja económica	A3: YR (7km) rp	0.00	0.00	0.00
	A5: YR (50 km) rp	0.04	0.04	0.01
	A2: YR (7km) dp	0.48	0.51	0.23
	A4: YR (50km) dp	0.51	0.55	0.24
	A1: YN	1.00	1.00	0.25

La jerarquía establecida para las alternativas permanece igual en las diferentes clasificaciones de los criterios (Tabla 4.16). Sin embargo, se observa que, si se le da prioridad al criterio medioambiental, los resultados no varían demasiado comparados con el criterio de igual importancia para el aspecto ambiental y económico.

Al darle mayor importancia al criterio económico, la diferencia entre la alternativa YR (7km) rp y el resto de alternativas es menor. La ventaja de la alternativa YR (7km) rp, frente a la alternativa YR (50 km) rp, es de un 4 % y la de la alternativa YR (7km) rp frente a la alternativa YR (7km) dp y YR (50km) dp es de un 48 % y un 51 % respectivamente. Estos resultados conllevan a afirmar que las ventajas para la alternativa YR (7km) rp y YR (50 km) rp son aún mayores si se le da mayor prioridad al criterio medioambiental que al económico.

El sistema de gestión aplicado a los residuos provenientes del reciclaje del yeso, es decir, a los residuos de papel, juega un rol importante en los resultados finales. Las ventajas del 4 % y 5 % de la alternativa YR (7km) rp frente al YR (50 km) rp en todas las clasificaciones de los criterios son debidos sólo al transporte de los residuos, de manera que las ventajas mayores de la alternativa YR (7km) rp frente al YR (7km) dp y YR (50km) dp se debe básicamente al sistema de gestión aplicado a los residuos de papel. Las alternativas en las que se dispone el papel [YR (7km) dp y YR (50km) dp] frente a las alternativas en las que se recicla el papel [YR (7km) rp y YR (50km) rp] presentan menor impacto económico que medioambiental.

Si se considera el mismo peso para el criterio medioambiental y económico, las ventajas de las alternativas YR (7km) dp y YR (50km) dp, frente a la producción primaria del yeso, son 23 % y 18 % respectivamente. Si se le da prioridad al criterio medioambiental, las ventajas resultan ser 18 % y 13 % para las alternativas YR (7km) dp y YR (50km) dp. En cambio, si se le da mayor peso al criterio económico, las ventajas de las alternativas YR (7km) dp y YR (50km) dp frente a la producción de yeso a partir de materia prima original son 52 % y 49 %.

Estos resultados confirman que el factor medioambiental influye de manera más notoria en las ventajas de las alternativas YR (7km) rp y YR (50 km) rp frente al resto de alternativas, que el factor económico, siendo también mayores las ventajas económicas que las medioambientales de las alternativas YR (7km) dp y YR (50km) dp con respecto a la producción primaria del yeso.

Para todas las clasificaciones de los criterios evaluados, resulta como última opción la producción primaria del yeso (yeso natural).

4.4 Fase 5: Conclusiones

De acuerdo con los resultados de la evaluación del impacto del ciclo de vida para cada una de las alternativas de producción del yeso se concluye que la alternativa que presenta mayores impactos en las categorías de evaluadas es la obtención de yeso en polvo calcinado a partir de yeso natural. En cambio las alternativas de producción de yeso en polvo calcinado a partir de RCD (reciclaje del yeso) contribuyen a menores impactos medioambientales.

Las mayores ventajas medioambientales del reciclaje del yeso se presentan en las alternativas en que se aplica como sistema de gestión el reciclaje de papel proveniente de las placas de yeso laminado y las menores ventajas en las que se disponen los residuos de papel en vertedero.

La distancia de transporte de los residuos de yeso desde el sitio de generación hasta la planta de reciclaje influye de manera poco notoria en comparación con el sistema de gestión aplicado a los residuos generados durante el reciclaje del yeso. No obstante, los menores impactos por el reciclaje del yeso se presentan en las alternativas en que se considera la menor distancia de transporte (7 km). Aunque se considere una mayor distancia de transporte (50 km), el reciclaje del yeso continúa resultando beneficioso comparado con la obtención del yeso natural.

La alternativa de producción de yeso natural presenta mayor coste económico comparado con las alternativas de obtención de yeso reciclado. En cuanto a las alternativas de reciclaje del yeso, las que presentan mayor beneficio económico son la alternativa YR (7 km) rp y YR (50 km) rp, en las que se recicla también el papel proveniente de la placa de yeso laminado.

Las opciones óptimas de producción de yeso —teniendo en cuenta tanto el aspecto medioambiental como económico— son las alternativas YR (7 km) rp y YR (50 km) rp, que corresponden al reciclaje del yeso en el que se emplea como sistema de gestión el reciclaje del papel. Sin embargo, el aspecto medioambiental influye de manera más notoria que el aspecto económico en las ventajas de las alternativas YR (7 km) rp y YR (50 km) rp frente al resto de alternativas de producción de yeso.

Las alternativas YR (7km) rp y YR (50 km) rp resultan ser las opciones óptimas en todas las clasificaciones de los criterios: igual importancia para ambos criterios, importancia medioambiental e importancia económica.

5 Aplicación de la propuesta metodológica al cemento

5.1 Fase 4: Evaluación ambiental y económica

5.1.1 Criterio ambiental. Metodología de análisis de ciclo de vida

5.1.1.1 Definición de objetivos y alcance

❖ Objetivo

El objetivo de este análisis de ciclo de vida consiste en evaluar los impactos medioambientales de la producción de cemento a partir de yeso natural —producción primaria— y a partir de yeso y de vidrio reciclado —producción secundaria— con el fin de conocer en qué medida es viable a nivel medioambiental el yeso y el vidrio reciclado en la producción de cemento.

❖ Alcance

El estudio se localiza geográficamente en España (Cataluña).

Las etapas tenidas en cuenta en la producción del cemento van desde la obtención de las materias primas hasta la obtención de cemento Pórtland ordinario. Se incluye la infraestructura de la planta de cemento (la producción interna del clínker), el proceso de mezcla y molienda de las materias primas, la obtención y el uso de fuentes energéticas. Cada una de estas etapas se detalla más adelante en el apartado correspondiente al inventario.

En todos los procesos de producción se tienen en cuenta la obtención de las materias primas y su transporte a la planta de cemento. También se incluye el transporte de los residuos generados en la producción de cemento al sitio de disposición de los residuos sólidos municipales e inertes. Se considera el transporte interno de la planta de producción.

En cuanto al proceso de producción, cabe mencionar que el cemento Pórtland a partir de yeso natural y a partir de yeso reciclado es el mismo, de manera que sólo varía el proceso de obtención del yeso empleado y los impactos asociados al mismo.

Los procesos seguidos en la producción de cemento con vidrio reciclado son los mismos que en la producción de cemento Pórtland ordinario; lo que varía es la cantidad de arcilla —la cual es reemplazada parcialmente por vidrio triturado para la obtención del clinker— y los impactos medioambientales asociados al empleo del vidrio triturado.

Las etapas incluidas en la obtención del cemento Pórtland ordinario son:

- Obtención de las materias primas (caliza, marga y arcilla que son finamente molidas para obtener el crudo) y obtención del material yeso.
- Cocción del crudo en un horno rotatorio para la obtención de clinker de cemento.
- Molienda conjunta del clinker con otros componentes (yeso natural o reciclado). El yeso se añade al clinker para controlar las reacciones iniciales de hidratación y prevenir el fraguado relámpago.

En la Figura 5-1, se observan los límites del sistema en la obtención del cemento Pórtland ordinario (CPO).

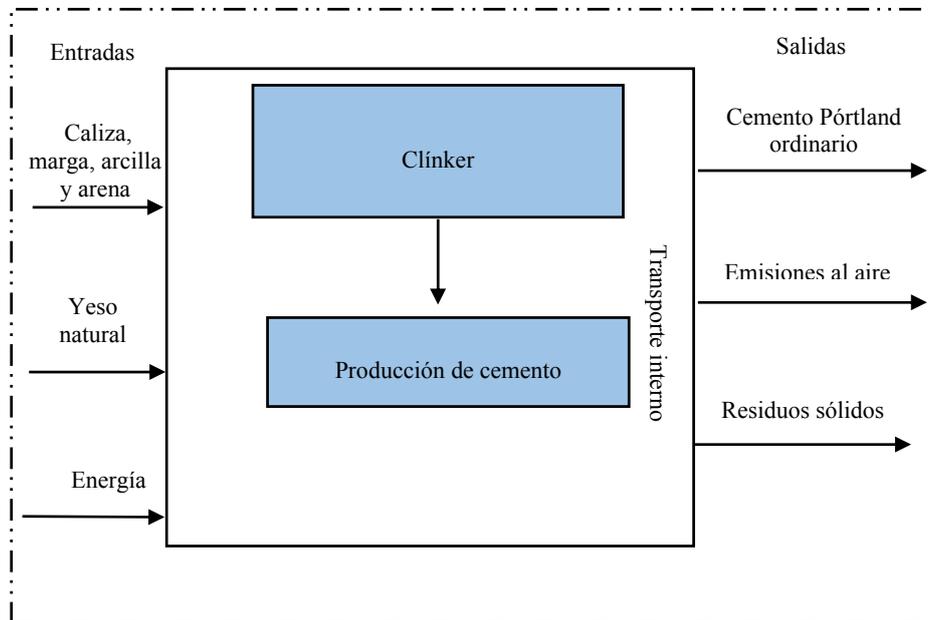


Figura 5-1 Límites del sistema del cemento Pórtland ordinario

Los límites del sistema de la producción de cemento con yeso reciclado (CYR) se muestran en la Figura 5-2.

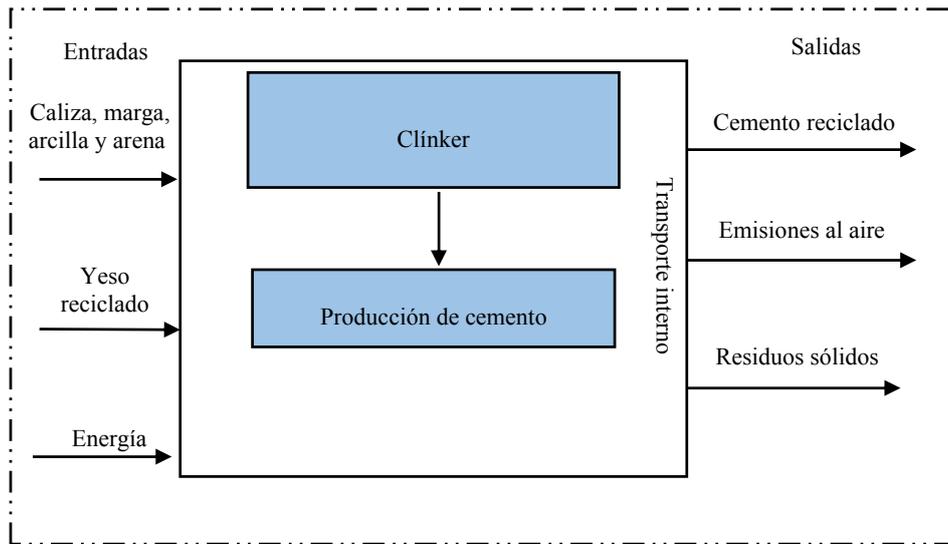


Figura 5-2 Límites del sistema del cemento con yeso reciclado

Los límites del sistema de la producción de cemento con vidrio reciclado (CVR) se muestran en la Figura 5-3.

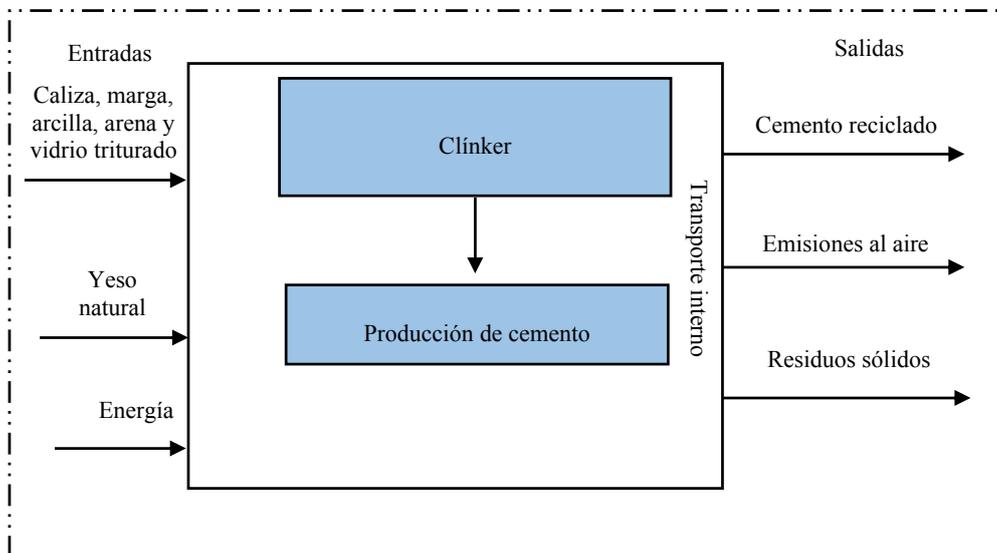


Figura 5-3 Límites del sistema del cemento con vidrio reciclado

En la Figura 5-4, se muestra el límite del sistema empleado en la obtención del vidrio triturado.

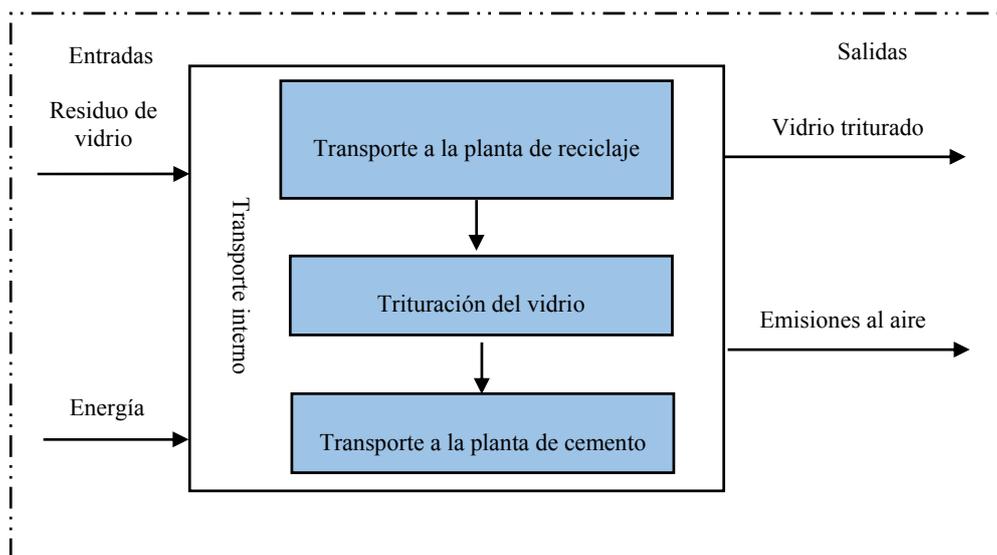


Figura 5-4 Límite del sistema en la obtención del vidrio triturado

❖ Unidad funcional

La unidad funcional es definida como 1 kg de cemento.

5.1.1.2 Definición de alternativas

De acuerdo con el apartado 3.3.2.1 , las alternativas de producción de cemento son las siguientes:

A1= cemento con yeso natural o cemento Pórtland ordinario (CPO).

A2=cemento con yeso reciclado (CYR).

A3= cemento con vidrio reciclado (CVR).

5.1.1.3 Análisis del inventario

Para el caso del cemento se consultaron también en forma directa empresas y organismos relacionados —siendo 15 en total— y la información restante se completó con información secundaria extraída de la declaración medioambiental de otras empresas españolas.

La información obtenida se refiere a datos generales sobre el sistema de producción; a la capacidad de producción de la planta; al tipo de maquinaria; al consumo energético en todo el proceso de producción del cemento; a la cantidad y tipo de materias primas empleadas; a la distancia a la que son trasladadas las materias primas hasta la planta de cemento; a las distancias a la que son trasladados los residuos

generados hasta el sitio de gestión; y al tipo de transporte empleado. Toda esta información se detalla a continuación en el inventario efectuado para cada alternativa de producción.

Es importante destacar que el proceso de producción de cemento a partir de materia prima original o a partir de materia prima reciclada, varía básicamente en el proceso de obtención de las materias primas empleadas (yeso natural o yeso reciclado, arcilla o vidrio reciclado), el resto de procesos permanecen similares en las diferentes alternativas de producción de cemento.

Por ello, seguidamente se explica el inventario del proceso de producción de cemento Pórtland ordinario y se hace la diferenciación en la obtención de las materias primas y los factores implicados con el resto de alternativas.

❖ **Cemento con yeso natural o cemento Pórtland ordinario (CPO)**

Para evaluar el impacto medioambiental del ciclo de vida del cemento, se emplean las entradas y salidas inventariadas en la base de datos Ecoinvent v2.2 referentes al proceso de producción del cemento. Sin embargo, es necesario adaptar los datos al contexto español a través de la modificación del mix eléctrico.

La producción de cemento incluye básicamente el proceso de obtención de las materias primas, el transporte a la planta de cemento, la mezcla y molienda de las materias primas, el transporte interno e infraestructura (equipos específicos y planta de producción) y el transporte y gestión de los residuos generados.

Los procesos de entrada en el proceso de producción del CPO son los siguientes:

- Infraestructura de la planta de cemento. El volumen de producción de la planta de producción de cemento inventariada en Ecoinvent v2.2 es de 1075321 t/año (capacidad de producción similar a las plantas cementeras españolas) y el tipo de cemento producido es el cemento tipo CEM I 42.5 R.

La infraestructura incluye el uso del suelo por los edificios y zona pavimentada y el tiempo de vida útil considerado es de 50 años. No se tiene en cuenta el horno rotatorio, ya que este se incluye en el proceso de producción de clínker.

- Producción del clínker. Incluye todo el proceso de producción, desde la obtención de la materia prima hasta mezcla y molienda. Se tiene en cuenta también la infraestructura del horno rotatorio. Se emplea como base el proceso existente en Ecoinvent v2.2, pero se adapta al contexto español, al considerar que la producción del clínker se efectúa dentro de la misma fábrica de cemento, por lo que no se tiene en cuenta el transporte del clínker hasta la fábrica de cemento. En esta alternativa

el clínker es denominado clínker A y la composición de las materias primas se muestran en la Tabla 5.1. En el Anexo F se pueden ver con detalle las entradas de este proceso.

La distancia de transporte desde el sitio de obtención de la materia prima hasta la planta de cemento para el caso de la arcilla, la caliza, la marga y la arena es de 10 km. Este valor se obtuvo de las empresas cementeras consultadas, en las que las canteras se encuentran ubicadas aproximadamente dentro de un radio de 10 km en torno a las fábricas.

La distancia de transporte de los residuos generados en la producción del clínker, para el caso de los residuos sólidos asimilables a residuos municipales hasta el vertedero municipal es de 21 km y para el caso de los residuos inertes de 17 km. Estas distancias fueron consideradas a partir del Servidor de mapas de la ARC (2015b), donde se encuentran el número de este tipo de instalaciones en todo el territorio catalán (23 vertederos municipales y 51 vertederos de inertes) (Anexo M, Anexo N y Anexo Q).

Por otro lado, el consumo eléctrico en la producción de 1 kg de clínker de cemento extraído de la base de datos Ecoinvent v2.2 es de 0.058 kWh.

Tabla 5.1 Cantidad de materia prima por kg de clínker A obtenido

Materias primas	Cantidad (kg)	Trayecto hasta cementera
Arcilla	0.331	10 km
Caliza	0.841	10 km
Marga	0.466	10 km
Arena	0.009	10 km

Las salidas del proceso de producción del clínker se detallan en la Tabla 5.2.

Tabla 5.2 Salidas del proceso de producción de 1 kg de clínker de CPO (Ecoinvent v2.2)

Emisiones al aire	Cantidad	Unidad
Amoníaco	2.28E-05	kg
Antimonio	2.00E-09	kg
Arsénico	1.20E-08	kg
Berilio	3.00E-09	kg
Cadmio	7.00E-09	kg
Dióxido de carbono, biogénico	1.51E-02	kg
Dióxido de carbono, fósil (Clínker A)	8.39E-01	kg
Dióxido de carbono, fósil (Clínker B)	7.81E -01	kg
Monóxido de carbono, fósil	4.72E-04	kg
Cromo	1.45E-09	kg
Cobalto	4.00E-09	kg
Cobre	1.40E-08	kg
Dioxina, 2,3,7,8 tetraclorodibenzo-p-	9.60E-13	kg
Calor residual	3.62E+00	MJ
Cloruro de hidrógeno	6.31E-06	kg
Plomo	8.50E-08	kg
Mercurio	3.30E-08	kg
Metano, fósil	8.88E-06	kg
Níquel	5.00E-09	kg
Óxidos de nitrógeno	1.08E-03	kg
NMVOC, compuestos orgánicos volátiles distintos del metano	5.64E-05	kg
Partículas, <2.5 µm	2.41E-05	kg
Partículas, > 10 µm	5.66E-06	kg
Partículas, > 2.5 µm, y <10 µm	7.92E-06	kg
Selenio	2.00E-09	kg
Dióxido de azufre	3.55E-04	kg
Talio	1.30E-08	kg
Estaño	9.00E-09	kg
Vanadio	5.00E-09	kg
Zinc	6.00E-08	kg
Cromo VI	5.50E-10	kg
Residuos y emisiones para tratamiento	Cantidad	Unidad
Disposal, inert waste, 5 % water, to inert material landfill/CH U	0,00008	kg
Disposal, municipal solid waste, 22.9 % water, to sanitary landfill/CH U	0,000045	kg

- Consumo de electricidad en la producción de CPO. Incluye la producción de electricidad en España y su importación. También incluye la red de transmisión y las emisiones directas al aire de SF₆ (Hexafluoruro de azufre). Se contabilizan las pérdidas de electricidad durante la transmisión y transformación a medio voltaje.
- Consumo de yeso natural. Se emplea el proceso de producción de yeso natural existente en la base de datos Ecoinvent adaptado al contexto español. En este caso se trata de yeso di-hidrato al que no es necesario hacer pasar por un proceso de calcinación. Según la norma UNE-EN 197-1 (2011), la cantidad máxima de yeso a añadir al clínker es de 5 %, equivalente a 0.05 kg de yeso por kg de cemento producido.
- Etilenglicol. Es el aditivo empleado debido a que facilita la molienda de las materias primas. Se emplea para conseguir cementos muy finos con reducido consumo de energía. Incluye precursores químicos e infraestructura, lo mismo que las emisiones al aire y al agua del proceso de obtención del etileno que se encuentran inventariadas en la base de datos Ecoinvent v2.2.
- Acero (piezas de desgaste para las maquinarias). Se tienen en cuenta diferentes procesos de producción del acero en Europa; entre éstos, el acero laminado en caliente.
- Transporte interno. Se considera el ciclo de vida entero de este proceso (producción del vehículo, operación, mantenimiento y disposición). También se incluye la construcción, el mantenimiento y disposición de las carreteras. Se emplean datos genéricos europeos. El tipo de vehículo empleado es un camión con capacidad de transportar entre 3.5 t -7.5 t, el cual consume 0.09 kg de diésel/km recorrido (Ecoinvent v2.2). En este caso, 1 kg de material se transporta en 0.345 km, el cual corresponde al transporte dentro de la planta de cemento, extraído del promedio de plantas cementeras consultadas. Si se convierten los kilogramos a toneladas, serían 0.001t en 0.345 km, equivalente a 3.45E-04 tkm. Este valor se adiciona a la base de datos Ecoinvent v2.2.

La infraestructura vial, los gastos y las intervenciones ambientales debido a la construcción, renovación y eliminación de las carreteras, se han fijado teniendo en cuenta el rendimiento bruto tonelada-kilómetro. Los gastos debido a la operación de la infraestructura vial, así como el uso del suelo se han asignado con base en el rendimiento anual vehículo y kilómetro. Para esto se ha supuesto un rendimiento en tiempo de vida del vehículo de 5.40E+05 tkm/vehículo (Ecoinvent v2.2).

Los salidas debidas al proceso de molienda y mezcla de las materias primas obtenidas, corresponden a emisiones al aire (calor equivalente a 0.105 MJ según Ecoinvent v2.2).

En la Tabla 5.3 se detallan los procesos de entradas y salidas de la producción del CPO.

Tabla 5.3 Entradas y salidas de la producción del CPO (kg de cemento)

Entradas conocidas desde la tecnosfera				
Proceso básico	Nombre del proceso en Ecoinvent v2.2	Unidad	Cantidad	Fuente
Infraestructura de la planta de cemento	Cement plant/CH/I U	p	5.36E-11	Ecoinvent v2.2
Clínker A	Clinker, at plant/CH U	kg	9.03E-01	Ecoinvent v2.2
Electricidad	Electricity, medium voltage, at grid/ES U	kWh	2.92E-02	Ecoinvent v2.2
Etilenglicol (aditivo cemento)	Ethylene glycol, at plant/RER U	kg	1.90E-04	Ecoinvent v2.2
Piezas de desgaste (acero)	Steel, low-alloyed, at plant/RER U	kg	5.00E-05	Ecoinvent v2.2
Yeso natural	Gypsum, mineral, at mine	kg	5.00E-02	Ecoinvent v2.2; empresas consultadas años (2009-2013) y Ministerio de Industria, Energía y Turismo (2013)
Transporte interno	Transport, lorry 3.5t -7.5t, EURO 5/RER U	tkm	3.45E-04	Cementeras españolas consultadas (2011)
Salidas				
Proceso básico	Nombre del proceso en Ecoinvent v2.2	Unidad	Cantidad	Fuente
Calor	Heat, waste	MJ	0.105	Ecoinvent v2.2

❖ **Cemento con yeso reciclado (CYR)**

Tal y como se comentó anteriormente, la producción de cemento con yeso reciclado es similar a la producción primaria, de modo que sólo cambia en el uso del yeso, que en este caso es yeso reciclado proveniente de los RCD. Sin embargo, el proceso de yeso reciclado creado en el apartado 4.1.1.3 se modifica al eliminar el proceso de secado del yeso en el horno, ya que, como se mencionó anteriormente, en este caso no es necesario someter el yeso a un proceso de calcinación para ser empleado en el cemento, ya que se suele utilizar sulfato de calcio di-hidrato ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$).

Por ello, en esta alternativa se toma como referencia los resultados del método VIKOR (Anexo E) y se escoge para efecto del estudio el YR (50 km) rp, al considerar la máxima distancia a la que serían transportados los residuos hasta la planta de reciclaje dentro de Cataluña, empleando en este caso la misma cantidad que en el yeso natural (0.05 kg de yeso reciclado).

La distancia promedio del yeso desde la planta de reciclaje hasta la cementera, se obtuvo teniendo en cuenta el número y ubicación de plantas de reciclaje de RCD y plantas de cemento dentro de todo el territorio catalán. De acuerdo con la Asociación de Fabricantes de cemento de Cataluña CIMENT CATALÁ (2015), existen 7 plantas de fabricación de cemento y 55 plantas de reciclaje de RCD (ARC,

2015b). Con base en esto —y a partir del Servidor de mapas de la ARC (2015b)— se calcula una distancia aproximada de 15 km desde la planta de reciclaje hasta la cementera (Anexo U).

Teniendo en cuenta que en Cataluña existen 10 canteras de yeso según el Ministerio de Industria, Energía y Turismo (2015), y que el número de estas es menor con respecto a las plantas de reciclaje existentes, se encuentra a partir del Servidor de mapas de la ARC (2015b) una distancia aproximada de 40 km desde la obtención del yeso natural hasta la planta de cemento (Anexo U).

En esta alternativa, el tipo y la cantidad de materias primas empleadas en la producción del clínker (caliza, marga, arcilla y arena) permanecen igual que en la alternativa del CPO (Tabla 5.1).

Cuando se sustituye una materia prima por otra en la producción del cemento, es decir, se considera el uso del yeso reciclado en lugar del yeso natural, se tienen en cuenta los productos evitados, que, para efectos prácticos, viene a ser la cantidad de materia prima original que se evita al emplear esa misma cantidad de material reciclado. Estos productos evitados dan origen a los ahorros medioambientales debido a que no se produce materia prima original. En esta alternativa el producto evitado es la cantidad de yeso natural que no se ha empleado por el reciclaje.

Por último, las salidas debidas al proceso de molienda y mezcla de las materias primas obtenidas, son semejantes a las de la alternativa de CPO (calor equivalente a 0.105 MJ (Ecoinvent v2.2)).

En la Tabla 5.4 se muestran los procesos de entrada y salida del CYR.

Tabla 5.4 Entradas y salidas del proceso de producción del CYR (kg de cemento)

Productos evitados				
Proceso básico	Nombre del proceso en Ecoinvent v2.2	Unidad	Cantidad	Fuente
Yeso natural	Gypsum, mineral, at mine	kg	5.00E-02	Ecoinvent v2.2; empresas consultadas años (2009-2013) y Ministerio de Industria, Energía y Turismo (2013)
Entradas conocidas desde la tecnosfera				
Proceso básico	Nombre del proceso en Ecoinvent v2.2	Unidad	Cantidad	Fuente
Infraestructura de la planta de cemento	Cement plant/CH/I U	p	5.36E-11	Ecoinvent v2.2
Clínker A	Clinker, at plant/CH U	kg	9.03E-01	Ecoinvent v2.2
Electricidad	Electricity, medium voltage, at grid/ES U	kWh	2.92E-02	Ecoinvent v2.2
Etilenglicol (aditivo cemento)	Ethylene glycol, at plant/RER U	kg	1.90E-04	Ecoinvent v2.2
Piezas de desgaste (acero)	Steel, low-alloyed, at plant/RER U	kg	5.00E-05	Ecoinvent v2.2
Yeso reciclado	Reciclaje del yeso	kg	5.00E-02	Guillén (2005); Plantas de reciclaje visitadas (2014); Rubio (2012), Begliardo <i>et al.</i> (2007)
Transporte interno	Transport, lorry 3.5t-7.5t, EURO 5/RER U	tkm	3.45E-04	Cementeras españolas consultadas (2011)
Salidas				
Proceso básico	Nombre del proceso en Ecoinvent v2.2	Unidad	Cantidad	Fuente
Calor	Heat, waste	MJ	0.105	Ecoinvent v2.2

❖ **Cemento con vidrio reciclado (CVR)**

En esta alternativa de producción de cemento se emplea el yeso natural usado también en el CPO, lo que se modifica son las materias primas necesarias para la producción del clínker. En este caso se reemplaza parcialmente la arcilla por vidrio triturado. La cantidad de arcilla a reemplazar está basada en estudios efectuados en los que se ha comprobado la viabilidad técnica del uso del vidrio triturado en la producción del cemento (Jani y Hogland, 2014) (Tabla 5.5).

El clínker en esta alternativa —para efecto de este caso de estudio— se denomina Clínker B. En el Anexo G, se puede ver con detalle las entradas de este proceso.

Tabla 5.5 Cantidad de materia prima por kg de clínker B obtenido

Materias primas	Cantidad (kg)	Trayecto hasta cementera
Arcilla	0.160	10 km
Caliza	0.840	10 km
Marga	0.466	10 km
Arena	0.009	10 km
Vidrio triturado	0.180	15 km

El proceso empleado para el vidrio reciclado se basa en el proceso existente en la base de datos de Ecoinvent v2.2, llamado “*Glass cullets, sorted at sorting plant/RER U*”, pero ha sido modificado según el contexto español. Se han adicionado las distancias de transporte desde el origen del residuo hasta la planta de reciclaje y desde la planta de reciclaje a la planta de cemento. Se tiene en cuenta como distancia de transporte del residuo desde el centro de Barcelona hasta la planta de tratamiento unos 7 km según el apartado 3.3.1.2.

Tabla 5.6 Entradas y salidas en la obtención del vidrio triturado

Entradas conocidas desde la naturaleza				
Proceso básico	Nombre del proceso en Ecoinvent v2.2	Unidad	Cantidad	Fuente
Residuo de vidrio	Residuo	kg	1 E+00	Ecoinvent v2.2
Entradas conocidas desde la tecnosfera				
Proceso básico	Nombre del proceso en Ecoinvent v2.2	Cantidad	Unidad	Fuente
Infraestructura de la planta de reciclaje	Sorting plant for construction waste/CH/I U	P	5E-11	Cálculo hecho en base al manual de Ecoinvent v 2
Electricidad	Electricity medium voltaje at grid/ESU	MJ	3.75E-03	Ecoinvent v2.2
Transporte	Transport, lorry >32 t, EURO 5/RER U	tkm	1.50E-02	ARC (2015b); Plantas de reciclaje visitadas (2014)
Transporte	Transport, lorry >32 t, EURO 5/RER U	MJ	7.00E-03	ARC (2015b); Plantas de reciclaje visitadas (2014)
Salidas				
Proceso básico	Nombre del proceso en Ecoinvent v2.2	Unidad	Cantidad	Fuente
Emisión de partículas < 2.5 µm	Particulates, < 2.5 µm	kg	4.00E-10	Ecoinvent v2.2
Emisión de partículas > 10 µm	Particulates, > 10 µm	kg	5.60E-09	Ecoinvent v2.2
Emisión de partículas > 2.5 µm y < 10µm	Particulates, > 2.5 µm, and < 10 µm	kg	2.00E-09	Ecoinvent v2.2

Por otro lado, la distancia promedio del vidrio triturado desde la planta de reciclaje hasta la cementera se obtuvo teniendo en cuenta el número y ubicación de plantas de reciclaje de RCD y plantas de cemento dentro de todo el territorio catalán. A partir del Servidor de mapas de la ARC (2015b), se encuentra una distancia aproximada de 15 km desde la planta de reciclaje hasta la cementera (Anexo U).

Así mismo, se emplea como producto evitado la cantidad de arcilla reemplazada por vidrio triturado en la fabricación del clínker igual a 0.18 kg.

Los procesos de entrada y salida del vidrio reciclado se observan en la Tabla 5.6.

Finalmente, la Tabla 5.7 muestra las entradas y salidas empleadas en el proceso de producción del cemento con vidrio reciclado (CVR).

Tabla 5.7 Entradas y salidas del proceso de producción del CVR (kg de cemento)

Entradas conocidas desde la tecnosfera				
Proceso básico	Nombre del proceso en Ecoinvent v2.2	Unidad	Cantidad	Fuente
Infraestructura de la planta de cemento	Cement plant/CH/I U	p	5.36E-11	Ecoinvent v2.2
Clínker B	Clínker, at plant/CH U	kg	9.03E-01	Ecoinvent v2.2
Electricidad	Electricity, medium voltage, at grid/ES U	kWh	2.92E-02	Ecoinvent v2.2
Etilenglicol (aditivo cemento)	Ethylene glycol, at plant/RER U	kg	1.90E-04	Ecoinvent v2.2
Piezas de desgaste (acero)	Steel, low-alloyed, at plant/RER U	kg	5.00E-05	Ecoinvent v2.2
Yeso natural	Gypsum, mineral, at mine	kg	5.00E-02	Ecoinvent v2.2; Ministerio de Industria, Energía y Turismo (2013)
Transporte interno	Transport, lorry 3.5 t-7.5 t, EURO 5/RER U	tkm	3.45E-04	Cementeras españolas consultadas (2011)
Salidas				
Proceso básico	Nombre del proceso en Ecoinvent v2.2	Unidad	Cantidad	Fuente
Calor	Heat, waste	MJ	0.105	Ecoinvent v2.2

Las emisiones al aire debidas a la producción del clínker B son similares a las emisiones de las alternativas de CPO y CYR (clínker A), debido a que el cemento fabricado con vidrio presenta una composición química muy similar al CPO (Jani y Hogland, 2014); sin embargo, algunos autores como Xie y Xi (2002) han encontrado que disminuye la cantidad de C_3S del cemento fabricado con vidrio

reciclado, lo que se traduce en menores emisiones de CO₂ durante la producción de este tipo de clínker. Teniendo en cuenta las diferentes cantidades de C₃S en el cemento con materia prima original y con vidrio reciclado según Jani y Hogland (2014), se considera un 7 % menos de emisiones de CO₂ por kg de clínker fabricado con vidrio reciclado (clínker B) (Tabla 5.2).

Por otra parte, con el uso del vidrio triturado se reduce también la temperatura de fundición, mediante esta modificación se consigue formar una mayor cantidad de fase líquida a una temperatura más baja y, a su vez, una reducción de la zona de máxima temperatura y, por lo tanto, a un menor consumo de combustible.

De acuerdo con Xie y Xi (2002), al adicionar vidrio reciclado al clínker, la fase líquida se alcanza a una temperatura de 950° C y 1250° C, en lugar de 1350° C que es la temperatura que normalmente se alcanza en la producción del clínker. Teniendo en cuenta estos datos y partiendo de la cantidad de vidrio triturado que se emplea en la producción de 1 kg de clínker (0.18 kg), se considera un ahorro de 7 % en el consumo energético. Estos datos están acorde con los objetivos del Proyecto LIFE CLAYGLASS (2013), donde el uso de vidrio por arcilla reduce el consumo energético en un 15 % al emplear 100 % vidrio reciclado. Si para esta alternativa se emplea un 50 % de vidrio triturado, se obtiene un ahorro de 7 %, coincidiendo con el porcentaje hallado anteriormente. Un ahorro de 7 % se traduce en un consumo de 0.053 kWh/kg por clínker producido. Este dato, que corresponde al consumo de electricidad en la producción del clínker, se adiciona en el proceso de clínker existente en la base de datos Ecoinvent v2.2 (Anexo G).

5.1.1.4 Evaluación del impacto del ciclo de vida

❖ Resultados caracterizados y discusión de la evaluación del impacto del ciclo de vida

En este apartado se presentan y se discuten los impactos potenciales en las diferentes categorías de impacto para cada una de las alternativas de producción del cemento y las contribuciones porcentuales de los procesos que conforman cada alternativa de producción.

➤ *Cemento con yeso natural o cemento Pórtland ordinario (CPO)*

La Figura 5-5 muestra los resultados caracterizados de la producción de CPO (CEM I 42.5 R), en el que se emplea yeso natural.

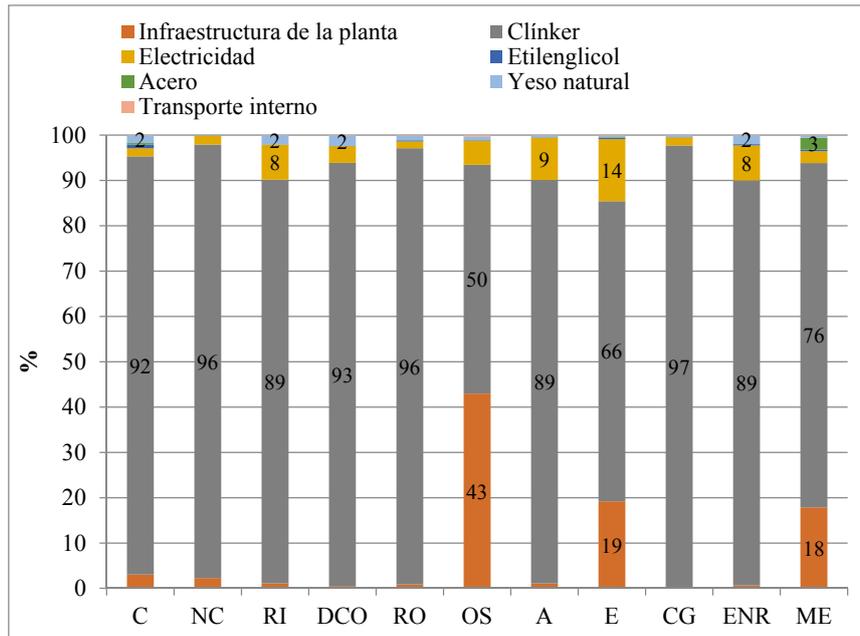


Figura 5-5 Caracterización de los impactos en CPO

En la Figura 5-5, se observa que el proceso de obtención del CPO que más contribuye en los impactos de todas las categorías evaluadas es la obtención del clínker de cemento. Este resultado está acorde con lo encontrado por Li *et al.* (2014).

Los mayores impactos por la producción del clínker se producen en las categorías: calentamiento global (98 %), efectos respiratorios orgánicos (96 %), efectos no carcinogénicos (96 %) y disminución de la capa de ozono (93 %).

Los impactos en calentamiento global y disminución de la capa de ozono son debido a las emisiones de dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) y óxido de nitrógeno (NO_x), que se derivan del proceso de obtención del clínker.

Las altas temperaturas y la atmósfera oxidante requeridas en el proceso de fabricación del cemento, favorecen la formación de óxidos de nitrógeno. Así mismo, las emisiones directas de CO₂ provienen de la descomposición de la piedra caliza y de la combustión del carbón; así como las emisiones indirectas de CO₂ de la generación de electricidad en la central tienen su origen fuera de la planta de cemento.

La formación de dióxido de nitrógeno en altas concentraciones puede llegar a causar efectos negativos en la salud humana y promover la formación de foto-oxidantes químicos.

El mayor impacto presentado en la categoría calentamiento global en la producción del clínker, tal y como se mencionó anteriormente, coincide con lo encontrado por Giama y Papadopoulos (2015) y Jiménez *et al.* (2015). Por otra parte, la extracción de minerales en este proceso se debe

mayoritariamente al consumo de materias primas como la caliza, la arena y la arcilla (Aouad *et al.*, 2012).

Otro de los procesos que presenta mayor impacto en las categorías evaluadas es la infraestructura de la planta de producción de cemento, principalmente en la categoría ocupación del suelo (43 %). Así mismo, el consumo de electricidad genera pequeños impactos en todas las categorías evaluadas, resultando los mayores valores en eutrofización (14 %) y acidificación (9 %), debido, según Juárez *et al.* (2008) y Roy *et al.* (2014), a la emisión de óxido de nitrógeno (NO_x), hidrocarburos y óxidos de azufre (SO₂) durante este proceso.

Los mayores impactos del uso del yeso natural se presentan en las categorías disminución de la capa de ozono, efectos respiratorios inorgánicos y energía no renovable (2 %). Estos impactos son causados principalmente por la emisión de partículas y, también, por el consumo de energía en la trituración del yeso.

➤ **Cemento con yeso reciclado (CYR)**

La Figura 5-6 muestra que en todas las categorías evaluadas los mayores impactos son debidos a la obtención del clínker. Más concretamente, los mayores impactos debido a este proceso se presentan en la categoría calentamiento global (98 %) y efectos respiratorios orgánicos (97 %), y el menor impacto en la categoría ocupación del suelo (40 %). En esta última categoría se presentan ahorros medioambientales por el uso de yeso reciclado (-99 %). Estos ahorros se deben, por una parte, a que se evita la extracción de yeso natural en la mina, y por otra, al reciclaje de los residuos de papel provenientes de las placas de yeso laminado.

El uso de yeso reciclado en el CYR también presenta ahorros en otras categorías, principalmente en eutrofización (-6 %) y efectos carcinogénicos (-4 %), donde se presentan los mayores ahorros cuando se lleva a cabo el proceso de reciclaje del yeso por el menor consumo de combustible. Este menor consumo de diésel, según Juárez *et al.* (2008) y Ferrís y Tortajada *et al.* (2003), se refleja en menores emisiones de óxido de nitrógeno, hidrocarburos y óxido de azufre y en la disminución de emisiones de benceno y dioxinas que causan efectos carcinogénicos en la salud humana. Estos ahorros se deben también al reciclaje de los residuos de papel cuyo proceso está incluido dentro del reciclaje del yeso.

Por otro lado, el proceso de electricidad presenta los mayores impactos en la categoría eutrofización (14 %) y acidificación (9 %) debido a la emisión de óxido de nitrógeno (NO_x), hidrocarburos y óxidos de azufre (SO₂), principalmente en las fases de minería y combustión según lo reportado por Juárez *et al.* (2008) y la APPA (2015). Así mismo, el mayor impacto de la infraestructura de la planta de reciclaje se presenta en la categoría ocupación del suelo (34%).

El transporte interno presenta poca influencia en los impactos finales del proceso de obtención del yeso, lo mismo que el uso de acero (piezas de desgaste de las maquinarias) y del etilenglicol (aditivo).

Por último, al evitar la producción de yeso natural se obtienen ahorros en las categorías evaluadas, principalmente en disminución de la capa de ozono y energía no renovable (-2 %), al evitar un mayor consumo energético en la obtención de yeso natural.

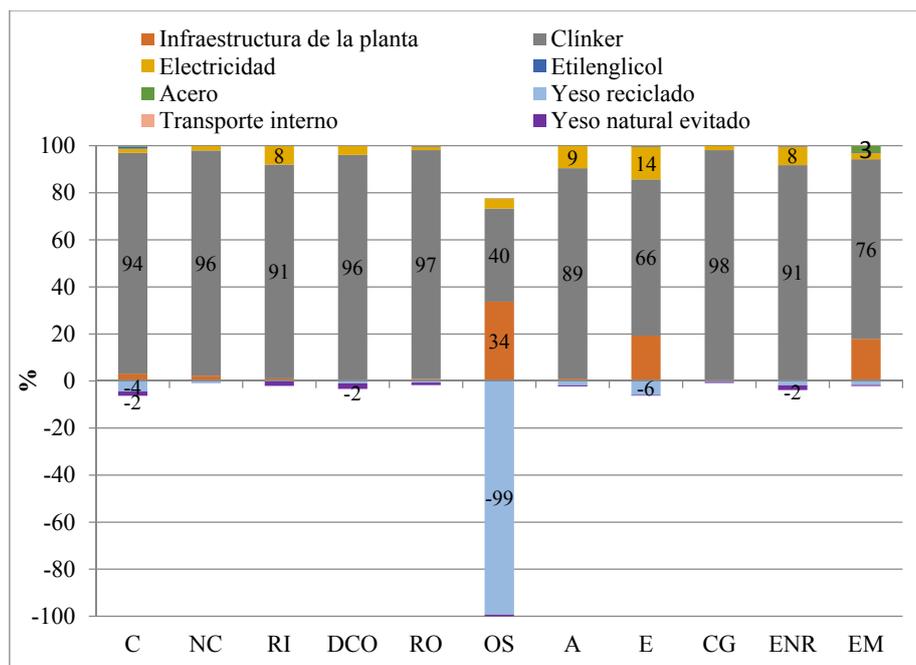


Figura 5-6 Resultados de caracterización de impactos del CYR

➤ **Cemento con vidrio reciclado (CVR)**

Esta alternativa de producción de cemento se diferencia de la alternativa de CPO, en que parte de la arcilla es reemplazada por vidrio triturado reciclado; por lo tanto, cambia la composición del clínker, pero los demás factores permanecen constantes. Sin embargo, el impacto del clínker con vidrio reciclado no cambia significativamente y continúa siendo el proceso que mayor impacto presenta en todas las categorías evaluadas. El mayor impacto de este se presenta —igual que en las alternativas anteriores— en la categoría calentamiento global (97 %) y el menor impacto en la categoría ocupación del suelo (50 %) (Figura 5-7). La infraestructura de la planta de producción de cemento presenta, al igual que en las otras alternativas de producción, los mayores impactos en la categoría ocupación del suelo (43 %).

Por último, los procesos de electricidad, acero y etilenglicol presentan impactos en las alternativas evaluadas en una proporción similar a la presentada en el CPO.

