

Análisis del Ciclo de Vida:

Estudio comparativo entre una
carretera con caucho reciclado y una
carretera convencional



Con la colaboración de:



septiembre 2022

ÍNDICE

RESUMEN.....	3
1. INTRODUCCIÓN.....	4
2. OBJETIVO	5
3. ALCANCE DEL ESTUDIO	5
3.1. Sistemas de procesos/productos a estudiar	5
3.2. Funciones de los sistemas procesos/productos.....	5
3.3. Unidad de análisis y flujo de referencia	5
3.4. Límites del sistema y posibles exclusiones.....	6
3.5. Procedimientos de asignación en multifuncionalidad.....	6
3.6. Categorías, modelos e indicadores de Huella Ambiental	6
3.7. Criterios de interpretación, suposiciones y juicios de valor	7
3.8. Requisitos de la calidad de los datos	7
4. COMPILACIÓN Y REGISTRO DE LOS DATOS DE INVENTARIO	8
4.1. Carretera con mezcla bituminosa convencional.....	8
4.2. Carretera con mezcla bituminosa con caucho.....	17
5. CÁLCULO DE LOS RESULTADOS DE LA EVALUACIÓN DE IMPACTO DE LA HUELLA AMBIENTAL	21
5.1. Limitaciones de los resultados con el objetivo y alcance.....	23
6. INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS DE HUELLA AMBIENTAL.....	24
6.1. Discusión de los resultados	24
6.2. Evaluación de la calidad de los datos	24
6.3. Transparencia e incertidumbre.....	24
6.4. Análisis de sensibilidad.....	25
7. CONCLUSIONES.....	26
8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	28
ANEXO: Resultados completos por materiales y etapas.....	30

RESUMEN

Este informe se corresponde con los resultados del proyecto: “ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA COMPARATIVO DE UNA CARRETERA FABRICADA CON UNA MEZCLA CON BETÚN MEJORADO Y UNA CARRETERA CONVENCIONAL”.

Signus Ecovalor encarga este estudio a título propio a la Universidad Politécnica de Madrid (UPM) a través de la Fundación Agustín de Betancourt con quien ha contado con la colaboración en su equipo de trabajo con personal de La Universidad de La Laguna (ULL) y con personal del CIEMAT.

El objetivo es cuantificar y comparar la huella ambiental (HA) basada en el Análisis de Ciclo de Vida (ACV) de una carretera fabricada con una mezcla con betún mejorado con caucho con la huella ambiental de una carretera convencional.

La conclusión principal, a partir de los resultados obtenidos, es que las carreteras fabricadas con un betún mejorado con caucho son notablemente más sostenibles comparadas con una carretera convencional incluso cuando se considera que la vida útil de ambas es la misma.

1. INTRODUCCIÓN

Los pavimentos están destinados a servir a los usuarios de la carretera garantizando que los viajes sean seguros, cómodos e incluso silenciosos. Pero también, en una sociedad profundamente preocupada por las tecnologías de construcción sostenibles, la durabilidad del asfalto está adquiriendo un papel clave en el diseño de las carreteras.

Los pavimentos de asfalto convencionales han demostrado un rendimiento de larga duración para todos los niveles de tráfico, diferentes tipos de subrasante y en todos los tipos de climas. Sin embargo, en las últimas décadas, para disminuir el uso de áridos vírgenes y de recursos naturales, así como para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y de consumo de energía, se han desarrollado nuevas tecnologías para pavimentos asfálticos.

El caucho procedente de los neumáticos al final de su vida útil (NFVU) se puede incorporar a las mezclas asfálticas, confiriendo unas propiedades que permiten mejorar el rendimiento del pavimento en comparación con los diseños convencionales [1].

Los pavimentos que contienen ligantes con caucho han demostrado que alcanzan múltiples beneficios: una mayor resistencia al agrietamiento, a la fatiga y a la fisuración térmica. También permiten reducir el ruido del tráfico, los costes de mantenimiento y la vida útil del pavimento se prolonga. Estas propiedades de los ligantes modificados con polvo de caucho y de las mezclas asfálticas que los contienen han sido corroboradas en una gran variedad de publicaciones sobre ingeniería de pavimentos [2-9].