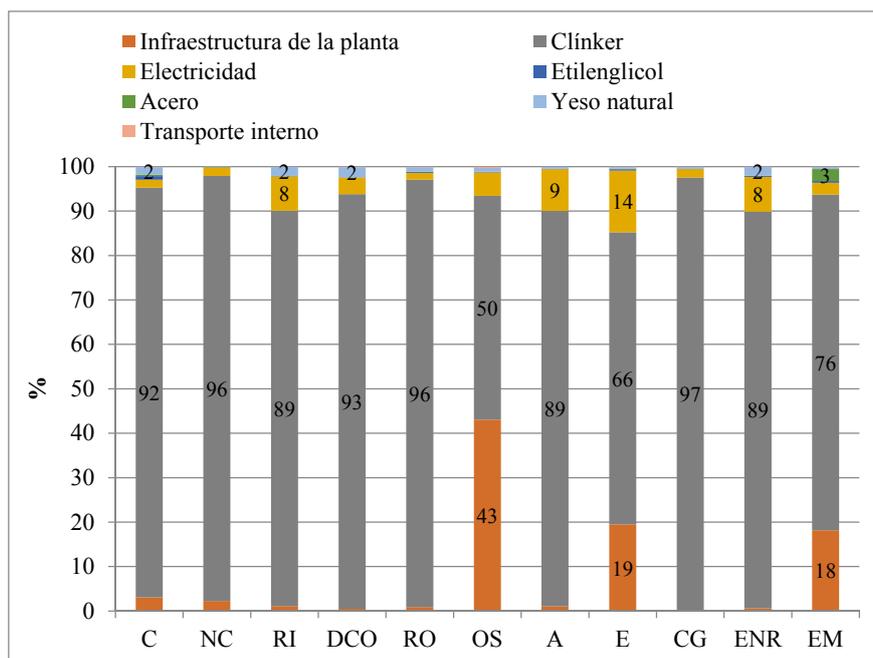


Figura 5-7 Resultados caracterizados de la producción de CVR

En la Tabla 5.8 se muestran los resultados de caracterización de cada una de las alternativas de producción de cemento.

Tabla 5.8 Resultados de caracterización de las alternativas de producción de cemento (kg de cemento)

Categorías	Unidad	CPO	CYR	CVR
C	kg C ₂ H ₃ Cl eq	2.00E-03	1.85E-03	1.99E-03
NC	kg C ₂ H ₃ Cl eq	8.51E-03	8.42E-03	8.50E-03
RI	kg PM 2.5 eq	2.56E-04	2.45E-04	2.53E-04
DCO	kg CFC-11 eq	4.41E-08	2.27E-08	2.39E-08
RO	kg C ₂ H ₄ eq	9.72E-05	9.45E-05	9.62E-05
OS	m ² org.arable	1.01E-03	-2.86E-04	1.009E-03
A	kg SO ₂ eq	1.44E-03	1.40E-03	1.43E-03
E	kg PO ₄ p-lim	1.93E-05	1.80E-05	1.90E-05
CG	kg CO ₂ eq	8.26E-01	8.15E-01	7.72E-01
ENR	MJ primaria	3.65E+00	3.45E+00	3.61E+00
EM	MJ surplus	1.68E-03	1.63E-03	1.65E-03

➤ *Comparación entre alternativas de producción primaria y secundaria*

Al comparar la producción primaria y secundaria del cemento, se observa en la Figura 5-8 que el uso de yeso reciclado en la producción de cemento presenta menores impactos en casi todas las categorías, comparado con el cemento fabricado con yeso natural o con vidrio triturado.

El uso de yeso reciclado en el cemento ocasiona ahorros en la categoría ocupación del suelo (-28 %), debido a los impactos evitados por la infraestructura de la mina de yeso —al no ser necesario extraer el yeso natural de la cantera— y a los ahorros producidos por el reciclaje del papel proveniente de las placas de yeso laminado. Según López (2007) y Cheung y Pachisia (2015), con el reciclaje del papel se reducen los impactos ocasionados en el uso y transformación del suelo.

También en las categorías efectos carcinogénicos, eutrofización y energía no renovable los impactos son menores en el cemento con yeso reciclado (8 %, 7 % y 6 % respectivamente), con respecto a la producción de cemento con yeso natural y con vidrio reciclado, debido al menor consumo de gas natural y diésel.

Los menores impactos del uso del yeso reciclado en el cemento se deben, en parte, a que el reciclaje del yeso incluye también las ventajas del reciclaje de los residuos de papel, que provienen de las placas de yeso laminado.

Por otro lado, se observa en la Figura 5-8 que el cemento con vidrio triturado disminuye los impactos en todas las categorías comparado con el CPO. El menor impacto por la producción de este tipo de cemento se presenta en la categoría calentamiento global, comparado con la producción de cemento a partir de yeso natural y yeso reciclado.

El impacto de CVR es un 7 % menor en esta categoría con respecto al impacto del CPO y un 5 % menor con respecto al CYR. Esto se debe a que con el uso de vidrio reciclado se modifica el factor clínker, lo que reduce el impacto, ya que, al reemplazar parte de la arcilla por vidrio reciclado, disminuyen las emisiones de CO₂ que contribuyen al calentamiento global (Jani y Hogland, 2014; Shi y Zheng, 2007). Por lo tanto, los menores impactos en el proceso de obtención clínker conllevan a una reducción de impactos en la categoría calentamiento global cuando se produce cemento con vidrio reciclado.

Por otra parte, los menores impactos —aunque poco significativos en la producción de cemento con vidrio reciclado con respecto al cemento Pórtland ordinario en las categorías: eutrofización, efectos respiratorios orgánicos e inorgánicos y acidificación— se debe a una menor emisión de NO_x y SO₂. Estos resultados están acordes con los encontrados por Xie y Xi (2002) y Shi y Zheng (2007). La leve disminución de impactos en las categorías ocupación del suelo y extracción de mineral en la producción de cemento con vidrio reciclado en relación al CPO se debe a los ahorros por el menor uso de materias primas, así como también a la extensión de la vida útil del vertedero (Shi y Zheng, 2007).

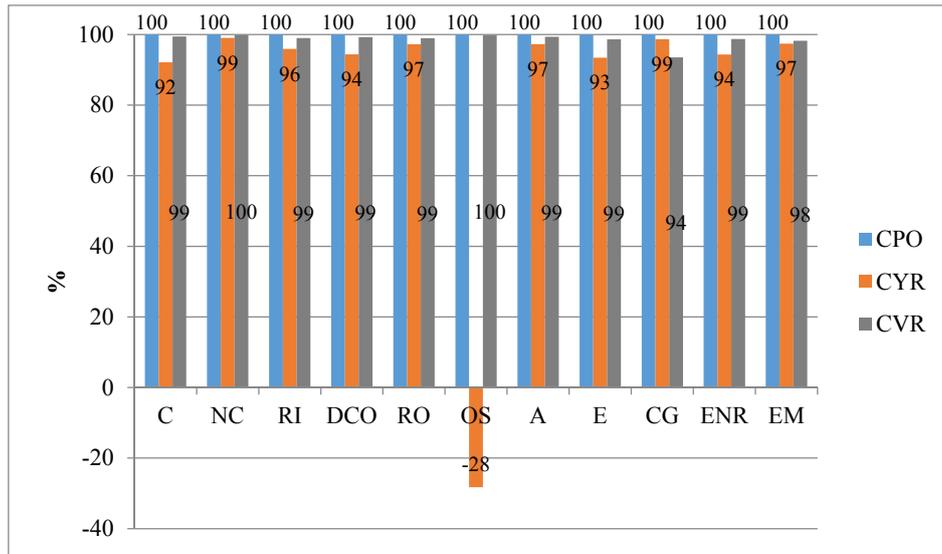


Figura 5-8 Producción primaria y secundaria del cemento

Se observa también un menor impacto en la categoría energía no renovable (99 %) por el uso de vidrio reciclado en el cemento con respecto a la producción de cemento con yeso natural. El uso de vidrio triturado en la producción del clínker reduce el consumo energético de este proceso, en comparación con el uso de arcilla natural (Xie y Xi, 2002; Proyecto LIFE CLAYGLASS, 2013).

En la Figura 5-8 también se observa que la producción de cemento con yeso natural, presenta los mayores impactos en todas las categorías evaluadas.

5.1.1.5 Interpretación de la evaluación del impacto del ciclo de vida

Todas las alternativas de producción de cemento coinciden en presentar los mayores impactos en el proceso de obtención del clínker. Los mayores impactos debido a este proceso se presentan en la categoría calentamiento global, y los menores en la categoría ocupación del suelo. Otro de los impactos comunes en todas las alternativas de producción de cemento ocurre en la categoría ocupación del suelo debido a la infraestructura de la planta de cemento.

El proceso de electricidad influye en mayor medida en las categorías eutrofización y acidificación; sin embargo, el transporte interno presenta poca influencia en los impactos finales de todas las alternativas de producción.

La producción de cemento con yeso natural resulta ser la que tiene los mayores impactos en todas las categorías evaluadas. No obstante, la obtención de cemento a partir de residuos de construcción como el yeso y el vidrio contribuyen a una leve disminución en los impactos finales del cemento. La alternativa

de producción de cemento reciclado que presenta mayores ventajas en todas las categorías de impacto evaluadas, menos en calentamiento global, es el cemento con yeso reciclado (CYR). Estos menores impactos se deben, en parte, a la influencia positiva del reciclaje de los residuos de papel proveniente de las placas de yeso laminado en el reciclaje del yeso. Los mayores ahorros se presentan en la categoría ocupación del suelo, debido a que no se extrae el yeso natural de la cantera, a los impactos evitados por la infraestructura de la mina de yeso, y a los ahorros producidos por el reciclaje del papel proveniente de las placas de yeso laminado.

El uso de vidrio reciclado en el cemento como reemplazo de parte de la arcilla también disminuye los impactos en todas las categorías, comparado con el CPO. En la categoría calentamiento global presenta los menores impactos, no sólo con respecto al CPO sino también con respecto al CYR. Este menor impacto se debe a que con el uso de vidrio reciclado se modifica el factor clínker y, por lo tanto, se reducen las emisiones de CO₂.

En general, los resultados de las alternativas CPO y CVR son parecidos, debido a que en este caso se emplea el mismo tipo de yeso (yeso natural), lo que cambia es la composición del clínker. Los resultados de la alternativa CYR difieren de las otras dos (CPO y CVR), debido a que con el empleo del yeso reciclado se modifican los resultados, principalmente en la categoría ocupación del suelo.

5.1.2 Criterio económico

Para conocer el coste de referencia de cada alternativa se tiene en cuenta la proporción de cada material dentro del producto final y el coste de ejecución de cada material por separado. Se toma como base el coste de cada material o producto que aparece inventariado en la base de datos (BEDEC, 2015) y se tienen en cuenta también los costes suministrados por las empresas consultadas.

5.1.2.1 Resultados y discusión del criterio económico

Como en los diferentes procesos de producción del cemento, los residuos sólidos generados en la producción de clínker son similares (residuos inertes y residuos sólidos asimilables a residuos sólidos municipales); además, como se les aplica el mismo sistema de tratamiento a las alternativas y a las mismas distancias de transporte, el coste de gestión de los residuos resulta ser similar en todas.

Para el cálculo del coste de gestión se siguió la Ecuación 3-4 explicada anteriormente en la propuesta metodológica.

El coste de transporte se halló de acuerdo a la Ecuación 3-2, empleando un trayecto de 21 km hasta el vertedero (2.96 E-05 €/t). La tasa aplicada por el vertido de residuos municipales fue de 19.10 €/t según la Ley 3/2015, resultando un tasa de 8.32 E-04 €/t de cemento producido.

Para el coste de gestión de los residuos inertes se tuvo en cuenta sólo el coste del transporte hasta el vertedero (Ecuación 3-2), debido a la moratoria del canon sobre la deposición controlada de los residuos de la construcción (Ley 2/2014). El coste debido al transporte de los residuos inertes fue de 2.40 E-05 €/t de cemento.

El coste total de gestión obtenido fue de 8.85 E-04 €/t de cemento —el cual al resultar mínimo— se consideró despreciable en todas las alternativas.

❖ **Cemento con yeso natural o cemento Pórtland ordinario (CPO)**

Para el coste de ejecución del CPO (CEM I 42.5 R) se tomó como base el coste del BEDEC (2015), equivalente a 118.55 €/t. Este coste fue contrastado por el coste dado por las empresas consultadas y fuentes secundarias.

❖ **Cemento con yeso reciclado (CYR)**

Para conocer el coste del cemento con yeso reciclado, se partió del coste de producción del CPO (118.55 €/t).

Teniendo en cuenta que el coste unitario debido a las materias primas, según García (2011) equivale aproximadamente a un 45 % del coste de la tonelada total de cemento, se emplea 53.34 €/t como coste base correspondiente a las materias primas. Por tanto, sobre este valor se calcula el coste de cada material, teniendo en cuenta el coste de ejecución de cada uno de ellos y su proporción dentro del cemento. Finalmente, al valor resultante se le suma 65.20 €/t, que corresponde al coste debido al resto de factores incluidos dentro el coste de producción total.

Como en la producción de CPO el yeso empleado para ser mezclado con el clínker no es el mismo yeso comercial calcinado ($\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2} \text{H}_2\text{O}$), sino que se emplea el yeso natural bi-hidrato triturado ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), al ser éste menos tratado, es más económico. De acuerdo con la estadística minera de España (Ministerio de Industria Energía y Turismo, 2015) y con las empresas consultadas, el coste del yeso natural sin calcinar crudo empleado para el cemento es, en promedio, de 15.06 €/t, y el coste del proceso de reciclaje del yeso sin calcinar es de 9.79 €/t, según WRAP (2008) y Jiménez (2015). Si dentro del coste del reciclaje se incluye el coste de la gestión del residuo y el coste de transporte según la

Ecuación 3-4, se obtiene un coste total del yeso reciclado que corresponde en este caso al YR (50 km) rp de 6.69 €/t.

Tal y como se mencionó, el coste debido a las materias primas es de 53.34 €/t, si a este valor se resta el coste correspondiente al yeso natural dentro del cemento que incluye el transporte (0.82 €/t de cemento)... y se suma el coste del yeso reciclado dentro del cemento con transporte incluido (0.36 €/t de cemento), se obtiene un total de 52.88 €/t. Al sumar a este valor el coste debido al resto de factores que forman parte del coste total (65.20 €/t), se obtiene finalmente para esta alternativa un coste aproximado de 118.08 €/t de cemento.

❖ **Cemento con vidrio reciclado (CVR)**

El coste del CVR se halló de modo similar a la alternativa de CYR; es decir, teniendo en cuenta el coste y la proporción de la arcilla y del vidrio reciclado en la fabricación de este cemento. Al coste debido a las materias primas (53.34 €/t), hay que restar el coste de la arcilla que es reemplazada por el vidrio triturado y sumarle el coste de la cantidad de vidrio reciclado empleado.

Partiendo del hecho de que la arcilla roja empleada en el CPO es poco procesada, el coste promedio según las empresas consultadas es de 9.28 €/t, incluyendo el transporte (0.3 €/t de arcilla). De este modo, el coste de la arcilla dentro de 1 t de cemento (0.32 t de arcilla) es igual a 3 €/t de cemento.

Como en esta alternativa se reemplaza alrededor de un 50 % de la arcilla total empleada por vidrio triturado, se halla el coste de la nueva cantidad de arcilla y vidrio triturado empleado en la fabricación del cemento. De este modo, el coste de 0.15 t de arcilla en 1 t de cemento es igual a 1.41 €/t de cemento y el coste de 0.17 t de vidrio triturado dentro del cemento equivalen a 18.04 €/t de cemento.

El coste del vidrio reciclado se extrajo de la información obtenida por las empresas consultadas, según las cuales el coste de este tipo de vidrio, de una granulometría muy fina (75 μm), varía entre 80-130 €/t (años 2013-2015); por ello se escogió un coste promedio de 105 €/t. A este coste se suma el transporte (15 km) igual a 0.5 €/t, resultando así un total de 105.05 €/t de vidrio triturado.

Para obtener el coste de esta alternativa, se halla primero el coste de las materias primas dentro el cemento (50.34 €/t de cemento), sin incluir la arcilla, y a éste se le suma el coste de la nueva cantidad de arcilla y del vidrio triturado; haciendo todo esto, se obtiene un total de 69.79 €/t de cemento. A este valor se le adiciona el coste que se deriva del resto de factores que influyen en el coste total del cemento. En este caso la cantidad de vidrio triturado empleado en esta alternativa conlleva a un ahorro energético de aproximadamente 7 % (Xie y Xi 2002). De acuerdo con García (2011), del resto de factores que influyen en el coste total del cemento (65.20 €/t), un 50 % aproximadamente corresponde a consumo

energético debido al clínker; y si a éste se le resta el ahorro por energía, se obtiene un coste aproximado de 62.92 €/t. Procediendo así, para esta alternativa un coste final aproximado de 132.71 €/t.

En la Tabla 5.9 se pueden observar los costes de las diferentes alternativas de producción de cemento.

Tabla 5.9 Coste de referencia de las diferentes alternativas de producción de cemento

Material	A1 (CPO)	A2 (CYR)	A3 (CVR)
Cemento	118.55 €/t	118.08 €/t	132.71 €/t

El coste del CYR resulta menor que el del CPO, ya que, aunque se compara igual proporción de yeso, el coste del yeso reciclado es menor que el del yeso natural. El coste y la cantidad del resto de materias primas permanecen constantes en ambos sistemas de producción. Estos resultados coinciden con los datos del ensayo WRAP (2008) en el que se calcula el coste anual del producto de yeso en la industria del cemento, cuando se utiliza ya sea yeso natural o bien yeso reciclado.

El CVR resulta con mayor coste (3.17 %) con respecto al CPO, ya que, aunque emplean el mismo tipo de yeso —por incluir vidrio triturado—, el precio total del cemento aumenta, ya que el vidrio triturado presenta un coste un poco mayor con respecto al de la arcilla. El precio de transporte de ambas materias primas presenta poca influencia en el coste total de la arcilla y del vidrio triturado. Estos resultados se encuentran en línea con los encontrados por Hidalgo (2013) en un estudio suyo en el que emplea vidrio triturado reciclado para la fabricación de adoquines de hormigón. Sin embargo Shi y Zheng (2007) mencionan que los beneficios económicos del uso del vidrio reciclado en el cemento y en el hormigón pueden llegar a resultar muy significativos, dependiendo de las tasas impuestas por el vertido de los residuos en el país.

5.2 Fase 5: Definición de los indicadores

Para evaluar las alternativas en términos de criterios se siguió el mismo procedimiento que en el apartado 3.2.5, de este modo se halló la carga normalizada para cada una de ellas.

Los resultados de la carga normalizada de cada alternativa se muestran en la Tabla 5.10.

Tabla 5.10 Carga normalizada y valor del criterio económico para cada una de las alternativas del cemento

Alternativas		F1	F2	F3 Económico
		(normalizada)	(normalizada)	€/t
A1	CPO	1.00	0.98	118.55
A2	CYR	0.00	0.11	118.08
A3	CVR	0.79	0.64	132.71

5.3 Fase 6: Clasificación y elección de las alternativas. Análisis y discusión de resultados

5.3.1 Aplicación del método multicriterio y elección de las alternativas

Para la clasificación y la elección de las alternativas, se implementó el método multicriterio propuesto correspondiente al método VIKOR.

Para la aplicación de dicho método se siguieron unas series de ecuaciones, desde la Ecuación 3-7 hasta la Ecuación 3-12. De este modo se encontraron los valores Q, S y R, los cuales fueron ordenados de menor a mayor, teniendo en cuenta que la alternativa más óptima es la más cercana a cero y la peor opción la más cercana a uno (Tabla 5.11).

Tabla 5.11 Lista de valores S, R y Q calculados en la producción del cemento

Clasificación de los criterios	Alternativas	Qj	Sj	Rj
Igual importancia	A2 (CYR)	0.00	0.00	0.00
	A1 (CPO)	0.92	0.67	0.33
	A3 (CVR)	1.00	0.79	0.33
Ventaja medioambiental	A2 (CYR)	0.00	0.00	0.00
	A3 (CVR)	0.72	0.76	0.32
	A1 (CPO)	1.00	0.81	0.40
Ventaja económica	A2 (CYR)	0.00	0.00	0.00
	A1 (CPO)	0.55	0.52	0.25
	A3 (CVR)	1.00	0.85	0.50

Para la elección de la opción óptima se tuvo en cuenta la Ecuación 3-10 y la Ecuación 3-11 y se encontró que la diferencia entre la alternativa en primera y segunda posición de Q para todos los criterios evaluados (ventaja ambiental o económica o igual importancia para ambos) es mayor que 0.25; además,

como la alternativa de CYR sigue estando en primera posición en las listas S y R, se escoge a esta como una única opción óptima (Tabla 5.11).

Si se le da la misma importancia al criterio medioambiental que al económico, se encuentra en la lista de Q que el CYR presenta una ventaja de 92 % con respecto al CPO y una ventaja de 100 % con respecto al CVR. Si se le da un mayor peso al criterio medioambiental, la alternativa en segunda posición es la alternativa de CVR y la ventaja del CYR frente al CVR en este criterio es de 72 %.

Al considerar más importante el criterio económico, la alternativa en segunda posición es la alternativa CPO y como última opción la alternativa CVR. La ventaja del CYR con respecto al CPO es de 55 % y con respecto a la alternativa de CVR de 100 %.

Estos resultados se deben a las ventajas medioambientales del empleo de vidrio reciclado en el cemento con respecto a la producción de CPO, pero también a un mayor coste económico al producir cemento con vidrio reciclado con respecto a las otras alternativas de producción de cemento.

La jerarquía de clasificación de las alternativas permanece constante en las listas S y R con respecto a los resultados de Q en las tres clasificaciones de los criterios evaluados.

Partiendo de que la mejor alternativa de producción de cemento es el CYR, se calculan los ahorros ambientales por la producción de este tipo de cemento en lugar de CPO. Para esto se tiene en cuenta que el consumo de cemento en la producción de hormigón preparado en España en los últimos 3 años (2012-2014) según ANEFHOP (2015) y OFICEMEN (2014) es de $5.07E+06$ toneladas.

Para producir una tonelada de CPO se necesitan 0.05 toneladas de yeso; según esto, las $5.07E+06$ toneladas de cemento requerirán $2.53E+05$ toneladas de yeso. De acuerdo con la FERCD (2015) el promedio de generación de RCD en España en los últimos 5 años (2009-2013) corresponde a $1.55E+08$ t/año y, si se toma como referencia que dentro de la corriente de RCD generados, el yeso corresponde a 0.20 % del total; de este modo, se generarían alrededor de $3.09E+05$ t de residuos de yeso al año, lo cual alcanzaría para abastecer la producción anual de cemento con yeso reciclado. Cabe resaltar que esta sería la condición más desfavorable, ya que el 0.20 % corresponde a la cantidad de residuos dentro de la mezcla de RCD que llega mezclado a las plantas sin considerar los grandes volúmenes generados cuando se efectúa la demolición selectiva proveniente de las placas de yeso laminado.

A modo de ejemplo, si el 50 % de todo el cemento que se emplea en la producción de hormigón preparado en España equivalente a $2.53E+06$ t/año, se produjera con yeso reciclado, se encontrarían grandes ahorros en cada una de las categorías de impacto en lugar de producir CPO (Tabla 5.12).

En la Tabla 5.12 se destaca la simulación de los ahorros anuales producidos en las categorías calentamiento global, energía no renovable, ocupación del suelo, efectos carcinogénicos y no carcinogénicos.

Así mismo, la producción de un 50 % de cemento con yeso reciclado en España, en lugar de CPO podría producir ahorros de hasta 1.19E+06 €/año.

Tabla 5.12 Simulación de los ahorros anuales en las categorías por la producción de un 50 % del cemento en España con yeso reciclado

Categorías	Unidad	Ahorros por CYR
C	kg C ₂ H ₃ Cl eq	3.80E+05
NC	kg C ₂ H ₃ Cl eq	2.28E+05
RI	kg PM 2.5 eq	2.79E+04
DCO	kg CFC-11 eq	3.55E+00
RO	kg C ₂ H ₄ eq	6.84E+03
OS	m ² org.arable	3.28E+06
A	kg SO ₂ eq	1.01E+05
E	kg PO ₄ p-lim	3.29E+03
CG	kg CO ₂ eq	2.79E+07
ENR	MJ primaria	5.07E+08
EM	MJ surplus	1.27E+05

Aunque la alternativa de producción de cemento con vidrio reciclado no es elegida como mejor opción de producción de cemento teniendo en cuenta el enfoque multicriterio, es importante destacar que, específicamente en la categoría calentamiento global, esta presenta un menor impacto con respecto a las otras alternativas de producción de cemento. Por ello, aunque la adquisición de la materia prima es más costosa, se pueden producir grandes ahorros en la categoría calentamiento global. Por ello, merece destacar los ahorros presentados por los kg CO₂ eq evitados al emplear vidrio reciclado en el cemento.

Si además de cemento con yeso reciclado se produjera, por ejemplo, un 10 % del cemento en España con vidrio triturado, aunque la adquisición de la materia prima fuera más costosa, se producirían ahorros en la categoría calentamiento global de 2.74E+07 CO₂ eq/año y ahorros en energía no renovable de 2.03E+07 MJ/año con respecto a la producción de CPO.

De acuerdo con el apartado 5.1.1.3 (CVR), la cantidad de vidrio empleado en 1 tonelada de cemento es 0.17 t, entonces para producir 506876 t de cemento reciclado se necesitarían 86169 t de vidrio. Como la cantidad de vidrio dentro de la corriente de RCD en España es de 0.5 %, es decir 772980 toneladas, esta cantidad alcanzaría para abastecer la cantidad de cemento reciclado producido.

5.4 Fase 7: Conclusiones

El cemento con yeso natural presenta los mayores impactos medioambientales en todas las categorías evaluadas. Sin embargo, el cemento con yeso reciclado (CYR) resulta con menores impactos en todas las categorías, menos en calentamiento global.

La alternativa de producción de cemento con vidrio reciclado ocasiona menores impactos en la categoría calentamiento global con respecto a las demás alternativas de producción de cemento; no obstante, en el resto de categorías evaluadas se presentan mayores impactos comparados con la producción de CYR.

Así mismo, la alternativa de producción de cemento que resulta en un menor coste económico es el CYR y la que presenta mayor coste es la alternativa de producción de cemento con vidrio reciclado (CVR).

La alternativa escogida como mejor opción después de aplicar la propuesta metodológica y, al darle igual importancia al criterio ambiental como económico... o mayor peso al criterio económico o ambiental, es la alternativa de producción de cemento con yeso reciclado (CYR).

La alternativa en segunda posición, cuando se le da mayor importancia al criterio medioambiental, es la producción de cemento con vidrio reciclado (CVR); sin embargo, ésta pasa a ser la última opción en el caso en que se le dé mayor importancia al criterio económico o igual importancia tanto al criterio ambiental como al económico.

6 Aplicación de la propuesta metodológica a los áridos

6.1 Fase 4: Evaluación ambiental y económica

6.1.1 Criterio ambiental. Metodología de análisis de ciclo de vida

6.1.1.1 Definición de objetivos y alcance

❖ Objetivo

El objetivo de este análisis de ciclo de vida consiste en evaluar los impactos medioambientales de la producción primaria (obtención de áridos de cantera) y producción secundaria (obtención de los áridos por medio del reciclaje de los RCD).

❖ Alcance

En cuanto al límite geográfico el estudio se sitúa en España (Cataluña) y tanto en la producción primaria como secundaria, se evalúa el funcionamiento de la planta (bien sea de producción primaria o de reciclaje) durante un año.

➤ Producción primaria de los áridos

Las etapas en la obtención del árido natural se muestran a continuación:

- Extracción del árido. La extracción del árido en cantera se efectúa mediante explosivos.
- Trituración del árido. Se lleva a cabo mediante el uso de trituradoras hasta obtener un tamaño entre 4 mm y 32 mm. Incluye el consumo de combustible y las emisiones al aire.

En el proceso de obtención del árido se tiene en cuenta el transporte interno en la mina de producción de áridos. No se tiene en cuenta el transporte externo, ya que por lo general las minas de extracción se sitúan muy cerca de la planta de trituración de áridos. En el inventario se detallan cada uno de estos procesos.

En la Figura 6-1 se muestran los límites del sistema en la obtención del árido natural.

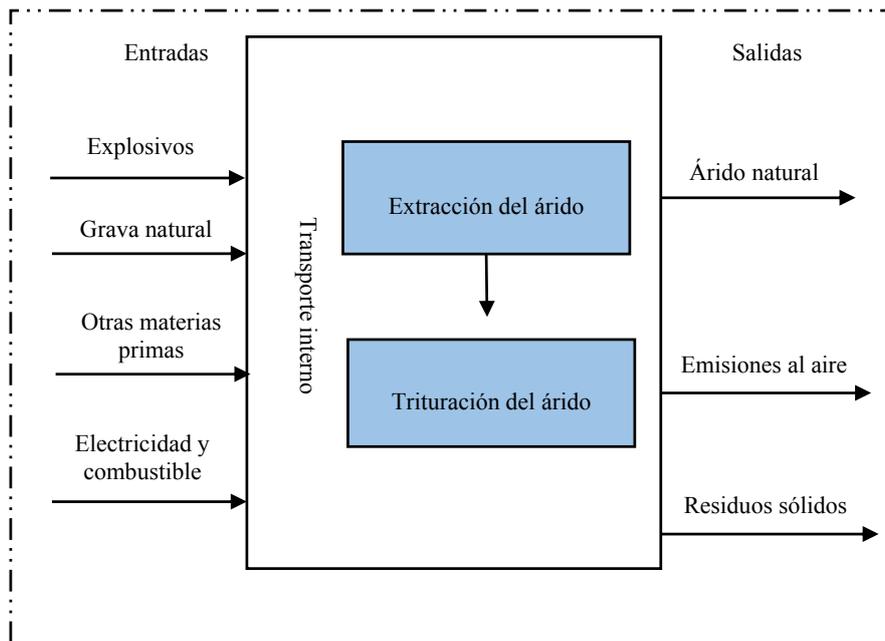


Figura 6-1 Límites del sistema en la obtención del árido natural

➤ **Producción secundaria**

Los procesos generales tenidos en cuenta en la producción secundaria de los áridos dependen de si el reciclaje se efectúa en una planta de reciclaje fija o móvil. Si el reciclaje se efectúa en una planta fija, se tiene en cuenta toda la infraestructura de la planta de reciclaje. En cambio, si el reciclaje se lleva a cabo en una planta móvil, se tiene en cuenta sólo la infraestructura de la maquinaria móvil.

Por otra parte, si el reciclaje se efectúa en planta fija se incluye el proceso de transporte del residuo desde el sitio de generación hasta la planta de reciclaje. Y en el caso del reciclaje en obra, se tiene en cuenta el transporte de la maquinaria móvil al sitio de construcción.

A continuación se exponen las etapas seguidas en el proceso de reciclaje de los áridos en una planta fija:

- Recolección y transporte del residuo. Se tiene en cuenta la distancia de transporte del residuo desde el sitio de generación hasta la planta de reciclaje. Se parte del supuesto de que los residuos son

separados y clasificados en obra. Se tiene en cuenta como trayecto 7 km, según el apartado 3.3.1.2 y Anexo R.

- Trituración y clasificación del árido en planta de reciclaje. Para obtener árido reciclado de un tamaño entre 4 mm y 32 mm se lleva a cabo la trituración por medio de trituradoras de impacto.

Los límites del sistema del reciclaje del árido en una planta fija se muestran en la Figura 6-2.

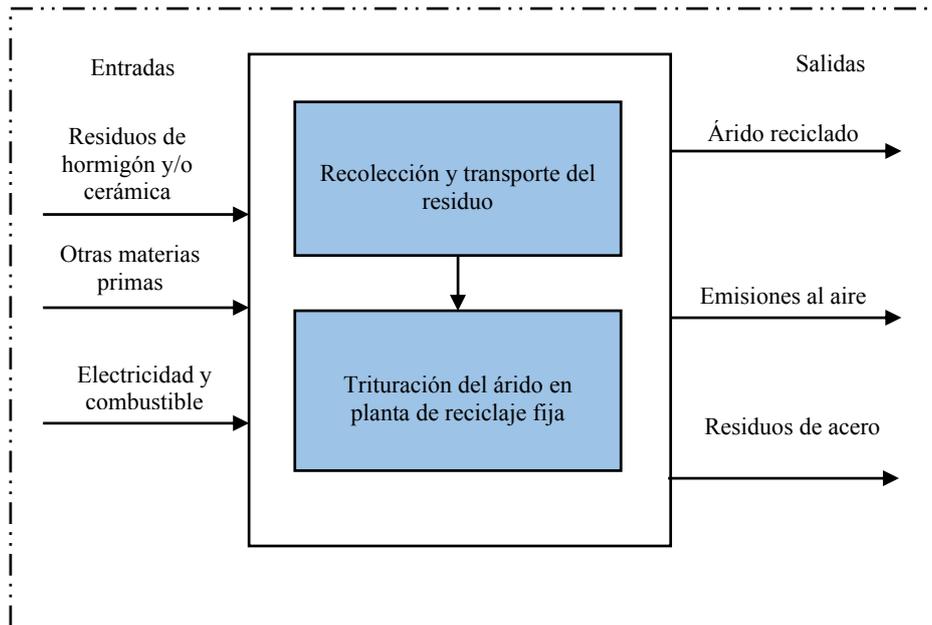


Figura 6-2 Límites del sistema en árido reciclado (planta fija)

Las etapas seguidas durante el reciclaje en la misma obra de construcción son las siguientes:

- Transporte de las plantas móviles al sitio de construcción. Consiste en el transporte de una trituradora primaria, así como de otra trituradora secundaria y terciaria. El transporte de cada una de estas máquinas se efectúa en un tráiler convencional (con capacidad de carga de 32 t). Se considera una distancia de 14 km ida y vuelta hasta el centro de Barcelona, que es donde se generan los residuos, ya que normalmente la misma planta de reciclaje es la que suministra la planta móvil.
- Trituración y clasificación del árido en planta móvil. Por medio de este proceso se obtiene un árido de un tamaño entre 4 mm y 32 mm.

Los límites del sistema en una planta móvil se muestran en la Figura 6-3.

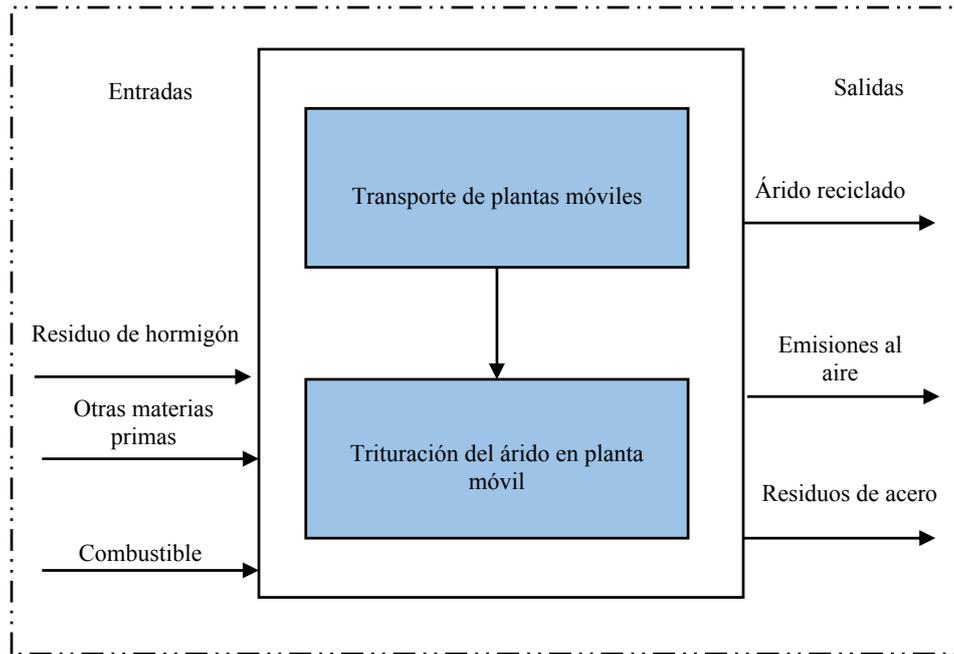


Figura 6-3 Límites del sistema del reciclaje del árido en una planta móvil

❖ **Unidad funcional**

La unidad funcional es definida como 1 kg de árido.

6.1.1.2 Descripción de las alternativas propuestas

Se evalúan las diferentes alternativas escogidas en el apartado 3.3.2.1. Una primera alternativa se refiere a la obtención del árido natural en cantera. Las demás alternativas de obtención del árido reciclado están relacionadas con la forma en que se encuentran los residuos antes de ser reciclados (hormigón separado u hormigón mezclado con cerámica, el cual da origen al árido mixto). También dependen del lugar donde se lleva a cabo el reciclaje (en planta o en el sitio de construcción). Estas alternativas se muestran a continuación:

A1= Árido natural (AN)

A2= Árido de hormigón en planta (AHp)

A3=Árido de hormigón en obra (AHo)

A4= Árido mixto en planta (AMp)

6.1.1.3 *Análisis del inventario*

Los datos necesarios para llevar a cabo el estudio de los impactos fueron recolectados a través de información primaria por medio de la consulta a diferentes organismos y asociaciones de España como el Ministerio de Industria, Energía y Turismo, la Asociación de Fabricantes de Áridos de la Rioja (AFA) y el Gremi d'Àrids de Catalunya. También se estableció consulta directa con empresas fabricantes de materiales de construcción en España y visitas a plantas de reciclaje de residuos de construcción y demolición en Cataluña, pertenecientes a Gestora de Runes de Cataluña, las cuales tratan un porcentaje muy elevado de residuos. De este modo, se consultaron de forma directa a empresas, organismos y plantas de reciclaje, siendo 17 en total para el caso del árido.

La información obtenida de forma directa está relacionada con: el proceso de producción y de reciclaje; la capacidad de la planta de reciclaje o planta de producción; el tipo y la cantidad de explosivos empleados en la extracción del árido; el tipo de maquinaria empleada; el consumo de electricidad y gasoil; el transporte interno para el caso del árido natural; la distancia de transporte del residuo hasta el sitio de gestión y el tipo y la cantidad de residuos generados en el proceso de reciclaje.

Los datos obtenidos de fuentes primarias fueron completados y/o confrontados con la base de datos Ecoinvent v2.2 y con otras fuentes secundarias.

Para todos los casos se considera una maquinaria de trituración que tiene un tiempo de vida útil de 50 años y una capacidad de producción de 400000 t/año. Se estima para efecto de comparar los diferentes sistemas de obtención del árido un tiempo de funcionamiento de la maquinaria de 1 año.

❖ **Árido natural (AN)**

Se emplea como base el proceso de Ecoinvent v2.2, llamado "*Gravel, crushed at mine/CH U*", pero se crea un nuevo proceso en el que la extracción de los áridos, en vez de maquinaria, se lleva a cabo con explosivos, que es la forma más habitual en España. En este nuevo proceso se tienen las siguientes entradas:

- Consumo de materia prima que corresponde a la grava natural de cantera.
- Infraestructura de la mina, la cual incluye oficinas, talleres y parte pavimentada. Se considera una producción anual de 400000 toneladas al año y un tiempo de vida útil de 50 años. Se emplea como base la infraestructura de grava y arena que se encuentra inventariada en Ecoinvent v2.2.
- Proceso de explosivos para la extracción de la grava, que incluye el uso de explosivos Tovex y las emisiones al aire derivadas de su uso.

La cantidad de explosivo empleada se extrajo del promedio de datos suministrados por varios organismos nacionales: Ministerio de Industria, Energía y Turismo (2013) ($1.82E-04$ kg/kg de grava), AFA (2010) ($1.17E-04$ kg/kg de grava), Gremi d'Àrids de Catalunya (2013) ($1.22E-04$ kg/kg de grava) y empresas o graveras nacionales (2009-2013) ($1.24E-04$ kg/kg de grava), con capacidad de producción similar a la mina considerada en la base de datos Ecoinvent v2.2.

- Maquinaria para trituración y cinta transportadora. La infraestructura de la maquinaria se basa en una trituradora de roca tipo Nordberg HP 400 SX, que se encuentra inventariada en Ecoinvent v2.2. El proceso de maquinaria incluye la obtención de los materiales y el transporte de estos hasta el sitio de montaje. Se considera que todos los residuos se reutilizan.

El proceso de cinta transportadora incluye la obtención de los materiales y su transporte hasta el sitio de fabricación. Se tiene en cuenta sólo la disposición del hormigón empleado en la base ya que los demás materiales se reciclan.

- El proceso de electricidad incluye el consumo de energía eléctrica gastada en las oficinas, iluminación y maquinaria. Estos datos corresponden al promedio ($1.80E-03$ kWh/kg) de los datos primarios obtenidos de organismos nacionales como el Ministerio de Industria, Energía y Turismo (2013) (1.15 kWh/t), AFA (2010) (1.76 kWh/t) y el Gremi d'Àrids de Catalunya (2013) (2.51 kWh/t).

En este proceso se toma como base el proceso de electricidad de Ecoinvent v.2, adaptado al mix eléctrico español, que incluye la producción de electricidad en España y su importación. Se incluyen las emisiones debidas a este proceso; también, la transmisión a medio voltaje y la red de distribución.

- El proceso de gasoil incluye la cantidad de diésel consumido y las emisiones al aire por el uso de este combustible. Se refiere al gasoil consumido en la maquinaria de trituración del árido y en la cinta transportadora. El consumo de gasoil fue extraído del promedio de datos suministrados por el Ministerio de Industria, Energía y Turismo (2013) (0.31 l/t) y por el Gremi d'Àrids de Catalunya (2013) (0.44 l/t), siendo el total del promedio del consumo de gasoil por maquinaria de $1.40E-02$ MJ/kg.

- El proceso de fuelóleo en caldera fue tomado de la base de datos Ecoinvent v2.2 y adaptado al contexto español. Corresponde al combustible necesario para la calefacción en la planta de producción.

- Se incluyen otros recursos como aceite lubricante, piezas de desgaste de acero y plástico empleado en las maquinarias que se encuentran en la base de datos Ecoinvent v2.2.

- Transporte interno. Se emplea el proceso existente en Ecoinvent v2.2, que corresponde al transporte dentro de la mina de extracción considerada. Para esto usa un camión de carga de 3.5 t-7.5 t.

- El proceso agua incluye la infraestructura de tratamiento del agua, la energía empleada en dicho tratamiento, y el transporte hasta el usuario. Se toma como base el proceso existente en Ecoinvent v2.2.
- Restauración de la mina. Incluye el consumo de diésel y la transformación del sitio de extracción. El consumo de diésel se toma también de la base de datos Ecoinvent v2.2 (7.44 MJ/m²).

Además de las entradas enumeradas, también se consideran las entradas desde la naturaleza. Todas las entradas, tanto desde la naturaleza como desde la tecnosfera, se resumen en la Tabla 6.1.

En el proceso de obtención del árido natural se tienen las siguientes salidas:

- Emisiones al aire debido al uso de explosivo en la extracción del árido. Se incluyen las emisiones debidas al uso de explosivo para la obtención de 1 kg de árido natural (Tabla 6.2).
- Emisiones al aire debido al proceso de trituración de 1 kg de árido natural (Tabla 6.3).
- Residuos para tratamiento. Se consideran como salidas también los residuos generados en el proceso de obtención de árido natural, que son básicamente la mezcla de varios residuos sólidos semejables a los residuos municipales (Tabla 6.4).

Los residuos sólidos son transportados a un vertedero municipal a una distancia de 21 km, encontrada a partir del Servidor de mapas de la ARC (2015b), teniendo en cuenta el número de vertederos municipales existentes (23 en total) y el número de plantas de reciclaje de RCD en Cataluña (Anexo T). El proceso de disposición fue tomado de la base de datos Ecoinvent v2.2 y adaptado al contexto español.

Tabla 6.1 Procesos de entrada en el árido natural (AN)

Proceso básico	Nombre del proceso en Ecoinvent v2.2	Unidad	Cantidad	Fuente
Árido	Gravel, in ground	kg	1.00E+00	Ecoinvent v2.2
Ocupación del sitio de extracción	Occupation, mineral extraction site	m ² a	2.88E-04	Ecoinvent v2.2
Transformación de sitios de alrededor	Transformation, from unknown	m ²	3.51E-05	Ecoinvent v2.2
Transformación del sitio de extracción	Transformation, to mineral extraction site	m ²	2.88E-05	Ecoinvent v2.2
Agua de origen natural	Water, unspecified natural origin/m ³	m ³	1.35E-03	Ecoinvent v2.2

Proceso básico	Nombre del proceso en Ecoinvent v2.2	Unidad	Cantidad	Fuente
Extracción con explosivos	Blasting/RER U	kg	1.36E-04	Ministerio de Industria, Energía y Turismo (2013); AFA (2010); Gremi d'Àrids de Catalunya (2013) y empresas españolas (2009-2013)
Cinta transportadora	Conveyor belt, at plant/RER/I U	m	9.51E-08	Ecoinvent v2.2
Diésel empleado en maquinaria	Diesel, burned in building machine/GLO	MJ	1.40E-02	Ministerio de Industria, Energía y Turismo (2013); Gremi d'Àrids de Catalunya (2013)
Electricidad	Electricity, medium voltage, at grid/ES U	kWh	1.80E-03	Ministerio de Industria, Energía y Turismo (2013); Gremi d'Àrids de Catalunya (2013)
Infraestructura de la mina	Mine, gravel/sand/CH/I U	p	4.75E-11	Ecoinvent v2.2
Restauración de la mina	Recultivation, limestone mine/CH U	m ²	1.27E-06	Ecoinvent v2.2
Fuelóleo en caldera	Heat, light fuel oil, at boiler 10kW, non-modulating/CH U	MJ	4.91E-03	Ecoinvent v2.2
Maquinaria	Industrial machine, heavy, unspecified, at plant/RER/I U	kg	9.51E-05	Ecoinvent v2.2
Aceite lubricante	Lubricating oil, at plant/RER U	kg	2.50E-06	Ecoinvent v2.2
Piezas de desgaste (acero)	Steel, low-alloyed, at plant/RER U	kg	5.10E-05	Ecoinvent v2.2
Piezas de desgaste (caucho sintético)	Synthetic rubber, at plant/RER U	kg	4.00E-06	Ecoinvent v2.2
Agua	Tap water, at user/RER U	kg	1.22E-02	Ecoinvent v2.2
Transporte interno	Transport, lorry 3.5 t-7.5 t, EURO 5/RER U	tkm	1.55E-05	Ecoinvent v2.2

Tabla 6.2 Emisiones por el uso de explosivos en la obtención de 1 kg de árido natural (Ecoinvent v2.2)

Emisiones al aire	Cantidad	Unidad
Aluminio	2.05E-05	kg
Amoniaco	8.02E-06	kg
Monóxido de carbono	1.05E-05	kg
Óxido de nitrógeno	4.50E-05	kg
Agua	3.16E-05	kg
COV	8.16E-06	kg
Partículas < 2.5 µm	7.34E-07	kg
Partículas > 10 µm	4.08E-08	kg
Partículas > 2.5 µm y < 10 µm	4.08E-08	kg

Tabla 6.3 Emisiones al aire debido a la trituración de 1 kg de árido (Ecoinvent v2.2)

Proceso básico	Nombre del proceso en Ecoinvent v2.2	Unidad	Cantidad	Fuente
Calor	Heat, waste	MJ	3.26E-02	Ecoinvent v2.2
Emisión de partículas < 2.5 µm	Particulates, < 2.5 µm	kg	8.71E-07	Ecoinvent v2.2
Emisión de partículas > 10 µm	Particulates, > 10 µm	kg	8.72E-06	Ecoinvent v2.2
Emisión de partículas > 2.5 µm y < 10 µm	Particulates, > 2.5 µm, and < 10 µm	kg	7.84E-06	Ecoinvent v2.2

Tabla 6.4 Residuos derivados del proceso de obtención de 1 kg de árido (Ecoinvent v2.2)

Proceso básico	Nombre del proceso en Ecoinvent v2.2	Unidad	Cantidad	Fuente
Disposición de residuos sólidos	Disposal, municipal solid waste, 22.9 % water, to sanitary landfill/CH U	kg	2.12E-06	Ecoinvent v2.2

❖ Árido de hormigón en planta (AHP)

El proceso de reciclaje se crea a partir de otros procesos unitarios existentes en la base de datos Ecoinvent v2.2, ya que no existe ningún proceso referido al árido reciclado. De este modo, con la información obtenida en las plantas de reciclaje visitadas y con información encontrada en otros estudios efectuados (Tošić *et al.*, 2015), se crea un proceso en el que se incluyen las siguientes entradas:

- Residuo de hormigón. En esta alternativa el residuo está compuesto en su totalidad por hormigón armado.

- Transporte del residuo. Al comparar el árido natural con el árido reciclado, se tiene que en el caso del árido natural no es necesario el transporte externo de la materia prima, ya que normalmente las plantas de extracción de árido natural o graveras se ubican lo más cerca posible de la mina de extracción; por lo tanto, únicamente se tiene en cuenta el transporte interno. En el caso de la obtención del árido reciclado, sí existe transporte externo, ya que cuando el reciclaje se efectúa en plantas de reciclaje fijas lo más común es que el residuo se transporte desde el sitio de generación hasta la planta de reciclaje. Como se comentó en el apartado 3.3.1.2, se considera que los residuos se generan en el centro de Barcelona, tomando como distancia promedio hasta las plantas de reciclaje más cercanas unos 7 km. Partiendo de este hecho, se calculan las toneladas-kilómetros a introducir en la base de datos Ecoinvent v2.2. De este modo se obtiene como resultado que para transportar 1.04 kg de residuo de hormigón se emplea 0.007 tkm. En este caso se transportan al año 400000 t de residuos hasta la planta de reciclaje.
- Infraestructura de la planta de reciclaje. La tecnología empleada en la infraestructura de la planta corresponde a una trituradora de cono. El proceso de infraestructura incluye los materiales, inclusive el reemplazo de las piezas durante su operación y disposición de la infraestructura, uso del suelo y demanda de fuelóleo para oficinas. Se estima un tiempo de operación de la planta de 50 años y una capacidad de producción de 200000 t/año. Sin embargo, como la capacidad de producción es la mitad de la empleada en la producción de árido natural, se emplean los datos correspondientes a dos plantas de tratamiento de residuos, con el objetivo de alcanzar una producción de 400000 t/año. En este caso la infraestructura empleada para la producción de un 1 kg de árido reciclado corresponde a 5E-11 p.
- Cinta transportadora. Se toma como base el proceso existente en la base de datos Ecoinvent v2.2.
- Diésel empleado en la maquinaria. Como parte del hormigón contiene metal (acero) debido a las armaduras, este hormigón debe pasar por una machacadora de hormigón para ser separado del metal. El consumo de diésel del demolidor de hormigón que se encarga de separar el acero es de 0.0018 MJ/kg, de acuerdo a información suministrada por las plantas de reciclaje visitadas. Una vez el hormigón es separado del metal, éste pasa por las máquinas trituradoras.

El consumo de diésel en todo el proceso de transporte, trituración y separación granulométrica del material corresponde a 0.014 MJ/kg, según las plantas de reciclaje de Cataluña (2010-2013) y Mercante *et al.* (2010). De este modo, el consumo total de diésel en todo el proceso de reciclaje del árido es de 0.015 MJ/kg.

Es importante aclarar que este consumo energético incluye la separación de los restos de madera, papel, plástico o metal que hayan estado presente aunque en mínima proporción al entrar a la planta de reciclaje y que no se hayan podido separar de manera manual, debido a que el proceso de reciclaje incluye simultáneamente la trituración, clasificación y separación de los residuos.

- El consumo de electricidad corresponde al usado en las oficinas y talleres igual a 1.02 kWh/t de acuerdo a las plantas de reciclaje de España (2009-2013) y al consumo eléctrico por trituración igual a 0.975 kWh/t según Mercante *et al.* (2010).
- Piezas de desgaste (caucho sintético). El resto de piezas de desgaste, tales como piezas de acero y consumo de aceite lubricante, están incluidos dentro de la infraestructura de la planta de reciclaje. Estos procesos se encuentran inventariados en la base de datos Ecoinvent v2.2.
- Agua. Incluye la infraestructura de tratamiento del agua, la energía empleada en dicho tratamiento, y el transporte hasta el usuario.

Cada una de estas entradas, tanto las que provienen de la naturaleza, como de la tecnosfera, se muestran en forma resumida en la Tabla 6.5.

Tabla 6.5 Entradas del proceso de producción del árido de hormigón en planta (AHP)

Proceso básico	Nombre del proceso en Ecoinvent v2.2	Unidad	Cantidad	Fuente
Residuo de hormigón	Residuo	kg	1.04E+00	Ecoinvent v2.2
Transporte del residuo	Transport lorry >32t EURO 5/RERU	tkm	7.00E-03	ARC (2015b); Plantas de reciclaje visitadas (2014)
Infraestructura de la planta de reciclaje	Sorting plant for construction waste/CH/I U	p	5.00E-11	Ecoinvent v2.2
Cinta transportadora	Conveyor belt, at plant/RER/I U	m	9.51E-08	Ecoinvent v2.2
Diésel empleado en maquinaria	Diesel, burned in building machine/GLO U	MJ	1.50E-02	Plantas de reciclaje de Cataluña (2010-2013)
Electricidad	Electricity, medium voltage, at grid/ES U	kWh	2.00E-03	Mercante <i>et al.</i> (2010) y Plantas de reciclaje de España (2009-2013)
Piezas de desgaste (caucho sintético)	Synthetic rubber, at plant/RER U	kg	4.00E-06	Ecoinvent v2.2
Agua	Tap water, at user/RER U	kg	1.22E-02	Ecoinvent v2.2

Como salidas se tienen en cuenta las emisiones al aire provenientes del proceso de trituración del árido. En este caso se consideran las mismas emisiones al aire del proceso de trituración del árido natural, ya que el proceso y la maquinaria empleada en la trituración es la misma para ambos casos (Tabla 6.3).

No existen emisiones debidas al uso de explosivos debido a la ausencia de este proceso en el reciclaje.

En esta alternativa se considera que el acero proveniente del hormigón armado que llega a la planta de reciclaje es reciclado en otra planta de tratamiento de residuos ubicada a 4 km. Esta distancia se calculó a partir del Servidor de mapas de la ARC (2015b), de acuerdo al número de plantas de este tipo (372) dentro de Cataluña (ARC 2015b) (Anexo O y Anexo X).

El cálculo de la cantidad de residuo de acero por kg de hormigón reciclado se basa en un estudio efectuado por Zazurca (2012) en una vivienda unifamiliar en Barcelona, en el que para 1 kg de hormigón se necesitaba 0.04 kg de acero como cuantía para conseguir el hormigón armado (Tabla 6.6).

Este valor fue contrastado también con la base de datos BEDEC del ITEC, donde se constata que diferentes elementos estructurales de hormigón, como son los muros, pilares, vigas, zunchos, losas y forjados de hormigón armado, necesitan una cuantía de acero tal que oscila entre 0.02-0.07 kg de acero por kg de hormigón armado. Por ello se escogió 0.04 kg de acero como dato promedio.

Dentro del proceso de reciclaje de acero, se tiene en cuenta también la infraestructura de la planta de reciclaje, para la que se emplea como cantidad 1E-10 p, correspondientes a la infraestructura necesaria para el tratamiento de 1 kg de residuo (capacidad de producción de la planta 200000 t/año y tiempo de vida útil de 50 años).

De este modo, el proceso de reciclaje de acero se crea tomando como base los procesos existentes en Ecoinvent v2.2 sobre fabricación de acero a partir de materia prima original y a partir de materia prima secundaria. Para esto se emplea como base para la producción primaria el proceso llamado “Stell, converter, unalloyed, at plant/RER U” y para la producción secundaria el proceso “Steel, un-and-alloyed, at plant/RER U”. Estos procesos fueron adaptados a la situación española. Dado que con el reciclaje del residuo de acero se evita la producción de materia prima original, se emplea como producto evitado la cantidad de acero primario que se evita producir por el reciclaje.

Tabla 6.6 Residuos para tratamiento del proceso de reciclaje del hormigón

Proceso básico	Nombre del proceso en Ecoinvent v2.2	Unidad	Cantidad	Fuente
Reciclaje de acero	Recycling steel and iron/RER U	kg	0.04	Zazurca (2012); BEDEC (2015)

❖ **Árido de hormigón en obra (AHo)**

Para esta alternativa de producción de árido de hormigón, se toman algunos procesos unitarios existentes en la base de datos Ecoinvent v2.2 y se crea un nuevo proceso que presenta las siguientes entradas:

- Residuos de hormigón. Los residuos de hormigón que son separados en obra se considera que están conformados en su totalidad por hormigón armado.
- Maquinaria y cinta transportadora (incluye transporte al sitio de la obra). Como se parte del hecho de que se necesitan grupos móviles de trituración primaria, secundaria y terciaria, se emplean datos reales de estos grupos de trituración de empresas consultadas. Se considera que los grupos móviles funcionan a su máxima capacidad de producción. Para los equipos de trituración se escogieron plantas móviles de trituración con capacidad de producción similar a la maquinaria que aparece inventariada en la base de datos de Ecoinvent v2.2 y con capacidad similar a las plantas de reciclaje utilizadas en el caso del reciclaje del árido en planta fija igual a 400000 t/año, de acuerdo a plantas de reciclaje visitadas.
- En el uso de los equipos móviles se siguieron las recomendaciones que aparecen en Rueda (2011) acerca del tipo de trituradora empleada en cada proceso de trituración. Para el caso de la trituración primaria se emplea una planta móvil de trituración de mandíbulas Lokotrack LT 96, de capacidad máxima de 350 t/h y de una potencia de 170 kW (METSU, 2012). Así mismo, el grupo móvil de trituración secundaria-terciaria consiste en un equipo de una capacidad máxima de 250 t/h y una potencia de 160 kW, modelo GMTR-BMT (Talleres Alquézar S.A. 2014).
Para la cinta transportadora se tiene en cuenta el proceso existente en la base de datos Ecoinvent v2.2, pero se adapta a la maquinaria empleada, cuyo tiempo de vida útil es de 50 años. Los procesos de maquinaria y cinta transportadora incluyen además del equipo de demolición que separa el acero del hormigón, las piezas de acero y caucho sintético empleadas como piezas de desgaste.

Tal y como se mencionó anteriormente, en la producción de este tipo de árido se incluye el transporte de la maquinaria al sitio de construcción y, dado que, normalmente, las empresas de trituración de áridos son las que suministran las plantas móviles de trituración, se asume la misma distancia existente entre la planta de reciclaje y el centro de Barcelona (7 km). Por ello, la distancia de transporte de cada trituradora móvil es de 14 km (ida y vuelta con carga). Para efecto del estudio de los impactos, se considera 1 año como tiempo de operación de la maquinaria en la obra. Para el transporte de cada maquinaria se emplea un camión de carga convencional de 32 t, ya que la trituradora primaria pesa 27800 kg y la secundaria-terciaria 22200 kg. En total se transportan al año 50 t ida y vuelta debido a la maquinaria.

- Diésel. De acuerdo con los datos obtenidos en las empresas, el equipo de trituración primaria consume 0.48 kWh/t y el equipo de trituración secundaria y terciaria, 0.64 kWh/t. Partiendo de estos valores, y sabiendo que 1 kWh de salida necesita de 0.2-0.4 l de gasoil (Orbegozo, 2010), se tiene que en total se consume 0.38 l/t de gasoil en las maquinarias móviles, correspondiente a 3.8 kWh/t (1.40E-02 MJ/kg de diésel por kg triturado). Si a este valor se suma el coste energético de

la demolidora (1.80E-03 MJ/kg), resulta un consumo total por trituración del árido en esta alternativa de 1.50E-02 MJ/kg, igual al consumo por trituración del árido de hormigón en planta fija.

- Lubricante. Se toma el proceso existente en la base de datos Ecoinvent v2.2.

Las entradas de este proceso se observan en la Tabla 6.7.

Tabla 6.7 Entradas del proceso de obtención del árido de hormigón en obra (AHO)

Proceso básico	Nombre del proceso en Ecoinvent v2.2	Unidad	Cantidad	Fuente
Residuo de hormigón	Residuo	kg	1.04E+00	Ecoinvent v2.2
Cinta transportadora	Conveyor belt, at plant/RER/I U	m	4.75E-08	Ecoinvent v2.2
Maquinaria	Industrial machine, heavy, unspecified, at plant/RER/I U	kg	9.51E-05	Ecoinvent v2.2
Diésel empleado en maquinaria	Diesel, burned in building machine/GLO	MJ	1.50E-02	Plantas de reciclaje de Cataluña (2010-2013)
Aceite lubricante	Lubricating oil, at plant/RER U	kg	2.50E-06	Ecoinvent v2.2

En la trituración del árido de hormigón en obra se consideran las mismas salidas del árido de hormigón en planta (Tabla 6.3), ya que las emisiones y los residuos sólidos no cambian. Tampoco cambia el sistema de gestión aplicado a los residuos sólidos. Las distancias de transporte de los residuos desde la obra hasta el sitio de gestión son las mismas que las consideradas en la alternativa de producción en planta (AHP), ya que en ambos casos se consideran distancias medias de acuerdo al número de instalaciones distribuidas en todo el territorio catalán.

❖ Árido mixto en planta (AMp)

Esta alternativa es similar a la alternativa de AHP, cambiando tan solo el tipo de residuo que entra a la planta de reciclaje. En este caso se considera que el residuo que llega a la planta de reciclaje está conformado por hormigón y cerámica (residuo mixto).

La composición de este residuo puede llegar a ser muy variable; sin embargo, para esta alternativa se considera que el residuo está conformado en más de un 70% por residuos de hormigón y menos de un 30 % por residuos de cerámica. Esta tipología de residuo permite obtener áridos mixtos “TIPO 2” según la normativa alemana DIN 4226-100:2002 con los que se pueden llegar a alcanzar resistencias aceptables en hormigones reciclados.

Una vez el residuo llega a la planta de reciclaje —al estar mezclado el hormigón con la cerámica— se hace pasar todo por la demoldadora para desprender el acero. Por ello, el consumo energético de esta fase es igual al del hormigón armado que llega separado. Sin embargo, según las plantas de reciclaje visitadas, en el proceso de trituración del residuo mixto se consume un 11 % menos de diésel comparado con el residuo de hormigón ($1.30E-02$ MJ/kg); resultando en total un consumo en todo el proceso de reciclaje de $1.40E-02$ MJ/kg.

Por otra parte, al cambiar la proporción de hormigón dentro del residuo, cambia también la cantidad de acero generado en la obtención de este tipo de árido. En este caso se generan 0.028 kg de acero por 1 kg de árido mixto producido, según las proporciones dadas por Zazurca (2012) y las encontradas en la base de datos BEDEC (2015).

Para el estudio de esta alternativa se toma como base el proceso creado para el AHp y se modifican los valores correspondientes a la nueva tipología de residuo. La distancia de transporte del residuo mixto hasta la planta de reciclaje y de los residuos generados en la planta de reciclaje hasta el sitio de gestión, se consideran similares a la alternativa de AHp. Las emisiones al aire se consideran iguales que el resto de alternativas de producción de árido reciclado explicadas anteriormente.

6.1.1.4 Evaluación del impacto del ciclo de vida

❖ Resultados caracterizados y discusión de la evaluación del impacto del ciclo de vida

A continuación se presentan y se discuten los resultados de la caracterización de los impactos de las diferentes alternativas de obtención de árido. También se presentan las contribuciones porcentuales de los procesos que conforman cada alternativa de producción.

➤ Árido natural (AN)

Los resultados de la Figura 6-4 muestran que el proceso de extracción con voladuras para la obtención del árido natural presenta impactos considerables en todas las categorías. Los mayores impactos debido a este proceso ocurren en la categoría respiratorios orgánicos (74 %), acidificación (66 %), respiratorios inorgánicos (54 %) y efectos no carcinogénicos (24 %). La extracción con voladura emite sustancias al medio como son los óxidos de nitrógeno (NO_x) y los compuestos orgánicos volátiles que causan problemas respiratorios debido a la formación del smog fotoquímico y la emisión de partículas, afectando de este modo la salud humana (Wallington *et al.*, 2014; Kulkarni *et al.*, 2011). La emisión de

Los impactos del proceso de disposición de los residuos sólidos asimilables a residuos municipales generados durante la obtención del árido natural, lo mismo que los impactos del transporte interno, son despreciables comparados con el resto de los procesos.

Por último, durante la trituración del árido se emiten partículas que causan problemas respiratorios; por ello, este proceso produce un impacto de un 6 % en la categoría efectos respiratorios inorgánicos.

➤ **Árido de hormigón en planta (AHp)**

Esta alternativa se refiere a la obtención de árido de hormigón y se parte del supuesto de que los residuos de hormigón llegan separados del resto de RCD a la planta de reciclaje.

Los residuos de hormigón en este caso están conformados por hormigón armado. Por lo tanto, se hace necesario primero desprender el acero del hormigón, por lo que los residuos se hacen pasar por un demolidor y solo posteriormente —cuando el acero se encuentra separado— se tritura el hormigón hasta obtener el árido con la granulometría deseada.

Los residuos de acero que se generan de este proceso son transportados hasta la planta de producción de acero secundario para su reciclaje. Los impactos debido a este proceso se muestran en la Figura 6-5, en la que se observa que la producción de acero secundario produce grandes impactos en las categorías efectos carcinogénicos y no carcinogénicos, debido a que el proceso de fundición emite sustancias que generan problemas en la salud humana como son las dioxinas (Krishnaraj, 2015).

Sin embargo, también se observa en la Figura 6-5 que la producción secundaria del acero produce grandes ahorros en el resto de categorías evaluadas. En la categoría disminución de la capa de ozono estos ahorros son menores (-10 %).

Los grandes ahorros en la mayoría de categorías evaluadas se deben a que con el reciclaje del acero se evita la extracción de mineral natural, se ahorra energía y, por lo tanto, se disminuyen las emisiones de CO₂ que, según Dombrowski y Ernst (2014) y Truelove y Parks (2012) son las responsables del calentamiento global. Además, es importante tener en cuenta que con el reciclaje del acero se evitan los impactos debidos a la producción de acero a partir de materia prima original. Estos resultados están en concordancia con varios autores: Yellishetty *et al.* (2011); Zabalza Bribián *et al.* (2011) y Sodsai y Rachdawong (2012), quienes mencionan que la fabricación de acero en un horno de arco eléctrico (utilizado en el reciclaje de acero) consume menos energía y genera menos emisiones de CO₂, que un horno de oxígeno básico empleado en la producción de acero a partir de materia prima original.

En el estudio efectuado por Turk *et al.* (2015) también se evidencian significativos ahorros cuando se reciclan los residuos de hormigón debido a la recuperación del acero.

Otro de los procesos que produce impactos importantes en la producción de AHp es el consumo de combustible diésel en maquinaria, presentándose el mayor impacto en las categorías: disminución de la capa de ozono (45 %), efectos respiratorios orgánicos (31 %) y acidificación (8 %) y efectos respiratorios inorgánicos (8 %). Los impactos en estas categorías se presentan debido a que el proceso de combustión del diésel da lugar a la emisión de CO₂, NO_x, compuestos orgánicos volátiles, amoniaco, emisión de partículas y emisiones que contienen cloro (Ferrís y Tortajada *et al.*, 2003).

El proceso de electricidad afecta en mayor medida a la disminución de la capa de ozono (17 %) y a la categoría acidificación (6 %). Esto se debe, según Roy *et al.* (2014) y la APPA (2015), a las emisiones de óxido de azufre que se generan durante este proceso. También, de acuerdo con Bolaji y Huan (2013), el proceso de electricidad implica la generación de emisiones que deterioran la capa de ozono.

El proceso de trituración del árido, que incluye las emisiones de partículas, no es un proceso relevante en las categorías evaluadas, al igual que el proceso de cinta transportadora, las piezas de desgaste, el aceite lubricante y el agua de consumo en la planta.

Para finalizar, el proceso de obtención del árido de hormigón en planta incluye, a diferencia del árido natural, el transporte del residuo de hormigón desde el sitio de generación hasta la planta de reciclaje, que corresponde al proceso de explotación del árido en cantera. El transporte de este residuo desde el centro de Barcelona hasta la planta de reciclaje genera impactos principalmente en la categoría disminución de la capa de ozono (34 %) y respiratorios orgánicos (12 %), debido a la emisión de óxidos de nitrógeno, compuestos orgánicos volátiles y emisiones que deterioran la capa de ozono.

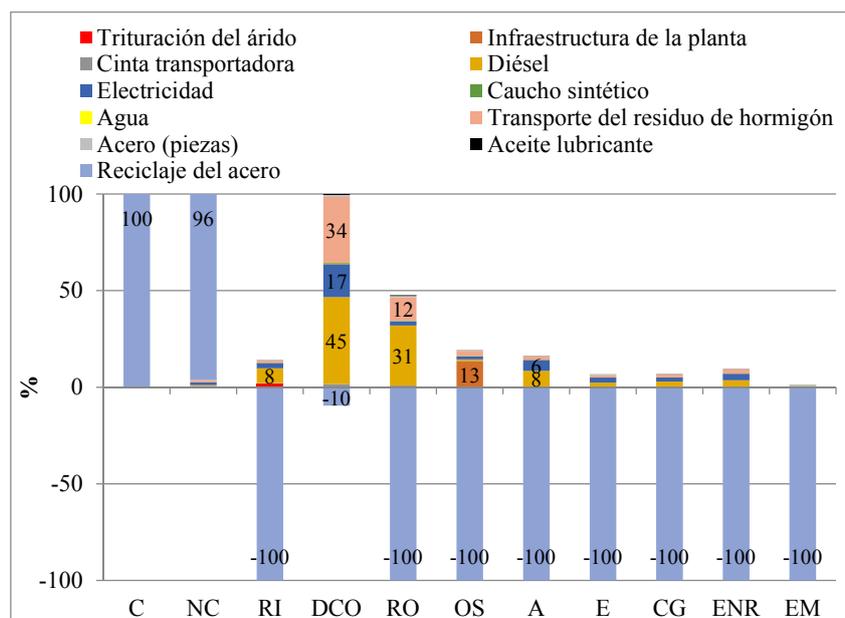


Figura 6-5 Resultados caracterizados del AHp

➤ **Árido de hormigón en obra (AHO)**

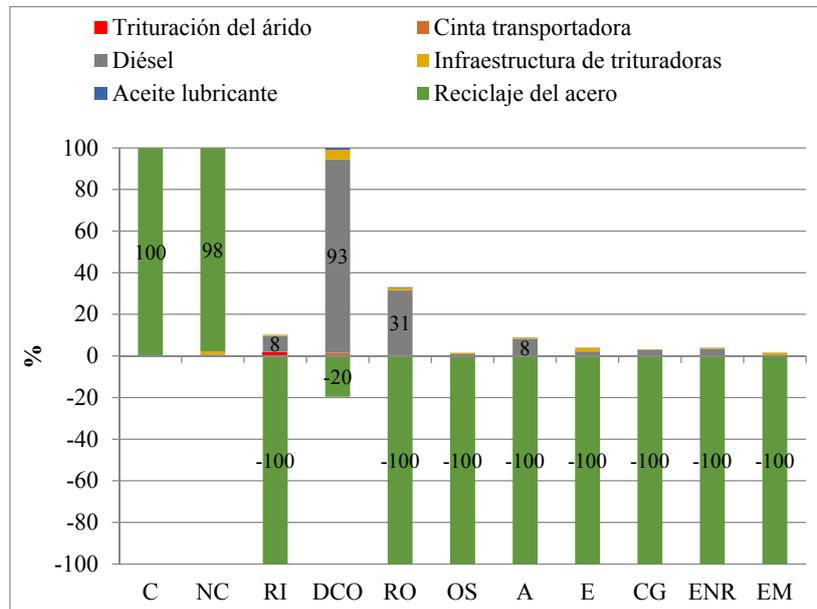


Figura 6-6 Resultados caracterizados del AHO

Esta alternativa de producción de árido es similar al AHp, debido a que se trata el mismo tipo de residuo; sin embargo, en este caso, el reciclaje se lleva a cabo en la misma obra de construcción.

La cantidad de residuos de acero generados al desprender el hormigón del acero es igual a la alternativa AHp; por ello, los resultados de los impactos debido al reciclaje de los residuos de acero generados en el AHO (Figura 6-6), presentan un comportamiento similar a la producción de árido de hormigón en planta (Figura 6-5).

La producción secundaria de acero presenta impactos muy relevantes en las categorías efectos carcinogénicos (100 %) y no carcinogénicos en la salud humana (98 %), así como ahorros en la categoría disminución de la capa de ozono (-20 %) y en el resto de categorías evaluadas (-100 %). Estos resultados se deben a los impactos evitados por la producción secundaria de acero. Es importante destacar que con la producción secundaria de acero se evitan también los impactos debidos a la disposición de los residuos en vertedero.

En la alternativa AHO, los impactos en la disminución de la capa de ozono se deben fundamentalmente al consumo de combustible diésel (93 %); en cambio, en el AHp los impactos en esta categoría son generados también por la electricidad consumida en toda la planta de reciclaje y por el transporte de los residuos hasta dicha planta. Estos dos procesos no se tienen en cuenta cuando se efectúa el reciclaje en obra.

El impacto del resto de los procesos se considera insignificante, incluso el transporte de las maquinarias hasta la obra y su retorno —que aunque se encuentra incluido dentro del proceso de infraestructura de trituradoras— no es un proceso relevante. Lo mismo ocurre en el proceso de trituración del árido y de aceite lubricante.

➤ ***Árido mixto en planta (AMp)***

Los impactos en esta alternativa de producción de áridos son parecidos a la alternativa de AHp; no obstante, al generarse en este caso menos residuos de acero y, por lo tanto, al reciclarse menor cantidad de éstos, son menores los impactos producidos en la categoría efectos no carcinogénicos (94 %) y menores los ahorros en la categoría disminución de la capa de ozono (-7 %) con relación al AHp (Figura 6-5 y Figura 6-7).

Los impactos por el consumo de diésel resultan también menores en las categorías disminución de la capa de ozono (43 %) y efectos respiratorios orgánicos (41 %). Sin embargo, el transporte de los residuos de hormigón y cerámica desde el centro de Barcelona hasta la planta de reciclaje, influyen en mayor medida en estas categorías con respecto al AHp (un 35 % en disminución de la capa de ozono y 17 % en efectos respiratorios orgánicos).

El menor impacto por el diésel se atribuye al menor consumo de dicho combustible en trituración, comparado con los residuos de hormigón armado (Figura 6-7).

La infraestructura de la planta de reciclaje en el AMp afecta en un 19 % en la categoría ocupación del suelo y, por otra parte, el proceso de electricidad influye en mayor medida en las categorías disminución de la capa de ozono y acidificación. La electricidad influye en la acidificación por la generación de óxidos de nitrógeno y dióxidos de azufre (Roy *et al.*, 2014; APPA, 2015). Un ligero impacto se produce en la categoría respiratorios inorgánicos por el proceso de trituración del árido donde se emiten partículas (3 %) (Figura 6-7).

Los demás procesos como cinta transportadora, agua, piezas de desgaste y aceite lubricante influyen de un modo muy reducido en los impactos finales.

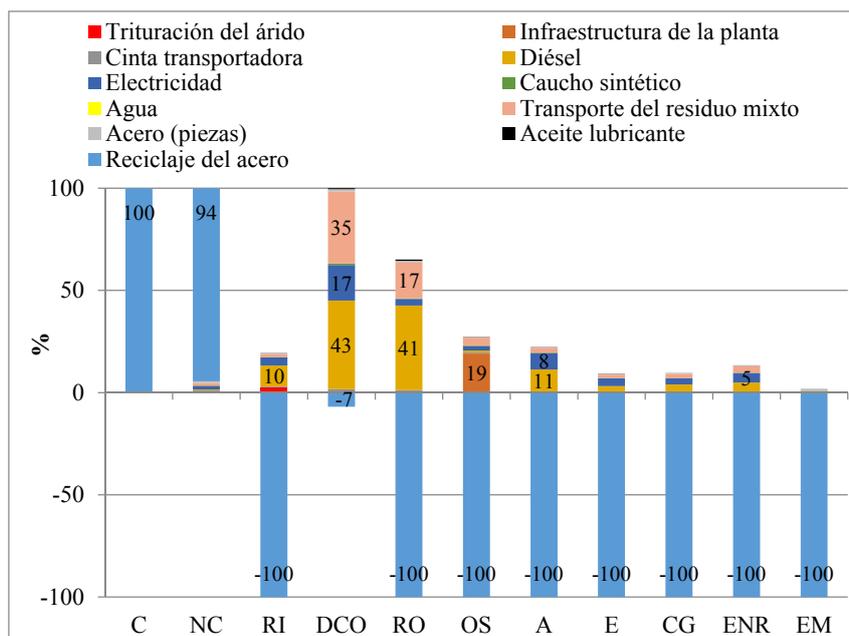


Figura 6-7 Resultados caracterizados del AMp

Por último, en la Tabla 6.8 se observan los resultados de la caracterización de todas las alternativas de producción de áridos en las categorías evaluadas.

Tabla 6.8 Resultados de la caracterización de las alternativas de producción de áridos

Categorías	Unidad	AN	AHp	AHo	AMp
C	kg C ₂ H ₃ Cl eq	4.56E-05	1.10E-02	1.10E-02	7.70E-03
NC	kg C ₂ H ₃ Cl eq	6.14E-05	8.38E-04	8.22E-04	5.96E-04
RI	kg PM 2.5 eq	1.41E-05	-4.11E-05	-4.30E-05	-2.70E-05
DCO	kg CFC-11 eq	3.32E-10	3.26E-10	1.40E-10	3.26E-10
RO	kg C ₂ H ₄ eq	6.71E-06	-2.33E-06	-2.98E-06	-1.09E-06
OS	m ² org.arable	1.28E-04	-1.75E-04	-2.14E-04	-1.10E-04
A	kg SO ₂ eq	7.27E-05	-1.35E-04	-1.46E-04	-8.73E-05
E	kg PO ₄ p-lim	6.70E-07	-6.36E-06	-6.54E-06	-4.32E-06
CG	kg CO ₂ eq	3.44E-03	-4.45E-02	-4.62E-02	-3.02E-02
ENR	MJ primaria	5.51E-02	-5.20E-01	-5.53E-01	-3.49E-01
EM	MJ surplus	2.60E-04	-9.12E-03	-9.08E-03	-6.36E-03

➤ *Comparación entre alternativas de producción primaria y secundaria*

A continuación se efectúa una comparación de los impactos entre todas las alternativas de producción de árido. En la Figura 6-8 se observa que la obtención del árido natural presenta impactos en todas las categorías evaluadas; sin embargo, estos impactos tienden a ser casi nulos en las categorías efectos carcinogénicos y no carcinogénicos comparados con los impactos que presentan el resto de alternativas en estas dos categorías. Los grandes impactos presentados en estas categorías debido a la producción de árido reciclado se deben a los impactos de la fundición en la producción secundaria del acero (reciclaje del acero) que resulta del hormigón armado. Durante el proceso de fundición del acero se generan emisiones que pueden causar efectos en la salud humana, tales como la emisión de partículas y dioxinas (Krishnaraj, 2015).

Por otra parte, la categoría disminución de la capa de ozono se ve afectada por todas las alternativas de producción de árido, en mayor medida por la obtención de AN (100 %) y en menor proporción por la alternativa AHo (42 %). No existen diferencias entre la alternativa de AHp y AMp en esta categoría. El impacto de estas alternativas de producción de árido reciclado en la disminución de la capa de ozono se debe al consumo de electricidad en la planta de reciclaje y al transporte de los residuos de hormigón hasta la planta de reciclaje.

Todas las alternativas de producción de árido reciclado ocasionan ahorros en las categorías efectos respiratorios orgánicos e inorgánicos, ocupación del suelo, acidificación, eutrofización, calentamiento global, energía no renovable y extracción de mineral. Los menores impactos se deben a que en el proceso de obtención del árido reciclado se consume menos energía y se emiten menos emisiones de CO₂, en comparación con el proceso de obtención de árido natural según lo reportado por Limbachiya *et al.* (2012). Además, según Alves *et al.* (2014), el árido reciclado conlleva también a ahorros en el uso de recursos naturales.

En la categoría efectos respiratorios orgánicos, la producción de árido natural presenta el más grande impacto (100 %); en cambio, los mayores ahorros ocurren en la producción de AHo (-44 %) y AHp (-35 %). El impacto del árido natural en esta categoría se debe al uso de voladuras para la explotación del árido en cantera.

La producción de árido natural continúa presentado grandes impactos en las categorías ocupación del suelo (60 %), acidificación (50 %) y respiratorios inorgánicos (33 %). La obtención del árido natural supone impactos en la categoría ocupación del suelo por la infraestructura de la mina, y el proceso de voladura genera emisiones de partículas, de óxido de nitrógeno y de amoníaco que facilitan, por una parte, la acidificación y, por otra, los efectos respiratorios en la salud humana. No obstante, en las categorías: eutrofización, calentamiento global, energía no renovable y extracción de minerales, los impactos son menores (Figura 6-8).

La producción de AHo presenta los más grandes ahorros (-100 %) en las categorías efectos respiratorios inorgánicos, ocupación del suelo, acidificación, eutrofización, calentamiento global y energía no renovable.

La alternativa de AHp presenta ahorros entre -82 % y -100 % en las categorías respiratorios inorgánicos, ocupación del suelo, acidificación, eutrofización, calentamiento global, energía no renovable y extracción de minerales. El menor ahorro ocurre en la categoría ocupación del suelo, y el mayor en extracción de minerales. En esta última categoría es donde todas las alternativas de producción de árido reciclado, presentan los más grandes ahorros debido a que se evita la extracción de material virgen. Además, al obtener árido proveniente de residuos conformados en su totalidad por hormigón armado (AHo y AHp), se genera mayor cantidad de residuos de acero (con respecto al árido mixto), los cuales al ser reciclados, contribuyen al ahorro de los impactos en las categorías.

El reciclaje del árido en la obra de construcción (AHo) proporciona, en la mayoría de categorías evaluadas, unos mayores ahorros con respecto al reciclaje en planta (AHp) (Figura 6-8). Estos resultados están en concordancia con Vossberg *et al.* (2014), quien encontró que el reciclaje *in situ* presenta ventajas con respecto al reciclaje en planta en la categoría calentamiento global, debido a un menor consumo energético cuando el reciclaje se efectúa en obra que cuando se efectúa en una planta de reciclaje fija. Los grandes ahorros debidos al AHo se deben, también, a que con la producción de este tipo de árido se evitan los impactos por el transporte de los residuos hasta la planta de reciclaje, ya que, aunque se incluye el transporte de ida y vuelta de la maquinaria al sitio de construcción, el impacto de este proceso resulta insignificante.

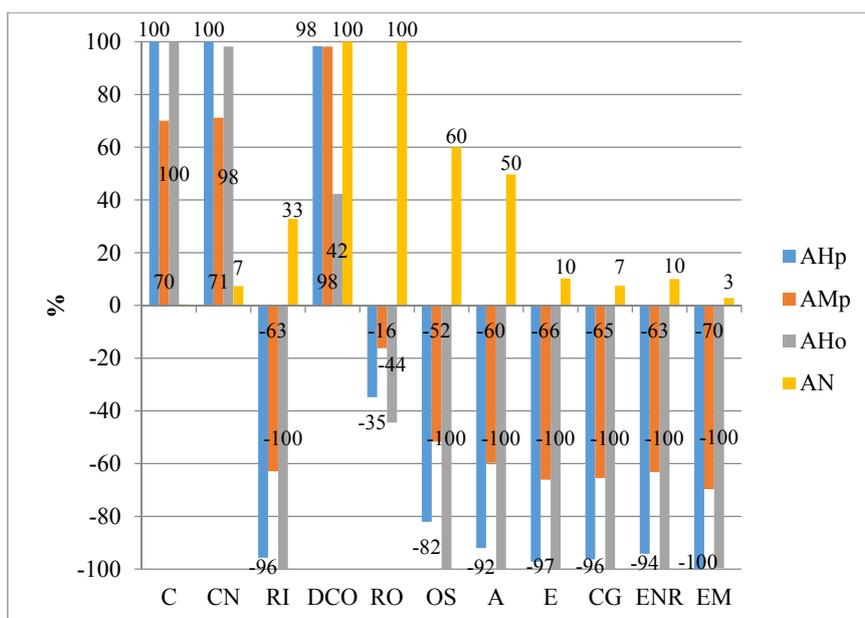


Figura 6-8 Resultados de caracterización de las alternativas de obtención del árido

Para el caso del árido, al no evaluar diferentes distancias de transporte del residuo hasta la planta de reciclaje en las alternativas escogidas, se efectuó un análisis de sensibilidad con la distancia a la que se genera el residuo hasta la planta. Por esto se empleó una distancia de 50 km que corresponde a la distancia máxima a la que serían transportados los residuos desde el sitio de generación hasta cualquier planta de reciclaje de RCD ubicada en Cataluña, debido al número de plantas distribuidas uniformemente dentro de todo el territorio de estudio según la ARC (2015b).

Los resultados comparativos para las tres alternativas de producción de árido reciclado, con el árido natural se muestran en la Figura 6-9.

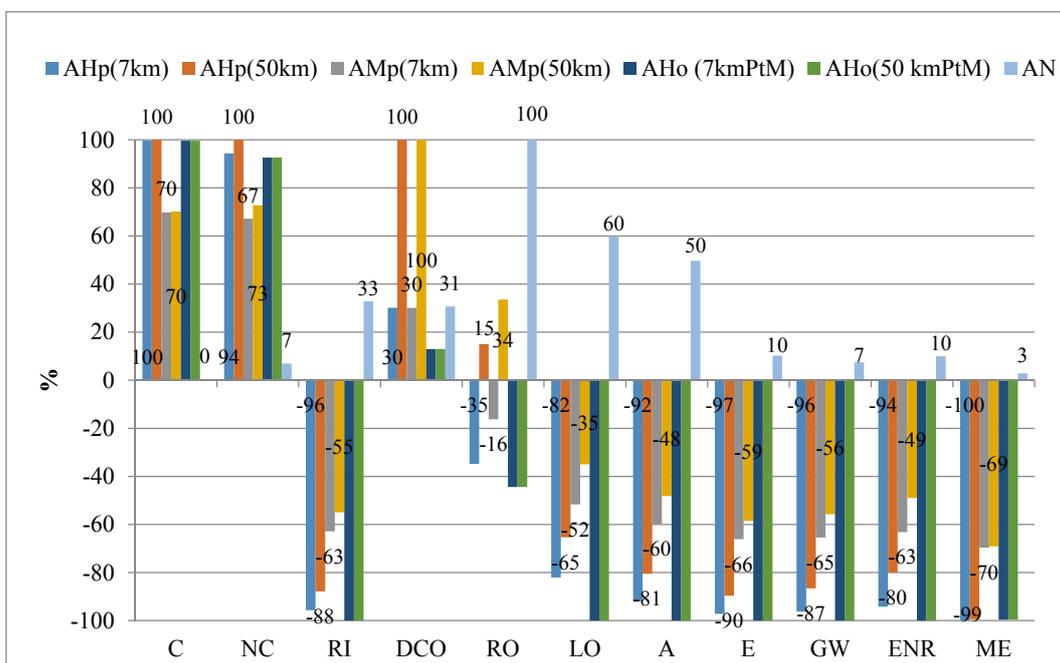


Figura 6-9 Comparación de las alternativas de producción de árido (análisis de sensibilidad)

En la Figura 6-9 se observa que la distancia de transporte influye en mayor medida en la categoría disminución de la capa de ozono para las alternativas de obtención de árido reciclado en planta (AHp y AMp). En el resto de categorías el transporte influye para estos dos tipos de áridos, pero en menor medida. El transporte de las plantas móviles (PtM) hasta el sitio de la obra no afecta los resultados de modo significativo cuando estas son transportadas hasta una distancia de 100 km (ida y vuelta). Los resultados de la Figura 6-9 demuestran que el reciclaje del árido resulta más beneficioso que el árido natural, tanto para una distancia de 7 km como para 50 km para las categorías extracción de mineral, energía no renovable, calentamiento global, eutrofización, acidificación, ocupación del suelo, respiratorios orgánicos e inorgánicos. En la única categoría donde el árido reciclado presenta mayores impactos con relación al árido natural —al aumentar el trayecto recorrido por el residuo a 50 km— es en

la categoría disminución de la capa de ozono, ya que en las categorías efectos carcinogénicos y no carcinogénicos el árido reciclado también presenta mayores impactos comparados con el árido natural al emplear un trayecto de 7 km. Por lo que se puede afirmar que, al escoger la distancia máxima de 50 km, se ve afectada únicamente la categoría disminución de la capa de ozono, mientras que en el resto de categorías los resultados se pueden considerar similares aunque con una ligera variación.

6.1.1.5 Interpretación de la evaluación del impacto del ciclo de vida

En la obtención del árido natural, el proceso de extracción con voladuras presenta impactos considerables en todas las categorías evaluadas. Los mayores impactos se presentan en respiratorios orgánicos, acidificación, respiratorios inorgánicos y efectos no carcinogénicos en la salud humana. Otro de los procesos cuyo impacto es destacable en las categorías es el consumo de diésel en la maquinaria. También en la obtención del árido natural, la infraestructura de la mina sobresale por los grandes impactos en la categoría ocupación del suelo.

La gestión de los residuos generados durante la obtención del árido natural, es decir, la disposición de los residuos sólidos asimilables a los residuos municipales y el transporte interno generan impactos muy mínimos que se consideran despreciables comparados con los impactos del resto de procesos.

Por otra parte, el residuo de acero generado en el reciclaje del hormigón armado, al ser reciclado o reincorporado para la producción secundaria de acero, conduce a ahorros significativos en las categorías respiratorios orgánicos e inorgánicos, ocupación del suelo, acidificación, eutrofización, calentamiento global, energía no renovable y extracción de minerales. En esta última categoría se presentan los mayores ahorros en todas las alternativas de árido reciclado. Sin embargo, en las categorías efectos carcinogénicos y no carcinogénicos, la producción de acero secundario provoca impactos por el proceso de fundición del acero.

En el AHp el transporte de los residuos de hormigón desde el centro de Barcelona hasta la planta de reciclaje genera impactos, principalmente, en la categoría disminución de la capa de ozono (34 %) y respiratorios orgánicos (12 %). Otro de los procesos que produce un impacto importante es el consumo de combustible diésel en maquinaria, presentándose los mayores impactos en las categorías disminución de la capa de ozono (45 %), efectos respiratorios orgánicos (31 %), acidificación y efectos respiratorios inorgánicos (8 %).

En la producción de AHo el transporte de las maquinarias hasta la obra y su retorno — incluido dentro del proceso de infraestructura de las trituradoras— no es un proceso relevante.

Al generarse menos residuos de acero en la producción de AMP y, por lo tanto, al reciclarse menos de éstos, son menores también los impactos producidos en las categorías efectos carcinogénicos y no

carcinogénicos, y menores los ahorros en la categoría disminución de la capa de ozono con relación al resto de categorías.

Las alternativas de producción de AHp y AMp no presentan grandes diferencias en los impactos generados en la categoría disminución de la capa de ozono, debido al consumo de electricidad y al transporte de los residuos hasta la planta de reciclaje en ambas alternativas. La categoría disminución de la capa de ozono también se ve afectada en gran medida por la producción de árido natural en un 100 % y en menor proporción por la alternativa AHo con un 42 %.

Al comparar la obtención del árido natural con el resto de alternativas de producción de árido, se encuentra que el AN presenta los más grandes impactos en todas las categorías evaluadas, menos en carcinogénicos y no carcinogénicos, donde los impactos son casi nulos, debido a que los más grandes impactos los presenta la obtención de árido de hormigón en planta y en obra, al incluir los impactos por el reciclaje de los residuos de acero.

Al efectuar el análisis de sensibilidad con distancias por medio del aumento del trayecto recorrido por el residuo desde el sitio de generación hasta la planta de reciclaje, se obtiene que la única categoría donde el árido reciclado resulta con impactos notables comparados con el árido natural es en la categoría disminución de la capa de ozono; sin embargo, para las categorías: extracción de mineral, energía no renovable, calentamiento global, eutrofización, acidificación, ocupación del suelo y respiratorios orgánicos e inorgánicos, el árido reciclado sigue presentando menores impactos comparado con el árido natural.

6.1.2 Criterio económico

En este apartado se presentan los resultados del cálculo del coste de referencia para cada una de las alternativas de obtención de árido con el fin de hacer la comparación entre ellas.

6.1.2.1 Resultados y discusión del criterio económico

❖ Árido natural (AN)

Para el coste de esta alternativa se tomó como base el coste del BEDEC (2015) correspondiente al coste de ejecución del árido natural para el año 2015. Se trata de una grava de cantera de piedra calcárea, de tamaño máximo 40 mm, para hormigones, cuyo coste de ejecución corresponde a 17.47 €/t. Dicho dato

fue contrastado con la información suministrada por las empresas y plantas de producción de áridos consultadas.

Debido a la mínima cantidad de residuos sólidos generados en la obtención del árido natural, el coste por la gestión de los residuos en esta alternativa es igual a $4.05E-05$ €/t de árido natural (según la Ecuación 3-4), de manera que, al ser un coste muy mínimo, se considera insignificante.

❖ **Árido de hormigón en planta (AHp)**

Para esta alternativa de obtención de árido reciclado de hormigón en planta, se tomó como base una grava de árido reciclado de hormigón de 20 a 40 mm con un coste de ejecución de 10.76 €/t de árido (BEDEC, 2015). A este coste, se ha de sumar aquel otro de gestión de los residuos de acero, el cual se calcula al hallar el coste de transporte de los residuos de acero hasta la planta de reciclaje y el ingreso por la venta del residuo de acero o chatarra como materia prima para la producción secundaria de acero (0.04 t de acero/t de árido).

El coste de transporte, teniendo en cuenta la Ecuación 3-2, resulta en $5.00E-03$ €/t de árido reciclado y el ingreso por la venta del residuo de acero es 6 € por tonelada de árido reciclado. Este ingreso se calcula teniendo en cuenta la información suministrada por las plantas de reciclaje consultadas y empresas productoras de acero, donde el coste de la chatarra oscila entre 100-220 €/t (años 2013-2015). De este modo, se calcula un coste de venta promedio de 150 €/t para la chatarra de acero.

Si a 10.76 €/t se suma el coste de transporte del residuo de acero generado y se resta el ingreso por la venta del residuo de acero, finalmente se obtiene en total un coste de referencia aproximado para esta alternativa de 4.76 €/t.

❖ **Árido de hormigón en obra (AHo)**

Esta alternativa de producción del árido de hormigón es similar a la anterior; no obstante, al cambiar el lugar donde se lleva a cabo el reciclaje, que en este caso es en la misma obra de construcción, si bien no hace falta trasladar los residuos a la planta de reciclaje, sí es necesario trasladar las plantas móviles a la obra.

El coste de transporte de los residuos de hormigón hasta la planta de reciclaje, según la Ecuación 3-2, resulta ser 0.23 €/t. Este coste se resta al coste de producción del árido de hormigón 10.76 €/t (BEDEC, 2015), resultando un coste de 10.53 €/t.