El objetivo de este proyecto es evaluar los impactos ambientales de las carreteras construidas con pavimentos fabricados con caucho a lo largo de su ciclo de vida en comparación con los de una carretera convencional.

Las mezclas bituminosas que incorporan caucho reciclado no solo contribuyen al modelo de Economía Circular al emplear un material procedente de un residuo como es el NFVU y ahorran materia prima (betún asfáltico que proviene del crudo del petróleo), sino que logran prolongar la vida útil del pavimento gracias a las propiedades que le confiere. Esto se traduce en un beneficio ambiental el cual hay que cuantificar para demostrar que, aunque estas mezclas se fabrican a mayor temperatura en comparación con las mezclas convencionales, siguen existiendo otras ventajas y beneficios medioambientales: la energía consumida de las mezclas con caucho durante la fase de mantenimiento de la carretera es menor que la del asfalto convencional. Además, las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) de la producción y construcción de mezclas asfálticas con caucho son similares a las mezclas bituminosas en caliente, pero sus emisiones de CO₂ y CH₄ son mucho más bajas [10].

Por ello, es fundamental un análisis de ciclo de vida (ACV) donde se tengan en cuenta estos aspectos y se pueda cuantificar de un modo preciso las ventajas/desventajas ambientales del uso de estos pavimentos a lo largo de la vida útil de la carretera.

En este documento se presentan los resultados del ACV de una carretera fabricada con una mezcla con betún mejorado con caucho y una carretera convencional y, posteriormente, se han comparado ambos estudios para determinar los posibles beneficios ambientales de incorporar el polvo de caucho de NFVU en el ligante de las mezclas asfálticas.

2. OBJETIVO

El objetivo de este trabajo es calcular y comparar los impactos medioambientales potenciales de una carretera fabricada con una mezcla con betún mejorado con caucho a lo largo de su vida útil con los impactos de una carretera convencional mediante la aplicación del método de Análisis de Ciclo de Vida (ACV) según las normas ISO 14040:2006 e ISO 14044:2006 [11-12] y las recomendaciones del cálculo de huella ambiental (HA) [13].

La realización de esta investigación concreta puede aportar información que resulte de interés a diversos ámbitos como los profesionales del sector de construcción de carreteras, la administración pública, la comunidad científica, los expertos medioambientales y el público en general.

3. ALCANCE DEL ESTUDIO

3.1. Sistemas de procesos/productos a estudiar

De acuerdo a la normativa ISO, el sistema proceso o producto se define como el conjunto de flujos elementales y flujos de producto, que desempeñan una o más funciones, y que sirve como modelo para la realización del ACV de un proceso o producto. El sistema proceso, en este caso, está a su vez dividido en una serie de procesos unitarios, vinculados entre sí mediante procesos intermedios, bien con otros sistemas de producto o bien con el medio ambiente mediante flujos elementales [11].

El sistema proceso para este ACV comparativo comprenderá las siguientes etapas o elementos correspondientes:

- (i) dosificación y preparación de la mezcla bituminosa.
- (ii) transporte de los materiales hasta la puesta en obra.
- (iii) consumo de maquinaria para la puesta en obra.
- (iv) posteriores procesos de rehabilitación hasta el fin de su vida útil.

3.2. Funciones de los sistemas procesos/productos

La función de todos los sistemas de procesos estudiados es la prestación del servicio de transporte vehicular que cumplan las funcionalidades en cuanto al soporte de cargas de tráfico, permitiendo la circulación de los vehículos en condiciones de comodidad y seguridad. En el caso de las mezclas con caucho permitiría, a priori, mantener la misma función de una mezcla convencional durante más tiempo.

3.3. Unidad de análisis y flujo de referencia

La unidad de análisis a partir de la cual se van a definir los resultados se va a referir tanto a superficie construida de pavimento asfáltico (m²) como al tiempo de vida útil de cada una de las carreteras sometidas a estudio (años): **m²-año**.