Como las plantas móviles funcionan durante un año en la obra, se calcula el coste de transporte —ida y vuelta de dichas plantas (peso de las dos aproximadamente de 50 t, apartado 6.1.1.3 [AHo])— para el caso del reciclaje en obra, así como el coste del transporte de las 400000 t/año de los residuos de hormigón hasta la planta, considerando el caso del reciclaje en planta fija (para dicho cálculo se emplea la Ecuación 3-2). Las 400000 t/año corresponden a la capacidad de producción anual de la planta de reciclaje considerada en el estudio.

El resultado del coste por transporte de los residuos de hormigón fue $9.40E+04$ €/año y el coste por el transporte de las maquinarias móviles ida y vuelta fue de 23.5 €/año. A partir de estos resultados se concluye que el coste de transporte del reciclaje en obra es 0.05 % del coste de transporte de los residuos en planta fija. Por lo tanto, si el coste por tonelada del residuo de hormigón hasta la planta fija es de 0.23 €/t, el coste de transporte de las maquinarias en el reciclaje en obra es de $1.15 E-04$ €/t. Este valor se suma a los 10.53 €/t y se le aplica el mismo coste de gestión del residuo de acero, hallado en el árido de hormigón en planta (AHp), resultando en total 4.54 €/t para esta alternativa.

❖ **Árido mixto en planta (AMp)**

El coste de esta alternativa se calculó con base al coste de ejecución del árido mixto reciclado igual a 8.26 €/t (BEDEC, 2015). Se trata de una grava de árido reciclado mixto de hormigón-cerámica de 40 a 70 mm. A este valor se suma el coste de gestión del residuo de acero generado en la producción del árido mixto.

Como este tipo de árido corresponde a un árido TIPO 2, según la normativa alemana DIN 4226, y está conformado en más de un 70 % de hormigón y con menos de un 30 % de cerámica, la cantidad de acero generado en este caso por t de árido mixto reciclado es 0.048 t. El coste de transporte del acero por t de árido reciclado mixto es de 0.004 € y el ingreso de la venta de acero por t de árido reciclado mixto es de 4.2 €.

Si al coste de producción (8.26 €/t) se suma el coste del residuo de acero hasta la planta de reciclaje y se resta el ingreso por la venta del acero, se obtiene un coste de referencia aproximado para esta alternativa de 4.06 €/t.

En la Tabla 6.9, se muestra en forma resumida el coste económico de cada una de las alternativas.

Tabla 6.9 Coste de referencia de cada una de las alternativas de producción de árido

Material	A1 (Árido natural)	A2 (Árido de hormigón en planta)	A3 (Árido de hormigón en obra)	A4 (árido mixto en planta)
Árido	17.47 €/t	4.76 €/t	4.54 €/t	4.06 €/t

Al comparar el coste económico de cada una de las alternativas de producción de árido se encuentra un ahorro económico en las alternativas de árido reciclado con respecto a la alternativa de obtención de árido natural. Estos resultados coinciden con varios autores (Tam, 2008; Coelho y De Brito, 2013a; Coelho y De Brito, 2013b), quienes han encontrado también ahorros en la obtención de árido reciclado de hormigón frente al árido natural.

El mayor ahorro en los áridos reciclados se presenta en la alternativa de producción de árido mixto reciclado (77 %), seguido de la producción de hormigón en obra (74 %) y, por último, la producción de árido de hormigón en planta con un ahorro de 73 %. El menor coste del árido mixto reciclado se debe a que en este tipo de árido el hormigón y la cerámica se encuentran mezclados y, por lo tanto se considera de menor calidad con respecto al árido de hormigón de caras a ser empleado para la producción de nuevo hormigón. También hay que tener en cuenta que el coste por la recepción de este tipo de residuo en la planta de reciclaje es menor, en comparación con los residuos que llegan conformados únicamente por hormigón.

El menor coste del árido de hormigón obtenido en la misma obra de construcción se debe a los ahorros por el transporte de los residuos desde el sitio de producción hasta la planta de reciclaje, el cual resulta menor comparado con el transporte de la maquinaria hasta el sitio de la obra.

6.2 Fase 5: Definición de los indicadores

Para evaluar las alternativas en término de criterios (ambiental y económico), se halló la carga normalizada para las categorías relacionadas con la salud (F1) y la carga normalizada para las categorías relacionadas con la calidad del ecosistema, el cambio climático y el consumo de recursos (F2), siguiendo la Ecuación 3-6. Los resultados de dichos cálculos se muestran en la Tabla 6.10.

Tabla 6.10 Carga medioambiental normalizada y valor del criterio económico para cada alternativa

Alternativas		F1	F2	F3 Económico
		(normalizada)	(normalizada)	€/t
A1	AN	0.50	0.98	17.47
A2	AHp	0.53	0.17	4.76
A3	AHo	0.49	0.00	4.54
A4	AMp	0.47	0.39	4.06

6.3 Fase 6: Clasificación y elección de las alternativas. Análisis y discusión de resultados

6.3.1 Aplicación del método multicriterio y elección de las alternativas

Al aplicar el método VIKOR propuesto, se hallaron los valores de S, R y Q los cuales se clasificaron en orden decreciente (de mayor a menor ventaja). Los resultados son tres listas de clasificación, donde el valor ideal para las tres medidas es cero. Los resultados de dicha clasificación se muestran en la Tabla 6.11.

Estos valores se hallaron siguiendo la secuencia de ecuaciones comprendidas desde la Ecuación 3-7 hasta la Ecuación 3-12.

Tabla 6.11 Lista de valores S, R y Q calculados en la producción del árido

Clasificación de los criterios	Alternativas	Qj	Sj	Rj
Igual importancia	A4(AMp)	0.00	0.13	0.13
	A3(AHo)	0.11	0.17	0.16
	A2(AHp)	0.69	0.41	0.33
	A1(AN)	1.00	0.85	0.33
Ventaja medioambiental	A4(AMp)	0.00	0.16	0.16
	A3(AHo)	0.11	0.20	0.20
	A2(AHp)	0.74	0.48	0.40
	A1(AN)	1.00	0.83	0.40
Ventaja económica	A4 (AMp)	0.00	0.10	0.10
	A3(AHo)	0.05	0.14	0.12
	A2(AHp)	0.33	0.32	0.25
	A1(AN)	1.00	0.89	0.50

Como se observa en la Tabla 6.11, las alternativas escogidas como mejor opción para todas las clasificaciones de los criterios son las alternativas AMp y AHo. Al no cumplirse las condiciones de la Ecuación 3-10 y Ecuación 3-11, se escogieron dos alternativas como la solución óptima a partir de la Ecuación 3-12.

Se aprecia en la Tabla 6.11 que no existen diferencias en el resultado de Q cuando se considera el criterio de igual importancia y cuando se considera el criterio de ventaja medioambiental. La ventaja de la alternativa AMp frente a la alternativa AHo, en ambos criterios, es de 11 %. Sin embargo, al darle un mayor peso al criterio económico, la ventaja de la alternativa AMp frente al AHo es menor (5 %). Esto se debe a que son menores las diferencias económicas con respecto a las diferencias medioambientales de la alternativa AMp frente a la alternativa AHo.

La diferencia entre la alternativa AMp y AHp es de 69 % si se le da el mismo peso al criterio medioambiental y económico. Si se atribuye mayor peso al criterio ambiental la ventaja de la alternativa AMp frente a la alternativa AHp es mayor, correspondiendo a un 74 %. Por el contrario, si se le da mayor peso al criterio económico, la diferencia entre esas alternativas es menor, lo que quiere decir que las diferencias medioambientales —entre dichas alternativas— es mayor con respecto a las diferencias económicas.

En todas las clasificaciones de los criterios, la ventaja de la alternativa AMp frente a la alternativa AN es de 100%, quedando la alternativa de obtención de árido natural como la última opción.

La ventaja del AHo frente al AHp es de 58 % cuando se considera igual peso a ambos criterios. Si se le da mayor peso al criterio ambiental, la ventaja de AHo frente a AHp es de 63 %, pero si se le da mayor peso al criterio económico la ventaja es de 28 %. Esta significativa diferencia quiere decir que el AHo presenta mayores ventajas medioambientales que económicas con respecto a la alternativa AHp.

La alternativa de AHp presenta ventajas con respecto a la alternativa de producción de AN en un 31 %, al darle igual peso a ambos criterios. Ahora bien, si se le da más importancia al aspecto ambiental esta ventaja se reduce a un 26 % y si se le da más peso al criterio económico la ventaja del AHp frente al AN llega a ser de 67 %. Estas diferencias bien visibles se deben a que el AHp presenta un coste económico mucho menor que el AN.

En la lista de valores de R y S, las alternativas mantienen el mismo orden de clasificación.

6.4 Conclusiones

La obtención de árido natural presenta impactos en todas las categorías evaluadas; sin embargo, en las categorías efectos carcinogénicos y no carcinogénicos muestra impactos casi nulos comparados con el resto de alternativas de obtención de árido.

La producción de árido reciclado presenta grandes impactos en la categoría carcinogénicos y no carcinogénicos y ahorros en las categorías respiratorios orgánicos e inorgánicos, ocupación del suelo, acidificación, eutrofización, calentamiento global, energía no renovable y extracción de mineral.

El coste de las alternativas de obtención de árido reciclado resulta en beneficio económico, con respecto a la alternativa de obtención de árido natural. Entre las alternativas de obtención de árido reciclado la más beneficiosa a nivel económico, es la producción de árido mixto con respecto al árido natural. La alternativa que presenta menos ahorros es la producción de árido de hormigón en planta.

Las opciones escogidas como óptimas, al aplicar la propuesta metodológica en la producción de árido para todas las clasificaciones de los criterios (igual importancia ambiental y económica o mayor importancia a uno de estos dos criterios), son AMp y AHo. Sin embargo, existen mayores ventajas medioambientales que económicas en la alternativa AMp frente a la alternativa AHo.

Al efectuar el análisis de sensibilidad con distancias por medio del aumento el trayecto recorrido por los residuos de hormigón y cerámica desde el sitio de generación hasta la planta de reciclaje, se obtiene que la mayoría de categorías evaluadas siguen presentando menores impactos en el árido reciclado en comparación con el árido natural.

7 Aplicación de la propuesta metodológica al hormigón

7.1 Fase 4: Evaluación ambiental y económica

7.1.1 Criterio ambiental. Metodología de análisis de ciclo de vida

7.1.1.1 *Definición de objetivo y alcance*

❖ Objetivo

El objetivo de este análisis de ciclo de vida consiste en evaluar los impactos medioambientales de la producción de hormigón estructural y no estructural, a partir de materia prima original y a partir de materia prima reciclada (hormigón reciclado).

❖ Alcance

➤ *Producción primaria y secundaria*

En el proceso de producción de hormigón se consideran como entradas las materias primas, recursos y energía (combustible y electricidad) y como salidas las emisiones atmosféricas, aguas residuales y residuos sólidos (Figura 7-1). El proceso de obtención del hormigón se basa, fundamentalmente, en la mezcla de las materias primas necesarias para su producción.

El proceso de obtención de hormigón primario y secundario difiere únicamente en el uso de material reciclado en vez de material original y los impactos asociados a la obtención de cada una de las materias primas.

En este caso, para la aplicación de la propuesta metodológica se tiene en cuenta el transporte interno y el transporte de los materiales desde la fábrica de obtención de las materias primas hasta la planta de producción del hormigón. Se incluye también el transporte hasta el sitio de gestión de los residuos generados en el proceso de producción del hormigón.

En la Figura 7-1 y Figura 7-2 se muestran los límites del sistema para la producción primaria y secundaria del hormigón.

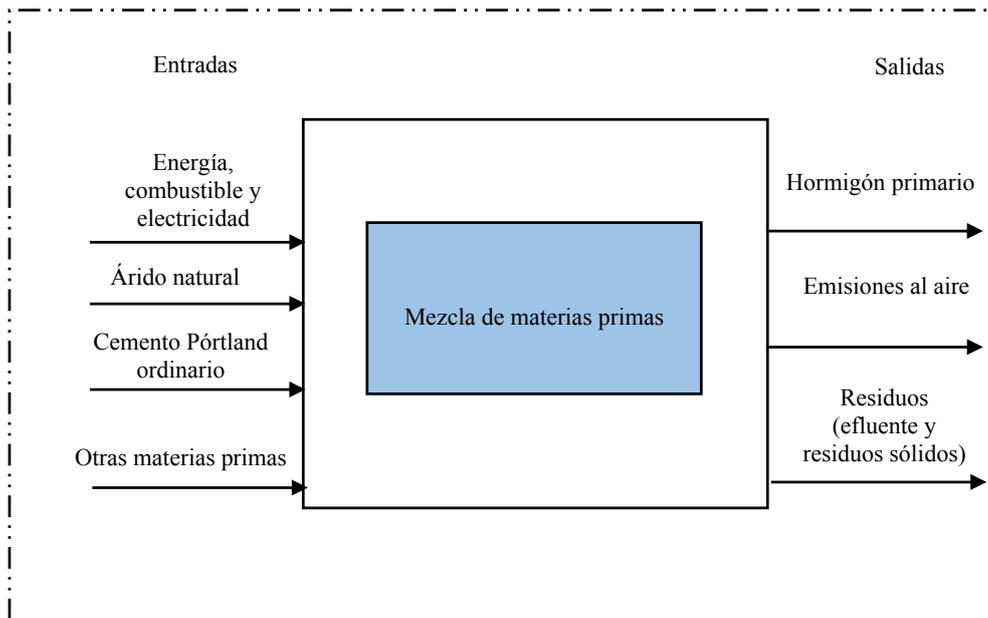


Figura 7-1 Límites del sistema en la obtención del hormigón primario

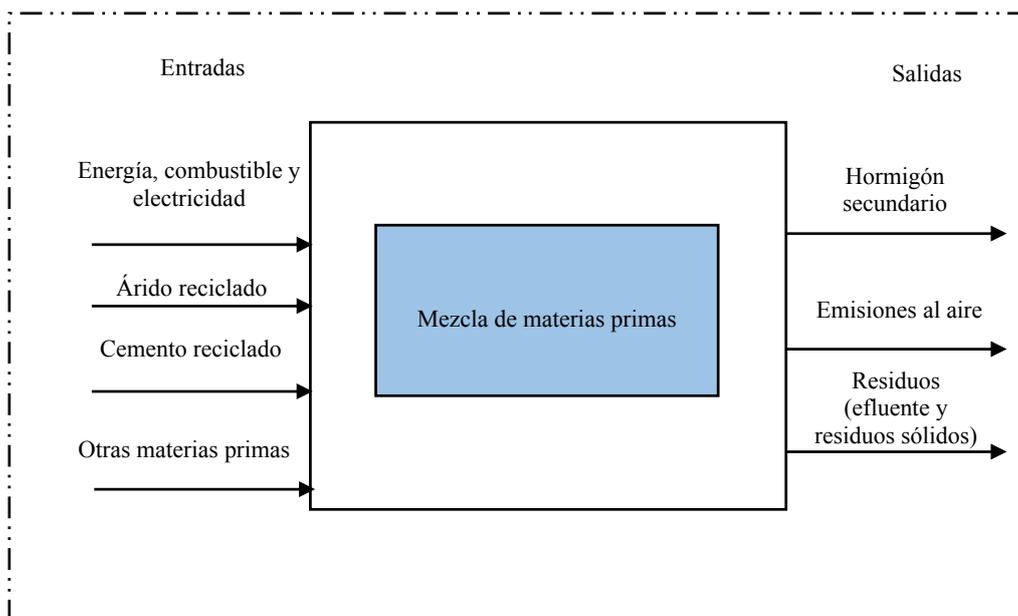


Figura 7-2 Límites del sistema en la obtención del hormigón secundario

En el hormigón secundario (Figura 7-2), se reemplaza árido natural por árido reciclado de hormigón y/o CPO por cemento con yeso reciclado.

❖ **Unidad funcional**

La unidad funcional escogida en el hormigón es 1 m³ de material.

7.1.1.2 Descripción de las alternativas propuestas

Las alternativas de producción de hormigón se clasifican en dos bloques, tal como se mencionó en el apartado 3.3.2.1.

Se emplean dos categorías de hormigones teniendo en cuenta la resistencia a compresión, ya que para comparar, tanto económica como ambientalmente, es necesario tener en cuenta también el aspecto técnico y comparar diferentes tipos de hormigones con la misma funcionalidad.

Un primer bloque se refiere a la producción de hormigón con características estructurales con resistencias a compresión de 35 N/m², y un segundo bloque se refiere a la producción de hormigón con características no estructurales con resistencia a compresión de 15 N/m². Las alternativas están basadas en la obtención de hormigones de similar resistencia y comportamiento mecánico, lo que permite, a la vez, una misma funcionalidad.

Para el caso de hormigón estructural se siguió la dosificación empleada por López (2008) con la que se garantiza obtener una resistencia de 35 N/m². Esta resistencia cubre la gran mayoría de los hormigones normalmente fabricados en España para obra civil. En este primer grupo de hormigones se emplea una cantidad de cemento de 375 kg/m³ y 187.5 kg de agua; por lo tanto, una relación a/c de 0.50.

Las alternativas de producción de árido escogidas como solución óptima, de acuerdo a la aplicación de la propuesta metodológica, son: AMp y AHo (apartado 6.3.1). Por ello, se emplea AMp para el caso de hormigón no estructural y para el hormigón estructural se escoge, en vez de AHo, la alternativa de producción de árido en tercera posición, es decir, AHp, ya que normalmente el árido de hormigón que es producido en las plantas de reciclaje es el que es transportado a las plantas de fabricación de hormigón.

Para la fabricación de hormigón no estructural se tuvo en cuenta la dosificación recomendada por Sánchez de Juan *et al.* (2011) y CEDEX (2010) en la que se emplea 250 kg de cemento (CEM I 42.5 R) y 187.5 kg de agua; es decir, una relación agua/cemento de 0.75 para obtener un hormigón de una resistencia de 15 N/m² para uso no estructural.

En la Tabla 7.1 y Tabla 7.2 se muestran las alternativas de producción de hormigón.

Tabla 7.1 Alternativas en la producción de hormigón estructural

Producción primaria	Producción secundaria	
A1 (HE100%AN)	A2 (HE20%AR)	A3 (HE20%AR -CYR)
Hormigón estructural, 100% árido natural	Hormigón estructural, 20% árido de hormigón	A2, 100% cemento reciclado

Tabla 7.2 Alternativas en la producción de hormigón no estructural

Producción primaria	Producción secundaria			
A1 (HNE100%AN)	A2 (HNE100%AR)	A3 (HNE75%AMR)	A4 (HNE100% AR-CYR)	A5 (HNE75% AMR-CYR)
Hormigón no estructural, 100% árido natural	Hormigón no estructural, 100% árido de hormigón	Hormigón no estructural, 75% árido mixto	A2, 100% cemento reciclado	A3, 100% cemento reciclado

Un resumen de las principales características de las alternativas de hormigón estudiadas, se muestran en la Tabla 7.3.

Tabla 7.3 Principales características de las alternativas de producción del hormigón (m³)

Alternativas		a/c (efectiva)	Agua (kg)	CPO (kg)	CYR (kg)	AGN (kg)	AFN (Kg)	AGRH (kg)	AGRM (kg)
HEA1	(HE100%AN)	0.50	187.5	375		1125	750		
HEA2	(HE20%AR)	0.50	187.5	375		900	750	225	
HEA3	(HE20%AR-CYR)	0.50	187.5		375	900	750	225	
HNEA1	(HNE100%AN)	0.75	187.5	250		1107	886		
HNEA2	(HNE100%AR)	0.75	206.25*	250			998	730	
HNEA3	(HNE75%AMR)	0.75	206.25*	250		182	998		548
HNEA4	(HNE100%AR-CYR)	0.75	206.25*		250		998	730	
HNEA5	(HNE75%AMR-CYR)	0.75	206.25*		250	182	998		548

*Incluye pre-saturación de los áridos (cantidad de agua = 187.5 kg + agua de pre-saturación (10% de 187.5 kg) = 206.25 kg).

7.1.1.3 Análisis de inventario

Para aplicar la propuesta metodológica al hormigón se recurrió también a la consulta directa en empresas y organismos a nivel nacional. Teniendo en cuenta no sólo las empresas productoras de hormigón, sino también las empresas o plantas de producción de las materias primas empleadas —como es el caso de

las cementeras, graveras o plantas de reciclaje de áridos— se contactó en total con 22 de ellas. Los datos que no se pudieron obtener a partir de fuentes primarias se extrajeron de bases de datos o de estudios efectuados en este campo.

Para las alternativas de producción de hormigón se tomó como base el proceso existente en la base de datos de Ecoinvent v2.2 llamado “*Concrete, normal, at plant/CH U*”. Sin embargo, este proceso se adaptó al contexto español, no sólo en cuanto al mix eléctrico, sino también empleando la dosificación de los diferentes tipos de hormigón según la normativa española y estudios de casos que garantizan unas características técnicas, físicas y mecánicas adecuadas para el hormigón resultante.

Los procesos referentes a áridos y cemento son tomados de los procesos creados en las diferentes alternativas de producción halladas en los capítulos anteriores.

❖ **Alternativas de hormigón estructural**

➤ ***Hormigón con 100 % árido grueso natural (HE100%AN)***

Esta alternativa de producción de hormigón corresponde al hormigón estructural convencional en el que se emplea una cantidad de cemento de 375 kg/m³ y 187.5 kg de agua; por lo tanto, una relación a/c de 0.50.

Básicamente el proceso llevado a cabo para la obtención del hormigón consiste en la mezcla de las materias primas en la planta de producción. Este proceso presenta las siguientes entradas:

- Infraestructura de la planta de producción. Incluye el área de la infraestructura y la maquinaria empleada para la producción de hormigón pre-mezclado. Se asume un tiempo de vida útil de la infraestructura de 50 años con una producción anual de aproximadamente 100000 t.
- Diésel y electricidad. Para ambos se toma como base los procesos de Ecoinvent v2.2. El consumo de diésel es debido a la maquinaria empleada y la electricidad corresponde a la consumida en la planta. Estos procesos incluyen las emisiones al aire.
- Áridos. Para el árido fino se emplea el proceso existente en la base de datos de Ecoinvent v2.2, mientras que para el árido grueso se utiliza el proceso creado en el apartado 6.1.1.3, correspondiente al árido natural. En ambos casos se utilizan como distancia promedio de transporte desde la cantera del árido hasta la planta de hormigón unos 5 km. Esta distancia se calcula a partir del número y de la distribución de las canteras de árido (114), según el Gremi d'Àrids de Catalunya (2015) y de las plantas de hormigón en Cataluña (150), según la ANEFHOP (2015).

En esta alternativa de producción de hormigón se emplea una cantidad de árido grueso de 1125 kg y árido fino de 750 kg. La relación agua/cemento empleada ha sido ya explicada en el apartado 7.1.1.2.

- Fuelóleo y gas natural. Estos combustibles se emplean en los sistemas de calefacción y agua caliente sanitaria de la planta de producción.
- Aceite lubricante. Se tomó como base el proceso de Ecoinvent v2.2.
- Cemento Pórtland ordinario. Se emplea el proceso creado en el apartado 5.1.1.3 (CPO) y se adiciona la distancia promedio de transporte desde la cementera hasta la planta de producción de hormigón (15 km), de acuerdo al número y distribución de estas plantas en Cataluña (CIMENT CATALÁ, 2015; ANEFHOP, 2015) (Anexo V).
- Agua. El consumo de agua se refiere al agua empleada en la mezcla de los materiales de hormigón, equivalente a 187.5 kg. El transporte del agua se encuentra incluido en la obtención de 1 kg de agua.
- Piezas de desgaste. Las piezas de acero y de plástico son usadas para el desgaste de las maquinarias.

En la Tabla 7.4 se resumen los diferentes procesos de entrada existentes en esta alternativa de producción. En el Anexo H se pueden ver con más detalle.

Las salidas del proceso de producción del hormigón son las siguientes y se muestran en forma resumida en la Tabla 7.5:

- Residuos de hormigón, los cuales se transportan hasta el vertedero de residuos inertes a una distancia aproximada de 17 km y residuos sólidos a semejables a residuos municipales, los cuales son transportados al vertedero de residuos municipales ubicado aproximadamente a 21 km. Ambas distancias fueron calculadas a partir del Servidor de mapas de la ARC (2015b) (Anexo W).
- Efluente del hormigón. Las aguas residuales que resultan de la producción de hormigón son tratadas por una estación depuradora. La composición típica de esta agua residual se muestra en la Tabla 7.6.

Tabla 7.4 Entradas del hormigón estructural (1 m³) con 100 % árido natural

Proceso básico	Unidad	Cantidad	Fuente
Infraestructura de la planta de producción	p	4.57E-07	Ecoinvent v2.2
Diésel empleado en maquinaria	MJ	2.27E+01	Ecoinvent v2.2
Electricidad	kWh	4.36E+00	Ecoinvent v2.2
Árido fino natural	kg	7.50E+02	Sánchez de Juan (2004); Ecoinvent v2.2
Árido grueso natural	kg	1.13E+03	Ministerio de Industria, Energía y Turismo (2013); AFA (2010); Gremi d'Àrids de Catalunya (2013); empresas españolas (2009-2013) y Ecoinvent v2.2
Fuelóleo (pesado) en horno industrial	MJ	3.09E+00	Ecoinvent v2.2
Fuelóleo (ligero) en horno industrial	kg	1.33E+01	Ecoinvent v2.2
Aceite lubricante	kg	1.19E-02	Ecoinvent v2.2
Gas natural	MJ	1.16E+00	Ecoinvent v2.2
Cemento Pórtland ordinario	kg	3.75E+02	Ecoinvent v2.2; Ministerio de Industria, Energía y Turismo (2013); Empresas cementeras españolas (2009-2011) y López (2008)
Piezas de desgaste (acero)	kg	2.38E-02	Ecoinvent v2.2
Piezas de desgaste (caucho sintético)	kg	7.13E-03	Ecoinvent v2.2
Agua	kg	1.88E+02	Ecoinvent v2.2

Tabla 7.5 Salidas del proceso de producción de 1 m³ hormigón estructural con 100 % árido natural

Proceso básico	Nombre del proceso en Ecoinvent v2.2	Unidad	Cantidad	Fuente
Calor	Heat, waste	MJ	1.57E+01	Ecoinvent v2.2
Disposición de residuos de hormigón	Disposal, concrete, 5 % water, to inert material landfill/CH U	kg	1.69E+01	Ecoinvent v2.2
Disposición de residuos sólidos	Disposal, municipal solid waste, 22.9 % water, to sanitary landfill/CH U	kg	9.51E-02	Ecoinvent v2.2
Tratamiento del efluente	Treatment, concrete production effluent, to wastewater treatment, class 3/CH U	m ³	1.43E-02	Ecoinvent v2.2

Tabla 7.6 Composición típica del agua residual proveniente de la fabricación del hormigón (Ecoinvent v2.2)

Emisiones al agua	Cantidad promedio (kg/l de agua residual)
Cloruro	2.97E-05
Ion de arsénico	1.00E-09
Ion de plomo	1.00E-09
Ion de cromo VI	2.13E-08
Ion de potasio	3.18E-04
Ion de sodio	8.28E-05
Ion de Zinc	3.46E-08
Nitrato	1.40E-05
Fosfato (PO ₄)	2.10E-07
Sulfato	3.01E-06
Carbono orgánico total	1.22E-05

➤ **Hormigón con 20 % árido grueso reciclado (HE20%AR)**

En esta alternativa se emplea un 20 % de árido grueso reciclado como sustitución del árido natural, ya que debido a estudios efectuados (Alaejos, 2008 ; Sánchez de Juan *et al.*, 2011) esta proporción de árido reciclado en el hormigón no afecta las características técnicas del material, por lo que se obtienen resistencias similares al hormigón convencional fabricado con árido natural, sin necesidad de modificar la relación a/c empleada.

Las entradas de esta alternativa de producción de hormigón son similares a la alternativa (HE100%AN), de modo que sólo cambia el tipo y la cantidad de áridos empleados (Tabla 7.7). También se adiciona como producto evitado la cantidad de árido natural, que deja de producirse por el reciclaje. En el Anexo I se puede ver con más detalle.

Con referencia a la cantidad de árido grueso y fino empleado en el hormigón convencional (100 % de árido natural), se emplea en esta alternativa la misma cantidad de árido fino (750 kg) y se reemplaza un 20 % del contenido de árido grueso natural, que equivalen a 225 kg de árido reciclado. En total se emplean 900 kg de árido grueso natural.

El proceso empleado para el árido reciclado se creó en el apartado 6.1.1.3, el cual se refiere al árido reciclado en planta proveniente de residuos de hormigón. La distancia de transporte del árido reciclado hasta la planta de hormigón es de 7 km aproximadamente de acuerdo al número de plantas de reciclaje (55) y plantas de hormigón (150) en Cataluña (Anexo M y Anexo P).

En este proceso se incluye también como producto evitado 225 kg de árido natural, ya que el uso del árido reciclado evita la producción de árido natural.

Las salidas se muestran en la Tabla 7.5. Estas son iguales en todas las alternativas de producción de hormigón.

Tabla 7.7 Entradas en la producción de 1 m³ hormigón con 20 % árido reciclado

Proceso básico	Unidad	Cantidad	Fuente
Infraestructura de la planta de producción	p	4.57E-07	Ecoinvent v2.2
Diésel empleado en maquinaria	MJ	2.27E+01	Ecoinvent v2.2
Electricidad	kWh	4.36E+00	Ecoinvent v2.2
Árido fino natural	kg	7.50E+02	Sánchez de Juan (2004); Ecoinvent v2.2
Árido grueso natural	kg	9.00E+02	Ministerio de Industria, Energía y Turismo (2013); AFA (2010); Gremi d'Àrids de Catalunya (2013); Empresas españolas (2009-2012) y Ecoinvent v2.2
Árido grueso reciclado	kg	2.25E+02	ARC (2015b); Plantas de reciclaje (2010-2014); Mercante <i>et al.</i> (2010); Zazurca (2012); BEDEC (2015) y Ecoinvent v2.2.
Fuelóleo (pesado) en horno industrial	MJ	3.09E+00	Ecoinvent v2.2
Fuelóleo (ligero) en horno industrial	kg	1.33E+01	Ecoinvent v2.2
Aceite lubricante	kg	1.19E-02	Ecoinvent v2.2
Gas natural	MJ	1.16E+00	Ecoinvent v2.2
Cemento Pórtland ordinario	kg	3.75E+02	Ecoinvent v2.2; Ministerio de Industria, Energía y Turismo (2013); Empresas cementeras españolas (2009-2011) y López (2008)
Piezas de desgaste (acero)	kg	2.38E-02	Ecoinvent v2.2
Piezas de desgaste (caucho sintético)	kg	7.13E-03	Ecoinvent v2.2
Agua	kg	1.88E+02	Ecoinvent v2.2

➤ **Hormigón con 20 % árido grueso reciclado y 100 % cemento reciclado (HE20AR%-CYR)**

Esta alternativa es similar a la alternativa HE20%AR, sólo que se reemplaza la totalidad del CPO por cemento reciclado. La alternativa de cemento reciclado escogida para ser evaluada corresponde a la mejor opción, tanto ambiental como económica, tenida en cuenta de acuerdo con los resultados del método multicriterio (apartado 5.3.1). Por esta razón se emplea el cemento con yeso reciclado (CYR)

en todas las alternativas de producción de hormigón con cemento reciclado. La cantidad de cemento empleado es de 375 kg/m³.

También se emplea como producto evitado la cantidad de CPO que se evita producir (375 kg/m³), debido al uso de cemento reciclado. Las entradas y salidas son similares a la alternativa HE20%AR (Tabla 7.7).

❖ **Alternativas de hormigón no estructural**

➤ ***Hormigón no estructural con 100 % árido grueso natural (HNE100%AN)***

Esta alternativa corresponde al hormigón no estructural convencional en el que se emplea árido grueso y árido fino natural.

En esta alternativa de producción de hormigón no estructural, se emplea como se mencionó en el apartado 7.1.1.2, una relación a/c de 0.75. La cantidad de árido fino usada es de 866 kg y la cantidad de árido grueso de 1107 kg (Sánchez de Juan 2011). Como el proceso de producción de hormigón es el mismo, las entradas y salidas permanecen iguales a la alternativa de producción de hormigón estructural (apartado 7.1.1.3, referente al HE100%AN), de manera que solo cambia la cantidad de agua y de cemento empleado que en este caso equivale a 250 kg /m³ de cemento y 187.5 kg de agua. En esta alternativa se emplea el proceso de árido grueso natural creado en el apartado 6.1.1.4.

➤ ***Hormigón no estructural con 100 % árido grueso reciclado (HNE100%AR)***

Según Sánchez de Juan (2004), se puede emplear hasta un 100 % de árido de grueso reciclado proveniente de hormigón para la obtención de hormigón reciclado para uso no estructural.

Las dosificaciones recomendadas por Sánchez de Juan (2004) corresponden a una relación a/c de 0.75, con una cantidad de cemento de 250 kg/m³ y de agua de 187.5 kg. Sin embargo, de acuerdo a los estudios efectuados (Sánchez de Juan, 2004; Poon *et al.*, 2004; Oliveira *et al.*, 2004; Correia *et al.*, 2006; López, 2008; Evangelista y De Brito, 2010; Matías *et al.*, 2013; Coelho y De Brito, 2013c; Ferreira, 2013; Bravo *et al.*, 2015), se recomienda saturar los áridos reciclados o aumentar la cantidad de agua, además de la contenida en la relación a/c, para evitar que los áridos reciclados —al ser más porosos— absorban agua y generen con el tiempo fisuras en el hormigón. Por ello, siguiendo la dosificación empleada por Poon *et al.* (2004) y López (2008), se adiciona un 10 % más de agua para garantizar la pre-saturación de los áridos reciclados. En este caso resulta una cantidad de agua de 206.25 kg y se emplea como producto evitado 730 kg de árido natural, que se evita producir con el reciclaje.

En la Tabla 7.8 se muestran las entradas de esta alternativa. En el Anexo J se pueden ver con más detalle.

Tabla 7.8 Entradas en la producción de 1 m³ de hormigón no estructural con 100 % árido reciclado

Proceso básico	Unidad	Cantidad	Fuente
Infraestructura de la planta de producción	p	4.57E-07	Ecoinvent v2.2
Diésel empleado en maquinaria	MJ	2.27E+01	Ecoinvent v2.2
Electricidad	kWh	4.36E+00	Ecoinvent v2.2
Árido fino natural	kg	9.98E+02	Sánchez de Juan (2004); Ecoinvent v2.2
Árido reciclado de hormigón	kg	7.30E+02	ARC (2015b); Plantas de reciclaje de Cataluña (2010- 2014) y Mercante <i>et al.</i> (2010)
Fuelóleo (pesado) en horno industrial	MJ	3.09E+00	Ecoinvent v2.2
Fuelóleo (ligero) en horno industrial	kg	1.33E+01	Ecoinvent v2.2
Aceite lubricante	kg	1.19E-02	Ecoinvent v2.2
Gas natural	MJ	1.16E+00	Ecoinvent v2.2
Cemento Pórtland ordinario	kg	2.50E+02	Ecoinvent v2.2; Ministerio de Industria, Energía y Turismo (2013); Empresas cementeras españolas (2009-2011) y López (2008)
Piezas de desgaste (acero)	kg	2.38E-02	Ecoinvent v2.2
Piezas de desgaste (caucho sintético)	kg	7.13E-03	Ecoinvent v2.2
Agua	kg	2.06E+02	Ecoinvent v2.2

Las salidas de esta alternativa se pueden observar en la Tabla 7.5.

➤ **Hormigón no estructural con 75 % árido mixto reciclado (HNE75%AMR)**

Según la literatura, al emplear una relación a/c de 0.75 y un 75 % de árido mixto reciclado, se alcanza una resistencia del hormigón de alrededor de 20 N/mm² (Poon y Chan, 2006); por ello, se emplea esta proporción de árido reciclado mixto como reemplazo del árido natural. En este caso, el árido mixto está compuesto en menos de 30 % por cerámica y más del 70 % de hormigón.

Con base a la cantidad de árido grueso y fino empleado en la producción de hormigón reciclado no estructural (Sánchez de Juan, 2011), se emplea en este caso 548 kg de árido mixto reciclado (75 % del

árido grueso), 182 kg de árido grueso natural y 998 kg de árido fino. La cantidad de cemento es 250 kg/m³ y la cantidad de agua, incluyendo el agua de pre-saturación de los áridos, es de 206.25 kg.

Se emplea para esta alternativa el proceso de árido reciclado mixto creado en el apartado 6.1.1.3.

Las entradas de la producción de hormigón no estructural con 75% de árido mixto reciclado se especifican en la Tabla 7.9. En el Anexo K se puede ver con más detalle.

Tabla 7.9 Entradas de la producción de 1 m³ de hormigón no estructural con 75 % de árido mixto reciclado

Proceso básico	Unidad	Cantidad	Fuente
Infraestructura de la planta de producción	p	4.57E-07	Ecoinvent v2.2
Diésel empleado en maquinaria	MJ	2.27E+01	Ecoinvent v2.2
Electricidad	kWh	4.36E+00	Ecoinvent v2.2
Árido fino natural	kg	9.98E+02	Sánchez de Juan (2004); Ecoinvent v2.2
Árido reciclado mixto	kg	5.48E+02	ARC (2015b); Plantas de reciclaje de Cataluña (2010-2014) y Mercante <i>et al.</i> (2010)
Árido grueso natural	kg	1.82E+02	Ministerio de Industria, Energía y Turismo (2013); AFA (2010); Gremi d'Àrids de Catalunya (2013); empresas españolas (2009-2012) y Ecoinvent v2.2
Fuelóleo (pesado) en horno industrial	MJ	3.09E+00	Ecoinvent v2.2
Fuelóleo (ligero) en horno industrial	kg	1.33E+01	Ecoinvent v2.2
Aceite lubricante	kg	1.19E-02	Ecoinvent v2.2
Gas natural	MJ	1.16E+00	Ecoinvent v2.2
Cemento Pórtland ordinario	kg	2.50E+02	Ecoinvent v2.2; Ministerio de Industria, Energía y Turismo (2013); Empresas cementeras españolas (2009-2011) y López (2008)
Piezas de desgaste (acero)	kg	2.38E-02	Ecoinvent v2.2
Piezas de desgaste (caucho sintético)	kg	7.13E-03	Ecoinvent v2.2
Agua	kg	2.06E+02	Ecoinvent v2.2

➤ ***Hormigón no estructural con 100 % árido grueso reciclado y 100 % cemento reciclado (HNE100%AR-CYR)***

Esta alternativa es similar a la alternativa HNE100%AR; de este modo, sólo se reemplaza la misma cantidad de CPO por cemento fabricado con yeso reciclado, escogida como mejor opción de acuerdo con los resultados del método multicriterio (apartado 5.3.1).

La cantidad de cemento reciclado empleado es de 250 kg/m³. Las entradas se muestran en la Tabla 7.8, en donde solo cambia el tipo de cemento empleado.

➤ ***Hormigón no estructural con 75 % árido mixto reciclado y 100 % cemento reciclado (HNE75%AMR-CYR)***

Corresponde a la alternativa HNE75%AMR, pero en este caso la totalidad del cemento empleado es el cemento con yeso reciclado (250 kg/m³), como la mejor opción de producción de cemento, tanto a nivel ambiental como económico. Las entradas se aprecian en la Tabla 7.9.

7.1.1.4 Evaluación del impacto del ciclo de vida

❖ Resultados caracterizados y discusión de la evaluación del impacto del ciclo de vida

A continuación se presentan y se discuten los impactos potenciales resultantes para cada una de las alternativas de producción de hormigón, tanto estructural como no estructural, así como las contribuciones porcentuales de los procesos que conforman cada alternativa de producción.

➤ ***Alternativas de hormigón estructural***

• ***Hormigón estructural 100 % AN (HE100%AN)***

La Figura 7-3 indica que las mayores aportaciones a los impactos de todas las categorías evaluadas corresponden al proceso de CPO. Los mayores impactos se presentan en las categorías: calentamiento global (96 %), efectos no carcinogénicos (92 %), disminución de la capa de ozono (87 %) y energía no renovable (86 %). Los menores impactos en las categorías: extracción de mineral (43 %) y ocupación del suelo (45 %). Estos resultados se deben a la gran contribución del clínker dentro del cemento como

se puede observar en la Figura 5-5. Los resultados de estos impactos coinciden con los estudios efectuados por Marinković *et al.* (2010), Giama y Papadopoulos (2015) y Jiménez *et al.* (2015).

Otro proceso relevante en las categorías extracción de mineral (27 %), ocupación del suelo (23 %) y eutrofización (18 %) es el impacto debido a la infraestructura de la planta de hormigón por el uso de materias primas para su construcción, incluyendo el uso del suelo y las emisiones generadas durante este proceso que contribuyen a la eutrofización. Al igual que Jiménez *et al.* (2015), los mayores impactos por la infraestructura se presentan en la categoría extracción de mineral.

El árido grueso natural también influye de manera significativa en las categorías evaluadas, principalmente en extracción de mineral (20 %), ocupación el suelo (18 %), respiratorios orgánicos (16 %) e inorgánicos (13 %). Esto se debe al uso de voladura en el proceso de extracción, que emite partículas y emisiones que contribuyen a la formación de smog fotoquímico, al uso del suelo por la infraestructura de la mina y al consumo de una materia prima. La explicación de estos resultados se pueden ver también en la Figura 6-4.

Por otro lado, en la Figura 7-3 se advierte que el árido fino empleado en el hormigón influye en mayor medida en las categorías ocupación del suelo (11 %) y extracción de mineral (7 %). Se advierte también que el consumo de diésel contribuye a los impactos en las categorías respiratorios orgánicos e inorgánicos (4 %), debido a la emisión de partículas, de óxidos de nitrógeno y compuestos orgánicos volátiles, según constata Ferrís y Tortajada *et al.* (2003).

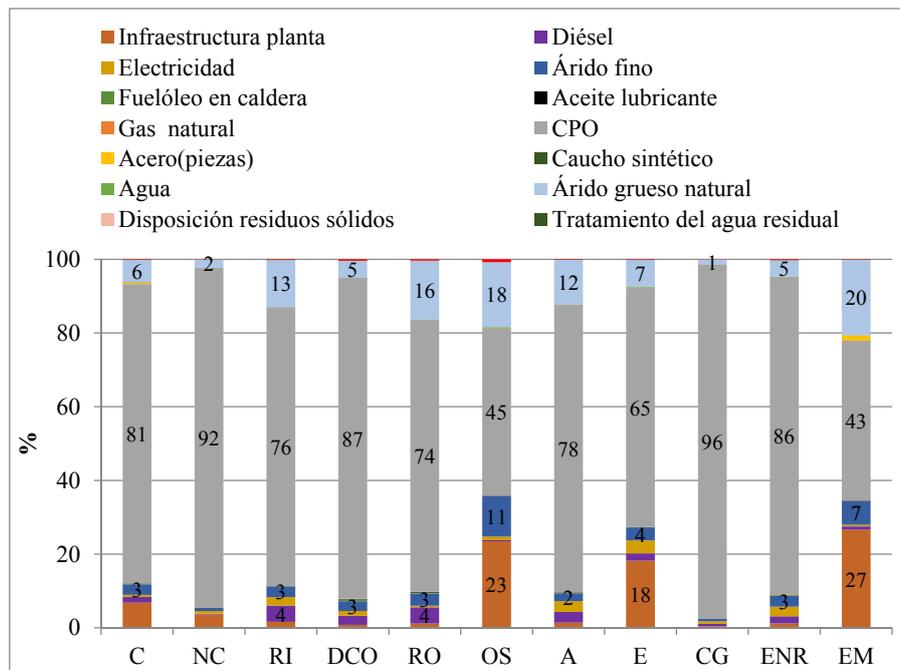


Figura 7-3 Resultados de la caracterización de HE100%AN

La mayor contribución del proceso de electricidad ocurre en la categoría de eutrofización (4 %). Todos los demás procesos que intervienen en la producción de HE100%AN, como el agua, fuel óleo, gas natural, piezas de desgaste y aceite lubricante, tienen poca influencia en los impactos de las categorías evaluadas. Lo mismo ocurre con los procesos de gestión de los residuos generados durante la producción de hormigón, aunque incluyen el transporte hasta los vertederos, la disposición de los residuos y el tratamiento del agua residual, no afectan de modo significativo a las categorías al compararlos con los otros procesos.

- *Hormigón estructural 20% AR (HE20%AR)*

En esta alternativa de producción de árido se reemplaza 20 % del árido grueso natural por árido de hormigón reciclado. Para esto se emplea el proceso creado en el apartado sobre árido de hormigón en planta (AHp).

En la Figura 7-4 se visualiza que la producción de CPO es el proceso más significativo en todas las categorías de impacto —menos en la categoría efectos carcinogénicos— en el que la obtención de árido de hormigón en planta presenta los más grandes impactos. Los impactos por el CPO se deben a la obtención del clínker, mientras que el impacto del AHp —en la categoría efectos carcinogénicos— es debido al reciclaje del residuo de acero proveniente del hormigón armado. Sin embargo, es importante destacar que el AHp presenta grandes ahorros en la categoría extracción de mineral (-97 %); esto, por un lado, es debido a que el árido reciclado evita la producción de árido natural y, por otro lado, porque se evita el consumo de materia prima original con el reciclaje de los residuos de acero provenientes del hormigón armado.

La infraestructura de la planta presenta impactos igual que en la alternativa HE100% AN en las categorías ocupación del suelo (24 %), eutrofización (18 %) y extracción de minerales (18 %), presentando el árido fino el mayor impacto en la categoría ocupación del suelo (12 %) debido a la infraestructura de la mina de extracción.

En esta alternativa se producen impactos debido al uso de un 80 % de árido grueso natural, principalmente en las categorías ocupación del suelo, efectos respiratorios orgánicos y extracción de mineral, estando todo ello en concordancia con los resultados encontrados por Jiménez *et al.* (2015). Sin embargo, el árido natural evitado por el uso del AHp conlleva al ahorro de impactos en dichas categorías; concretamente, un ahorro de -4 % en la categoría ocupación del suelo y de -3 % en las categorías efectos respiratorios orgánicos y extracción de mineral. Estos ahorros se deben a que se evita el uso de voladura en la extracción del árido y se reducen a la vez las emisiones de óxido de nitrógeno y compuestos orgánicos volátiles que contribuyen a los efectos respiratorios orgánicos (Wallington *et al.*, 2014;

Kulkarni *et al.*, 2011). Con el uso de AHp se reducen, además, los impactos en la categoría ocupación del suelo.

Los demás procesos, inclusive el transporte y la gestión de los residuos generados (residuos sólidos, residuos de hormigón y agua residual), tienen poca influencia en los impactos de las categorías evaluadas comparados con el resto de procesos (Figura 7-4).

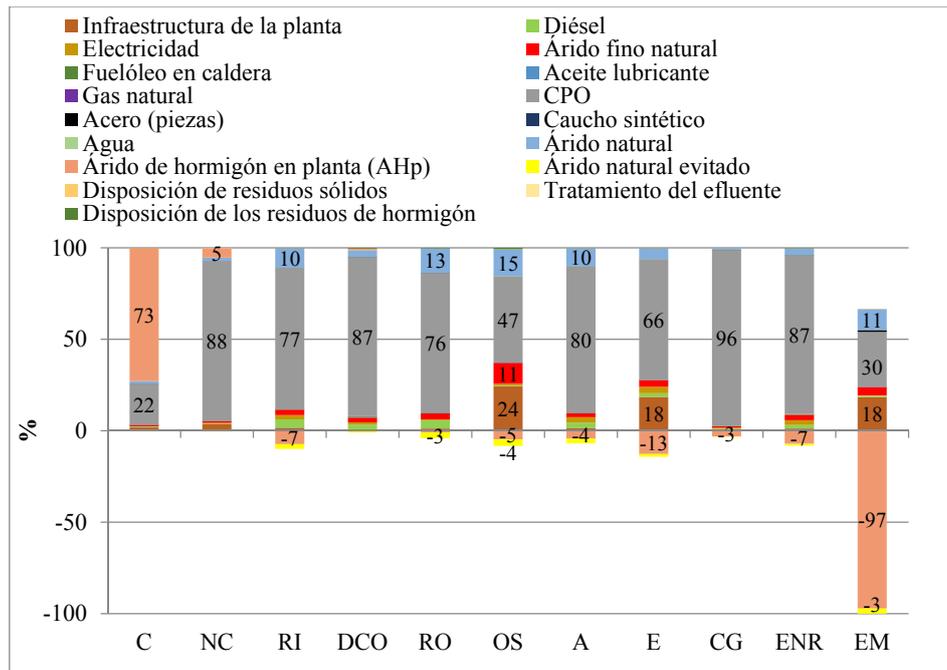


Figura 7-4 Resultados de caracterización del HE20%AR

- *Hormigón estructural 20 % AR con cemento reciclado (HE20%AR-CYR)*

En la Figura 7-5 se pone de manifiesto que el cemento reciclado presenta la más grande aportación de impactos en casi todas las categorías evaluadas. El mayor aporte se presenta en la categoría calentamiento global (96 %) por las emisiones de CO₂ durante la obtención del clínker según Dombrowski y Ernst (2014) y Truelove y Parks (2012). Sin embargo, en la categoría ocupación del suelo, el cemento reciclado presenta ahorros de -19 %. Esto se debe a que el uso de yeso reciclado en el cemento ocasiona grandes ahorros en esta categoría por las ventajas del reciclaje del papel proveniente de las placas de yeso laminado.

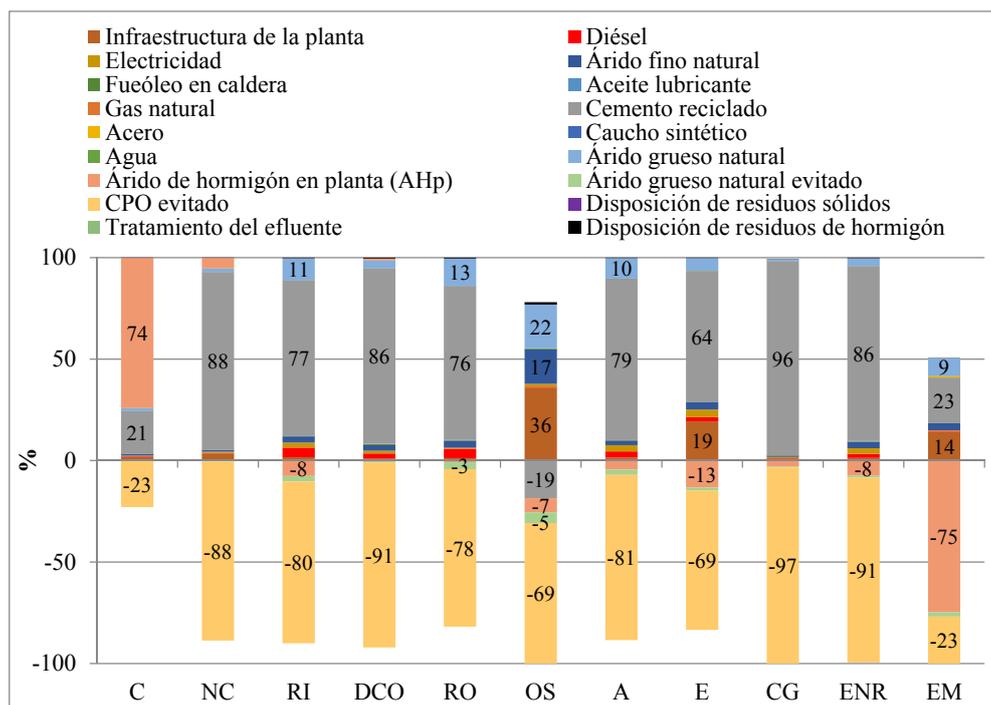


Figura 7-5 Resultados caracterizados del HE20%AR-CYR

Se puede apreciar también en la Figura 7-5 que, al evitar el uso de CPO, se evitan impactos en todas las categorías evaluadas. Los mayores ahorros se presentan, como era de esperar, en la categoría calentamiento global (-97 %) por las emisiones de CO₂ evitadas, y los menores en la categoría efectos carcinogénicos (-23 %).

El AHP contribuye con significativos impactos en la categoría carcinogénicos (74 %) y con grandes ahorros en la categoría extracción de mineral (-75 %). Esto es fruto de los impactos y ahorros ocasionados por el reciclaje de los residuos de acero provenientes del hormigón armado y como consecuencia de los ahorros por no extraer el árido en cantera.

La infraestructura de la planta presenta, igualmente que en las alternativas anteriores, impactos en las categorías ocupación del suelo (36 %), eutrofización (19 %) y extracción de mineral (14 %).

Tanto el árido grueso natural como el árido fino natural, presentan el mayor impacto en la categoría uso del suelo (22 % y 17 % respectivamente), y precisamente el árido grueso natural evitado genera los mayores ahorros en esta categoría (-5 %).

El resto de procesos que intervienen en la producción del hormigón reciclado tienen poca influencia en los impactos totales de las alternativas.

En la Tabla 7.10 se aprecian los resultados caracterizados de la producción de hormigón estructural.

Tabla 7.10 Resultados caracterizados de la producción de hormigón estructural

Categorías	Unidad	HE100%AN	HE20%AR	HE20%AR+CYR
C	kg C ₂ H ₃ Cl eq	9.33E-01	3.38E+00	2.57E+00
NC	kg C ₂ H ₃ Cl eq	3.47E+00	3.63E+00	4.08E-01
RI	kg PM 2.5 eq	1.28E-01	1.12E-01	1.19E-02
DCO	kg CFC-11 eq	1.05E-05	1.04E-05	7.85E-07
RO	kg C ₂ H ₄ eq	5.00E-02	4.64E-02	8.58E-03
OS	m ² org.arable	8.45E-01	7.48E-01	-1.21E-01
A	kg SO ₂ eq	6.93E-01	6.30E-01	7.62E-02
E	kg PO ₄ p-lim	1.13E-02	9.51E-03	1.76E-03
CG	kg CO ₂ eq	3.23E+02	3.12E+02	-1.94E+00
ENR	MJ primaria	1.61E+03	1.46E+03	7.52E+00
EM	MJ surplus	1.46E+00	-7.07E-01	-1.36E+00

➤ *Alternativas de hormigón no estructural*

• *Hormigón no estructural 100 % AN (HNE100%AN)*

Los procesos que intervienen en esta alternativa de producción de hormigón presentan un comportamiento similar con respecto a los procesos de la alternativa HE100%AN (Figura 7 3), en cuanto al aporte que hacen a los impactos en las categorías evaluadas. De este modo, se refleja en la Figura 7 6 que el proceso que tiene más relevancia en todas las categorías de impacto evaluadas es el CPO. En este caso, el mayor impacto se presenta en la categoría calentamiento global (94 %) por las emisiones de CO₂ en la obtención del clínker, y el menor en la categoría ocupación del suelo (35 %), debido a que en esta categoría la producción de clínker tiene poca relevancia.

La infraestructura de la planta de reciclaje influye también en mayor medida en las categorías extracción de mineral (31 %), ocupación del suelo (27 %) y eutrofización (23 %). Esto se explica por el uso de materiales extraídos de la naturaleza para la construcción de la infraestructura, por el uso del suelo tanto en la fase de construcción como en la fase de uso, y por las emisiones de óxido de nitrógeno generadas en este proceso. La infraestructura de la planta de reciclaje presenta también impactos en la categoría efectos carcinogénicos y no carcinogénicos, coincidiendo con los resultados encontrados por Jiménez *et al.* (2015) en su estudio.

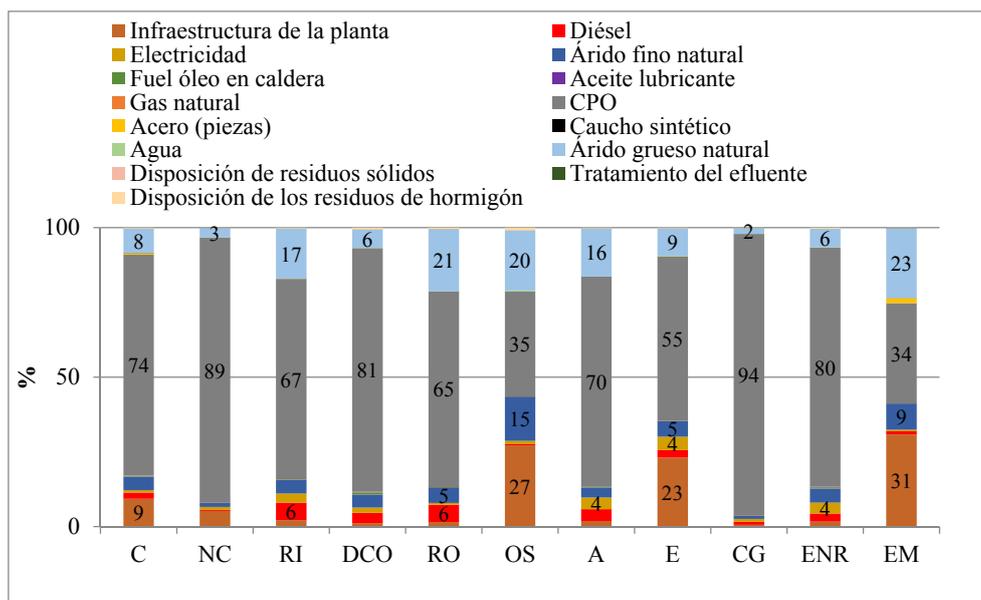


Figura 7-6 Resultados de caracterización del HNE100%AN

El uso de árido grueso natural conduce a los mayores impactos en la categoría extracción de mineral (23 %), respiratorios orgánicos (21 %), ocupación del suelo (20 %) y respiratorios inorgánicos (17 %). Así mismo, el árido fino natural genera impactos mayores en las categorías ocupación del suelo (15 %) y extracción de mineral (9 %), debido a la infraestructura de la mina de extracción y al uso de materia prima natural. Los efectos respiratorios inorgánicos se deben a la emisión de partículas durante la extracción del mineral natural, y los orgánicos a la emisión de óxidos de nitrógeno y compuestos orgánicos volátiles en este proceso (Wallington *et al.*, 2014; Kulkarni *et al.*, 2011).

Por otro lado, el consumo de diésel contribuye con los impactos principalmente en las categorías efectos respiratorios orgánicos e inorgánicos (6 %) por las emisiones generadas en este proceso.

Finalmente, en la Figura 7-6 se observa que el agua, las piezas de desgaste, el aceite lubricante, la disposición de los residuos generados y el tratamiento del efluente, tienen muy poca aportación a los impactos en las categorías evaluadas.

- *Hormigón no estructural 100 % AR (HNE100%AR)*

En la producción de HNE100%AR se observa la influencia que tiene la alternativa de árido reciclado de hormigón (AHP) en los resultados finales. Como se aprecia en la Figura 7-7, el uso de AHP conlleva a ahorros de impactos en las categorías extracción de mineral (-97 %), eutrofización (-56 %), respiratorios inorgánicos (-37 %), energía no renovable (-34 %), acidificación (-22 %), ocupación del suelo (-21 %), calentamiento global (-15 %) y efectos respiratorios orgánicos (-4 %). Estos resultados

se explican por los ahorros que representa el proceso de reciclaje de los residuos de acero, frente al impacto del resto de procesos que intervienen en la producción del árido de hormigón (Figura 6-5).

Por el contrario, el uso de AHp contribuye a impactos en las categorías carcinogénicos (93 %), no carcinogénicos (21 %) y disminución de la capa de ozono (4 %). El proceso de AHp es el más relevante en la categoría efectos carcinogénicos por la contribución de las emisiones de dioxinas generadas en la producción secundaria del acero.

Por otra parte, con el empleo de AHp en el hormigón se evita el uso de árido grueso natural y, por lo tanto, la emisión de partículas generadas en el proceso de extracción del árido (-13 %). Al disminuir la emisión de óxidos de nitrógeno, de compuestos orgánicos volátiles y de amoníaco se reducen también los impactos en efectos respiratorios orgánicos (-17 %), acidificación (-13 %) y eutrofización (-7 %). Además, al evitar la explotación del árido en cantera se producen también ahorros en la categoría ocupación del suelo (-16 %).

El CPO continúa presentando los mayores impactos en las categorías evaluadas. Sin embargo, este impacto en la categoría efectos carcinogénicos resulta muy mínimo comparado con la influencia del AHp.

Los mayores impactos por la infraestructura de la planta y por el árido fino natural ocurren en la categoría ocupación del suelo (33 % y 21 % respectivamente). Así mismo, el proceso de diésel presenta el mayor impacto en las categorías efectos respiratorios orgánicos e inorgánicos (7 %), debido a la emisión de partículas, emisiones de CO₂, NO_x y compuestos orgánicos volátiles (Ferrís y Tortajada *et al.*, 2003). En esta alternativa de producción de hormigón, los impactos por el uso del árido fino natural resultan mayores por la mayor cantidad de árido fino empleado en la dosificación del hormigón con relación a la alternativa HNE100%AN.

Los demás procesos involucrados en la producción del hormigón resultan poco significativos en los resultados finales. Aunque en esta alternativa se emplea una mayor cantidad de agua, debido a la necesaria para la saturación previa de los áridos, su mayor uso influye muy poco en los impactos totales de las categorías. En el estudio efectuado por Jiménez *et al.* (2015) se encontró, también, que el agua contribuye mínimamente a los impactos de todo el ciclo de vida de la producción del hormigón.

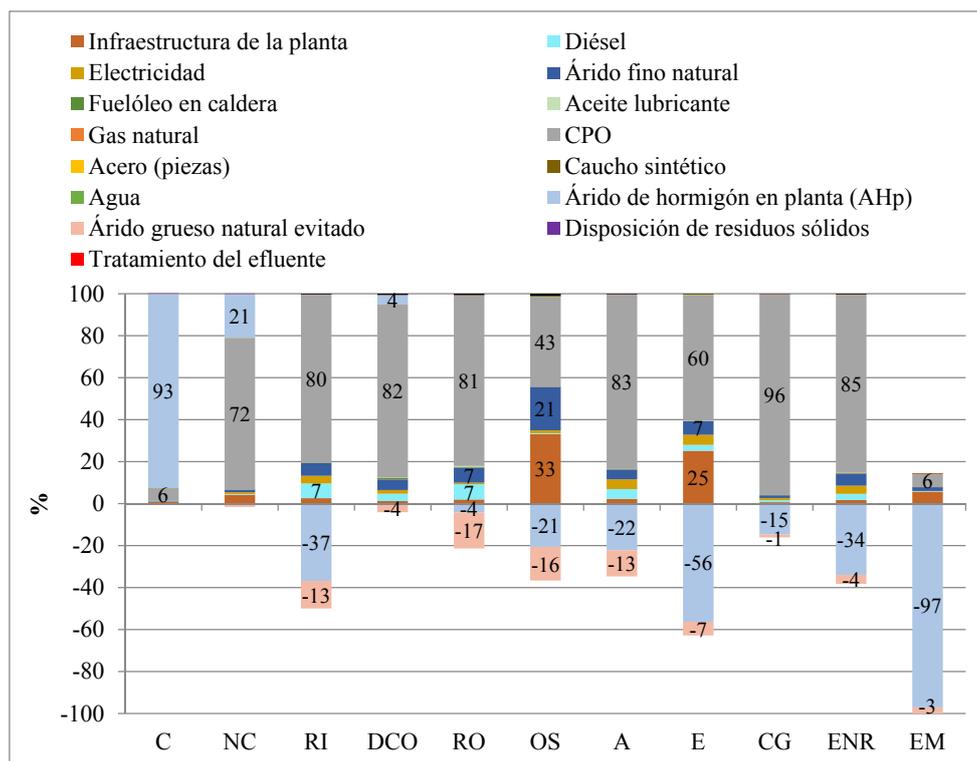


Figura 7-7 Resultados de caracterización del HNE100%AR

- *Hormigón no estructural 75 % árido mixto reciclado (HNE 75% AMR)*

Los procesos que intervienen en la alternativa de producción de hormigón HNE75%AMR (Figura 7 8) presentan una contribución a los impactos en las categorías evaluadas, de modo parecido a como lo hacen en la alternativa HNE100%AR (Figura 7 7). La diferencia estriba básicamente en que en el HNE75%AMR se emplea, en lugar del árido de hormigón reciclado (AHp), el árido mixto el cual incluye hormigón y cerámica (AMp).

El AMp presenta los mayores impactos en la categoría efectos carcinogénicos y los mayores ahorros en la categoría extracción de mineral. Otro ahorro importante por el AMp ocurre en las categorías eutrofización (-28 %), efectos respiratorios inorgánicos y energía no renovable (-17 %). En general, los ahorros alcanzados por el uso de AMp son menores comparados con los alcanzados con AHp debido, principalmente, a que con el árido de hormigón se genera una mayor cantidad de acero, y por lo tanto, es mayor la cantidad de acero reciclado y mayores los ahorros debido a este proceso. Lo mismo ocurre con los impactos generados en la categoría efectos no carcinogénicos y disminución de la capa de ozono, estos resultan menores en relación con el AHp, por la menor cantidad de acero reciclado por kg de árido mixto producido.

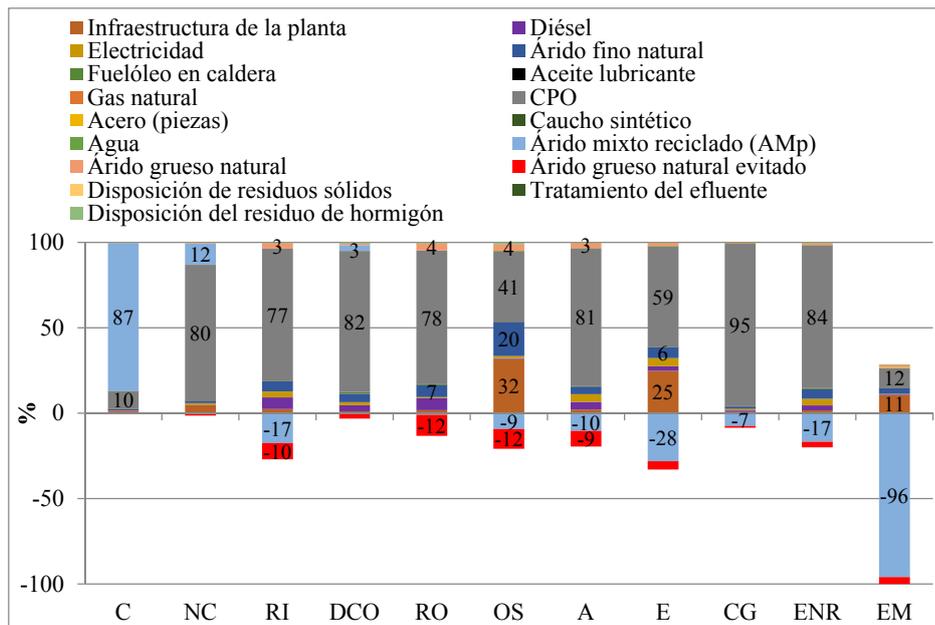


Figura 7-8 Resultados de caracterización del HNE75%AMR

Los ahorros por el árido grueso natural evitado en el HNE75%AMR son menores comparado con el HNE100%AR, esto se debe a que sólo se reemplaza un 75 % de árido grueso natural por árido mixto. Sin embargo, en este caso se presentan impactos por el empleo de un 25 % de árido grueso natural, principalmente en las categorías efectos respiratorios orgánicos, ocupación del suelo y efectos respiratorios inorgánicos. Estos impactos son causados por las emisiones generadas durante el proceso de extracción del árido con voladura.

Los procesos relacionados con otros insumos como agua, aceite lubricante y piezas de desgaste, así como los relacionados con la gestión de los residuos generados, incluyendo el transporte de estos hasta el vertedero, resultan poco significativos.

- *Hormigón no estructural 100% árido reciclado con cemento reciclado (HNE100%AR-CYR)*

En esta alternativa de producción se ve la influencia que presenta el uso de cemento y de árido reciclado en la producción de hormigón. En la Figura 7-9 se visualiza que el proceso dominante en casi todas las categorías de impacto es el cemento reciclado. Esto ocurre también en el caso en que se emplea el CPO —debido al proceso de obtención del clínker— ya que la diferencia entre el CPO y el cemento reciclado estriba básicamente en el uso de yeso reciclado, en lugar de yeso natural. Los mayores impactos por el uso cemento reciclado ocurren en la categoría calentamiento global (85 %) y disminución de la capa de ozono (82 %), así como los menores impactos en las categorías efectos carcinogénicos (5 %) y

extracción de mineral (6 %). Así mismo, en la categoría ocupación del suelo, el cemento reciclado presenta ahorros de -13%. Estos ahorros se deben a que el yeso reciclado presenta ahorros significativos en esta categoría.

Otro punto relevante en el HNE100%AR-CYR (Figura 7-9) son los ahorros ocasionados por el reemplazo del CPO. Los mayores ahorros se presentan como era de esperar en la categoría calentamiento global y disminución de la capa de ozono (-86 %) y los menores, en las categorías extracción de mineral y efectos carcinogénicos (-6 %), donde ocurren también los menores impactos por el cemento. Los ahorros presentados al evitar el uso de árido grueso natural son mayores en la categoría ocupación del suelo, respiratorios orgánicos, acidificación y respiratorios inorgánicos. Esto se explica por el hecho de que se evitan las emisiones de partículas, de óxidos de nitrógeno, de compuestos orgánicos volátiles y amoníaco, que ocasionan estos impactos durante la extracción del árido.

Aunque el árido de hormigón en planta (AHp) presenta ahorros en la mayoría de categorías evaluadas, los mayores ocurren en extracción de mineral y eutrofización, ya que es precisamente en estas categorías donde el proceso de reciclaje del acero presenta mayor influencia que el resto de procesos que intervienen en la producción del AHp. Con el reciclaje del acero proveniente del hormigón armado se sustituye la extracción de materia prima original, lo que contribuye a la disminución de los impactos en eutrofización por el menor consumo de energía. Esto trae como consecuencia la reducción de emisiones de NO_x y amonio (NH_4) (Cabrita *et al.*, 2015; Gallego, 2008).

El AHp también contribuye a los impactos en las categorías efectos carcinogénicos y no carcinogénicos y disminución de la capa de ozono. Los impactos en efectos carcinogénicos y no carcinogénicos se deben a la emisión de sustancias durante el proceso de fundición del acero, las cuales pueden llegar a ocasionar problemas en la salud humana (Krishnaraj, 2015). Y los impactos en la disminución de la capa de ozono son debidos al uso de combustibles por el transporte de los residuos a la planta de reciclaje y el uso de diésel en el proceso de trituración del AHp.

El uso de diésel en la producción de HNE100%AR-CYR conduce a las emisiones de partículas, de óxido de nitrógeno, de compuestos orgánicos volátiles y CO_2 , que contribuyen a efectos respiratorios orgánicos e inorgánicos. La infraestructura de la planta presenta, al igual que en el resto de alternativas de producción de hormigón, los más altos impactos en las categorías uso del suelo y eutrofización.

Los demás procesos que contribuyen en la producción de este tipo de hormigón —tanto en las entradas como en las salidas— presentan poca influencia en los impactos de las categorías.

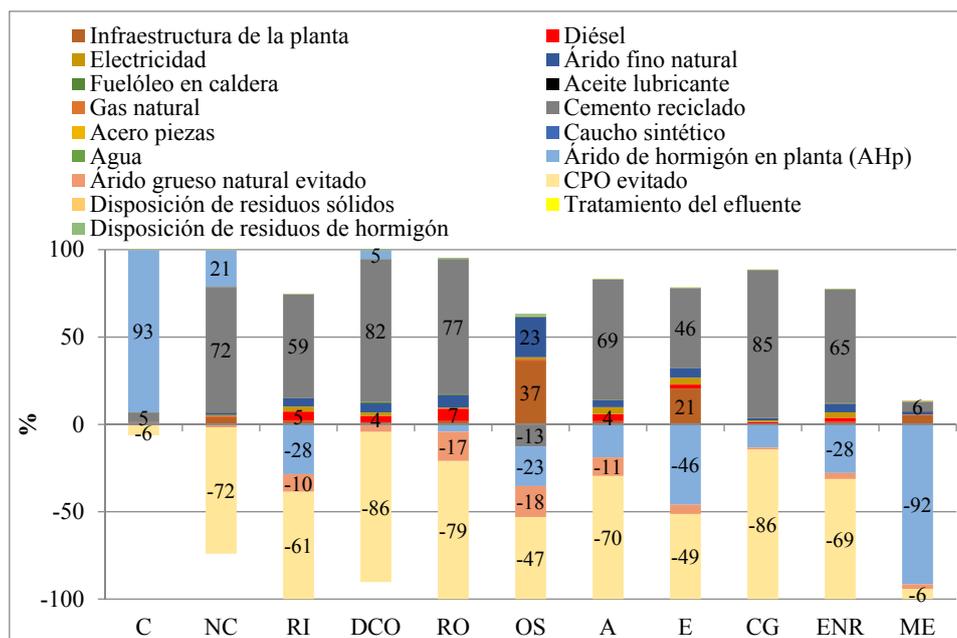


Figura 7-9 Resultados de caracterización del HNE100%AR-CYR

- *Hormigón no estructural 75 % árido mixto reciclado con cemento reciclado (HNE75%AMR-CYR)*

Este tipo de hormigón emplea un porcentaje elevado de árido mixto reciclado y de cemento reciclado, los cuales influyen notablemente en los impactos totales de cada una de las categorías. En la Figura 7-10, se aprecia que, aunque el uso de cemento reciclado presenta, al igual que el CPO, los mayores impactos debido al proceso de clínker, éste ocasiona ahorros en la categoría ocupación del suelo, como consecuencia de los ahorros presentados en esta categoría por el reciclaje del yeso. Además, es importante resaltar que con el empleo de cemento reciclado, se evitan los impactos ocasionados por el uso de CPO.

De este modo los mayores ahorros se presentan —como era de esperar— en las categorías donde ocurren los mayores impactos por el CPO; es decir, en las categorías calentamiento global y disminución de la capa de ozono debido a la emisión de CO₂, de gases de efecto invernadero y emisiones que contienen cloro en la obtención del clínker.

La proporción de impactos presentados en el HNE75%AMR-CYR por el AMP, árido fino natural, árido grueso natural y árido grueso natural evitado, no se ven grandemente afectados con respecto a la alternativa HNE75%AMR, ya que en ambos tipos de hormigón se emplea la misma cantidad de estas materias primas, sólo cambia el tipo de cemento. Los procesos de infraestructura de la planta y uso de diésel también son los mismos que en la alternativa HNE75%AMR; por lo tanto, tampoco se ven modificados en mayor medida.

Los procesos referidos a otras materias primas como agua, aceite lubricante, piezas de desgaste y los referidos a la gestión de los residuos provenientes del hormigón presentan impactos poco significativos en la producción del hormigón.

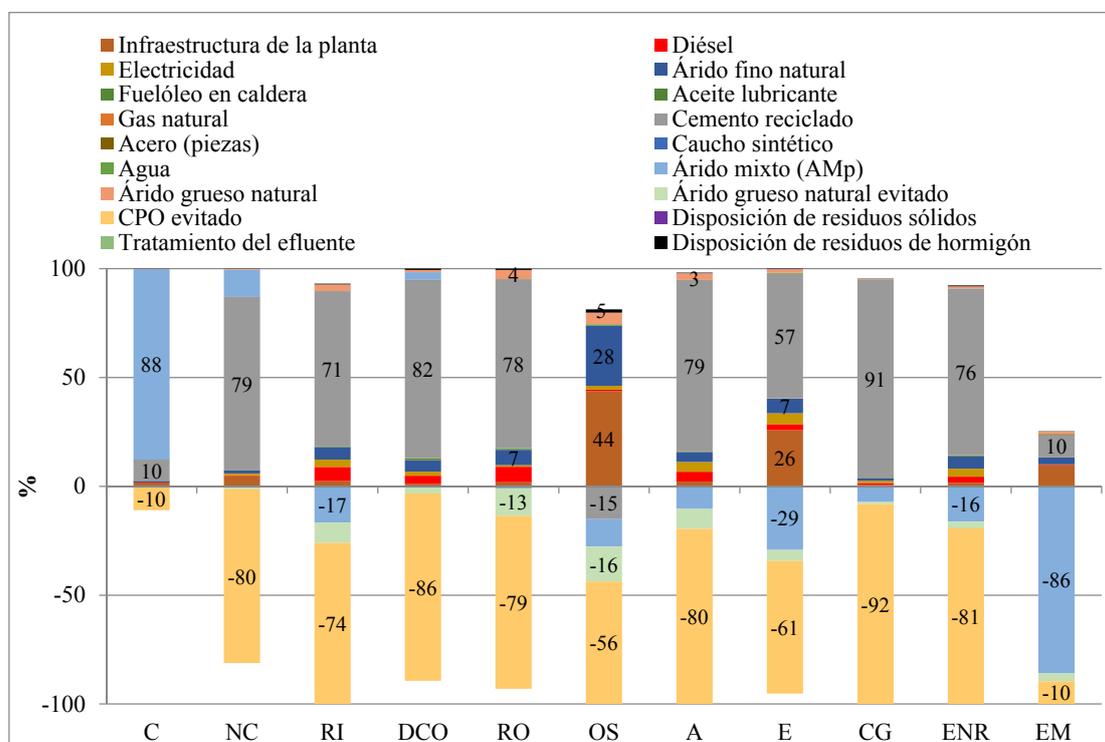


Figura 7-10 Resultados de caracterización del HNE75%AMR-CYR

Finalmente en la Tabla 7.11, se pueden apreciar los resultados de caracterización de las alternativas de producción de hormigón no estructural.

Tabla 7.11 Resultados de caracterización del hormigón no estructural

Categorías	Unidad	HNE 100%AN	HNE 100%AR	HNE75%AMR	HNE100%AR-CYR	HNE75%AMR-CYR
C	kg C ₂ H ₃ Cl eq	6.84E-01	8.62E+00	4.84E+00	8.08E+00	4.30E+00
NC	kg C ₂ H ₃ Cl eq	2.40E+00	2.90E+00	2.64E+00	7.61E-01	4.99E-01
RI	kg PM 2.5 eq	9.58E-02	4.02E-02	6.06E-02	-2.64E-02	-5.98E-03
DCO	kg CFC-11 eq	7.48E-06	7.08E-06	7.15E-06	6.82E-07	7.53E-07
RO	kg C ₂ H ₄ eq	3.78E-02	2.38E-02	2.73E-02	-1.42E-03	2.17E-03
OS	m ² org.arable	7.30E-01	3.80E-01	4.94E-01	-2.00E-01	-8.49E-02
A	kg SO ₂ eq	5.14E-01	2.83E-01	3.60E-01	-8.56E-02	-8.43E-03
E	kg PO ₄ p-lim	8.87E-03	3.02E-03	5.54E-03	-2.14E-03	3.82E-04
CG	kg CO ₂ eq	2.20E+02	1.81E+02	1.98E+02	-2.75E+01	-10.3E+00
ENR	MJ primaria	1.15E+03	6.72E+02	8.82E+02	-2.98E+02	-8.78E+01
EM	MJ surplus	1.26E+00	-5.86E+00	-2.59E+00	-6.30E+00	-3.02E+00

➤ *Comparación entre alternativas de producción primaria y secundaria*

• *Producción de hormigón estructural*

En la Figura 7 11, se pone de manifiesto las diferencias entre los diferentes tipos de hormigón estructural estudiados. Se aprecia que el tipo de hormigón que causa los mayores impactos en todas las categorías menos en las categorías efectos carcinogénicos y no carcinogénicos, es el hormigón estructural con 100 % árido natural, es decir el hormigón convencional. Esto se explica por los mayores impactos del árido natural, frente al árido de hormigón reciclado, causados por el uso de voladura en la extracción del árido natural, la infraestructura de la mina y un mayor consumo de combustibles. Los resultados de los mayores impactos en el hormigón con árido natural— con respecto al hormigón con árido reciclado— concuerdan con los encontrados por Tošić *et al.* (2015).

Al producir hormigón con un 20 % de árido reciclado los impactos en todas las categorías menos en efectos carcinogénicos y no carcinogénicos, disminuyen con respecto al hormigón con árido natural. En la categoría extracción de mineral, el HE20%AR presenta ahorros, debidos principalmente a que con el reciclaje del árido se evita la extracción de materia prima original. Estos ahorros son aún mayores en esta categoría, ya que a raíz del reciclaje del hormigón estructural, se reciclan también los residuos de acero provenientes del hormigón. Estos resultados están en línea con los encontrados por Turk *et al.* (2015).

En la Figura 7-11 se puede observar que en las categorías efectos carcinogénicos y no carcinogénicos, el HE20%AR presenta el más grande impacto, comparado con las otras alternativas de producción de hormigón estructural. Esto se explica ya que el árido reciclado (AHP) presenta los mayores impactos en estas categorías debido a las emisiones derivadas del proceso de fundición del reciclaje del acero que afectan la salud humana (Krishnaraj, 2015).

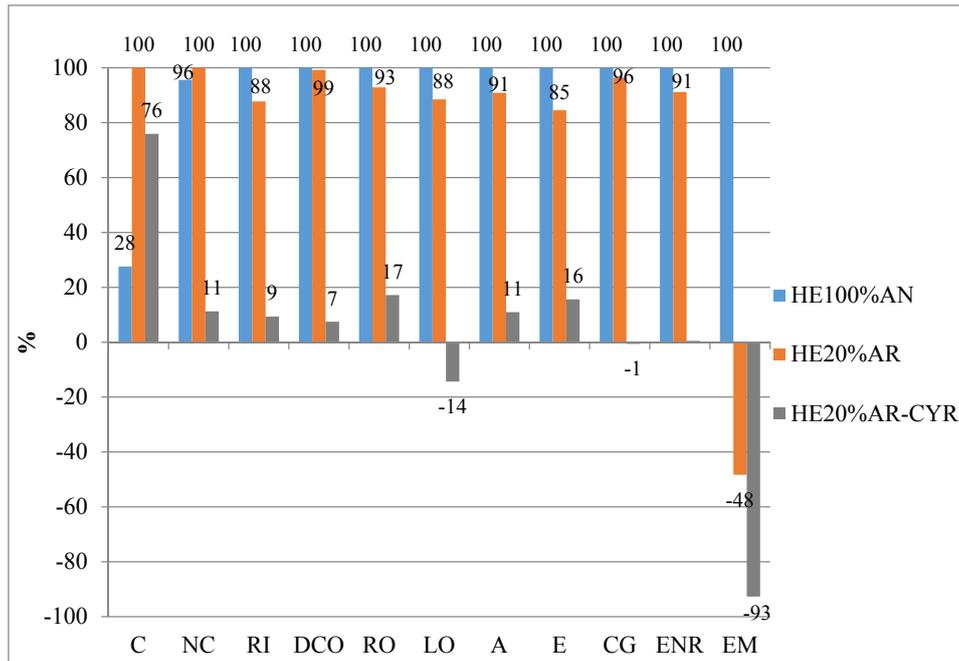


Figura 7-11 Alternativas de producción de hormigón estructural

Como el árido natural presenta muy pocos impactos en la categoría efectos carcinogénicos, el uso de este árido en el hormigón estructural conduce a la reducción de impactos en esta categoría, al compararlo con el resto de alternativas de producción del hormigón.

Al producir hormigón con 20 % árido reciclado y con cemento reciclado (HE20%AR-CYR), se observa en la Figura 7-11 una reducción de los impactos, comparado con el HE20%AR. En la categoría extracción de mineral se presentan grandes ahorros (-93 %) no sólo por el uso del árido reciclado, sino que el cemento con yeso reciclado también contribuye al ahorro en esta categoría al evitar la producción de CPO. Se constata que el uso de yeso reciclado en el cemento contribuye a una disminución de los impactos también en el resto de categorías.

El uso de cemento reciclado contribuye al ahorro de impactos en la categoría ocupación del suelo (-14 %), debido a que el yeso reciclado empleado en el cemento evita la extracción de yeso en la mina y evita también los impactos en el suelo por la producción de papel a partir de materia prima original. En este caso el reciclaje del yeso incluye el reciclaje del papel.

El mayor impacto del HE20%AR-CYR ocurre en la categoría efectos carcinogénicos, no obstante, este impacto sigue siendo menor que el que presenta el HE20%AR en esta misma categoría. De este modo, el cemento reciclado contribuye una vez más a la reducción de impactos.

- *Producción de hormigón no estructural*

El hormigón no estructural con 100 % de árido natural, contribuye en mayor medida a los impactos en todas las categorías (100 %), menos en efectos carcinogénicos y no carcinogénicos. Esto se debe al mayor impacto del árido natural en la mayoría de categorías evaluadas, con relación al árido reciclado. Dicha afirmación está en concordancia con el estudio efectuado por Tošić *et al.* (2015). El HNE100%AN contribuye con el menor impacto en la categoría efectos carcinogénicos (8 %), debido a que en la obtención del árido natural se emiten menos sustancias cancerígenas comparadas con las emitidas en la obtención del árido reciclado por el reciclaje del acero. El proceso de fundición en el reciclaje del acero conduce a la emisión de sustancias que pueden provocar efectos carcinogénicos en la salud humana (Krishnaraj, 2015).

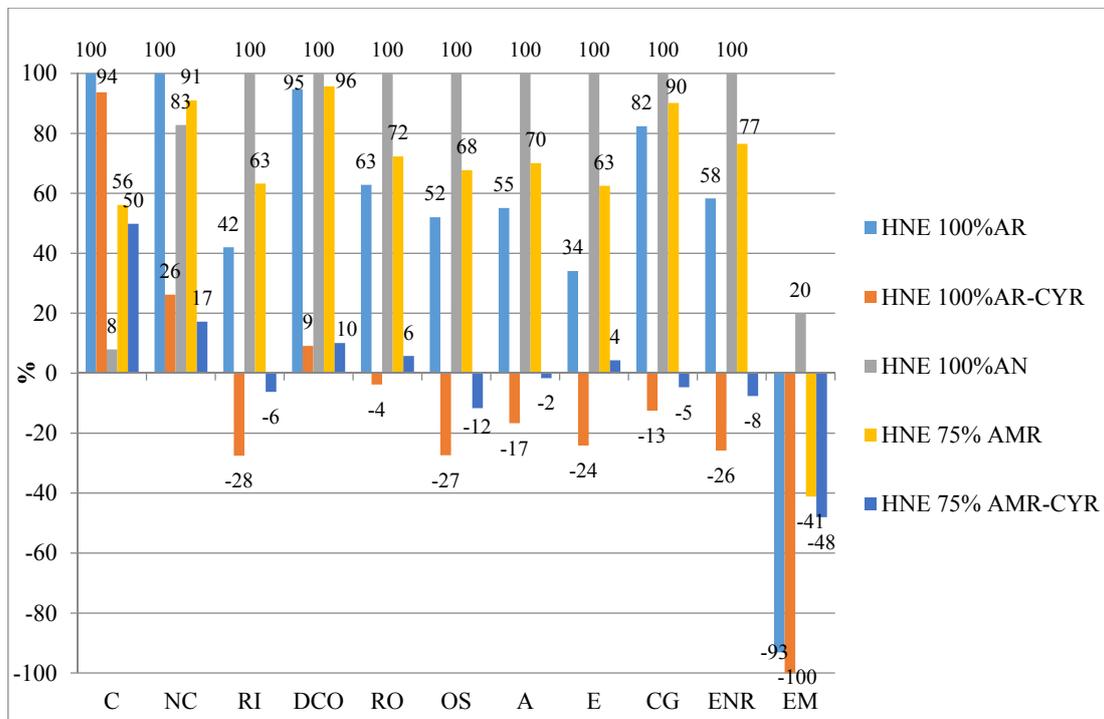


Figura 7-12 Alternativas de producción de hormigón no estructural

Si se produce hormigón, reemplazando todo el árido grueso natural por el árido de hormigón reciclado HNE100%AR, se encuentra que los máximos impactos por su producción se presentan en las categorías efectos carcinogénicos y no carcinogénicos (100 %) y el mayor ahorro en la categoría extracción del mineral (-93 %), debido a la influencia del AHp en estas categorías como se mencionó anteriormente. Si se produce un hormigón con 100 % árido reciclado de hormigón y con cemento reciclado

(HNE100%AR-CYR), resulta una disminución de impactos en todas las categorías evaluadas con respecto al mismo hormigón con CPO.

La menor reducción de impactos se presenta en la categoría efectos carcinogénicos debido a la gran influencia del árido reciclado en esta categoría. Reducciones mayores se presentan en efectos no carcinogénicos y disminución de la capa de ozono por el mayor peso que representa el cemento en estas categorías. Sin embargo, en el resto de categorías evaluadas, el uso de cemento con yeso reciclado contribuye a significativos ahorros, principalmente, en extracción de mineral por la reducción de materia prima extraída.

Al producir HNE100%AR-CYR se evitan emisiones de partículas, de óxido de nitrógeno y se disminuye la cantidad de combustible por el uso de cemento con yeso reciclado. Esto se ve reflejado en la disminución de problemas respiratorios inorgánicos, en un menor consumo de energía no renovable y en ahorros en los impactos por ocupación del suelo y eutrofización (Figura 7-12). En la producción de HNE100%AR-CYR, se producen también ahorros en la categoría acidificación, calentamiento global y efectos respiratorios orgánicos como consecuencia de una reducción de emisiones de SO₂, NO_x, CO₂ y compuestos orgánicos volátiles, ya que se emplea cemento reciclado, en lugar de CPO.

La producción de HNE75%AMR genera impactos positivos en todas las categorías evaluadas, a excepción de la categoría extracción de mineral, en la que presentan ahorros todas las alternativas de producción de hormigón con árido reciclado como consecuencia del reciclaje del acero. Se observa en la Figura 7-12, que el HNE75%AMR resulta con mayores impactos con respecto al HNE100%AR en las categorías respiratorios orgánicos e inorgánicos, disminución de la capa de ozono, ocupación del suelo, acidificación, eutrofización, calentamiento global, y energía no renovable debido a que el HNE75%AMR contiene en su dosificación un 25 % de árido grueso natural, lo cual contribuye al aumento de los impactos en estas categorías.

A su vez, los menores impactos y ahorros en las categorías efectos carcinogénicos, no carcinogénicos y extracción de mineral, se deben a la menor proporción de hormigón armado dentro del residuo mixto, lo que ocasiona una menor generación de residuos de acero y, por lo tanto, un menor reciclaje de acero por kg de árido mixto empleado. No obstante, al comparar el HNE75%AMR con el HNE100%AN, se nota que en las categorías carcinogénicos y no carcinogénicos el HNE75%AMR presenta impactos mayores y en el resto de categorías impactos menores o hasta ahorros con respecto al HNE100%AN por el uso de árido reciclado. Esto permite afirmar que, en la producción del hormigón, el árido reciclado contribuye a los impactos en las categorías efectos carcinogénicos y no carcinogénicos y reduce los impactos en el resto de categorías evaluadas, así como también llega a generar ahorros en la categoría extracción de mineral. Caso contrario ocurre con el árido natural en el hormigón, el cual reduce los impactos en las categorías carcinogénicos y no carcinogénicos comparado con el árido reciclado.

En la Figura 7-12 se observa que, cuando se emplea cemento con yeso reciclado en el hormigón con árido mixto HNE75%AMR-CYR, existe una ligera disminución de impactos en la categoría carcinogénicos con respecto al HNE75%AMR. Lo mismo ocurre en la categoría extracción de mineral, al producir un ligero aumento en los ahorros debido al uso de cemento reciclado en el hormigón. Sin embargo, en el resto de categorías el uso de cemento reciclado conlleva a una gran reducción de impactos, incluso al ahorro.

A modo de ejemplo, en la Figura 7-12 se observa que en la categoría efectos no carcinogénicos los impactos pasan de 91 % en el HNE75%AMR a 17 % en el HNE75%AMR-CYR y en la categoría disminución de la capa de ozono de 96 % en el HNE75%AMR a 10 % en el HNE75%AMR-CYR. Así mismo, en la categoría ocupación del suelo pasan de 68 % en el HNE75%AMR a -12 % en el HNE75%AMR-CYR.

7.1.1.5 Interpretación de la evaluación del impacto del ciclo de vida

Cuando se produce hormigón, bien sea estructural o no estructural, con 100 % de árido natural y CPO (hormigón convencional), se encuentra que las mayores aportaciones a los impactos de todas las categorías evaluadas corresponden al proceso de cemento. Los mayores impactos se presentan en las categorías calentamiento global, efectos no carcinogénicos, disminución de la capa de ozono y energía no renovable; y los menores efectos se dan en las categorías extracción de mineral y ocupación del suelo.

En cuanto al uso de árido natural en el hormigón, los mayores impactos ocurren en las categorías extracción de mineral, ocupación del suelo, efectos respiratorios orgánicos e inorgánicos. Esto se debe a la emisión de partículas y contaminantes que contribuyen a la formación de smog fotoquímico, al uso del suelo por la infraestructura de la mina y al consumo de materia prima virgen.

Al producir hormigón con árido reciclado, pero con CPO, los mayores impactos en las categorías se deben también al cemento; menos en la categoría efectos carcinogénicos, donde el árido reciclado presenta un mayor peso en el impacto final, debido a que incluye los impactos por el reciclaje del acero proveniente del hormigón armado. Así mismo, los mayores ahorros por el uso de árido reciclado en el hormigón se presentan en la categoría extracción de mineral, y esto por los ahorros que ocasiona el reciclaje del acero.

Con el empleo de árido reciclado en el hormigón se evita el uso de árido grueso natural y, por lo tanto, se evita la emisión de partículas generadas en el proceso de extracción del árido. Además, al no extraer el árido en cantera, se producen también ahorros en la categoría ocupación del suelo. Tanto el árido de hormigón como el árido mixto reciclado, conducen a mayores impactos en el hormigón en la categoría

efectos carcinogénicos. Por lo tanto, el tipo de hormigón que presenta el mayor impacto en esta categoría es el HNE100%AR, seguido por el HNE75%AMR y, finalmente, el HE20%AR.

En general, en todas las alternativas de producción de hormigón los procesos de agua, fuel óleo, gas natural, piezas de desgaste y aceite lubricante tienen poca influencia en los impactos de las categorías evaluadas. Lo mismo ocurre con los procesos de gestión de los residuos generados durante la producción de hormigón —aunque incluyen el transporte hasta los vertederos, la disposición de los residuos y el tratamiento del agua residual— no afectan de modo significativo a las categorías al compararlos con los otros procesos.

El tipo de hormigón que causa los mayores impactos en todas las categorías evaluadas, menos en las categorías efectos carcinogénicos y no carcinogénicos es el hormigón con 100 % de árido natural; es decir, el hormigón convencional, tanto estructural como no estructural. Esto se explica por los mayores impactos del árido natural frente al árido de hormigón reciclado en la mayoría de categorías.

Por otra parte, el uso de cemento con yeso reciclado en el hormigón conduce a ahorros en la categoría ocupación del suelo. Esto se debe a que en el proceso de reciclaje del yeso se genera papel proveniente de las placas de yeso laminado, el cual, al ser reciclado, comporta la reducción de impactos en esta categoría.