3.4. Límites del sistema y posibles exclusiones

En cuanto a los límites del sistema, éstos se describirán y definirán posteriormente con detalle en cada apartado de compilación de datos de inventario, analizado por cada subproceso para cada uno de los casos de estudio. No obstante, de forma general se puede decir que en estos límites quedan incluidos los siguientes procesos:

- Obtención de materias primas y transporte de las mismas.
- Fabricación de betunes, ligantes, mezclas bituminosas y su distribución hasta la obra.
- La puesta en obra de todos los materiales y sus posteriores operaciones de rehabilitación.
- El transporte de la mezcla bituminosa y materiales (zahorra, riegos, etc..) desde la planta de mezclas a la obra.
- En el caso de la carretera con caucho, se considera la fabricación de polvo de caucho, así como la fabricación del ligante betún caucho.

Quedan excluidas de los límites las operaciones de extracción de muestras, acabados, señalización, balizamiento, infraestructuras, reposiciones de equipos (estaciones de aforos, sensores meteorológicos, etc.) y limpiezas posteriores a la puesta en obra de la capa de rodadura, y las operaciones previas de realizaciones de testigos. También se excluyen las operaciones de conservación de carreteras y el mantenimiento de la maquinaria.

3.5. Procedimientos de asignación en multifuncionalidad

No existen procesos multifuncionales a los que aplicar procedimientos de asignación según se detalla en la normativa ISO.

3.6. Categorías, modelos e indicadores de Huella Ambiental

Las categorías de impacto en un ACV o HA están relacionadas en general con la utilización de los recursos y las emisiones de sustancias que perjudican al medio ambiente y que también pueden afectar a la salud humana.

Existen diversos métodos que contemplan la modelización de esos daños, cuya finalidad es agrupar y agregar los datos del perfil de uso de los recursos y de emisiones inventariados según las contribuciones respectivas a cada categoría de impacto seleccionada.

En este estudio se consideran las categorías determinadas en el método ILCD 2011 *midpoint* [14], recomendado en la guía de HA [13] y desarrollada por la Comisión Europea. Las categorías que contempla son las siguientes:

- **Cambio climático (GWP)**, medido en kg equivalente de CO₂, diferenciando entre las fósiles, las biogénicas y las del uso del terreno.
- **Agotamiento de la capa de ozono (ODP)**, medida en kg equivalente de CFC-11.
- **Ecotoxicidad, para ecosistemas de agua dulce (FETP)**, medida CTUe (Unidad tóxica comparativa para los ecosistemas).

- **Toxicidad humana (efectos carcinogénicos) (HTPc)**, medida en CTUe (Unidad tóxica comparativa para las personas).
- **Toxicidad humana (efectos no carcinogénicos) (HTPnc)**, medida en CTUe (Unidad tóxica comparativa para las personas).
- **Partículas/sustancias inorgánicas con efectos respiratorios (RIP)**, medida en incidencia de la enfermedad.
- **Radiaciones ionizantes (efectos sobre la salud humana) (IRP)**, medida en kg equivalente de U²³⁵ (en el aire).
- **Formación fotoquímica de ozono (POFP)**, medida en kg de NMVOC (Compuestos Orgánicos Volátiles no Metánicos).
- **Acidificación (ACP)**, medida en mol equivalente de H⁺.
- **Eutrofización terrestre (TEP)**, medida en mol equivalente de N.
- **Eutrofización acuática (FEP, MEP)**, medida en kg equivalente de P (agua dulce) y medida en kg equivalente de N (agua del mar).
- **Agotamiento de los recursos (agua) (WDP)**, medida en m³ de consumo de agua en relación con la escasez de agua a nivel local.
- **Agotamiento de los recursos minerales y metales (RUmm)**, medido en kg equivalente Sb.
- **Agotamiento del recurso energético (RUec)**, medido en J.
- **Uso del terreno (LUP)**, medido en puntos equivalentes.

Para la realización de los cálculos se utiliza la herramienta profesional **SimaPro®**, muy utilizada ampliamente por la comunidad científica internacional con la que se puede realizar el estudio de los impactos ambientales asociados a un producto servicio u organización a lo largo de su ciclo de vida. En el mismo se encuentra integrada, entre otras, la base de datos ecoinvent¹ (muy utilizada en este estudio) y, entre otros, el método de caracterización ILCD 2011 *midpoint (EF 2.0)*.

3.7. Criterios de interpretación, suposiciones y juicios de valor

Una vez analizados y evaluados los impactos potenciales medioambientales se interpretarán los mismos para poder identificar los aspectos significativos, establecer recomendaciones para la mejora del comportamiento ambiental del sistema o subsistemas determinados, jerarquizar los aspectos más impactantes, analizar las posibilidades de realizar determinados análisis de sensibilidad y establecer las limitaciones del estudio.

En este caso, se desarrollarán análisis de sensibilidad modificando la variable temporal para el caso de las mezclas con caucho.

3.8. Requisitos de la calidad de los datos

Los requisitos referidos a la calidad de los datos utilizados para la recopilación del inventario en este caso de estudio se eligen preferiblemente a partir de datos reales. La empresa proporciona de forma general las cantidades de materiales y maquinaria

¹ <http://www.ecoinvent.org>

empleada. No obstante, los procesos anteriores como la extracción de materias primas, procesos de fabricación de datos intermedios, consumos de maquinaria, etc. se han caracterizado previamente e incorporado a la base de datos de SimaPro® a partir de bibliografía específica y bases de datos internacionalmente reconocidas.

4. COMPILACIÓN Y REGISTRO DE LOS DATOS DE INVENTARIO

El proceso de compilación y registro de los datos de inventario de los recursos y consumos energéticos se presenta diferenciado por cada una de las mezclas a estudiar.

Los materiales, transporte y procesos han sido previamente caracterizados y se encuentran a disposición en el software SimaPro®.

En base a la experiencia e información aportada por expertos en la materia, en la siguiente tabla se muestran los procesos de mantenimiento que se requieren para cada tipo de mezcla.

Tabla 1. Procesos considerados en la carretera durante su vida útil.

Fase	Carretera con mezcla convencional	Carretera con mezcla con caucho
Construcción	Año 0	Año 0
Microaglomerado	Año 7/8	-
Fresado y reposición de capa de rodadura	Año 10	Año 15
Reciclado	Año 18	-
Demolición	Año 20	Año 30
Vida útil (años)	20	30

4.1. Carretera con mezcla bituminosa convencional

A continuación, se presentan los datos de inventario para cada una de las fases consideradas en la vida útil de una carretera fabricada con una mezcla bituminosa convencional.

4.1.1. Fase de construcción

El firme de carretera que se va a tomar como referencia en el estudio está compuesto de tres capas: rodadura, intermedia y zahorra. En la Tabla 2 se muestran los espesores y los materiales de cada una de ellas.

Tabla 2. Espesor y porcentajes de materiales de las distintas capas de la carretera con mezcla convencional.

Capa (tipo)	Espesor (cm)	% betún	% áridos
Rodadura (AC16 surf D 50/70)	5	5	95
Intermedia (AC22 bin S 50/70)	10	5	95
Zahorra	35	0	100

Los datos para el cálculo de la cantidad de materiales (betún y áridos) para cada una de las capas se muestran a continuación. Se considera una densidad aparente de 2,3 t/m³ para las mezclas de las capas de rodadura e intermedia, y de 2,2 t/m³ para la zahorra.

Tabla 3. Cantidad de materiales por capa y por m².

Capa (tipo)	Betún (t/m ²)	Áridos (t/m ²)
Rodadura (AC16 surf D 50/70)	0,0058	0,1093
Intermedia (AC22 bin S 50/70)	0,0115	0,2185
Zahorra	-	0,7700

La fase de construcción de una carretera implica los siguientes subprocesos:

- Fabricación de las mezclas bituminosas de la capa de rodadura y de la capa intermedia.
- Transporte de los materiales que componen las capas desde la planta de mezclas hasta la obra.
- Extendido y compactación de las capas.
- Riego de imprimación y de adherencia.