El uso de cemento reciclado en la producción de hormigón también conlleva la reducción de impactos en todas las categorías evaluadas, más aun concretamente en las categorías correspondientes a efectos no carcinogénicos y disminución de la capa de ozono. En las categorías relativas a respiratorios orgánicos e inorgánicos, eutrofización, ocupación del suelo, acidificación, calentamiento global, energía no renovable y extracción de minerales, el cemento reciclado favorece ahorros significativos en los impactos. Por esto se puede afirmar que el cemento reciclado juega un papel mucho más importante en los impactos finales que el árido reciclado. Se comprueba, a raíz de todo lo anterior, que el uso de materiales reciclados es beneficioso a nivel medioambiental en la producción del hormigón.

7.1.2 Criterio económico

En general, el coste de referencia del hormigón se calcula al sumar el coste de ejecución del hormigón y el coste por la gestión de los residuos generados. Debido a que en todas las alternativas se generan los mismos residuos y a todos se les aplica el mismo tratamiento, el coste de gestión de estos permanece constante en todos los sistemas de producción.

7.1.2.1 Resultados y discusión del criterio económico

El coste por la gestión de los residuos resulta de la suma del importe por el vertido de los residuos sólidos asimilables a residuos municipales, del coste por el vertido de los residuos inertes, y de aquél correspondiente al tratamiento del agua residual.

El coste debido al tratamiento de los residuos sólidos generados, se calcula de acuerdo con la Ecuación 3-2 y Ecuación 3-4. Para el coste de la disposición de los residuos de hormigón en el vertedero inerte se considera sólo el coste de transporte (17 km) (apartado 7.1.1.3), debido a la moratoria del canon sobre la deposición de estos residuos. De acuerdo con lo anterior, el coste de transporte de estos residuos por m^3 de hormigón producido es de $9.64 \text{ E-}03 \text{ €}$.

Para el caso de los residuos municipales, se tiene en cuenta una distancia de transporte de 21 km (apartado 7.1.1.3) y una tasa por disposición de los residuos municipales en vertederos controlados de 19.10 €/t según la Ley 3/2015. Finalmente, resulta un coste de gestión de los residuos sólidos municipales de $1.95 \text{ E-}03 \text{ €/m}^3$ de hormigón.

El coste por el vertido del agua residual proveniente del proceso productivo el hormigón se calcula de acuerdo al canon del agua que pagan las industrias en Cataluña. Según la ACA (2015), dicho canon del agua se calcula siguiendo la Ecuación 7-1.

Ecuación 7-1

$$\text{Canon del agua (€)} = \text{base imponible (m}^3\text{)} * \text{tipo de gravamen (€/m}^3\text{)}$$

La base imponible del canon del agua está constituida por el volumen de agua consumido o, si no se conoce éste, por el volumen de agua estimado (art. 67 del Decreto legislativo 3/2013).

Para los usos industriales y asimilables, el tipo de gravamen del canon del agua resulta de la suma de un tipo de gravamen general correspondiente al uso productivo de la misma, así como de un tipo de gravamen específico, correspondiente a la contaminación (Ecuación 7-2).

Ecuación 7-2

$$\text{Tipo de gravamen} = \text{tipo de gravamen general} + \text{tipo de gravamen específico}$$

Según la Ley 1/2014 el tipo de gravamen general es igual a $1.61E-01$ €/m³ y el tipo de gravamen específico (tarifación por volumen igual a $6.30E-01$ €/m³). En total se obtiene un canon del agua de $1.10E-02$ €/m³ de hormigón.

Finalmente, al sumar el canon del agua y el coste de gestión de los residuos sólidos, se obtiene un coste de gestión por todos los residuos generados de $2.28 E-02$ €/m³, parámetro tenido en cuenta en todas las alternativas de producción de hormigón.

❖ **Alternativas de hormigón estructural**

➤ ***Hormigón con 100 % árido grueso natural (HE100%AN)***

El coste de un hormigón estructural de consistencia blanda, con un tamaño máximo del árido de 40 mm y con una cantidad de cemento de 325 kg o más, presenta un coste de ejecución de 84.99 €/m³ (BEDEC, 2015). Este coste fue contrastado con la información suministrada por las otras fuentes consultadas.

Si a este coste se le suma aquel otro de gestión de los residuos generados en el apartado 7.1.2.1 ($2.28 E-02$ €/m³), resulta un coste total para esta alternativa de 85.01 €/m³ de hormigón producido.

➤ ***Hormigón con 20 % árido grueso reciclado (HE20%AR)***

Un hormigón estructural con un 20 % de árido reciclado, pero con iguales características que el hormigón fabricado con 100 % árido natural, presenta un coste de ejecución de 84.73 €/m³ (BEDEC, 2015). Si a este importe se le suma el coste por la gestión de los residuos (apartado 7.1.2.1), se obtiene finalmente un coste total de 84.75 €/m³ de hormigón para esta alternativa.

➤ ***Hormigón con 20 % árido grueso reciclado y 100 % cemento reciclado (HE20AR%-CYR)***

El coste de producción de esta alternativa se halló a partir del coste del hormigón con 20% de árido grueso reciclado, teniendo en cuenta a la vez el ahorro económico por el uso de cemento con yeso reciclado, en lugar de utilizar el CPO.

Como el CPO tiene un coste de 0.118 €/kg (Tabla 5.9), el uso de 375 kg de cemento en la fabricación de 1 m³ de hormigón supone un coste de 44.45 €. Este coste concuerda con estudios como PROIN (2015) e ICPA (2015) en los que se ha evaluado la incidencia de los diferentes componentes en el coste total

del hormigón y se ha encontrado que el cemento presenta un porcentaje de aproximadamente el 50 % del importe total.

Al coste de 44.45 €/m³ se suma el debido al transporte del cemento hasta la planta de hormigón igual a 0.18 €/m³ de hormigón, resultando un valor de 44.63 €/m³ para el CPO. Para el coste del transporte se emplea la Ecuación 3-2 y se tiene en cuenta una distancia de 15 km.

Si al coste del hormigón 84.75 €/m³, se le resta el correspondiente al CPO y se le suma el coste del cemento con yeso reciclado igual a 44.46 €/m³ de hormigón —el cual también incluye transporte— se obtiene finalmente para esta alternativa un coste de 84.58 €/m³.

❖ Alternativas de hormigón no estructural

➤ *Hormigón no estructural con 100 % árido grueso natural (HNE100%AN)*

Un hormigón de uso no estructural de resistencia a compresión 15 N/mm², consistencia blanda y tamaño máximo del árido de 40 mm, presenta un coste de ejecución de 60.49 €/m³ (BEDEC, 2015). Al sumarle el coste por la gestión de los residuos, que incluye también el transporte (2.28 E-02 €/m³, apartado 7.1.2.1), resulta en total para esta alternativa un coste de referencia de 60.51 €/m³.

➤ *Hormigón no estructural con 100 % árido grueso reciclado (HNE100%AR)*

El coste de este hormigón se calculó a partir del coste del hormigón no estructural con árido grueso natural, el cual, a su vez, incluye el importe debido al tratamiento de los residuos (60.51 €/m³).

Primero se halló el coste del agua, del árido fino y del árido grueso dentro del hormigón convencional, debido a que la proporción de estos materiales varía con respecto al hormigón con árido reciclado.

Teniendo en cuenta la cantidad empleada de cada uno de ellos (Tabla 7.3) y los costes (agua = 1.71 €/m³; árido fino = 17.62 €/t y árido grueso natural = 17.47 €/t [BEDEC, 2015]), se obtuvo un valor de 35.27 €/m³ de hormigón para estos materiales. A este valor es necesario incluir el coste de transporte de estos materiales a la planta de hormigón (0.33 €/m³ de acuerdo a la Ecuación 3-2), resultando de este modo un coste total de 35.6 €/m³.

Posteriormente, se calculó el coste que tendrían el agua, el árido fino natural y el árido grueso reciclado dentro del HNE100%AR, teniendo en cuenta las proporciones de la Tabla 7.3 y el coste del árido de hormigón reciclado igual a 4.76 €/t hallado en el capítulo anterior (Tabla 6.9). De este modo, se obtuvo un total de 21.75 €/m³ para el agua y los áridos dentro del hormigón reciclado, incluyendo el transporte

a la planta de hormigón. La distancia de transporte de los áridos naturales es de 5 km y de los áridos reciclados de 7 km (apartado 7.1.1.3).

Si al coste del hormigón con 100 % árido natural (60.51 €/m³) se le resta el coste del agua y de los áridos naturales (35.6 €/m³) y se le suma el coste del agua y de los áridos empleados en el hormigón reciclado (21.75 €/m³), obteniéndose un coste aproximado de 46.66 €/m³ para esta alternativa.

➤ ***Hormigón no estructural con 75 % árido mixto reciclado (HNE75%AMR)***

En el hormigón con 75 % de árido mixto reciclado se emplea la misma cantidad de árido fino (998 kg), de agua (206.25 kg) y de cemento (250 kg) que en la alternativa HNE100%AR. En este caso, en vez de emplear 730 kg de árido de hormigón reciclado, se emplean 182 kg de árido grueso natural y 548 kg de árido reciclado mixto.

Para calcular el coste de la presente alternativa, se tuvo en cuenta, por una parte, el coste del árido grueso de hormigón reciclado dentro del HNE100%AR a partir de la cantidad (730 kg) y, por otra parte, del coste por tonelada (4.76 €/t de la Tabla 6.9). De este modo, se encontró para el árido de hormigón un coste de 3.47 €/m³ de hormigón. A este valor se le sumó el coste por transporte igual a 0.17 €/m³, resultando, de este modo, un total de 3.64 €/m³.

Por otra parte, se calculó el coste del árido grueso empleado en el hormigón con 75 % de árido mixto reciclado, que consiste básicamente en árido grueso natural (182 kg) y árido grueso mixto reciclado (548 kg). A partir del coste por tonelada de cada uno (17.47 € para el árido natural y 4.06 € para el árido mixto [Tabla 6.9]), se encontró un coste de 5.56 € para los áridos gruesos empleados en 1 m³ de hormigón con árido mixto, el cual incluye el transporte de éstos hasta la planta de hormigón.

Si al coste de la alternativa de hormigón con 100 % de árido reciclado (46.66 €/m³) se le resta el coste que corresponde al árido reciclado de hormigón (3.64 €/m³) y, a continuación, se le suma el coste debido a los áridos gruesos (natural y mixto) en el árido mixto reciclado (5.56 €/m³), se obtiene para esta alternativa un coste total de referencia de 48.58 €/m³.

➤ ***Hormigón no estructural con 100 % árido grueso reciclado y 100 % cemento reciclado (HNE 100% AR-CYR)***

Para hallar el coste de esta alternativa se tomó como base la alternativa HNE100%AR y, en lugar de tener en cuenta el coste del CPO dentro del hormigón, se tuvo en cuenta el coste del cemento con yeso reciclado en la misma proporción (250 kg). De este modo, se encontró un coste de referencia para esta alternativa de 46.55 €/m³ de hormigón.

➤ **Hormigón no estructural con 75 % árido mixto reciclado y 100 % cemento reciclado (HNE75% AMR-CYR)**

Para el coste de esta alternativa se partió del coste del hormigón HNE75%AMR, pero se tuvo en cuenta en este caso el coste del cemento con yeso reciclado. De esta forma se encontró un coste de 48.47 €/m³ para el HNE75%AMR-CYR.

En la Tabla 7.12 se observa a modo de resumen el coste de referencia de las diferentes alternativas de producción del hormigón.

Tabla 7.12 Coste de referencia de cada una de las alternativas de producción de hormigón

Hormigón	€/m ³
HE100%AN	85.01
HE20%AR	84.75
HE20%AR-CYR	84.58
HNE100%AN	60.51
HNE100%AR	46.66
HNE75%AMR	48.58
HNE100%AR-CYR	46.55
HNE75%AMR-CYR	48.47

Las alternativas correspondientes al hormigón estructural presentan, como era de esperar, un coste más alto debido a la mayor cantidad de cemento empleado y, por ende, a la mayor resistencia a compresión (Tabla 7.12). La alternativa HE100%AN resulta tener un coste mayor, debido al mayor coste del árido natural en comparación al árido reciclado. Al comparar HE20%AR y HE20%AR-CYR, se observa que el uso del cemento con yeso reciclado contribuye a un coste mínimamente menor en relación al hormigón con CPO.

Con respecto a las alternativas de hormigón no estructural (Tabla 7.12), la alternativa que presenta mayor coste es la alternativa de producción con un 100 % de árido natural (HNE100%AN) y la que resulta con menor coste es la alternativa HNE100%AMR-CYR. Esto se debe, por un lado, al mayor coste del árido natural frente al árido reciclado —constatado también por Tam (2008), Coelho y De Brito (2013a) y Coelho y De Brito (2013b)— y, por otro lado, al menor coste del cemento reciclado comparado con el CPO como también lo demuestran los datos del ensayo WRAP (2008).

Si se comparan hormigones con iguales resistencias a compresión, pero con diferentes tipos y proporciones de áridos (HNE100%AN, HNE100%AR y HNE75%AMR), resulta un coste menor en la alternativa de producción de hormigón con 100 % de árido reciclado y un coste intermedio para la alternativa HNE75%AMR. Esto se debe a que la alternativa de árido mixto reciclado contiene también

árido natural y esto hace que aumente el coste total del hormigón. Sin embargo, sigue estando por debajo del coste del HNE100%AN.

Igual que en el hormigón estructural, el uso de cemento reciclado reduce mínimamente el coste de producción del hormigón, con relación al uso del CPO.

7.2 Fase 5: Definición de los indicadores

7.2.1 Hormigón estructural

Las categorías relacionadas con la salud humana y las relacionadas con la calidad del ecosistema, el cambio climático y el consumo de recursos fueron normalizadas con el fin de obtener un índice que permitiera evaluar las alternativas de HE en término de criterios. En la Tabla 7.13 se muestran los resultados de normalización de las categorías de impacto medioambiental (según la Ecuación 3-6) y el valor del criterio económico para cada alternativa.

Tabla 7.13 Carga medioambiental normalizada y valor del criterio económico para cada alternativa de HE

Alternativas		F1	F2	F3 Económico
		(normalizada)	(normalizada)	€/m ³
A1	HE100%AN	0.74	0.98	85.01
A2	HE20%AR	0.94	0.80	84.75
A3	HE20%AR-CYR	0.17	0.00	84.58

7.2.2 Hormigón no estructural

Para evaluar las alternativas de HNE en término de criterios, fue necesario normalizar las cargas medioambientales de las categorías de impacto. Los resultados de normalización de las cargas medioambientales y el valor del criterio económico para cada una de las alternativas se muestran en la Tabla 7.14.

Tabla 7.14 Carga medioambiental normalizada para cada alternativa de HNE

Alternativas		F1	F2	F3 Económico
		(normalizada)	(normalizada)	€/t
A1	(HNE100%AN)	0.70	0.98	60.51
A2	(HNE100%AR)	0.80	0.59	46.66
A3	(HNE75%AMR)	0.71	0.75	48.58
A4	(HNE100%AR-CYR)	0.26	0.00	46.55
A5	(HNE75%AMR-CYR)	0.18	0.16	48.47

7.3 Fase 6: Clasificación y elección de las alternativas. Análisis y discusión de resultados

7.3.1 Aplicación del método multicriterio y elección de las alternativas para el hormigón estructural

A partir de los valores de la Tabla 7.13 y siguiendo la secuencia de ecuaciones desde la Ecuación 3-7 hasta la Ecuación 3-12, con el fin de aplicar el método VIKOR, se hallaron los valores de Q, R y S, los cuales fueron ordenados de mayor a menor ventaja, teniendo en cuenta que la mejor opción es la más cercana a cero y la peor la más cercana al uno. Se tuvieron en cuenta también las diferentes clasificaciones de los criterios (igual importancia, ventaja medioambiental y ventaja económica).

En la Tabla 7.15 se observa que la alternativa escogida como mejor opción para todas las clasificaciones de los criterios es la alternativa HE20%AR-CYR. Se escogió la alternativa HE20%AR-CYR como única opción debido a que se cumplen las condiciones dadas por la Ecuación 3-10 y Ecuación 3-11.

De acuerdo con los resultados obtenidos en la lista de Q, la alternativa HE20%AR-CYR presenta una ventaja de 90 % con respecto a la alternativa HE20%AR, así como una ventaja de 100 % con respecto a la alternativa HE100%AN para el criterio de igual importancia medioambiental y económica.

La ventaja de la alternativa HE20%AR-CYR frente a la alternativa HE20%AR se hace mayor si se le da un mayor peso al criterio medioambiental (95 %) y se hace menor si se da más importancia al criterio económico (60 %). Lo que se quiere decir, a fin de cuentas, es que el HE20%AR-CYR presenta mayores ventajas medioambientales que económicas con respecto al HE20%AR.

Tabla 7.15 Lista de valores S, R y Q calculados en la producción del hormigón estructural

Clasificación de los criterios	Alternativas	Qj	Sj	Rj
Igual importancia	A3: HE20%AR-CYR	0.00	0.00	0.00
	A2: HE20%AR	0.90	0.73	0.33
	A1: HE100%AN	1.00	0.90	0.33
Ventaja medioambiental	A3: HE20%AR-CYR	0.00	0.00	0.00
	A2: HE20%AR	0.95	0.80	0.40
	A1: HE100%AN	1.00	0.89	0.40
Ventaja económica	A3: HE20%AR-CYR	0.00	0.00	0.00
	A2: HE20%AR	0.60	0.65	0.20
	A1: HE100%AN	1.00	0.93	0.50

La ventaja de la alternativa HE20%AR-CYR con respecto a la alternativa HE100%AN en la lista de Q es de 100 % en todas las clasificaciones de los criterios, lo que indica que la alternativa HE100%AN es la peor opción.

El orden de las alternativas permanece similar en las tres listas de clasificación (Q, R y S).

Teniendo en cuenta que la alternativa escogida como mejor opción es el HE20%AR-CYR y que el promedio de producción de hormigón de los últimos 3 años (2012-2014) en España es $1.79E+07$ m³, según ANEFHOP (2015), se calculan los ahorros y/o impactos totales anuales que pueden presentarse en cada categoría de impacto si el 40 % del hormigón preparado producido en España ($6.76E+06$ m³/año) se fabricara según las características del HE20%AR-CYR; es decir, con 20 % de árido reciclado y empleando, en lugar de CPO, cemento con yeso reciclado (375 kg). La simulación de los ahorros y/o impactos en cada categoría se muestran en la Tabla 7.16.

En este caso se asume la producción del 40 % de todo el hormigón producido en España, ya que de este modo se estaría empleando todo el cemento producido con yeso reciclado (50% del total, apartado 5.3.1). La cantidad de árido para este tipo de hormigón sería $6.08E+06$ t/año y como un 12 % de la cantidad de RCD generados equivale a residuos de hormigón ($1.86E+07$ t/año en España, de acuerdo a los datos suministrados por el FERCD (2015) y por el CEDEX (2010), se estaría garantizando el suministro de la cantidad de materia prima reciclada.

Tabla 7.16 Simulación de los ahorros anuales por la producción de un 40 % de hormigón preparado en España tipo HE20%AR-CYR

Categorías	Unidad	Ahorros por HE20%AR-CYR
C	kg C ₂ H ₃ Cl eq	-1.11E+07
NC	kg C ₂ H ₃ Cl eq	2.07E+07
RI	kg PM 2.5 eq	7.85E+05
DCO	kg CFC-11 eq	6.57E+01
RO	kg C ₂ H ₄ eq	2.80E+05
OS	m ² org.arable	6.53E+06
A	kg SO ₂ eq	4.17E+06
E	kg PO ₄ p-lim	6.45E+04
CG	kg CO ₂ eq	2.20E+09
ENR	MJ primaria	1.08E+10
EM	MJ surplus	1.91E+07

En la Tabla 7.16 se observa que la producción de un 40 % de HE20%AR-CYR conduce a grandes ahorros anuales en las categorías evaluadas, a excepción de la categoría efectos carcinogénicos, donde se producen mayores impactos por el empleo del árido reciclado. Esto se debe a que el reciclaje del árido incluye el proceso de fundición del reciclaje del acero, el cual contribuye a impactos en esta categoría por la emisión de sustancias que pueden provocar efectos carcinogénicos. Por ello, el uso del árido natural, a pesar de presentar mayores impactos en las otras categorías, en ésta precisamente los impactos son menores comparados con el árido reciclado proveniente de hormigón armado.

En la Tabla 7.16 se aprecia que la producción de un 40 % de HE20%AR-CYR en España conlleva a ahorros destacables en la categoría calentamiento global, energía no renovable, efectos no carcinogénicos, extracción de mineral y ocupación del suelo.

Los ahorros económicos por la producción del 40 % del HE20%AR-CYR —en lugar del hormigón preparado convencional— podrían estar alrededor de 2.91E+06 €/año.

7.3.2 Aplicación del método multicriterio y elección de las alternativas para el hormigón no estructural

Al aplicar la secuencia de ecuaciones (Ecuación 3-7- Ecuación 3-12), se encuentran los resultados de los valores de Q, R y S. Estos resultados se ordenan en forma decreciente; es decir, de mejor a peor opción, teniendo en cuenta que la mejor opción es el cero. S representa la distancia de las alternativas a la mejor solución y R la distancia de las alternativas a la peor opción. Q como medida de cercanía o clasificación, es la interpolación lineal de las medidas S y R.

En la Tabla 7.17 se observa que, como no se cumplen las condiciones de la Ecuación 3-10 y de la Ecuación 3-11, se proponen múltiples alternativas según la Ecuación 3-12. De este modo, las alternativas HNE100%AR-CYR y HNE75%AMR-CYR son propuestas como mejor opción.

En la lista de Q y R el orden de las alternativas de mayor a peor opción es: A4, A5, A3, A2 y A1, cuando se aplica igual importancia a todos los criterios o se da ventaja al aspecto medioambiental. Cuando se da prioridad al aspecto económico, la HNE100%AR queda en tercera posición en la lista de Q y la alternativa HNE75%AMR en cuarta posición.

En cambio, para todas las clasificaciones de los criterios en la lista de S, la alternativas se clasifican jerárquicamente de la siguiente forma: A4, A5, A2, A3 y A1. No obstante, para efecto de elegir la mejor opción y la lista jerárquica definitiva de las alternativas se tiene en cuenta los resultados de Q, ya que, como se mencionó anteriormente, se refiere a una interpolación lineal de las medidas S y R.

En la lista de Q, la ventaja del HNE100%AR-CYR frente al HNE75%AMR-CYR es de 5 % para el caso en que se considere igual importancia a ambos criterios. Si se le da un mayor peso al criterio medioambiental esta ventaja se hace menor (4 %); por el contrario, si se le da más importancia al criterio económico, la ventaja de HNE100%AR-CYR frente a HNE75%AMR-CYR se hace mayor. Lo que quiere decir que la alternativa HNE100%AR-CYR presenta mayores ventajas económicas que ambientales con respecto a la alternativa HNE75%AMR-CYR.

La alternativa HNE100%AR-CYR presenta frente a la alternativa HNE75%AMR una ventaja de 73 % para el criterio de igual importancia y una ventaja de 78 % cuando se le da mayor importancia al criterio medioambiental. Al darle mayor peso al criterio económico el HNE100%AR-CYR presenta una ventaja de 43 % frente a HNE100%AR y de 44 % frente al HNE75%AMR. Esto es debido a las mayores ventajas ambientales que económicas de la alternativa HNE100%AR-CYR con respecto a las alternativas HNE100%AR y HNE75%AMR. De este modo se verifica también que la alternativa HNE100%AR presenta mayores ventajas económicas que la alternativa HNE75%AMR.

En la Tabla 7.17 se observa que la alternativa HNE100%AR-CYR presenta una ventaja de 77 % con respecto a la alternativa HNE100%AR para el criterio de igual importancia. Esta ventaja se hace mayor cuando se le da mayor peso al criterio medioambiental (83 %) y menor cuando se le da mayor importancia al aspecto económico (43 %). Lo que demuestra que la alternativa HNE100%AR-CYR presenta mayores ventajas ambientales que económicas con respecto a la alternativa HNE100%AR.

La alternativa de última opción es el HNE100%AN; sin embargo, esta alternativa comparada con la mejor opción (HNE100%AR-CYR) presenta una desventaja de 91 % cuando se tiene en cuenta igual importancia para ambos criterios.

Tabla 7.17 Lista de valores S, R y Q calculados en la producción de hormigón no estructural

Clasificación de los criterios	Alternativas	Qj	Alternativas	Sj	Alternativas	Rj
Igual importancia	A4	0.00	A4	0.04	A4	0.04
	A5	0.05	A5	0.10	A5	0.05
	A3	0.73	A2	0.53	A3	0.29
	A2	0.77	A3	0.59	A2	0.33
	A1	0.91	A1	0.94	A1	0.33
Ventaja medioambiental	A4	0.00	A4	0.05	A4	0.05
	A5	0.04	A5	0.09	A5	0.07
	A3	0.78	A2	0.64	A3	0.35
	A2	0.83	A3	0.68	A2	0.40
	A1	1.00	A1	0.94	A1	0.40
Ventaja económica	A4	0.00	A4	0.03	A4	0.03
	A5	0.08	A5	0.11	A5	0.07
	A2	0.43	A2	0.40	A3	0.22
	A3	0.44	A3	0.48	A2	0.25
	A1	1.00	A1	0.96	A1	0.50
A1(HNE100%AN); A2(HNE100%AR); A3(HNE75%AMR); A4 (HNE100%AR-CYR); A5(HNE75%AMR-CYR)						

7.4 Fase 7: Conclusiones

El tipo de hormigón que causa los mayores impactos en todas las categorías evaluadas —menos en las categorías efectos carcinogénicos y no carcinogénicos— es el hormigón con 100 % árido natural; es decir, el hormigón convencional, tanto estructural como no estructural.

Tanto el árido de hormigón como el árido mixto reciclado conducen a mayores impactos en el hormigón en la categoría efectos carcinogénicos. Así mismo, los mayores ahorros por el uso de árido reciclado en el hormigón se presentan en la categoría extracción de mineral.

El uso de cemento con yeso reciclado en el hormigón conlleva a ahorros en la categoría ocupación del suelo y también a la reducción de impactos en todas las categorías evaluadas, más aún en las categorías efectos no carcinogénicos y disminución de la capa de ozono. En las categorías respiratorios orgánicos e inorgánicos, eutrofización, ocupación del suelo, acidificación, calentamiento global, energía no renovable y extracción de minerales, el cemento reciclado conduce a ahorros significativos en los impactos.

Se presentan mayores costes de producción en hormigones con árido natural, con respecto a hormigones con árido reciclado. Los menores costes de producción se presentan en el HE20%AR-CYR, para el caso del hormigón estructural y en el HNE100%AR-CYR, para el caso del hormigón no estructural.

La mejor opción de producción de hormigón estructural en todas las clasificaciones de los criterios (igual importancia ambiental y económica, o mayor peso a uno de los dos criterios) es el HE20%AR-CYR. La ventaja de la alternativa HE20%AR-CYR frente a la alternativa HE20%AR es mayor si se le da un mayor peso al criterio medioambiental, y visiblemente menor si se da más importancia al criterio económico.

Finalmente, en la producción de hormigón no estructural, las alternativas HNE100%AR-CYR y HNE75%AMR-CYR son elegidas como las mejores opciones para todas las clasificaciones de los criterios evaluados, si bien la alternativa HNE100%AR-CYR presenta mayores ventajas económicas que ambientales con respecto a la alternativa HNE75%AMR-CYR.

8 Conclusiones finales y futuras líneas de investigación

8.1 Conclusiones generales

La industria de la construcción es responsable de muchos de los problemas medioambientales actuales. La mayoría de los impactos se deben a la fase de adquisición de materias primas, que incluye las actividades de explotación, minería, perforación, dragado y recolección. En esta fase son numerosas las emisiones al aire y los residuos en el agua y en el suelo. Así mismo, el proceso de voladura y operaciones de trituración y clasificación del material ocasiona impactos por la generación de ruido y vibraciones.

El sector de la construcción no sólo consume más materia prima y energía que cualquier otra actividad económica, sino que genera la mayor fracción de residuos en toda Europa. Estos residuos en la mayoría de los casos no son bien gestionados y, por ello, se disponen gran parte en vertederos, ocupando un volumen que claramente excede al ocupado por los residuos domésticos.

Debido a la problemática ambiental del sector de la construcción referida, por una parte, a los impactos generados por la producción de materiales y, por otra, a la generación de residuos, parece del todo necesario buscar estrategias de producción de materiales de construcción alternativos en los que se empleen residuos provenientes de la construcción y demolición, en lugar de materias primas originales.

Considerando lo anterior, partiendo de la base de que el entorno económico es cada vez más competitivo y también que crece cada vez más la responsabilidad en las obras constructivas por una mayor exigencia de la legislación a nivel medioambiental, se ha advertido la necesidad de contar con una herramienta que permita evaluar y comparar diferentes alternativas de producción de materiales de construcción a partir de materia prima original y de material reciclado, gracias a la cual se pudiera tener en cuenta, además del criterio técnico que ya ha sido ampliamente estudiado, el criterio medioambiental y el económico.

Teniendo en cuenta lo anteriormente comentado, en esta tesis se estableció el siguiente objetivo general:

- *Desarrollar una propuesta metodológica*, a modo de herramienta funcional, que permita evaluar la producción primaria y la producción secundaria de los materiales pétreos y, a partir de ahí, elegir la opción óptima teniendo en cuenta el criterio medioambiental y el económico.

Con el fin de *implementar la propuesta metodológica desarrollada* para validar su efectividad y evaluar tanto ambiental como económicamente los materiales pétreos, en el contexto de España, se establecieron los siguientes objetivos específicos:

1. Aplicar la propuesta metodológica al material *yeso*, con el fin de evaluar diferentes alternativas de producción e identificar la mejor alternativa, teniendo en cuenta diferentes pesos para los criterios evaluados.
2. Aplicar la propuesta metodológica desarrollada al *cemento*, con el propósito de evaluar diferentes alternativas de producción e identificar la mejor alternativa de producción de este material bajo un enfoque multicriterio.
3. Aplicar la propuesta metodológica a los *áridos*, para evaluar diferentes alternativas de producción u obtención del árido y definir la mejor alternativa de producción, tanto a nivel ambiental como económico, así como la mejor alternativa, dándole un mayor peso a uno de estos criterios.
4. Aplicar la propuesta metodológica desarrollada al *hormigón estructural y no estructural*, con el fin de evaluar desde un enfoque multicriterio diferentes alternativas de producción y escoger para cada uno de estos tipos de hormigón la mejor opción, empleando diferentes clasificaciones para los criterios elegidos.

Se puede afirmar que los objetivos anteriores fueron satisfechos en el marco de la tesis, ya que:

- Se desarrolló una propuesta metodológica a base de una herramienta, la cual permite evaluar y comparar diferentes alternativas de producción primaria y secundaria de materiales pétreos en construcción, teniendo en cuenta un enfoque multicriterio.
- Para cada uno de los materiales pétreos evaluados (*yeso, cemento, áridos y hormigón*) se efectuó el análisis de ciclo de vida, tanto para la producción primaria como para la producción secundaria, dando cumplimiento a todos los elementos obligatorios que forman parte de la herramienta ACV, con el fin de conocer los potenciales impactos ambientales asociados.
- Se recopiló datos e información primaria, a modo de inventario a través de visitas o entrevistas a empresas, plantas de reciclaje, organismos e instituciones pertinentes en España.
- Se analizaron y compararon los diferentes resultados de caracterización de impactos para cada una de las alternativas de producción de los materiales estudiados.
- Se calculó el coste económico de referencia para la producción y el reciclaje del *yeso, del cemento, de los áridos y del hormigón*.

- La propuesta metodológica desarrollada fue aplicada a los principales materiales pétreos como son: *el yeso, el cemento, los áridos y el hormigón*, tomando como ámbito de estudio a España.
- Se eligieron las alternativas óptimas para cada material (*yeso, cemento, áridos y hormigón*) teniendo en cuenta diferentes clasificaciones para los criterios y puntos de vista implicados.

A continuación se resaltan los aspectos más relevantes que representan las principales contribuciones derivadas de esta tesis.

8.1.1 Conclusiones de la propuesta metodológica

La metodología de ACV se constituye en una herramienta efectiva y eficaz para el estudio de los impactos medioambientales de un proceso o de un producto en todo su ciclo de vida; sin embargo, permite evaluar sólo el criterio ambiental.

Como el objetivo de esta tesis era desarrollar una propuesta metodológica, que permitiera evaluar la producción primaria y la producción secundaria de los materiales pétreos... y elegir la opción óptima teniendo en cuenta el criterio medioambiental y económico, fue necesario recurrir al empleo del análisis multicriterio, el cual resulta ser una forma de evaluación integrada de sostenibilidad, adecuada para abordar problemas complejos con un alto grado de incertidumbre, objetivos conflictivos y múltiples intereses y perspectivas. Podemos afirmar, en efecto, que el análisis multicriterio se presenta como una valiosa herramienta para ayudar al decisor durante el proceso de toma de decisiones.

De este modo, la propuesta metodológica desarrollada permite evaluar y comparar diferentes alternativas de producción de materiales de construcción a partir de materia prima original y de material reciclado, empleando un enfoque multicriterio. Es por esto que gracias a esta herramienta se puede tener en cuenta, además del criterio técnico que ya ha sido ampliamente estudiado, el criterio medioambiental y el económico, ambos relativamente menos estudiados y/o tenidos tanto en cuenta.

La propuesta metodológica desarrollada permite considerar diferentes puntos de vista implicados, ya que establece diferentes clasificaciones para los criterios: “igual importancia ambiental y económica”, “mayor importancia medioambiental” y “mayor importancia económica”. El criterio técnico, aunque no es evaluado de modo directo, es tenido en cuenta en este estudio en el momento de definir las diferentes alternativas a evaluar.

Esta herramienta también permite apoyar el proceso de toma de decisiones mediante la obtención de índices asociados a cada criterio evaluado y conseguir —por medio del empleo de un método multicriterio— listas de preferencia de las alternativas, con el fin de definir la óptima teniendo en cuenta diferentes puntos de vistas implicados.

La herramienta desarrollada ha sido aplicada con éxito a cuatro materiales pétreos de construcción en España; por ello, se puede decir que se ha podido comprobar su validez y funcionalidad.

Dicha herramienta, aunque está diseñada especialmente para materiales pétreos en construcción, pensamos que puede ser aplicada también a cualquier otro material de construcción acerca del cual se quiera evaluar la producción primaria y secundaria, teniendo en cuenta el criterio medioambiental y económico, además de otros puntos de vista implicados. También se cree que puede ser implementada en cualquier otro país o zona de estudio con muy buenos resultados.

Por lo anteriormente comentado se puede decir que el objetivo principal de la tesis se cumplió de manera satisfactoria.

8.1.2 Conclusiones de la aplicación de la propuesta metodológica

8.1.2.1 Yeso

Para evaluar ambiental y económicamente diferentes alternativas de producción del yeso se tuvieron en cuenta diferentes sistemas de gestión del residuo de papel proveniente de las placas de yeso laminado. Se escogió, por una parte, un tratamiento finalista (disposición de los residuos de papel) y, por otro lado, el reciclaje para conocer la influencia de ambos sistemas de gestión en los resultados finales.

Otro criterio importante tenido en cuenta en la producción secundaria del yeso fue la distancia del transporte de los residuos de yeso desde el sitio de generación hasta la planta de reciclaje. De este modo, se consideraron dos distancias: una de 7 km que corresponde a la distancia promedio de las plantas de reciclaje más cercanas al centro de Barcelona, y otra, de 50 km, que corresponde a la distancia máxima a la que serían transportados los residuos producidos en cualquier otro sitio hasta las plantas de reciclaje.

Con la implementación de la propuesta metodológica al material yeso, se exponen a continuación las *principales conclusiones del primer objetivo específico*:

- La obtención de yeso natural (YN) presenta los mayores impactos medioambientales en todas las categorías evaluadas, menos en ocupación del territorio, efectos no carcinogénicos, eutrofización y extracción de mineral.

- La alternativa de obtención de yeso reciclado, en la que la distancia de transporte es de 7km y donde se emplea como sistema de gestión el reciclaje de los residuos de papel [YR (7km) rp], presenta los mayores ahorros medioambientales en todas las categorías evaluadas. Los mayores ahorros se presentan en la categoría ocupación del suelo, debido, por un lado, al reciclaje del papel y, por otro, a que se evita así la extracción de yeso natural.
- El sistema de gestión aplicado a los residuos de papel provenientes del reciclado del yeso influye en gran medida en las categorías de impacto de este proceso. Si el papel se dispone en vertedero se presentan grandes impactos en todas las categorías; en cambio, si el papel se recicla conlleva a grandes ahorros en los impactos totales del proceso de reciclaje del yeso.
- La distancia de transporte de los residuos de yeso desde el lugar de generación hasta la planta de reciclaje influye de manera poco notoria en comparación con el sistema de gestión aplicado a los residuos generados durante el reciclaje del yeso.
- La alternativa de producción de yeso que presenta mayor coste económico es la producción de yeso natural (YN). En cuanto a las alternativas de reciclaje del yeso, las que presentan mayor beneficio económico son las alternativas YR (7km) rp y YR (50 km) rp, en las que se recicla también el papel proveniente de la placa de yeso laminado y en las que se emplea como distancia recorrida 7 km y 50 km respectivamente.
- Las mayores ventajas medioambientales y económicas del reciclaje del yeso se han hecho presentes en las alternativas en que se aplica como sistema de gestión el reciclaje de papel proveniente de las placas de yeso laminado y, en contraste, las menores ventajas se han evidenciado en las que se disponen los residuos de papel en vertedero.
- Los resultados del método multicriterio aplicado al yeso presentan como mejores opciones de producción del yeso dos alternativas: YR (7km) rp y YR (50 km) rp en primera y segunda posición respectivamente. La producción primaria del yeso (YN) es propuesta como última opción. Como la distancia máxima a la que sería transportados los residuos de yeso hasta la planta de reciclaje en Cataluña es 50 km y, además, esta alternativa es escogida también como mejor opción, todo lleva a decir que el reciclaje de los residuos de yeso resulta viable medioambiental y económicamente.
- Las alternativas YR (7km) rp y YR (50 km) rp resultan ser las opciones óptimas en todas las clasificaciones de los criterios: igual importancia para ambos criterios, mayor importancia medioambiental y mayor importancia económica.

Los resultados obtenidos llevan a confirmar que el primer objetivo específico se cumplió de manera satisfactoria.

8.1.2.2 *Cemento*

En la definición de las alternativas para el caso del cemento, se tuvieron en cuenta diferentes tipos de materias primas. De este modo, las alternativas de producción secundaria de cemento se basaron por una parte, en la necesidad de hacer una buena gestión de los residuos provenientes de la construcción y demolición y, por otra, en disminuir los impactos medioambientales de la industria del cemento. Es por ello que el yeso, como un material indispensable en la producción de cemento Pórtland ordinario, se convierte en un RCD con grandes posibilidades de ser reincorporado para la producción de dicho cemento.

Conociendo también la necesidad de disminuir el factor clínker, se consideró como otra alternativa de producción secundaria de cemento, el uso de vidrio triturado reciclado proveniente de los RCD, como sustitución de la arcilla.

Al aplicar la propuesta metodológica al material cemento, se exponen a continuación las *principales conclusiones encontradas del segundo objetivo específico*:

- El cemento con yeso natural o el cemento Pórtland ordinario (CPO) presenta los mayores impactos en todas las categorías evaluadas. Los mayores impactos debido al uso del yeso natural se presentan en las categorías disminución de la capa de ozono, efectos respiratorios inorgánicos y energía no renovable.
- El uso yeso reciclado en la producción de cemento (CYR) presenta menores impactos en la mayoría de las categorías, comparado con el cemento fabricado con yeso natural o con vidrio triturado. Los mayores ahorros se presentan en la categoría ocupación del suelo.
- El uso de vidrio reciclado en el cemento (CVR), como reemplazo parcial de la arcilla, disminuye los impactos en todas las categorías, comparado con el CPO. Sin embargo, en la categoría calentamiento global, presenta los menores impactos comparado con el CPO y CYR, por la modificación del factor clínker.
- La alternativa de producción de cemento que resulta con un menor coste económico es el cemento con yeso reciclado (CYR). La que presenta mayor coste es la alternativa de producción de cemento con vidrio reciclado (CVR).
- La alternativa escogida como mejor opción, al darle igual importancia al criterio ambiental que al económico, o mayor peso al criterio económico o ambiental, es la alternativa de producción de cemento con yeso reciclado (CYR).
- La alternativa en segunda posición cuando se le da mayor importancia al criterio medioambiental es la producción de cemento con vidrio reciclado; sin embargo, ésta pasa a ser la última opción en

el caso en que se le da mayor importancia al criterio económico o igual importancia tanto al criterio ambiental como económico.

- Aunque la alternativa de producción de cemento con vidrio reciclado no es elegida como mejor opción de producción de cemento, es importante destacar que, específicamente en la categoría calentamiento global, ésta presenta un menor impacto con respecto a las otras alternativas de producción. Por ello, aunque la adquisición de la materia prima resulta más costosa en la producción de cemento con vidrio reciclado, se producirían grandes ahorros en la categoría calentamiento global, con respecto a las otras alternativas de producción de cemento.

Estos resultados demuestran el cumplimiento satisfactorio del segundo objetivo específico.

8.1.2.3 Áridos

Para el caso de los áridos reciclados se consideraron dos factores importantes en el momento de definir las alternativas. Por un lado, el tipo de residuo que entra a la planta de reciclaje: hormigón armado y residuo mixto (hormigón armado y cerámica); y por otro, el lugar en el que se lleva a cabo el proceso de reciclaje; es decir, en planta fija o en la misma obra de construcción. De este modo; además del árido natural, se evaluó el árido de hormigón en planta y en obra y el árido mixto en planta.

Con la implementación de la propuesta metodológica a los áridos, se exponen a continuación las *principales conclusiones del tercer objetivo específico*:

- Todas las alternativas de producción de árido reciclado ocasionan ahorros en las categorías: efectos respiratorios orgánicos e inorgánicos, ocupación del suelo, acidificación, eutrofización, calentamiento global, energía no renovable y extracción de mineral; debido a que el residuo de acero proveniente del hormigón armado —al ser reciclado o reincorporado para la producción secundaria de acero— conduce a ahorros significativos en estas categorías. Sin embargo, en las categorías efectos carcinogénicos y no carcinogénicos, el reciclaje del acero genera impactos debido a la emisión de sustancias que pueden provocar daños a la salud humana durante el proceso de fundición de este metal.
- En la producción de árido mixto en planta (AMp), al generarse menos residuos de acero; y por lo tanto, al reciclarse menos de éstos, también son menores los impactos producidos en las categorías efectos carcinogénicos y no carcinogénicos, y menores los ahorros en la categoría disminución de la capa de ozono con relación al resto de categorías.

- En la alternativa de producción de árido de hormigón en obra (AHo) el impacto del transporte de las maquinarias hasta la obra y su retorno, no es relevante. Por ello, el reciclaje del árido en la obra de construcción (AHo) resulta en la mayoría de categorías evaluadas con mayores ahorros medioambientales con respecto al reciclaje del hormigón en planta (AHp).
- La producción de árido de hormigón en obra (AHo) presenta los más grandes ahorros (-100 %) en las categorías: efectos respiratorios inorgánicos, ocupación del suelo, acidificación, eutrofización, calentamiento global y energía no renovable.
- La obtención del árido natural presenta los más grandes impactos en todas las categorías evaluadas, menos en carcinogénicos y no carcinogénicos, donde los más grandes impactos los presenta la obtención de árido de hormigón en planta y en obra al incluir los impactos por el reciclaje de los residuos de acero provenientes del hormigón armado.
- Al efectuar el análisis de sensibilidad con distancias por medio del aumento el trayecto recorrido por los residuos de hormigón y cerámica desde el sitio de generación hasta la planta de reciclaje, se obtienen menores impactos en la mayoría de categorías evaluadas en el árido reciclado, comparado con el árido natural.
- El coste de las alternativas de obtención de árido reciclado resulta en beneficio económico con respecto a la alternativa de obtención de árido natural. Entre las alternativas de obtención de árido reciclado, la más beneficiosa a nivel económico es la producción de árido mixto. La alternativa que presenta menos ahorros económicos es la producción de árido de hormigón en planta.
- Las opciones escogidas como óptimas al aplicar el método multicriterio en la producción de árido en todas las clasificaciones de los criterios evaluados (igual importancia ambiental y económica o mayor importancia a uno de estos dos criterios) son el árido mixto en planta (AMp) y el árido de hormigón en obra (AHo). La alternativa ubicada en última posición es la alternativa de producción de árido natural.

Los resultados encontrados permiten considerar que el tercer objetivo específico se cumplió de manera satisfactoria.

8.1.2.4 Hormigón

Para el caso de la producción secundaria de hormigón se llevó a cabo, en primer lugar, una clasificación entre hormigón estructural y hormigón no estructural, con el fin de evaluar hormigones con la misma funcionalidad. De este modo, para ambos tipos de hormigones se tuvieron en cuenta los estudios efectuados y la normativa nacional e internacional que permiten el tipo y la cantidad de árido reciclado y también la adecuada dosificación de los hormigones.

Para el hormigón estructural se evaluaron las siguientes alternativas:

- Hormigón estructural convencional u hormigón con un 100% de árido natural (HE100%AN)
- Hormigón estructural con un 20% de árido reciclado (HE20%AR)
- Hormigón estructural con 20% de árido reciclado y 100% de cemento con yeso reciclado (HE20%AR-CYR)

Para el hormigón no estructural las alternativas evaluadas se mencionan a continuación:

- Hormigón no estructural convencional u hormigón con un 100% de árido natural (HNE100%AN)
- Hormigón no estructural con 100% árido reciclado (HNE100%AR)
- Hormigón no estructural con 75% árido mixto reciclado (HNE75%AMR)
- Hormigón estructural con 100% árido reciclado y 100% de cemento con yeso reciclado (HNE100%AR-CYR)
- Hormigón estructural con 75% de árido mixto reciclado y 100% de cemento con yeso reciclado (HNE75%AMR-CYR)

Al implementar la propuesta metodológica al hormigón, se exponen a continuación las *principales conclusiones del cuarto objetivo específico*:

- En todas las alternativas de producción de hormigón, los mayores impactos en las categorías se deben al proceso de cemento Pórtland ordinario. Los procesos de agua, fuel óleo, gas natural, piezas de desgaste y aceite lubricante tienen poca influencia en los impactos de las categorías evaluadas. Lo mismo ocurre con los procesos de gestión de los residuos generados durante la producción de hormigón —aunque incluyen el transporte hasta los vertederos, la disposición de los residuos y el tratamiento del agua residual— no afectan de modo significativo a las categorías, al compararlos con los otros procesos.
- El tipo de hormigón que causa los mayores impactos en todas las categorías evaluadas, menos en las categorías efectos carcinogénicos y no carcinogénicos es el hormigón con 100 % árido natural; es decir, el hormigón convencional, tanto estructural como no estructural.
- El uso de cemento con yeso reciclado en la producción de hormigón conlleva a la reducción de impactos en todas las categorías evaluadas. En las categorías respiratorios orgánicos e inorgánicos, eutrofización, ocupación del suelo, acidificación, calentamiento global, energía no renovable y

- extracción de minerales; esto es: el cemento reciclado conduce a ahorros significativos en los impactos.
- En la producción del hormigón, el uso de árido reciclado presenta un gran peso en las categorías efectos carcinogénicos y extracción de mineral. Por esto, tanto el árido de hormigón como el árido mixto reciclado, conducen a mayores impactos en el hormigón en la categoría efectos carcinogénicos y a mayores ahorros en la categoría extracción de mineral. En el resto de categorías, el cemento reciclado juega un papel mucho más importante en los impactos finales que el árido reciclado.
 - Se presentan mayores costes de producción en los hormigones con árido natural, con respecto a los hormigones con árido reciclado. Los menores costes de producción se presentan en el HE20%AR-CYR para el caso del hormigón estructural, y en el HNE100%AR-CYR para el caso del hormigón no estructural. Lo que confirma que el uso de árido y cemento reciclado en el hormigón conduce a menores costes de producción.
 - La mejor opción de producción del hormigón estructural en todas las clasificaciones de los criterios evaluados (igual importancia ambiental y económica, o mayor peso a uno de los dos criterios), es el HE20%AR-CYR. La alternativa que resulta como peor opción de producción de hormigón estructural en todas las clasificaciones de los criterios es el HE100%AN.
 - Después de aplicar el método multicriterio en la producción de hormigón no estructural se eligen como mejor opción para todas las clasificaciones de los criterios evaluados dos alternativas: HNE100%AR-CYR y HNE75%AMR-CYR. La alternativa de última opción para todas las clasificaciones de los criterios en el hormigón no estructural es la alternativa HNE100%AN.

Las conclusiones anteriormente mencionadas permiten confirmar que el cuarto objetivo específico se cumplió de manera satisfactoria.

8.2 Contribución al conocimiento

En esta investigación doctoral se ha desarrollado una propuesta metodológica de enfoque multicriterio, la cual permite evaluar y comparar los resultados de caracterización de los impactos de cada una de las alternativas de producción primaria y secundaria de los materiales pétreos y calcular el coste económico de referencia para cada una de las alternativas evaluadas.

Esta herramienta también permite apoyar el proceso de toma de decisiones mediante la obtención de índices asociados a cada criterio evaluado y conseguir —por medio del empleo de un método multicriterio— listas de preferencia de las alternativas, con el fin de definir la óptima teniendo en cuenta diferentes puntos de vistas implicados.

Con la aplicación de esta propuesta metodológica —además de comprobar su funcionalidad y validez— se ha podido evaluar y comparar, tanto ambiental como económicamente, diferentes alternativas de producción primaria y secundaria de los principales materiales pétreos en España y escoger la mejor opción teniendo en cuenta diferentes clasificaciones para los criterios: “igual importancia ambiental y económica”, “mayor importancia ambiental” y “mayor importancia económica”.

Los resultados obtenidos al aplicar esta propuesta metodológica a los principales materiales pétreos en España han significado un avance en el estudio medioambiental y económico del reciclaje de residuos de construcción y demolición y su empleo para la producción de materiales alternativos en construcción a nivel nacional.

El valor añadido de la aplicación de esta metodología a los materiales pétreos en España, se encuentra principalmente en el estudio de los impactos medioambientales y económicos del uso del yeso reciclado en el cemento y también en el estudio de los impactos medioambientales y económicos del empleo de cemento con yeso reciclado y de árido reciclado en el hormigón.

Dichos resultados se constituyen también en un gran incentivo para alcanzar los objetivos de valorización de los RCD para el año 2020 trazados por la Directiva Europea, donde se busca conseguir niveles de reciclado mucho más altos, minimizando la extracción de recursos naturales adicionales.

Así mismo, los resultados obtenidos con la aplicación de esta propuesta metodológica a los principales materiales pétreos en España pueden contribuir también a cambios en la legislación española en cuanto al empleo de áridos mixto en el hormigón y al empleo de cemento reciclado. Así mismo, puede dar un impulso a conceder un mayor peso a las técnicas de desconstrucción y a la separación selectiva de todos los RCD, incluyendo el yeso. Algo similar puede decirse en relación al impulso de cambios legislativos a nivel estatal... que favorezcan las técnicas de reciclaje, bien sea por medio de mayores tasas por el vertido de los RCD, o incentivos para la producción secundaria de materiales.

Por otra parte, esta tesis ha representado también un avance en nuestro campo de conocimiento, gracias a la actualización realizada en el capítulo propio del “estado del arte” efectuado acerca de la viabilidad técnica del empleo de materia prima secundaria en la producción de materiales pétreos de construcción.

Además, al aplicar dicha herramienta en España, se ha ampliado la base de datos existentes en cuanto a datos de inventario de los procesos de producción primaria y secundaria de materiales pétreos de construcción, sobre todo con datos acerca del reciclaje de RCD en este país.

8.3 Recomendaciones y futuras líneas de investigación

A partir de los resultados de esta tesis se sugieren como temas de gran interés, dignos de ser más desarrollados, los siguientes estudios complementarios:

- Aplicación de la metodología propuesta a otros materiales de construcción (plástico, asfalto, madera... entre otros), con el fin de evaluar y comparar medioambiental y económicamente diferentes alternativas de producción primaria y secundaria.
- Aplicación de la metodología propuesta a los mismos materiales pétreos evaluados, pero en otro ámbito de estudio con el fin de comparar dichos resultados con los obtenidos en esta tesis.

También, con la realización de esta tesis doctoral se han detectado diversas posibilidades de realizar líneas de investigación que continúen y profundicen la contribución al conocimiento en nuestro ámbito en los siguientes aspectos:

- Estudiar en profundidad la viabilidad técnica del uso del cemento con yeso reciclado y árido reciclado en el hormigón, mediante ensayos de laboratorios que permitan conocer el comportamiento mecánico, físico y químico de este tipo de hormigón reciclado.
- Realizar un estudio de reciclaje de residuos de construcción que incluya diferentes sistemas de desmantelamiento de las construcciones (desconstrucción y demolición).
- Efectuar un estudio detallado y profundo acerca de la viabilidad económica de los diferentes procesos de reciclaje.
- Ampliar las bases de datos existentes acerca del inventario de datos en la producción de materiales de construcción en la que se considere no sólo la producción primaria, sino la producción secundaria o reciclaje de los residuos.

9 Referencias bibliográficas

ACA (2015). Agencia Catalana del Agua. *Cálculo del canon del agua* [en línea].Cataluña (España) [Consulta: 11 de Julio de 2015]. Recuperado de: <http://www.gencat.cat/aca>.

ARC (2015a). Agència de Residus de Catalunya. *Instalaciones de gestión* [en línea] [Consulta: 3 de Marzo de 2015]. Recuperado de: http://residus.gencat.cat/es/ambits_dactuacio/valoritzacio_reciclatge/instal_lacions_de_gestio/

ARC (2015b). Servidor de mapas de l'Agència de Residus de Catalunya [en línea] [Consulta: 11 de Mayo de 2015]. Recuperado de: <http://oslo.geodata.es/arc/mapa.phpp>.

AFA (2010). Asociación de Fabricantes de Áridos de la Rioja. *Mejora de la gestión energética en las canteras y graveras de la Rioja* [en línea][Consulta: 18 de Octubre de 2014]. Recuperado de: <http://www.larioja.org/npRioja/default/defaultpage.jsp?idtab=456440&IdDoc=515711>.

AJDUKIEWICZ, A. and KLISZCZEWICZ, A. (2002). Influence of recycled aggregates on mechanical properties of HS/HPC. *Cement and Concrete Composites*, 24(2), 269–279. DOI [http://dx.doi.org/10.1016/S0958-9465\(01\)00012-9](http://dx.doi.org/10.1016/S0958-9465(01)00012-9).

ALAEJOS, P. (2008). Tipos y propiedades de áridos reciclados. *Informe CEDEX para el Ministerio de Medio Ambiente*. España.

ALI, M. *et al.* (2011). A review on emission analysis in cement industries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15 (5), 2252–2261. DOI 10.1016/j.rser.2011.02.014.

ALLACKER, K. *et al.* (2014). Allocation solutions for secondary material production and end of life recovery: Proposals for product policy initiatives. *Resources, Conservation and Recycling*, 88, 1–12. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2014.03.016>.

ÁLVAREZ, L. (2010). *Análisis medio ambiental de la gestión de los residuos de la construcción y demolición (RCD's). Enfoque en la perspectiva del análisis de ciclo de vida (ACV)*.Tesis Final de Máster. Universidad Politécnica de Cataluña.Barcelona.España.

ALVES, A. *et al.* (2014). Mechanical properties of structural concrete with fine recycled ceramic aggregates. *Construction and Building Materials*, 64, 103–113. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.04.037>.

ANASTASIOU, E. *et al.* (2014). Utilization of fine recycled aggregates in concrete with fly ash and steel slag. *Construction and Building Materials*, 50, 154–161. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.09.037>.

ANAYA, G. y CHAOCA, R. (2009). *Apoyo didáctico en la enseñanza y aprendizaje de la asignatura “materiales de construcción.”* Universidad Mayor de San Simón. Facultad de Ciencias y Tecnología. Bolivia.

ANEFHOP (2015). Asociación Nacional Española Fabricantes de Hormigón Preparado *Estadísticas de producción de hormigón preparado* [en línea] [Consulta: 3 de agosto de 2015]. Recuperado de: <http://www.anefhopp.com/component/content/article/126-estadisticas-prod/136-acceso-informes-produccion>.

AOUAD, G. *et al.* (2012). Dredged sediments used as novel supply of raw material to produce Portland cement clinker. *Cement and Concrete Composites*, 34 (6), 788–793. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2012.02.008>.

APPA (2015). Asociación de Productores de Energías Renovables. Impactos ambientales de la producción de electricidad estudio comparativo de ocho tecnologías de generación eléctrica. *Asociación de Empresas de Energías Renovables* [en línea][Consulta: 3 de agosto de 2015]. Recuperado de: www.appa.es/02appa/02b-documentosgeneral.php.

ARANDA, A. (2008). *Modelos energéticos sostenibles para España. Perspectiva desde la Ecoeficiencia.* Tesis Doctoral. Universidad de Zaragoza. Departamento de Ingeniería Mecánica. Zaragoza.España.

AREA, M. y MASTRANTONIO, G. (2012). Gestión ambiental en la fabricación de papel reciclado. *Reciclado celulósico* [en línea] Editorial:CYTED, Capítulo 8, pp. 263–303. Argentina. [Consulta: 18 de agosto de 2014] Recuperado de: http://www.researchgate.net/publication/262932872_Gestin_ambiental_en_la_fabricacin_de_papel_reciclado.

ASOKAN, P. *et al.* (2009). Assessing the recycling potential of glass fibre reinforced plastic waste in concrete and cement composites. *Journal of Cleaner Production*, 17 (9), 821–829. DOI: 10.1016/j.jclepro.2008.12.004.

ASPAPPEL (2015). Asociación Española de Fabricantes de Pasta, Papel y Cartón. Estadísticas de precios de papel para reciclar en España. *Precios del papel para reciclar* [en línea]. [Consulta: 26 de Junio de 2015]. Recuperado de: <http://www.aspapel.es/el-sector/precios-papel-recuperado>.

BANIAS, G. *et al.* (2011). A web-based Decision Support System for the optimal management of construction and demolition waste. *Waste Management*, 31(12), 2497–2502. DOI 10.1016/j.wasman.2011.07.018.

BARCELÓ, S. (2004). *Plan de adaptación de una empresa constructora ante los nuevos requerimientos de la gestión de residuos.* Proyecto de fin de carrera. Universidad Politécnica de Cataluña, pp.16-20. Barcelona. España.

BARROSO, S. e IBAÑEZ, J. (2014). *Introducción al conocimiento de materiales.* Universidad Nacional de Educación a Distancia. Cuadernos UNED. Madrid. Edición digital.. ISBN electrónico:978-84-362-6859-1.

BEDEC (2015). Base de datos del ITEC (Instituto de Tecnología y Construcción de Cataluña) Cataluña. España [en línea] Recuperado de: <http://itec.es/nouBedec.e/bedec.aspx>.

- Begliardo, H. *et al.* (2007). *Estudio del reciclaje de residuos de construcción con yeso*. Congreso SAM/CONAMENT. Congreso llevado a cabo en San Nicolás, Argentina del 4 al 7 de septiembre.
- BEHERA, M. *et al.* (2014). Recycled aggregate from C&D waste & its use in concrete – A breakthrough towards sustainability in construction sector: A review. *Construction and Building Materials*, 68, 501–516. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.07.003>.
- BEHZADIAN, M. *et al.* (2010). PROMETHEE: A comprehensive literature review on methodologies and applications. *European Journal of Operational Research*, 200(1), 198–215. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejor.2009.01.021>.
- BENVENISTE, G. *et al.* (2011). Life cycle assessment and product category rules for the construction sector. The floor and wall tiles sector case study. *Informes de la construcción*, 63, (552), 71-81.
- BLANCO, F. (2005). *Introducción a los materiales*. Apuntes de materiales de construcción. Universidad de Oviedo. Escuela Superior de Ingenieros de Minas. España.
- BLENGINI, G. and DI CARLO, T. (2010). The changing role of life cycle phases, subsystems and materials in the LCA of low energy buildings. *Energy and Buildings*, 42(6), 869–880. DOI: 10.1016/j.enbuild.2009.12.009.
- BLENGINI, G. and GARBARINO, E. (2010). Resources and waste management in Turin (Italy): the role of recycled aggregates in the sustainable supply mix. *Journal of Cleaner Production* 18, (10–11), 1021–1030. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2010.01.027>.
- BOLAJI, B. and HUAN, Z. (2013). Ozone depletion and global warming: Case for the use of natural refrigerant – a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*.18, 49–54. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2012.10.008>.
- BRAVO, M. *et al.* (2015). Durability performance of concrete with recycled aggregates from construction and demolition waste plants. *Construction and Building Materials*, 77, 357–369. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.12.103>.
- BRODKOM, F. (2002). *Guía de buenas prácticas medioambientales en la industria extractiva europea. Aplicación al caso español*. España. Recuperado de: <http://www.seguridadyaridos.org/pdfs/GBPMA%20EUROPEA%20Bloque1.pdf>.
- BROGAARD, L. *et al.* (2014). Evaluation of life cycle inventory data for recycling systems. *Resources, Conservation and Recycling*, 87, 30–45. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2014.03.011>.
- BUSTILLO, M. (2010). *Manual de RCD y áridos reciclados*. Madrid, Editorial Fuego.
- BUSTILLO, M. y CALVO, J. (2005). *Materiales de construcción*. Madrid, Editorial Fuego.
- BUTERA, S. *et al.* (2015). Life cycle assessment of construction and demolition waste management. *Waste Management*, 44, 196-205. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2015.07.011>
- BUTLER, L. *et al.* (2011). The effect of recycled concrete aggregate properties on the bond strength between {RCA} concrete and steel reinforcement. *Cement and Concrete Research*, 41(10), 1037–1049. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.06.004>.

CABEZA, L. F. *et al.* (2014). Life cycle assessment (LCA) and life cycle energy analysis (LCEA) of buildings and the building sector: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 29, 394–416. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2013.08.037>.

CABRITA, M. *et al.* (2015). Assessing eutrophication in the Portuguese continental Exclusive Economic Zone within the European Marine Strategy Framework Directive. *Ecological Indicators*, 58, 286–299. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolind.2015.05.044>.

CAREDDU, N. *et al.* (2013). From landfill to water, land and life: The creation of the Centre for stone materials aimed at secondary processing. *Resources Policy*, 38(3), 258–265. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.resourpol.2013.05.001>.

CASTELL, A. *et al.* (2013). Life Cycle Assessment of alveolar brick construction system incorporating phase change materials (PCMs). *Applied Energy*, 101, 600–608. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.06.066>.

CASTELL, X. E. *et al.* (2005). *Tratamiento y valoración energética de residuos*, España, Editorial Díaz de Santos.

CATÀLEG DE RESIDUS DE CATALUNYA (1999). Generalitat de Catalunya. Departament de Medi Ambient. Junta de Residus. Primera edició, Barcelona.

CATÁLOGO EUROPEO DE RESIDUOS (2013). *RESOLUCIÓN de 17 de noviembre de 1998, de la Dirección General de Calidad y Evaluación Ambiental, por la que se dispone la publicación del catálogo europeo de residuos (CER), aprobado mediante la Decisión 94/3/CE, de la Comisión, de 20 de diciembre de 1993*. Boletín Oficial del Estado, núm. 7, 8 de enero de 1999.

CEDEX (2010). *Residuos de construcción y demolición*. Fichas técnicas. Recuperado de: <http://www.cedex.es/NR/rdonlyres/0AF8BEF6-2BE2-4456-AE0C-7181B3A2975B/119974/RESIDUOSDECONSTRUCCIONYDEMOLICION1.pdf>.

CEN/TC350 (2013). *Sustainability of construction works*. European Committee for standardisation. CEN/TC350: TG Framework. Recuperado de: https://www.gph.at/images/gph/events/2013_03_18-19/FV/vortrag_ilomaeki_13.pdf.

CEPI (2007). *Framework for the development of carbon footprints for paper and board products*. Confederation of European Paper Industries, Bruselas. Recuperado de: <http://www.cepi.org/system/files/public/documents/publications/environment/2007/carbon%20footprint-final.pdf>.

CHANDARA, C. *et al.* (2009). Use of waste gypsum to replace natural gypsum as set retarders in portland cement. *Waste Management*, 29(5), 1675–1679. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2008.11.014>.

CHATTERJEE, P. *et al.* (2009). Selection of materials using compromise ranking and outranking methods. *Materials & Design*, 30(10), 4043–4053. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2009.05.016>.

CHEN, G. (2002). Glass recycling in cement production—an innovative approach. *Waste Management*, 22(7), 747–753. DOI [http://dx.doi.org/10.1016/S0956-053X\(02\)00047-8](http://dx.doi.org/10.1016/S0956-053X(02)00047-8).

- CHEUNG, W. and PACHISIA, V. (2015). Facilitating waste paper recycling and repurposing via cost modelling of machine failure, labour availability and waste quantity. *Resources, Conservation and Recycling*, 101, pp. 34–41. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2015.05.011>.
- CHONG, W. and HERMRECK, C. (2010). Understanding transportation energy and technical metabolism of construction waste recycling. *Resources, Conservation and Recycling*, 54(9), 579–590. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2009.10.015>.
- CIMENT CATALÀ (2015). Agrupació de Fabricants de Ciment de Catalunya. *Classes de ciment produïdes a Catalunya* [Consulta: 11 de Julio de 2015]. Recuperado de: http://www.cimentcatala.org/ePub/easnet.dll/execreq/page?eas:dat_im=001791&eas:template_im=001341.
- CIVIC, A. and VUCIJAK, B. (2014). Multi-criteria Optimization of Insulation Options for Warmth of Buildings to Increase Energy Efficiency. *Procedia Engineering*, 69, 911–920. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2014.03.070>.
- COELHO, A. and DE BRITO, J. (2013a). Economic viability analysis of a construction and demolition waste recycling plant in Portugal – part I: location, materials, technology and economic analysis. *Journal of Cleaner Production*, 39, 338–352. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.08.024>.
- COELHO, A. and DE BRITO, J. (2013b). Economic viability analysis of a construction and demolition waste recycling plant in Portugal – part II: economic sensitivity analysis. *Journal of Cleaner Production*, 39, 329–337. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.05.006>.
- COELHO, A. and DE BRITO, J. (2013c). Environmental analysis of a construction and demolition waste recycling plant in Portugal – Part I: Energy consumption and CO2 emissions. *Waste Management*, 33 (5), 1258–1267. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2013.01.025>.
- COLOMBANI, M. (2014). *ACV de bolsas de compra. Aplicación a Córcega. Análisis del cambio de bolsas de un solo uso por alternativas reutilizables*. Tesis Final de Máster. Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona, España.
- CONROY, A. *et al.* (2006). Composite recycling in the construction industry. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 37(8), 1216–1222. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesa.2005.05.031>.
- CORINALDESI, V. and MORICONI, G. (2009). Influence of mineral additions on the performance of 100% recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 23(8), 2869–2876. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.02.004>.
- CORREIA, J. *et al.* (2006). Effects on concrete durability of using recycled ceramic aggregates. *Materials and Structures*, 39(2), 169–177.
- CRESPO, S. (2010). *Materiales de construcción para edificación y obra civil*, Alicante, España, Editorial Club Universitario.
- CTE (2006). *REAL DECRETO 314/2006, de 17 de marzo, por el que se aprueba el Código Técnico de la Edificación*. Boletín Oficial del Estado, núm. 74, España, 28 de marzo de 2006.

DE CASTRO, S. and DE BRITO, J. (2013). Evaluation of the durability of concrete made with crushed glass aggregates. *Journal of Cleaner Production*, 41, 7–14. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.09.021>.

DECRETO 1/2009 (2009). *Decreto Legislativo 1/2009, de 21 de julio, por el que se aprueba el Texto refundido de la Ley reguladora de los residuos*. DOGC, núm. 5430, Comunidad Autónoma de Cataluña, 28 de julio de 2009.

DECRETO LEGISLATIVO 3/2013 (2013). *Decreto Legislativo 3/2003, de 4 de noviembre, por el que se aprueba el Texto refundido de la legislación en materia de aguas de Cataluña*. DOGC núm. 4015, Comunidad Autónoma de Cataluña, 21 de Noviembre de 2003.

DHIR, R. *et al.* (2004). Towards maximizing the value and sustainable use of glass. *Concrete*, 38(1), 38–40.

DIN 4226-100:2002 (2002). *Aggregates for concrete and mortar - Part 100: Recycled aggregates*. German legislation, Germany, February 2002.

DIRECTIVA 99/31/EC DEL CONSEJO de 26 de abril (1999). Directiva relativa al vertido de los residuos. *Diario oficial de las Comunidades Europeas* L 182 (1), 16 de julio de 1999. p. 19.

DIRECTIVA 2008/98/CE (2008). Directiva Europea sobre los residuos. *Diario Oficial de la Unión Europea* L 312(3), 22 de noviembre de 2008. p.28.

DIXIT, M. *et al.* (2010). Identification of parameters for embodied energy measurement: A literature review. *Energy and Buildings*, 42(8), 1238–1247. DOI: 10.1016/j.enbuild.2010.02.016.

DOMBROWSKI, U. and ERNST, S. (2014). Effects of Climate Change on Factory Life Cycle. *Procedia {CIRP}*, 15, 337–342. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.procir.2014.06.012>.

DYLEWSKI, R. and ADAMCZYK, J. (2014). The comparison of thermal insulation types of plaster with cement plaster. *Journal of Cleaner Production*, 83, 256–262. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.07.042>.

EHE (2008). *Real Decreto 1247/2008, de 18 de julio, por el que se aprueba la instrucción de hormigón estructural* (EHE). Boletín Oficial del Estado, España, núm. 203, 22 de agosto de 2008.

ELIAS, X. (2000). *Reciclaje de residuos industriales: aplicación a la fabricación de materiales para la construcción*. Madrid, Editorial Díaz de Santos.

ESTRATEGIA EUROPEA (2020). *Una Europa que utilice eficazmente los recursos - Iniciativa emblemática con arreglo a la Estrategia Europa 2020*. Comunicación de la comisión al parlamento Europeo (ES). Bruselas. COM (2011) 21, 26 de enero de 2011, pp.1-19. Recuperado de: http://ec.europa.eu/resource-efficient-europe/pdf/resource-efficient_europe_es.pdf

ETXEBERRIA, M. (2011). *Utilización del hormigón con árido reciclado en la ciudad de Barcelona*. Proyecto I+D de hormigón fabricado con árido reciclado. Universidad Politécnic de Cataluña. Barcelona. España.

ETXEBERRIA, M. *et al.* (2007). Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete. *Cement and Concrete Research*, 37(5), 735–742. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.02.002>.

EUROSTAT (2012). *Waste statistics*. Statistics Explained [en línea] [Consulta: 13 August 2015]. Recuperado de: http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Waste_statistics.

EVANGELISTA, L. and DE BRITO, J. (2010). Durability performance of concrete made with fine recycled concrete aggregates. *Cement and Concrete Composites*, 32(1), 9–14. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2009.09.005>.

FERCD (2015). *Informe de producción y gestión de los residuos de construcción y demolición (RCD) en España, periodo 2009-2013*. 2015. Federación Española de Gestores de Residuos de Construcción y Demolición, España.

FÉRNANDEZ, S. (2010). *Reciclaje interno de los residuos en las fábricas. Reutilización del yeso reciclado para la fabricación de placas de yeso laminado*. Comunicación Técnica. CONAMA 10. Congreso Nacional del Medio Ambiente, España.

FERREIRA, T. (2013). *Betões com incorporação de agregados finos reciclados cerâmicos*. Trabajo Final de Máster. Técnico Lisboa, Portugal.

FERRÍS I TORTAJADA, J. *et al.* (2003). Autobuses escolares y motores diesel: contaminación atmosférica, exposición pediátrica y efectos adversos en la salud humana. *Revista Española de Pediatría*, 59, 132–145.

FUEYO, L. (2012). *Mejoras tecnológicas en el reciclado de residuos de construcción y demolición (RCD)*. Tesis Doctoral. Departamento de Ingeniería de Materiales. Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, España.

GALLEGRO, A. (2008). *Diferenciación espacial en la metodología del Análisis del Ciclo de Vida: desarrollo de factores regionales, para eutrofización acuática y terrestre*. Tesis Doctoral. Grupo de ingeniería ambiental y bio procesos. Universidad Santiago de Compostela, Galicia, España.

GARCÍA, M. S. (2009). *Métodos para la comparación de alternativas mediante un Sistema de Ayuda a la Decisión (S.A.D.) y “Soft Computing”* Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Cartagena. Departamento de Electrónica, Tecnología de Computadoras y Proyectos, Murcia, España.

GARCÍA, L. A. (2004). *Aplicación del análisis multicriterio en la evaluación de impactos ambientales*. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Cataluña. Departamento de Proyectos de Ingeniería, Barcelona, España.

GARCÍA, L. (2008). *Análisis de Ciclo de Vida en la aplicación intensiva de energías renovables en el ciclo de agua*. Proyecto Final de Carrera. Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España.

GARCÍA, J. (2011). *Análisis de viabilidad económica- financiera de una planta de cemento*. Proyecto Final de Carrera. Universidad Pontificia Comillas, Madrid, España.

GARRAÍN, D. *et al.* (2009). *Nuevos retos en el Análisis del Ciclo de Vida de baldosas cerámicas: desarrollo de las categorías de impacto de uso de suelo, agotamiento de recursos abióticos y toxicidad humana* [en línea]. Asociación Española de Dirección e Ingeniería de Proyectos (AEIPRO). [Consulta: 7 de septiembre de 2014]. Recuperado de: <http://repositori.uji.es/xmlui/handle/10234/82629>.

GASTALDI, D. *et al.* (2015). An investigation on the recycling of hydrated cement from concrete demolition waste. *Cement and Concrete Composites*, 61, 29–35. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2015.04.010>.

GAYARRE, F. *et al.* (2014). The effect of curing conditions on the compressive strength of recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 53, 260–266. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.11.112>.

GERALDES, V. (2013). *Estudio de hormigones reciclados no estructurales fabricados con árido reciclado mixto: propiedades mecánicas y expansión debida al contenido de sulfatos*. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid. E.T.S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Madrid, España.

GIAMA, E. and PAPADOPOULOS, A. (2015). Assessment tools for the environmental evaluation of concrete, plaster and brick elements production. *Journal of Cleaner Production*, 99, 75–85. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.03.006>.

GODINHO-CASTRO, A. *et al.* (2012). Incorporation of gypsum waste in ceramic block production: Proposal for a minimal battery of tests to evaluate technical and environmental viability of this recycling process. *Waste Management*, 32(1), 153–157. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2011.08.019>.

GÓMEZ, M. *et al.* (2011). *Estudio de los tipos de residuos producidos en tipologías constructivas. Determinación y cotejo*. II Congreso Internacional de Cambios Climáticos de la VIII Convención Internacional sobre Medio Ambiente y Desarrollo. Congreso realizado en La Habana, Cuba, del 4 al 8 de julio de 2011.

GONZÁLEZ, E. (2012). *Nueva técnica de dosificación de hormigones reciclados: método del volumen de mortero equivalente*. Tesis Final de Máster. Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona, España.

GONZÁLEZ, M. and GARCÍA, J. (2006). Assessment of the decrease of CO₂ emissions in the construction field through the selection of materials: Practical case study of three houses of low environmental impact. *Building and Environment*, 41(7), 902–909. DOI: [10.1016/j.buildenv.2005.04.006](http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.04.006).

GONZÁLEZ-COROMINAS, A. and ETXEBERRIA, M. (2014). Properties of high performance concrete made with recycled fine ceramic and coarse mixed aggregates. *Construction and Building Materials*, 68, 618–626. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.07.016>.

GREMI D'ÀRIDS DE CATALUNYA (2011). *Guia de Millora en la Gestió Energètica a les pedreres i graveres de Catalunya*. Cataluña, España.

GREMI D'ÀRIDS DE CATALUNYA (2015). *Extracció i tractament d'àrids al territori català* [en línea] [Consulta: 11 de Julio de 2015]. Recuperado de: <http://www.gremiarids.com/ca/que-es-el-gremi.html>.

GRI (2015). *Gypsum Recycling*. Gypsum Recycling International (GRI) [en línea] [Consulta: 15 de Agosto de 2015]. Recuperado de: http://www.gypsumrecycling.biz/15841-1_GypsumRecycling.

GÜERECA, L. (2006). *Desarrollo de una metodología para la valoración en el análisis del ciclo de vida aplicada a la gestión integral de residuos municipales*. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España.

GUILLÉN, J. (2005). *Nuevas aplicaciones de recursos yesíferos: desarrollo, caracterización y reciclado*. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid. Madrid, España.

HIDALGO, D. (2013). *Obtención de adoquines fabricados con vidrio reciclado como agregado*. Proyecto Final de Carrera. Escuela Politécnica Nacional. Quito, Ecuador.

HUANG, X. *et al.* (2015). Mineral phases and metals in baghouse dust from secondary aluminum production. *Chemosphere*, 134, 25–30. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.chemosphere.2015.03.033>.

HUBERMAN, N. and PEARLMUTTER, D. (2008). A life-cycle energy analysis of building materials in the Negev desert. *Energy and Buildings*, 40(5), p. 837–848. DOI: 10.1016/j.enbuild.2007.06.002.

ICPA (2015). *Diseño racional de mezclas de hormigón – método ICPA*. Instituto del Cemento Pórtland Argentino [Consulta: 23 de Julio de 2015]. Recuperado de: www.icpa.org.ar/publico/files/DOSIFICACION_DE_HORMIGONES.pdf.

IDIR, R. *et al.* (2011). Pozzolanic properties of fine and coarse color-mixed glass cullet. *Cement and Concrete Composites*, 33(1), 19–29. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2010.09.013>.

IHOBE (2011). *Uso de áridos reciclados mixtos procedentes de residuos de construcción y demolición*. Investigación prenormativa. Sociedad Pública de Gestión Ambiental. Gobierno Vasco. País Vasco, España. Recuperado de: <http://www.ihobe.eus/Publicaciones/Ficha.aspx?IdMenu=750e07f4-11a4-40da-840c-0590b91bc032&Cod=c6daed49-d51e-460f-bffa-b2f5f149c842&Idioma=es-ES>

INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA (2013). *Encuesta sobre generación de residuos en servicios y construcción*. Notas de prensa [en línea] [Consulta: 7 de octubre de 2015]. Recuperado de: <http://www.ine.es/prensa/np801.pdf>.

IOANNOU, S. *et al.* (2015). Performance characteristics of concrete based on a ternary calcium sulfoaluminate–anhydrite–fly ash cement. *Cement and Concrete Composites*, 55, 196–204. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2014.08.009>. Recuperado de: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0958946514001693>.

ISO 14044 (2006). Norma Europea UNE EN ISO 14040:2006, *Environmental management. Life cycle assessment. Principles and framework*.

JAHAN, A. *et al.* (2011). A comprehensive {VIKOR} method for material selection. *Materials & Design*, 32 (3), 1215–1221. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2010.10.015>.

JANI, Y. and HOGGLAND, W. (2014). Waste glass in the production of cement and concrete – A review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2(3), 1767–1775. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jece.2014.03.016>.

JIANG, X. *et al.* (2015). Case study of polychlorinated naphthalene emissions and factors influencing emission variations in secondary aluminum production. *Journal of Hazardous Materials*, 286, 545–552. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2015.01.009>.

JIMÉNEZ F., C. *et al.* (2015). {LCA} of recycled and conventional concretes designed using the Equivalent Mortar Volume and classic methods. *Construction and Building Materials*, 84, 245–252. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.03.051>.

JIMÉNEZ R., A. (2015). *Resumen del inventario de prácticas actuales relacionadas con el reciclaje de productos de yeso en Europa*. II Jornada sobre Innovación en el sector del Yeso. Escuela Técnica Superior de Edificación. Universidad Politécnica de Madrid. Jornada llevada a cabo en Madrid, 17 de abril de 2015, España.

JOLLIET, O. *et al.* (2014). Global guidance on environmental life cycle impact assessment indicators: findings of the scoping phase. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 19, (4), 962–967.

JOLLIET, O. *et al.* (2003). IMPACT 2002+: A new life cycle impact assessment methodology. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 8 (6), 324–330.

JUÁREZ, C., *et al.* (2008). *Análisis de ciclo de vida del sistema de gestión de residuos municipales de la ciudad de México*. I Simposio Iberoamericano en Ingeniería de Residuos. Simposio llevado a cabo en Castellón, España, Julio 23-24.

KACIMI, L. *et al.* (2006). Reduction of clinkerization temperature by using phosphogypsum. *Journal of Hazardous Materials*, 137(1), 129–137. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2005.12.053>.

KRISHNARAJ, R. (2015). Contemporary and futuristic views of pollution control devices in foundries. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 120, 130–135. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoenv.2015.05.045>.

KULKARNI, P. *et al.* (2011). Tropospheric ozone variability over the Iberian Peninsula. *Atmospheric Environment*, 45(1), 174–182. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosenv.2010.09.029>.

KWON, E. *et al.* (2015). A study on development of recycled cement made from waste cementitious powder. In: *Construction and Building Materials*, 83, 174–180. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.02.086>.

LASVAUX, S. *et al.* (2014). Influence of simplification of life cycle inventories on the accuracy of impact assessment: application to construction products. *Journal of Cleaner Production*, 79, 142–151. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.06.003>.

LEY 1/2014 (2014), de 27 de enero, de presupuestos de la Generalidad de Cataluña para 2014. DOGC, Comunidad Autónoma de Cataluña, núm. 6551, 30 de Enero de 2014.

LEY 2/2014 (2014), de 27 de enero, de medidas fiscales, administrativas, financieras y del sector público. DOGC, núm. 6551, Comunidad Autónoma de Cataluña, 30 de Enero de 2014.

LEY 22/2011 (2011), de 28 de julio, de residuos y suelos contaminados. Boletín Oficial del Estado, núm. 181, España, 29 de julio de 2011.

LEY 3/2015 (2015), de 11 de marzo, de medidas fiscales, financieras y administrativas. DOGC, núm. 6830, Comunidad Autónoma de Cataluña, 13 de marzo de 2015.

LI, C. *et al.* (2014). The life cycle inventory study of cement manufacture in China. *Journal of Cleaner Production*, 72, 204–211. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.02.048>.

LI, X. *et al.* (2010). An LCA-based environmental impact assessment model for construction processes. *Building and Environment*, 45(3), 766–775. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2009.08.010>.

LIFE CLAYGLASS (2013). Proyecto LIFE CLAYGLASS-LIFE 12/ENV/ES/000156. *Adaptation to climate change by the structural ceramics industry through the use of recycled glass as pastry (2013-2016)*. Comisión Europea.

LIFE GYPSUM (2011). Proyecto LIFE11ENV/BE/001039C2CGYPSUM. 2011. *From cradle to cradle: a circular economy for the European Gypsum Industry with the Demolition and recycling industry* (2013-2016). Comisión Europea.

LIMBACHIYA, M. *et al.* (2012). Use of recycled concrete aggregate in fly-ash concrete. *Construction and Building Materials*, 27(1), 439–449. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.07.023>.

LIU, H. *et al.* (2013). Assessment of health-care waste disposal methods using a VIKOR-based fuzzy multi-criteria decision making method. *Waste Management*, 33(12), 2744–2751. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2013.08.006>.

LÓPEZ, F. (2008). *Influencia de la variación de los parámetros de dosificación y fabricación de hormigón reciclado estructural sobre sus propiedades físicas y mecánicas*. Tesis Doctoral. Universidad de Oviedo. Departamento de Construcción e Ingeniería de Fabricación.

LÓPEZ, E. (2007). Fabricación de pasta de celulosa. Aspectos técnicos y contaminación ambiental. *Revista Ciencia y Tecnología*, 6, 1-8.

MA, S. *et al.* (2015). Study on the hydration and microstructure of Portland cement containing diethanol-isopropanolamine. *Cement and Concrete Research*, 67, 122–130. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2014.09.002>.

MALEŠEV, M. *et al.* (2010). Recycled Concrete as Aggregate for Structural Concrete Production. *Sustainability*, 2 (5), 1204-1225. DOI 10.3390/su2051204.

MARINKOVIĆ, S. *et al.* (2010). Comparative environmental assessment of natural and recycled aggregate concrete. *Waste Management*, 30(11), 2255–2264. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2010.04.012>.

MATIAS, D. *et al.* (2013). Mechanical properties of concrete produced with recycled coarse aggregates – Influence of the use of superplasticizers. *Construction and Building Materials*, 44, 101-109. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.03.011>.

MATOS, A. and SOUSA-COUTINHO, J. (2012). Durability of mortar using waste glass powder as cement replacement. *Construction and Building Materials*, 36, 205–215. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.04.027>.

MEDINA, C. (2012). Microstructure and properties of recycled concretes using ceramic sanitary ware industry waste as coarse aggregate. *Construction and Building Materials*, 31, 112–118. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.12.075>.

MEDINA, L. (2007). *Anàlisi de la viabilitat econòmica i de la sostenibilitat de l'ús d'armadures corrugades d'acer inoxidable en elements de formigó armat sotmesos a classes generals d'exposició agressives. Aplicació als elements en contacte amb aigües residuals agressives*. Tesis de Final de Máster. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Barcelona. Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España.

MEJIA, E. *et al.* (2015). Residuos de la construcción: una opción para la recuperación de suelos. *Revista EIA*, 12(2), 1-7.

- MELIÀ, P. *et al.* (2014). Environmental impacts of natural and conventional building materials: a case study on earth plasters. *Journal of Cleaner Production*, 80, 179–186. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.05.073>.
- MERCANTE, I. *et al.* (2010). *Perfil ambiental de la gestión de los residuos de construcción y demolición. Elaboración de los inventarios de ciclo de vida*. 3er Simposio Iberoamericano de Ingeniería de Residuos. Simposio llevado a cabo en Brasil, septiembre de 8-10.
- METSO (2012). Plantas de trituración Lokotrack Serie LT para canteras y minas. *Documento Técnico. Plantas trituradoras móviles*. [Consulta: 27 de Junio de 2014]. Recuperado de: <http://www.metsominerals.com>.
- MINISTERIO DE AGRICULTURA ALIMENTACIÓN Y MEDIO AMBIENTE (2013). *Programa Estatal de Prevención de Residuos 2014-2020*, Secretaría de Estado de Medio Ambiente, Madrid, España.
- MINISTERIO DE FOMENTO (2015). *Índice de variación mensual de los precios medios* [en línea] [Consulta: 25 de junio de 2015]. Recuperado de: http://www.fomento.gob.es/MFOM/LANG_CASTELLANO/DIRECCIONES_GENERALES/TRANSPORTE_TERRESTRE560/SERVICIOS_TRANSPORTISTA/inc_gasoleo_mensual.htm.
- MINISTERIO DE INDUSTRIA ENERGÍA Y TURISMO (2015). *Estadística minera de España 2013*. [en línea] [Consulta: 4 de septiembre de 2015]. Recuperado de: [http://www.minetur.gob.es/energia/mineria/Estadistica/Datos anuales/anual 2013.pdf](http://www.minetur.gob.es/energia/mineria/Estadistica/Datos%20anuales/anual%202013.pdf).
- MONAHAN, J. and POWELL, J. (2011). An embodied carbon and energy analysis of modern methods of construction in housing: A case study using a lifecycle assessment framework. *Energy and Buildings*, 43(1), 179–188. DOI: 10.1016/j.enbuild.2010.09.005.
- MORALES, L. (2010). *Reutilización de residuos de edificación para el desarrollo de materiales cementantes con características especiales*. Tesis Final de Máster. Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España.
- MORANDEAU, A. *et al.* (2015). Impact of accelerated carbonation on {OPC} cement paste blended with fly ash. *Cement and Concrete Research*, 67, 226–236. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2014.10.003>.
- OFICEMEN (2014). Asociación española de cemento. *Reporte anual del sector del cemento español. Producción de cemento anual* [en línea][Consulta: 6 de diciembre de 2014]. Recuperado de: https://www.oficemen.com/default.asp?id_cat=10.
- OLIVEIRA, M. *et al.* (2004). *Study on compressed stress, water absorption and modulus of elasticity of produced concrete made by recycled aggregate*. Proceedings pro040: International RILEM Conference on the Use of Recycled Materials in Buildings and Structures, Barcelona, España.
- OLIVEIRA, R. *et al.* (2013). Incorporation of fine glass aggregates in renderings. *Construction and Building Materials*, 44, 329–341. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.03.042>.
- OPRICOVIC, S. (1998). *Multicriteria Optimization of Civil Engineering Systems*. University of Belgrade, Faculty of Civil Engineering, Belgrade, Serbia.

ORBEGOZO, C. (2010). *Buenas prácticas en economía, marketing y ética de las energías renovables*. Guía del emprendedor. GREEN ENERGY Consultoría y servicios SRL. Perú, pp.1- 48.

ORTIZ, O. *et al.* (2009). Sustainability in the construction industry: A review of recent developments based on LCA. *Construction and Building Materials*, 23(1), 28–39. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2007.11.012.

ORTIZ, O. *et al.* (2010a). Environmental performance of construction waste: Comparing three scenarios from a case study in Catalonia, Spain. *Waste Management*, 30(4), 646–654. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2009.11.013>.

ORTIZ, O. *et al.* (2010b). The environmental impact of the construction phase: An application to composite walls from a life cycle perspective. *Resources, Conservation and Recycling*, 54(11), 832–840. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2010.01.002>.

PACHECO-TORGAL, F. (2014). Eco-efficient construction and building materials research under the {EU} Framework Programme Horizon 2020. *Construction and Building Materials*, 51, 151–162. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.10.058>.

PATI, R. *et al.* (2006). Economic analysis of paper recycling vis-à-vis wood as raw material. *Int. J. Production Economics*, 103, 489–508.

PARRA, J. L. *et al.* (2006). Aridos reciclados para hormigones y morteros. *Boletín geológico y minero*, 117(4), 763–772.

PNRCD (2008). *II Plan Nacional de Residuos de Construcción y Demolición*. Ministerio de Medio Ambiente, España.

POON, C. *et al.* (2004). Influence of moisture states of natural and recycled aggregates on the slump and compressive strength of concrete. *Cement and Concrete Research*, 34(1), 31–36. DOI [http://dx.doi.org/10.1016/S0008-8846\(03\)00186-8](http://dx.doi.org/10.1016/S0008-8846(03)00186-8).

POON, C. and CHAN, D. (2006). Paving blocks made with recycled concrete aggregate and crushed clay brick. *Construction and Building Materials*, 20(8), 569–577. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.01.044>.

POON, C. and CHAN, D. (2007). The use of recycled aggregate in concrete in Hong Kong. *Resources, Conservation and Recycling*, 50(3), 293–305. DOI: 10.1016/j.resconrec.2006.06.005. PRECAT20, 2013. *Programa general de prevención y gestión de residuos y recursos de Cataluña (2013-2020)*. 2013. S.I. : s.n.

PROIN (2015). *Resumen de las nuevas aplicaciones y funcionalidades que PROIN ha desarrollado para el cumplimiento de la instrucción de hormigón estructural EHE-08*. Procedimientos integrados S.L. [en línea] [Consulta: 24 de julio de 2015]. Recuperado de: www.proin.es/pdf/novedades_proin.pdf.

PROYECTO IRCOW (2011). *Innovative Strategies for High-Grade Material Recovery from Construction and Demolition Waste*. FP7-ENV-2010. Fundación Tecnalia Research & Innovation. Recuperado de: <http://www.ircow.eu/Ircow.aspx?artid=4>. European Commission.

QUIJANO, R. (2012). *Diseño e implementación de una plataforma integrada de modelación para la planificación energética sostenible –modergis– “estudio de caso Colombia.”* Tesis Doctoral. Facultad de Minas. Universidad Nacional de Colombia, Colombia.

RAGAB, N. (2014). *Recycling of waste gypsum boards to produce new drywalls and non-load bearing bricks*. Master Thesis. The American University in Cairo. School of Sciences and Engineering, Egypt.

RAHAL, K. (2007). Mechanical properties of concrete with recycled coarse aggregate. *Building and Environment*, 42(1), 407–415. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.07.033>.

RALUY, R. (2009). *Evaluación ambiental de la integración de procesos de producción de agua con sistemas de producción de energía*. Tesis Doctoral. Universidad de Zaragoza. Zaragoza, España.

RAMESH, T. *et al.* (2010). Life cycle energy analysis of buildings: An overview. *Energy and Buildings*, 42(10), 1592–1600. DOI: 10.1016/j.enbuild.2010.05.007.

RANKIN, J. (2012). *Energy Use in Metal Production*. High Temperature Processing Symposium. Swinburne University of Technology, 6 - 7 February 2012, Melbourne, Australia.

RAO, A. *et al.* (2007). Use of aggregates from recycled construction and demolition waste in concrete. *Resources, Conservation and Recycling*, 50(1), 71–81. DOI: 10.1016/j.resconrec.2006.05.010.

RASHAD, A. (2014). Recycled waste glass as fine aggregate replacement in cementitious materials based on Portland cement. *Construction and Building Materials*, 72, 340–357. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.08.092>.

REAL DECRETO 105/2008 (2008), *de 1 de febrero, por el que se regula la producción y gestión de los residuos de construcción y demolición*. Boletín Oficial del Estado, núm. 38, España, 13 de febrero de 2008.

REGLAMENTO (UE) No 1291/2013 (2013) DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO *de 11 de diciembre de 2013, por el que se establece Horizonte 2020, Programa Marco de Investigación e Innovación (2014-2010)*. Diario Oficial de la Unión Europea, L347 (104), 20 de diciembre de 2013.

RINCÓN, L. *et al.* (2014). Environmental performance of recycled rubber as drainage layer in extensive green roofs. A comparative Life Cycle Assessment. *Building and Environment*, 74, 22–30. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.01.001>.

ROSSI, B. *et al.* (2012). Life-cycle assessment of residential buildings in three different European locations, case study. *Building and Environment*, 51, 402–407. DOI: 10.1016/j.buildenv.2011.11.002.

ROY, P. (2014). Characterization factors for terrestrial acidification at the global scale: A systematic analysis of spatial variability and uncertainty. *Science of The Total Environment*, 500–501, 270–276. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.08.099>.

RUBIO, Á. (2012). *Proyecto de optimización del proceso de producción en una planta de tratamiento de áridos*. Proyecto Final de Carrera. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas. Universidad Politécnica de Madrid. Madrid, España.

RUEDA, A. (2011). *Tipología de áridos reciclados en Cataluña y su aplicabilidad*. Tesis Final de Máster. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Barcelona. Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España.