A continuación, se calculan los consumos correspondientes a cada proceso expresados en MJ/m² para el caso de la fabricación y puesta en obra y en “tkm/m²” para la actividad relacionada con el transporte.

a. *Fabricación de las mezclas bituminosas de la capa de rodadura y de la capa intermedia*

Tanto la capa de rodadura como la intermedia, se han fabricado a una temperatura de 160°C en una mezcladora cuyo consumo de combustible diésel es de 8 L/t. Considerando la densidad del combustible (0,89 kg/L) y su poder calorífico (43 MJ/kg), el consumo total de los procesos de mezclado de betún y áridos para la fabricación de la capa de rodadura y de la capa intermedia es de 112,89 MJ/m².

Tabla 4. Consumos energéticos fabricación mezcla bituminosa convencional.

	Valor	Unidad
Temperatura de fabricación	160	°C
Consumo combustible diésel	8,55	L/t
Densidad combustible diésel	0,89	kg/L
Poder calorífico combustible diésel	43	MJ/kg
Consumo energético fabricación capa de rodadura	37,6	MJ/m ²
Consumo energético fabricación capa intermedia	75,3	MJ/m ²
Total	112,89	MJ/m²

Para la capa de zahorra, no se contempla proceso de fabricación por no ser necesario su mezclado en la realidad.

b. Transporte de los materiales que componen las capas a la obra

Para las capas de rodadura e intermedia se ha considerado el transporte por camión desde la planta de fabricación de la mezcla hasta la puesta en obra, tomando una media de 40 km, por lo que se obtiene un valor de 13,8 tkm/m² para esta etapa.

En el caso de la zahorra, la distancia considerada es de 30 km, por lo que el valor final es de 23,10 tkm/m².

Tabla 5. Inventario del transporte de los materiales a obra de la carretera convencional.

	t/m ²	Distancia (km)	tkm/m ²
Capa de rodadura	0,1150	40	4,6
Capa intermedia	0,2300	40	9,2
Zahorra	0,7700	30	23,1

c. Extendido y compactación de las capas

La puesta en obra de las capas de rodadura e intermedia se ha realizado con una maquinaria cuyo consumo total de diésel es de 0,28 L/m², por lo que el consumo total de este proceso asciende a 10,72 MJ/m².

En el caso de la zahorra, se ha considerado una motoniveladora, apisonadora de compactación y equipo de riego con agua que implica un consumo de 0,07 L/m² de diésel, teniendo un valor final de 2,68 MJ/m².

Tabla 6. Inventario extendido y compactación carretera convencional

Extendido y compactación	consumo diésel (L/m ²)	MJ/m ²
Capa rodadura + Capa intermedia	0,28	10,72
Zahorra	0,07	2,68

d. Riego de imprimación y de adherencia

En la fase de construcción se aplican tanto riego de imprimación como de adherencia. La siguiente tabla muestra las composiciones de los mismos.

Tabla 7. Composición de los riegos [15].

	Riego de imprimación (%)	Riego de adherencia (%)
Betún	42,0	60,0
Aditivo orgánico	10,7	1,4
Agua	47,3	38,6

La siguiente tabla muestra las cantidades de cada uno de los materiales de los riegos, los consumos energéticos para su fabricación y puesta en obra y el transporte considerado desde la planta mezcladora hasta la obra (80 km de distancia).

Tabla 8. Inventario de los riegos de imprimación y adherencia de la fase de construcción.

	Riego de imprimación	Riego de adherencia
Cantidad de material (t/m ²)	0,00111	0,00045
Consumo eléctrico (fabricación) (kWh/m ²)	0,00098	0,00070
Consumo diésel (fabricación) (kWh/m ²)	0,00080	0,00535
Consumo diésel (puesta en obra) (kWh/m ²)	0,15308	0,15308
Transporte (tkm/m ²)	0,08800	0,03576

Tabla 9. Inventario de consumos asociados a la fase de construcción de la carretera convencional.

Procesos de la fase de reciclado y reposición	Valor	Unidad
Material construido	1,115	t/m ²
Fabricación mezcla de rodadura e intermedia	112,89	MJ/m ²
Transporte de materiales desde la planta a la obra	36,9	tkm/m ²
Puesta en obra (extendido y compactación)	13,39	MJ/m ²
Riego de imprimación (fabricación electricidad)	0,00098	kWh/m ²
Riego de imprimación (fabricación combustible)	0,00080	kWh/m ²
Riego de imprimación (puesta en obra)	0,15308	kWh/m ²
Riego de imprimación (transporte)	0,08800	tkm/m ²
Riego de adherencia (fabricación electricidad)	0,00045	kWh/m ²
Riego de adherencia (fabricación combustible)	0,00070	kWh/m ²
Riego de adherencia (puesta en obra)	0,00535	kWh/m ²
Riego de adherencia (transporte)	0,15308	tkm/m ²

4.1.2. Fase de Microaglomerado

En esta fase se ha considerado la lechada de tipo MICROFD11, 14 kg/m², cuya composición de agua/betún/áridos es de 4/6/100, por lo que la cantidad de materiales necesarios es la siguiente, despreciando el agua: 0,0007636 t/m² de betún y 0,0132364 t/m² de áridos.

La lechada se fabrica a temperatura ambiente y la emulsión se trata como una mezcla bituminosa en una mezcladora a 90°C cuyo consumo de diésel es de 4,54 L/t, por lo que se considera un consumo total de **0,22 MJ/m²** en esta etapa de fabricación.

La puesta en obra se ha realizado con una maquinaria cuyo consumo es de 0,004 L/m², por lo que el consumo total de este proceso asciende a **0,13 MJ/m²**.

Tabla 10. Inventario fase de microaglomerado (fabricación y puesta en obra)

	Fabricación	Puesta en obra
Consumo diésel (L/t)	4,54	0,004
Densidad combustible (kg/L)	0,89	0,89
Poder Calorífico (MJ/kg)	43	43
Consumo energético (MJ/m²)	0,22	0,13

Para la etapa de transporte desde la planta mezcladora hasta la puesta en obra del microaglomerado, se ha considerado una distancia media de 40 km, resultando un valor de 0,56 tkm/m². Por otro lado, para el transporte de la emulsión se ha considerado una distancia de 80 km, por lo que se considera un valor adicional de 0,061 tkm/m², siendo el total de transporte en esta etapa de 0,621 tkm/m².

Tabla 11. Inventario del transporte de los materiales a obra de la carretera convencional.

	t/m ²	Distancia (km)	tkm/m ²
Microaglomerado	0,014	40	0,56
Emulsión	0,0007	80	0,061
Total			0,621

4.1.3. Fase de fresado y reposición

En esta etapa se retiran 5 cm de la capa superficial para su reposición con una mezcla nueva. A continuación, se enumeran los subprocesos que la componen:

- Fresado.
- Barrido.
- Transporte residuo generado.
- Fabricación mezcla reposición.
- Transporte mezcla reposición a la obra.
- Puesta en obra (extendido y compactación).
- Riego de adherencia (fabricación, transporte y puesta en obra).

a. *Fresado y barrido*

En primer lugar, para la retirada de la capa superficial se utiliza una fresadora y una barredora. La cantidad de material que se retira son 5 cm, que equivalen a 0,115 t/m², considerando una densidad de 2,3 t/m³. Los consumos de diésel de la maquinaria son de 0,044 y de 0,0056 L/(m²·cm), respectivamente, por lo que las cantidades serán de 8,42 y 1,07 MJ/m², siendo el total de **9,49 MJ/m²**.

b. *Fabricación mezcla reposición*

La reposición de material se realiza con la misma composición y maquinaria que la fase de construcción, siendo un total de 0,0058 t/m² de betún y 0,1093 t/m² de áridos. Los materiales se han mezclado a 160°C en una mezcladora cuyo consumo de combustible diésel es de 8,55 L/t, siendo el consumo total del proceso de mezclado de betún y áridos de **37,63 MJ/m²**.