SAKTHIVEL, G. *et al.* (2015). A hybrid multi-criteria decision modeling approach for the best biodiesel blend selection based on ANP-TOPSIS analysis. *Ain Shams Engineering Journal*, 6(1), 239–256. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.asej.2014.08.003>.

SÁNCHEZ DE JUAN, M. (2011). *Áridos reciclados para aplicaciones de hormigón no estructural*. Laboratorio Central de Estructuras y Materiales (CEDEX). I Semana de la Edificación. Colegio Oficial de Aparejadores, Arquitectos Técnicos e Ingenieros de Edificación de Madrid. Madrid, Marzo 2011.

SÁNCHEZ DE JUAN, M. (2004). *Estudio sobre la utilización de árido reciclado para la fabricación de Hormigón Estructural*. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid. Madrid, España.

SÁNCHEZ DE JUAN, M. *et al.* (2011). *Uso de áridos reciclados mixtos procedentes de Residuos de Construcción y Demolición*. IHOBE, Sociedad Pública de Gestión Ambiental. Departamento de Medio Ambiente, Planificación Territorial, Agricultura y Pesca. Gobierno Vasco, España.

SÁNCHEZ DE JUAN, M. and GUTIÉRREZ, P. (2004). Influence of recycled aggregate quality on concrete properties. *Proceeding of the International RILEM Conference on the Use of Recycled Materials in Building and Structures*, pp. 545–553. Conferencia llevada a cabo en Barcelona, España, 8-11 de noviembre.

SCHMIDT, J. *et al.* (2007). Life cycle assessment of the waste hierarchy – A Danish case study on waste paper. *Waste Management*, 27(11), 1519–1530. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2006.09.004>.

SCHWAB, O. *et al.* (2014). Beyond the material grave: Life Cycle Impact Assessment of leaching from secondary materials in road and earth constructions. *Waste Management*, 34(10), 1884–1896. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2014.04.022>.

SEGATTO, F. (2007). *Sistemas logísticos reversos na indústria da construção civil – estudo da cadeia produtiva de chapas de gesso acartonado*. Dissertação de Mestrado. Engenharia de Construção Civil e Urbana. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Brasil.

SHAO, Y. *et al.* (2000). Studies on concrete containing ground waste glass. *Cement and Concrete Research*, 30(1), 91–100. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0008-8846\(99\)00213-6](http://dx.doi.org/10.1016/S0008-8846(99)00213-6).

SHAYAN, A. and Xu, A. (2006). Performance of powder as pozzolnsnci materials in concrete: A filed trail on concrete slabs. *Cement and Concrete Research*, 36(3), 457–68.

SHI, C. *et al* (2004). Alkali-aggregate reaction of concrete containing ground glass powder. *Proceedings of the 12th International Conference on AAR in Concrete*, pp. 789–795. Recuperado de: <http://210.28.203.115/myEditor/uploadfile/20140716113916178.pdf>

SHI, C. and ZHENG, K. (2007). A review on the use of waste glasses in the production of cement and concrete. *Resources, Conservation and Recycling*, 52 (2), 234–247. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2007.01.013>.

SHIH, H. *et al.* (2007). An extension of {TOPSIS} for group decision making. *Mathematical and Computer Modelling*, 45 (7–8), 801–813. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.mcm.2006.03.023>.

SIM, J. and PARK, C. (2011). Compressive strength and resistance to chloride ion penetration and carbonation of recycled aggregate concrete with varying amount of fly ash and fine recycled aggregate. *Waste Management*, 31(11), 2352–2360 DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2011.06.014>.

SIMAPRO 7 (2008). *Database Manual. Methods library*. Pré consultants, The Netherlands.

- SODSAI, P. and RACHDAWONG, P. (2012). The current situation on CO₂ emissions from the steel industry in Thailand and mitigation options. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 6, 48–55. DOI 10.1016/j.ijggc.2011.11.018.
- SOUTSOS, M. *et al.* (2011). Concrete building blocks made with recycled demolition aggregate. *Composite Materials and Adhesive Bonding Technology*, 25(2), 726–735. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2010.07.014.
- SOUTSOS, M. *et al.* (2012). The use of recycled demolition aggregate in precast concrete products – Phase III: Concrete pavement flags. *Construction and Building Materials*, 36, 674–680. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.06.045>.
- SUGANTHI, L. *et al.* (2015). Applications of fuzzy logic in renewable energy systems – A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 48, 585–607. Doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2015.04.037>.
- TALLERES ALQUÉZAR S.A. (2014). *Plantas móviles de trituración*. [en línea] [Consulta: 15 de agosto de 2014]. Recuperado de: <http://www.talleresalquezar.es/ES/categoria/plantas-moviles-de-trituracion/47>.
- TAM, V. (2008). Economic comparison of concrete recycling: A case study approach. *Resources, Conservation and Recycling*, 52(5), 821–828. DOI: 10.1016/j.resconrec.2007.12.001.
- TAM, V. (2009). Comparing the implementation of concrete recycling in the Australian and Japanese construction industries. *Present and Anticipated Demands for Natural Resources: Scientific, Technological, Political, Economic and Ethical Approaches for Sustainable Management*, 17(7), 688–702. DOI: 10.1016/j.jclepro.2008.11.015.
- TAM, V. *et al.* (2005). Microstructural analysis of recycled aggregate concrete produced from two-stage mixing approach. *Cement and Concrete Research*, 35(6), 1195–1203. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.10.025>.
- TAM, V. and TAM, C. (2006a). A review on the viable technology for construction waste recycling. *Resources, Conservation and Recycling*, 47(3), 209–221. DOI: 10.1016/j.resconrec.2005.12.002.
- TAM, V. and TAM, C. (2006b). Evaluations of existing waste recycling methods: A Hong Kong study. *Building and Environment*, 41(12), 1649–1660 DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.06.017>.
- TAN, K. and DU, H. (2013). Use of waste glass as sand in mortar: Part I – Fresh, mechanical and durability properties. *Cement and Concrete Composites*, 35(1), 109–117 DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2012.08.028>.
- TOSCANO, E. (2008). *Gestión de la ciencia y tecnología para el reciclado de los desechos sólidos en la construcción*. Tesis Final de Máster. Centro de Trabajo: EMPROY Villa Clara, Cuba.
- TOŠIĆ, N. *et al.* (2015). Multicriteria optimization of natural and recycled aggregate concrete for structural use. *Journal of Cleaner Production*, 87, 766–776 DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.10.070>.
- TRUELOVE, H. and PARKS, C. (2012). Perceptions of behaviors that cause and mitigate global warming and intentions to perform these behaviors. *Journal of Environmental Psychology*, 32(3), 246–259. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvpp.2012.04.002>.

TURK, J. *et al.* (2015). Environmental evaluation of green concretes versus conventional concrete by means of {LCA}. *Waste Management*, 45, 194-205. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2015.06.035>.

UMAÑA, M. (2011). *Sostenibilidad y ciclo de vida de los materiales*. Tesis Final de Máster. Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España.

UNE-EN 13279-1:2009 (2009). *Yesos de construcción y conglomerantes a base de yeso para la construcción. Parte 1: Definiciones y especificaciones*. AENOR.

UNE-EN 197-1:2011 (2011). *Cemento. Parte 1: Composición, especificaciones y criterios de conformidad de los cementos comunes*. AENOR.

UNE-EN ISO 14040:2006 (2006). *Gestión ambiental. Análisis de ciclo de vida. Principios y marco de referencia*. 2006. AENOR.

USÓN, A. *et al.* (2013). Uses of alternative fuels and raw materials in the cement industry as sustainable waste management options. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 23, 242–260. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2013.02.024>.

VASTO-TERRIENTES, L. *et al.* (2015). ELECTRE-III-H: An outranking-based decision aiding method for hierarchically structured criteria. *Expert Systems with Applications*, 42(11), 4910–4926. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.eswa.2015.02.016>.

VENKATANARAYANAN, H. and RANGARAJU, P. (2015). Effect of grinding of low-carbon rice husk ash on the microstructure and performance properties of blended cement concrete. *Cement and Concrete Composites*, 55, 348–363. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2014.09.021>.

VOSSBERG, C. *et al.* (2014). An energetic life cycle assessment of C&D waste and container glass recycling in Cape Town, South Africa. *Resources, Conservation and Recycling*, 88, 39–49. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2014.04.009>.

VUČIJAK, B. *et al.* (2013). Applicability of multicriteria decision aid to sustainable hydropower. *Applied Energy*, 101, 261–267. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.05.024>.

WAGIH, A. *et al.* (2013). Recycled construction and demolition concrete waste as aggregate for structural concrete. *{HBRC} Journal*, 9(3), 193–200. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.hbrcj.2013.08.007>.

WALLINGTON, T. *et al.* (2014). Atmospheric chemistry of short-chain haloolefins: Photochemical ozone creation potentials (POCPs), global warming potentials (GWPs), and ozone depletion potentials (ODPs). *Chemosphere*, 129, 135-141. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.chemosphere.2014.06.092>.

WILLIAMS, T. *et al.* (2010). A case study of the open-loop recycling of mixed plastic waste for use in a sports-field drainage system. *Resources, Conservation and Recycling*, 55(2), 118–128. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2010.08.002>.

WRAP (2008). *Trials for the use of recycled gypsum in cement manufacture*. Report demonstrating the potential to use recycled gypsum in the manufacture of cement partially or fully in place of natural gypsum. Project code: PBD022-001. United Kingdom.

XIAO, J. *et al.* (2012). Recent studies on mechanical properties of recycled aggregate concrete in China-A review. *Science China Technological Sciences*, 55(6), 1463–1480.

XIE, Z. and XI, Y. (2002). Use of recycled glass as a raw material in the manufacture of Portland cement. *Materials and Structures*, 35(8), 510–515.

YANG, K. *et al.* (2008). Influence of type and replacement level of recycled aggregates on concrete properties. *ACI Materials Journal*, 105(3), 289–296.

YÁÑEZ, E. (2008). Análisis de sensibilidad de la cogeneración utilizando biomasa en el análisis de ciclo de vida del biodiésel de aceite de palma. *Palmas*, 29 (4), 1-10.

YELLISHETTY, M. *et al.* (2011). Environmental life-cycle comparisons of steel production and recycling: sustainability issues, problems and prospects. *Environmental Science & Policy*, 14(6), 650-653. DOI: 10.1016/j.envsci.2011.04.008.

YEPES, V. (2013). *Localización y extracción de áridos. Producción de áridos*. Poliblogs. Universidad Politécnica de Valencia. [Consulta: 17 de Junio de 2013]. Recuperado de: <http://procedimientosconstruccion.blogs.upv.es>.

YUAN, F. *et al.* (2011). Emergy analysis of the recycling options for construction and demolition waste. *Waste Management*, 31(12), 2503–2511. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2011.07.001>.

YUAN, H. and SHEN, L. (2011). Trend of the research on construction and demolition waste management. *Waste Management*, 31(4), 670–679 DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2010.10.030>.

ZABALZA, I. *et al.* (2011). Life cycle assessment of building materials: Comparative analysis of energy and environmental impacts and evaluation of the eco-efficiency improvement potential. *Building and Environment*, 46(5), 1133–1140. DOI: 10.1016/j.buildenv.2010.12.002.

ZABALZA, I. (2012). *Desarrollo de una base de datos y una herramienta de ACV de edificios adaptada a la región sudoeste de Europa*. Comunicación Técnica. Congreso Nacional del Medio Ambiente, Madrid, España.

ZAZURCA, S. (2012). *Estudio medioambiental de una vivienda unifamiliar en Barcelona*. Proyecto Final de Carrera. Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona, España.

10 Anexos

Anexo A. Lista de las empresas consultadas

Empresas fabricación	Localidad	Material	Actividad	Medio de contacto	Última Fecha de contacto
PROMSA (PROMSA GREEN)	Sant Vicenç del Horts (Barcelona)	Árido natural	Extracción árido natural	Correo electrónico	10/10/2013
ARENES I GRAVES CASTELLOT S.A	Barcelona	Árido natural	Extracción de árido natural	Correo electrónico	07/10/2013
CANTERAS Y ÁRIDOS LLAURI S.L	Valencia	Árido natural	Extracción de árido natural	Entrevista telefónica	27/06/2013
ÁRIDOS CARASOLES S.L.U	Valencia	Árido natural	Extracción de árido natural	Correo electrónico	29/05/2013
EXTRACCIONES Y RESTAURACIONES CASINOS	Valencia	Árido natural	Extracción de árido natural	Correo electrónico	10/09/2013
VICAR S.A	Valencia	Arcilla	Elaboración de pastas cerámicas	Correo electrónico	03/09/2015
PASTAS Y BARBOTINAS CERÁMICAS S.A	Valencia	Arcilla	Elaboración de pastas cerámicas	Entrevista telefónica	03/09/2015
ÁRIDOS Y HORMIGONES GRACIA S.L	Teruel (Aragón)	Hormigón	Fabricación de hormigón	Entrevista telefónica	11/02/2013
CEMEX	Sant Feliu de Llobregat (Barcelona)	Hormigón	Fabricación de hormigón	Correo electrónico	16/05/2013
SULFATO LA RIBERA	Navarra (España)	Yeso	Fabricación de yeso	Correo electrónico	14/03/2013
ALGÍSS – URALITA	Girona	Yeso	Fabricación de yeso	Correo electrónico	03/04/2013
YESOS MILLAN	Murcia	Yeso	Cocción de yeso en el horno	Correo electrónico	08/04/2013
CEMENTO PÓRTLAND VALDERRIVAS	España	Cemento	Fabricación de cemento	Declaración medioambiental (página web de la empresa)	2013
CEMEX	Tarragona	Cemento	Fabricación de cemento	Correo electrónico	16/05/2013
CEMENT MOLINS	Sant Vicenç del Horts (Barcelona)	Cemento	Fabricación de cemento	Entrevista telefónica	15/07/2015

Anexo B. Lista de las empresas de reciclaje consultadas

Empresas/plantas de reciclaje	Localidad	Residuo	Actividad	Medio de contacto	Última fecha de contacto
CEMEX	España	Hormigón	Hormigón reciclado. Producción de árido reciclado de hormigón	Correo electrónico	16/05/2013
RECINOR S.L	La Coruña	RCD	Reciclaje de RCD. Producción de árido reciclado	Entrevista telefónica	09/07/2013
GERMANS CAÑET- XIRGU	Gironès	RCD	Reciclaje de RCD. Producción de árido reciclado	Correo electrónico	26/05/2013
SAN GREGORIO CONSTRUCCIÓN	Zamora (Castilla y León)	RCD	Reciclaje de RCD. Producción de árido reciclado	Entrevista telefónica	09/07/2013
PLANTA DE RECICLAJE DEL PUERTO DE BARCELONA	Barcelona	RCD	Reciclaje de RCD. Producción de árido reciclado	Visita a la planta	21/05/2014; 15/06/2015
PLANTA DE RECICLAJE LES FRANQUESES DEL VALLÉS	Barcelona	RCD	Reciclaje de RCD. Producción de árido reciclado	Visita a la planta	22/05/2014
TOMRA SORTING GMGH	Gerona	RCD	Empresa de equipos de separación óptica de RCD	Correo electrónico	11/11/2013
KNAUF	Sucursal en España: Lérida y Granada.	Yeso	Fabricación de placa de yeso laminado. Reciclaje del yeso.	Correo electrónico	18/11/2013
YESOS IBÉRICOS PLADUR URALITA	Madrid	Yeso	Fabricación de placa de yeso laminado. Reciclaje del yeso.	Correo electrónico	17/12/2012
UNESID	Madrid	Acero	Reciclaje del acero	Entrevista telefónica y correo electrónico	04/08/2015
CELSA GROUP	Castellbisbal (Barcelona)	Acero	Reciclaje de acero (98 % chatarra de acero).	Correo electrónico	25/01/2013
ARCELOR MITTAL	Zaragoza	Acero	Reciclaje de acero	Correo electrónico	29/05/2013
RECYCLING HISPANIA	Madrid	Vidrio	Reciclaje del vidrio	Correo electrónico	03/04/2013
REVIBASA S.A	Barcelona	Vidrio plano	Reciclaje de vidrio plano	Correo electrónico	09/01/2013
HISPALYT	Madrid (España)	Vidrio plano	Producción de vidrio plano a partir de residuos de vidrio	Correo electrónico	04/11/2013
CAMACHO RECYCLING	Albacete	Vidrio	Reciclaje del vidrio	Entrevista telefónica y correo electrónico	04/09/2015
GONZALO MATEO S.L	Zaragoza	Vidrio	Reciclaje del vidrio	Entrevista telefónica	21/01/2013
GRUPO DAORJE	Asturias	Vidrio	Reciclaje del vidrio	Correo electrónico	1/09/2015
ECOVIDRIO	Madrid	Vidrio	Reciclaje del vidrio	Correo electrónico	2/09/2015

Anexo C. Lista de organismos y asociaciones consultadas

Organismos y asociaciones	Localidad	Material	Actividad	Medio de contacto	Última Fecha de contacto
MINISTERIO DE INDUSTRIA, ENERGÍA Y TURISMO	España	Árido natural	Extracción de árido natural (grava y arenas)	Correo electrónico	07/10/2013
GREMI D'ÀRIDS DE CATALUNYA	Barcelona	Árido natural	Extracción de árido natural	Correo electrónico	30/09/2013
MINISTERIO DE INDUSTRIA, ENERGÍA Y TURISMO	España	Yeso	Extracción de yeso	Correo electrónico	07/10/2013
IHOBE (Sociedad pública de gestión ambiental del Gobierno Vasco)	País Vasco	Yeso	Reciclaje del yeso	Correo electrónico	07/10/2013
ATEDY (Asociación técnica y empresarial del Yeso)	Madrid	Yeso	Asociación de fabricantes de yeso, escayola y sus derivados en España	Correo electrónico	13/03/2015
INSTITUTO DE TECNOLOGÍA CERÁMICA	España	Cerámica	Cerámica	Correo electrónico	07/11/2013
SOCIEDAD ESPAÑOLA DE CERÁMICA Y VIDRIO	España	Cerámica y vidrio	Cerámica y vidrio	Correo electrónico	12/11/2013
GERD (Asociación española de gestores de residuos de construcción y demolición)	España	RCD	Reciclaje de RCD. Producción de árido reciclado	Entrevista telefónica	11/12/2013
ARC (Agència de Residus de Catalunya)	Barcelona	RCD	Gestión de residuos de construcción	Correo electrónico	02/05/2014
GESTORA DE RUNES DE LA CONSTRUCCIÓ, S.A	Barcelona	RCD	Gestión de residuos de construcción	Entrevista telefónica y visita	24/04/2014
AEDED (Asociación Española de Empresarios de Demolición)	España	RCD	Demolición	Correo electrónico	28/11/2013
CESPA S.A	Barcelona	Residuos	Gestión de residuos	Entrevista telefónica	23/05/2014
ANEFHOP (Asociación Nacional Española Fabricantes de Hormigón Preparado)	Barcelona	Hormigón preparado	Producción de hormigón preparado	Correo electrónico	10/08/2015

Anexo D. Emisiones al aire por km recorrido en camión de 3.5-7.5 t (Ecoinvent v2.2)

Emisiones	Unidad	Cantidad
Etano	2.29E-06	kg
Dióxido de carbono	3.00E-01	kg
Dióxido de sulfuro	9.45E-06	kg
Cadmio	1.48E-09	kg
Cobre	1.80E-06	kg
Cromo	2.76E-08	kg
Níquel	2.29E-08	kg
Zinc	7.03E-07	kg
Plomo	1.05E-07	kg
Selenio	9.45E-10	kg
Mercurio	1.89E-12	kg
Cromo VI	9.45E-12	kg
Monóxido de carbono	2.94E-05	kg
Óxidos de nitrógeno	8.96E-04	kg
Partículas <2.5 um	4.39E-05	kg
Partículas >10 um	5.66E-05	kg
Partículas >2.5 um y <10 um	6.23E-05	kg
Compuestos orgánicos volátiles, distintos del metano	4.25E-06	kg
Metano	2.29E-06	kg
Benceno	2.97E-12	kg
Tolueno	4.25E-13	kg
Xileno	3.74E-11	kg
Formaldehído	3.57E-10	kg
Acetaldehído	1.94E-10	kg
Amoniaco	5.00E-06	kg
Monóxido de di nitrógeno	2.97E-05	kg
PAH (hidrocarburos poli cíclicos aromáticos)	1.00E-09	kg
Calor residual	4.29E+00	MJ

Anexo E. Lista de valores S, R y Q calculados en la producción de yeso (di hidrato) (Método VIKOR)

Clasificaciones de los criterios	Alternativas	Qj	Alternativas	Sj	Alternativas	Rj
Igual importancia	A3	0.00	A3	0.00	A3	0.00
	A5	0.11	A5	0.08	A5	0.05
	A2	0.91	A2	0.81	A2	0.32
	A4	0.97	A4	0.89	A4	0.33
	A1	1.00	A1	0.95	A1	0.33
Ventaja medioambiental	A3	0.00	A3	0.00	A3	0.00
	A5	0.07	A5	0.07	A5	0.03
	A2	0.93	A2	0.87	A2	0.38
	A1	0.97	A4	0.94	A1	0.38
	A4	0.99	A1	0.95	A4	0.40
Ventaja económica	A3	0.00	A3	0.00	A3	0.00
	A5	0.12	A5	0.10	A5	0.07
	A2	0.68	A2	0.76	A2	0.28
	A4	0.80	A4	0.86	A4	0.36
	A1	1.00	A1	0.97	A1	0.50
A1: YN ; A2: YR(7km) dp ; A3: YR(7km) rp; A4: YR(50km) dp y A5: YR(50 km) rp						

Anexo F. Entradas del proceso de clínker A (1 kg)

Entradas			
Proceso básico	Nombre del proceso en Ecoinvent v2.2	Unidad	Cantidad
Agua	Water, unspecified natural origin/m ³	m ³	0.00162
Amonio	Ammonia, liquid, at regional storehouse/CH U	kg	9.08E-04
Aceite lubricante	Lubricating oil, at plant/RER U	kg	4.71E-05
Margas calcáreas	Calcareous marl, at plant/CH U	kg	4.66E-01
Arcilla	Clay, at mine/CH U	kg	3.31E-01
Caliza	Limestone, milled loose, at plant/CH U	kg	8.41E-01
Arena	Sand, at mine/CH U	kg	9.26E-03
Cal	Lime, hydrated loose, at plant/CH U	kg	3.92E-03
Refractarios básicos	Refractory, basic packed, at plant/DE U	kg	1.90E-04
Arcilla refractaria	Refractory, fireclay packed, at plant/DE U	kg	8.21E-05
Óxidos de aluminio	Refractory, high aluminium oxide packed, at plant/DE U	kg	1.37E-04
Infraestructura de la planta de cemento	Cement plant/CH U	p	6.27E-12
Diésel	Diesel, burned in building machine/GLO U	MJ	1.34E-02
Maquinaria	Industrial machine, heavy unspecified, at plant/RER U	kg	3.76E-05
Electricidad	Electricity, medium voltage, at grid/CH U	kWh	5.80E-02
Hulla	Hard coal, at regional storage/WEU U	kg	3.54E-02
Bauxita	Bauxite, at mine/GLO U	kg	1.20E-04
Acero al cromo	Chromium steel 18/8, at plant/RER U	kg	5.86E-05
Gas natural	Natural gas, high pressure, at consumer/CH U	MJ	6.81E-03
Fuelóleo pesado	Heavy fuel oil, at regional storage/ CH U	kg	2.55E-02
Fuelóleo ligero	Light fuel oil, at regional storage/ CH U	kg	3.74E-04
Coque de petróleo	Petroleum coke, at refinery/RER U	kg	3.91E-03
Transporte	Transport lorry 3.5 t-7.5 t EURO 5/ RER U	tkm	7.09E-05
Agua	Tap water, at user/RER U	kg	3.40E-01

Anexo G. Entradas del proceso de clínker B (1 kg)

Productos evitados			
Proceso básico	Nombre del proceso en Ecoinvent v2.2	Unidad	Cantidad
Arcilla	Clay, at mine/CH U	kg	1.80E-01
Entradas			
Proceso básico	Nombre del proceso en Ecoinvent v2.2	Unidad	Cantidad
Agua	Water, unspecified natural origin/m ³	m ³	0.00162
Amonio	Ammonia liquid, at regional storehouse/CH U	kg	9.08E-04
Aceite lubricante	Lubricating oil, at plant/RER U	kg	4.71E-05
Margas calcáreas	Calcareous marl, at plant/CH U	kg	4.66E-01
Arcilla	Clay, at mine/CH U	kg	1.60E-01
Caliza	Limestone, milled loose, at plant/CH U	kg	8.41E-01
Arena	Sand, at mine/CH U	kg	9.26E-03
Cal	Lime, hydrated loose, at plant/CH U	kg	3.92E-03
Refractarios básicos	Refractory, basic packed, at plant/ DE U	kg	1.90E-04
Arcilla refractaria	Refractory, fireclay packed, at plant/DE U	kg	8.21E-05
Óxidos de aluminio	Refractory, high aluminium oxide packed, at plant/DE U	kg	1.37E-04
Infraestructura de la planta de cemento	Cement plant/CH U	p	6.27E-12
Diésel	Diesel, burned in building machine/GLO U	MJ	1.34E-02
Maquinaria	Industrial machine, heavy unspecified, at plant/RER U	kg	3.76E-05
Electricidad	Electricity, medium voltage, at grid/CH U	kWh	5.30E-02
Hulla	Hard coal, at regional storage/WEU U	kg	3.54E-02
Bauxita	Bauxite, at mine/GLO U	kg	1.20E-04
Acero al cromo	Chromium steel 18/8, at plant/RER U	kg	5.86E-05
Gas natural	Natural gas, high pressure, at consumer/CH U	MJ	6.81E-03
Fuelóleo pesado	Heavy fuel oil, at regional storage/ CH U	kg	2.55E-02
Fuelóleo ligero	Light fuel oil, at regional storage/ CH U	kg	3.74E-04
Coque de petróleo	Petroleum coke, at refinery/RER U	kg	3.91E-03
Transporte	Transport lorry 3.5 t-7.5 t EURO 5/ RER U	tkm	7.09E-05
Agua	Tap water, at user/RER U	kg	3.40E-01
Vidrio reciclado	Glass cullet, sorted, at sorting plant/RER U	kg	1.80E-01

Anexo H. Entradas detalladas del hormigón estructural (1 m³) con 100 % árido natural

Entradas conocidas desde la tecnosfera				
Proceso básico	Nombre del proceso en Ecoinvent v2.2	Unidad	Cantidad	Fuente
Infraestructura de la planta de producción	Concrete mixing plant/CH/I U	P	4.57E-07	Ecoinvent v2.2
Diésel empleado en maquinaria	Diesel, burned in building machine/GLO	MJ	2.27E+01	Ecoinvent v2.2
Electricidad	Electricity, medium voltage, at grid/ES U	kWh	4.36E+00	Ecoinvent v2.2
Árido fino natural	Gravel, round, at mine/CH U	kg	7.50E+02	Sánchez de Juan 2004; Ecoinvent v2.2
Árido grueso natural	Gravel, crushed, at mine/ CH U	kg	1.13E+03	Ministerio de Industria, Energía y Turismo (2013); AFA (2010), Gremi d'Àrids de Catalunya (2013); Empresas españolas (2009-2013) y Ecoinvent v2.2
Fuelóleo (pesado) en horno industrial	Heavy fuel oil, burned in industrial furnace 1MW, non-modulating/CH U	MJ	3.09E+00	Ecoinvent v2.2
Fuelóleo (ligero) en horno industrial	Light fuel oil, burned in industrial furnace 1MW, non-modulating/CH U	kg	1.33E+01	Ecoinvent v2.2
Aceite lubricante	Lubricating oil, at plant/ RER U	kg	1.19E-02	Ecoinvent v2.2
Gas natural	Natural gas, burned in industrial furnace low-NOx >100kW/RER U	MJ	1.16E+00	Ecoinvent v2.2
Cemento Pórtland	Portland cement, strength class Z 42.5, at plant/CH U	kg	3.75E+02	Ecoinvent v2.2, Ministerio de Industria, Energía y Turismo (2013); Empresas cementeras españolas (2009-2011); López (2008)
Piezas de desgaste (acero)	Steel, low-alloyed, at plant/RER U	kg	2.38E-02	Ecoinvent v2.2
Piezas de desgaste (caucho sintético)	Synthetic rubber, at plant/ RER U	kg	7.13E-03	Ecoinvent v2.2
Agua	Tap water, at user/RER U	kg	1.88E+02	Ecoinvent v2.2

Anexo I. Entradas detalladas en la producción de 1 m³ hormigón con 20 % árido reciclado

Productos evitados				
Proceso básico	Nombre del proceso en Ecoinvent v2.2	Unidad	Cantidad	Fuente
Árido grueso natural	Gravel, crushed, at mine/CH U	kg	2.25E+02	Ministerio de Industria, Energía y Turismo (2013); AFA (2010), Gremi d'Àrids de Catalunya (2013); empresas españolas (2009-2013) y Ecoinvent v2.2
Entradas conocidas desde la tecnosfera				
Proceso básico	Nombre del proceso en Ecoinvent v2.2	Unidad	Cantidad	Fuente
Infraestructura de la planta de producción	Concrete mixing plant/CH/I U	P	4.57E-07	Ecoinvent v2.2
Diésel empleado en maquinaria	Diesel, burned in building machine/GLO	MJ	2.27E+01	Ecoinvent v2.2
Electricidad	Electricity, medium voltage, at grid/ES U	kWh	4.36E+00	Ecoinvent v2.2
Árido fino natural	Gravel, round, at mine/CH U	kg	7.50E+02	Sánchez de Juan (2004); Ecoinvent v2.2
Árido grueso natural	Gravel, crushed, at mine/CH U	kg	9.00E+02	Ministerio de Industria, Energía y Turismo (2013); AFA (2010), Gremi d'Àrids de Catalunya (2013); empresas españolas (2009-2012) y Ecoinvent v2.2
Árido grueso reciclado	Gravel, crushed, at mine/CH U	kg	2.25E+02	ARC (2015b); Plantas de reciclaje (2010-2014); Mercante <i>et al.</i> (2010); Zazurca (2012), BEDEC (2015) y Ecoinvent v2.2.
Fuelóleo (pesado) en horno industrial	Heavy fuel oil, burned in industrial furnace 1MW, non-modulating/CH U	MJ	3.09E+00	Ecoinvent v2.2
Fuelóleo (ligero) en horno industrial	Light fuel oil, burned in industrial furnace 1MW, non-modulating/CH U	kg	1.33E+01	Ecoinvent v2.2
Aceite lubricante	Lubricating oil, at plant/ RER U	kg	1.19E-02	Ecoinvent v2.2
Gas natural	Natural gas, burned in industrial furnace low-NOx >100kW/RER U	MJ	1.16E+00	Ecoinvent v2.2
Cemento Pórtland ordinario	Portland cement, strength class Z 42.5, at plant/CH U	kg	3.75E+02	Ecoinvent v2.2; Ministerio de Industria, Energía y Turismo (2013); Empresas cementeras españolas (2009-2011); López (2008)
Piezas de desgaste (acero)	Steel, low-alloyed, at plant/RER U	kg	2.38E-02	Ecoinvent v2.2
Piezas de desgaste (caucho sintético)	Synthetic rubber, at plant/ RER U	kg	7.13E-03	Ecoinvent v2.2
Agua	Tap water, at user/RER U	kg	1.88E+02	Ecoinvent v2.2

Anexo J. Entradas detalladas en la producción de 1 m³ de hormigón no estructural con 100 % árido reciclado

Productos evitados				
Proceso básico	Nombre del proceso en Ecoinvent v2.2	Unidad	Cantidad	Fuente
Árido grueso natural	Gravel, crushed, at mine/CH U	kg	7.30E+02	Ministerio de industria y energía (2013); AFA (2010); Gremi d'Àrids de Catalunya (2013); empresas españolas (2009-2012) y Ecoinvent v2.2
Entradas conocidas desde la tecnosfera				
Proceso básico	Nombre del proceso en Ecoinvent v2.2	Unidad	Cantidad	Fuente
Infraestructura de la planta de producción	Concrete mixing plant/CH/I U	P	4.57E-07	Ecoinvent v2.2
Diésel empleado en maquinaria	Diesel, burned in building machine/GLO	MJ	2.27E+01	Ecoinvent v2.2
Electricidad	Electricity, medium voltage, at grid/ES U	kWh	4.36E+00	Ecoinvent v2.2
Árido fino natural	Gravel, round, at mine/CH U	kg	9.98E+02	Sánchez de Juan (2004); Ecoinvent v2.2
Árido reciclado de hormigón	Gravel, crushed, at mine/CH U	kg	7.30E+02	ARC (2015b); Plantas de reciclaje de Cataluña (2010-2014) y Mercante <i>et al.</i> (2010)
Fuelóleo (pesado) en horno industrial	Heavy fuel oil, burned in industrial furnace 1MW, non-modulating/ CH U	MJ	3.09E+00	Ecoinvent v2.2
Fuelóleo (ligero) en horno industrial	Light fuel oil, burned in industrial furnace 1MW, non-modulating/ CH U	kg	1.33E+01	Ecoinvent v2.2
Aceite lubricante	Lubricating oil, at plant/RER U	kg	1.19E-02	Ecoinvent v2.2
Gas natural	Natural gas, burned in industrial furnace low-NOx >100kW/RER U	MJ	1.16E+00	Ecoinvent v2.2
Cemento Pórtland ordinario	Portland cement, strength class Z 42.5, at plant/CH U	kg	2.50E+02	Ecoinvent v2.2; Ministerio de Industria, Energía y Turismo (2013); Empresas cementeras españolas (2009-2011); López (2008)
Piezas de desgaste (acero)	Steel, low-alloyed, at plant/RER U	kg	2.38E-02	Ecoinvent v2.2
Piezas de desgaste (caucho sintético)	Synthetic rubber, at plant/RER U	kg	7.13E-03	Ecoinvent v2.2
Agua	Tap water, at user/RER U	kg	2.06E+02	Ecoinvent v2.2

Anexo K. Entradas detalladas de la producción de 1 m³ de hormigón no estructural con 75 % de árido mixto reciclado

Productos evitados				
Proceso básico	Nombre del proceso en Ecoinvent v2.2	Unidad	Cantidad	Fuente
Árido grueso natural	Gravel, crushed, at mine/CH U	kg	5.48E+02	Ministerio de Industria, Energía y Turismo (2013); AFA (2010); Gremi d'Àrids de Catalunya (2013); empresas españolas (2009-2012) y Ecoinvent v2.2
Entradas conocidas desde la tecnosfera				
Proceso básico	Nombre del proceso en Ecoinvent v2.2	Unidad	Cantidad	Fuente
Infraestructura de la planta de producción	Concrete mixing plant/CH/I U	p	4.57E-07	Ecoinvent v2.2
Diésel empleado en maquinaria	Diesel, burned in building machine/GLO	MJ	2.27E+01	Ecoinvent v2.2
Electricidad	Electricity, medium voltage, at grid/ES U	kWh	4.36E+00	Ecoinvent v2.2
Árido fino natural	Gravel, round, at mine/CH U	kg	9.98E+02	Sánchez de Juan (2004); Ecoinvent v2.2
Árido reciclado mixto	Gravel, crushed, at mine/CH U	kg	5.48E+02	ARC (2015b); Plantas de reciclaje de Cataluña (2010-2014) y Mercante <i>et al.</i> (2010)
Árido grueso natural	Gravel, crushed, at mine/CH U	kg	1.82E+02	Ministerio de Industria, Energía y Turismo (2013); AFA (2010); Gremi d'Àrids de Catalunya (2013); Empresas españolas (2009-2012) y Ecoinvent v2.2
Fuelóleo (pesado) en horno industrial	Heavy fuel oil, burned in industrial furnace 1MW, non-modulating/CH U	MJ	3.09E+00	Ecoinvent v2.2
Fuelóleo (ligero) en horno industrial	Light fuel oil, burned in industrial furnace 1MW, non-modulating/CH U	kg	1.33E+01	Ecoinvent v2.2
Aceite lubricante	Lubricating oil, at plant/RER U	kg	1.19E-02	Ecoinvent v2.2
Gas natural	Natural gas, burned in industrial furnace low-NOx >100kW/ RER U	MJ	1.16E+00	Ecoinvent v2.2
Cemento Pórtland ordinario	Portland cement, strength class Z 42.5, at plant/CH U	kg	2.50E+02	Ecoinvent v2.2; Ministerio de Industria, Energía y Turismo (2013); Empresas cementeras españolas (2009-2011) y López (2008)
Piezas de desgaste (acero)	Steel, low-alloyed, at plant/ RER U	kg	2.38E-02	Ecoinvent v2.2
Piezas de desgaste (caucho sintético)	Synthetic rubber, at plant/RER U	kg	7.13E-03	Ecoinvent v2.2
Agua	Tap water, at user/RER U	kg	2.06E+02	Ecoinvent v2.2

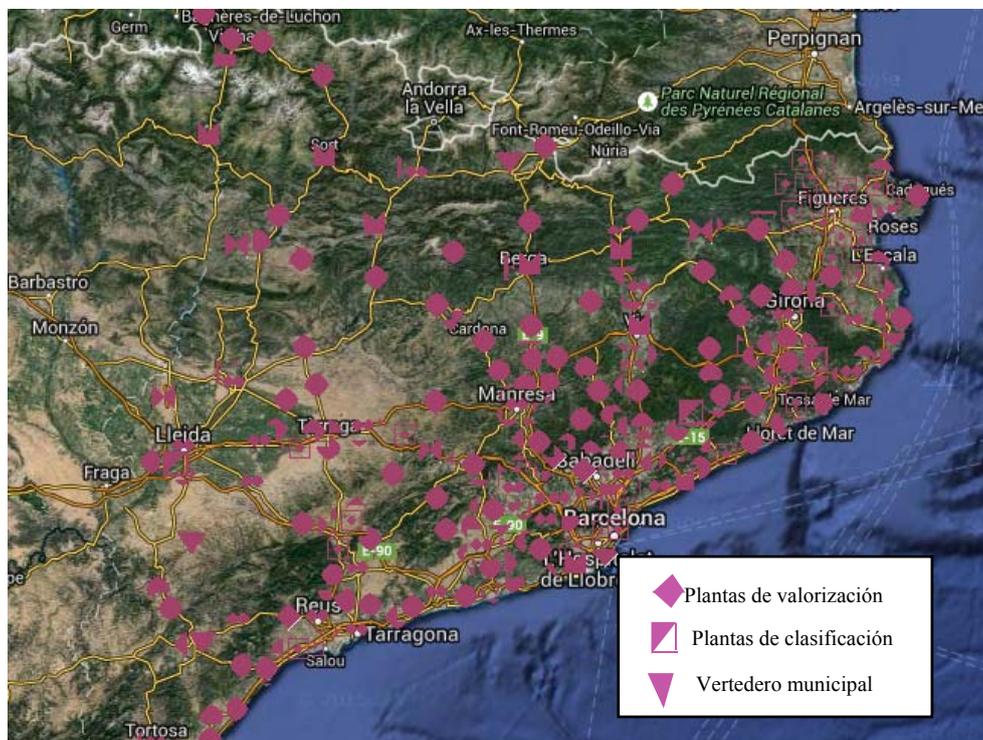
Anexo L. Número de instalaciones de gestión de residuos y de producción de materiales en Cataluña

Instalación	Nº	Fuente
Plantas de reciclaje de metales	372	ARC (2015a)
Plantas de reciclaje de papel	199	ARC (2015a)
Plantas de reciclaje de RCD	55	ARC (2015a)
Vertedero municipal	23	ARC (2015a)
Vertedero inertes	51	ARC (2015a)
Canteras de árido	114	Gremi d'Àrids de Catalunya (2015)
Plantas de cemento	6	CIMENT CATALÀ (2015)
Plantas de hormigón	150	ANEFHOP (2015)
Canteras de yeso	10	Estadística minera (2013)

Anexo M. Instalaciones de gestión de RCD en Cataluña (ARC, 2015b)



Anexo N. Instalaciones de gestión de residuos municipales (ARC, 2015b)



Anexo O. Instalaciones de gestión de residuos industriales (ARC, 2015b)



Anexo P. Plantas de hormigón en Cataluña (ANEFHOP, 2015)



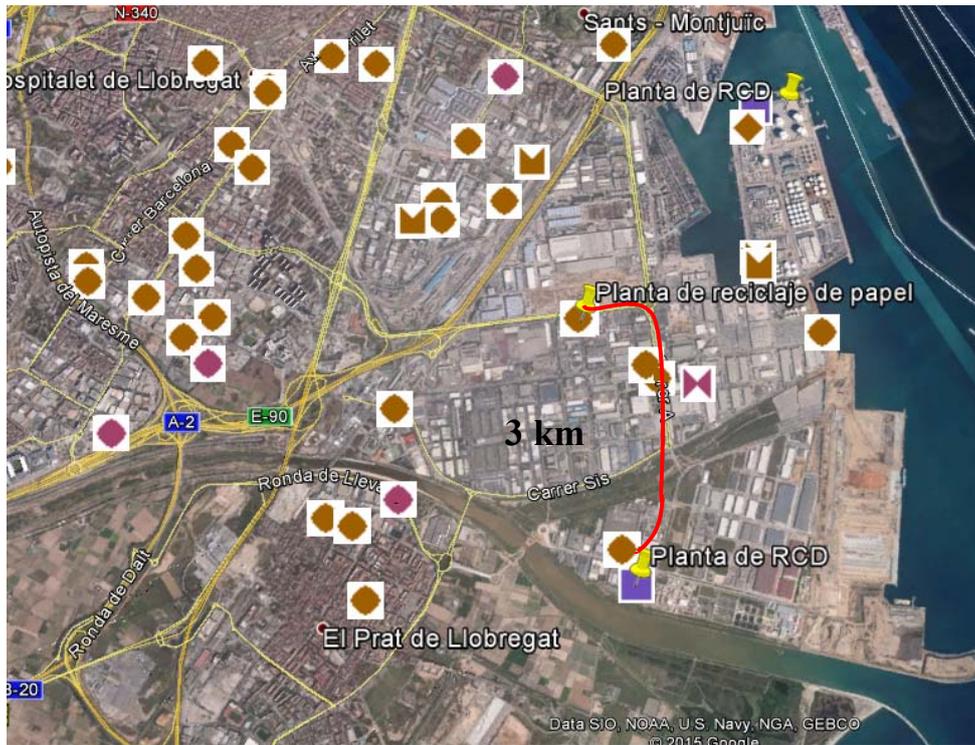
Anexo Q. Plantas de cemento en Cataluña (OFICEMEN, 2015)



Anexo R. Distancia entre planta de tratamiento de RCD y sitio de generación de residuos (ARC, 2015b)



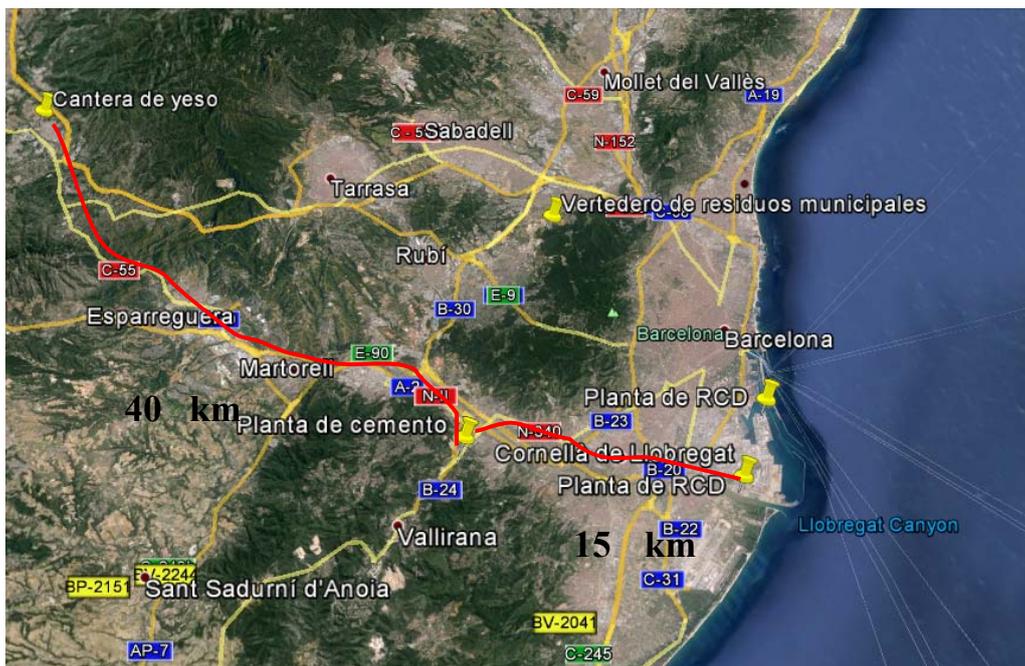
Anexo S. Distancia entre planta de RCD y planta de reciclaje de papel (ARC, 2015b)



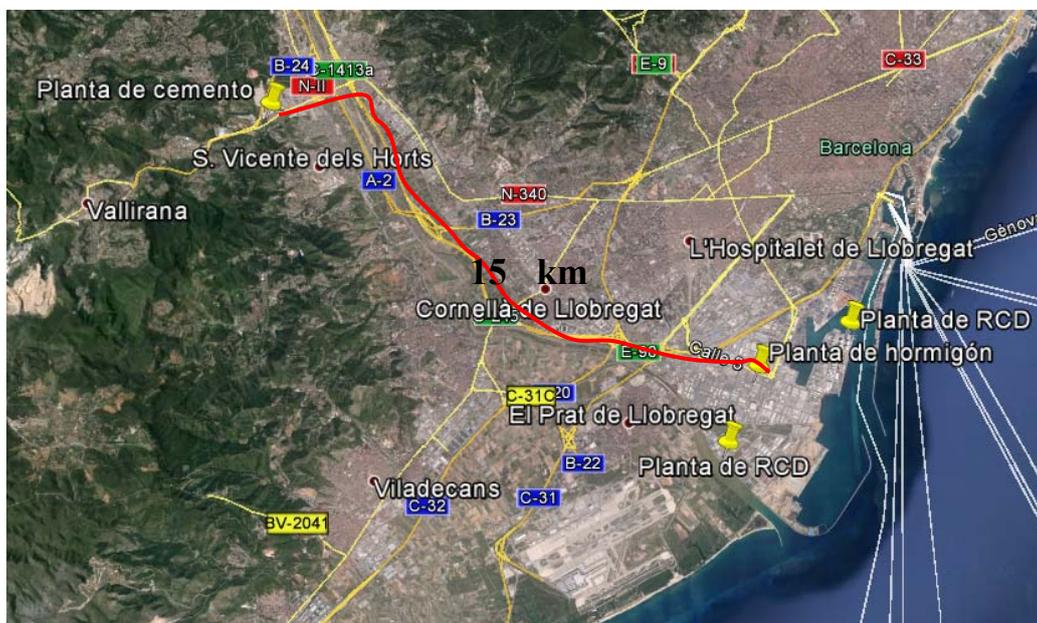
Anexo T. Distancia entre planta de RCD y vertedero municipal (ARC, 2015b)



Anexo U. Distancia entre cantera de yeso y planta de cemento y entre planta de RCD y planta de cemento (ARC, 2015b; CIMENT CATALÀ, 2015)



Anexo V. Distancia entre planta de cemento y planta de hormigón (ARC, 2015b; CIMENT CATALÀ, 2015; ANEFHOP, 2015)



Anexo W. Distancia entre planta de hormigón y vertederos (ARC, 2015b; ANEFHOP, 2015)



Anexo X. Distancia entre planta de RCD y planta de reciclaje de acero (ARC, 2015b)