Tabla 12. Inventario fabricación mezcla de reposición

Fabricación mezcla de reposición	Valor	Unidad
Betún	0,0058	t/m ²
Áridos	0,1093	t/m ²
Total mezcla	0,1151	t/m²
Combustible	8,55	L/t
Consumo energético	37,63	MJ/m²

c. Transporte mezcla de reposición y residuo generado

En relación con el transporte de la mezcla de reposición se ha considerado una distancia de 40 km desde la planta de mezclas hasta la obra, resultando un valor de 4,6 tkm/m² para esta etapa. Además, se ha considerado el transporte por camión del residuo generado, tomando una media de 40 km, obteniéndose un valor también de 4,6 tkm/m².

d. Puesta en obra (extendido y compactación)

La puesta en obra de la mezcla de reposición consiste en su extendido y compactación. Para ello, se ha empleado una maquinaria cuyo consumo total es de 0,078 L/m², por lo que el consumo total de este proceso asciende a **2,99 MJ/m²**.

e. Riego de adherencia

En cuanto al riego de adherencia se considera la misma composición que el aplicado en la fase de construcción (ver Tabla 7).

La siguiente tabla muestra las cantidades de material del riego, los consumos energéticos para su fabricación y puesta en obra y el transporte considerado desde la planta mezcladora hasta la obra (80 km de distancia).

Tabla 13. Inventario del riego de adherencia en la fase de fresado y reposición.

	Riego de adherencia
Cantidad de material (t/m ²)	0,00045
Consumo eléctrico (mezcla) (kWh/m ²)	0,00039
Consumo diésel (mezcla) (kWh/m ²)	0,00306
Consumo diésel (puesta en obra) (kWh/m ²)	0,15308
Transporte (tkm/m ²)	0,03576

A continuación, se muestra una tabla resumen con el inventario de consumos asociados con la fase de fresado y reposición expresados en MJ/m², kWh/m² y tkm/m².

Tabla 14. Inventario de consumos asociados a la fase de fresado y reposición de la carretera convencional.

Procesos de la fase de fresado y reposición	Valor	Unidad
Material retirado	0,115	t/m ²
Consumo energético fresadora	8,42	MJ/m ²
Consumo energético barredora	1,07	MJ/m ²
Transporte residuo generado	4,6	tkm/m ²
Fabricación mezcla de reposición	37,66	MJ/m ²
Transporte mezcla de reposición	4,6	tkm/m ²
Puesta en obra (extendido)	2,99	MJ/m ²
Riego de adherencia (fabricación electricidad)	0,00039	kWh/m ²
Riego de adherencia (fabricación combustible)	0,00306	kWh/m ²
Riego de adherencia (puesta en obra)	0,15308	kWh/m ²
Riego de adherencia (transporte)	0,03576	tkm/m ²

4.1.4. Fase de reciclado y reposición

La fase de reciclado y reposición de la carretera implica los siguientes subprocesos:

- Fresado.
- Barrido.
- Transporte residuo generado.
- Fabricación mezcla reciclada de reposición.
- Transporte mezcla reposición a la obra.
- Puesta en obra (extendido y compactación).
- Riego de adherencia (fabricación, transporte y puesta en obra).

A continuación, se calculan los consumos correspondientes a cada proceso expresados en MJ/m² para el caso de la fabricación y puesta en obra y en “tkm/m²” para la actividad relacionada con el transporte.

a. *Fresado y barrido*

La primera tarea consiste en retirar la capa de rodadura y la capa intermedia mediante una fresadora y una barredora para su reposición por una nueva. La cantidad de material retirado, considerando la misma densidad aparente de 2,3 t/m³, asciende a 0,345 t/m². Los consumos de diésel de la maquinaria son de 0,044 y de 0,0056 L/(m²·cm),, respectivamente, por lo que las cantidades serán de 25,26 y 3,21 MJ/m², siendo el total de 28,47 MJ/m².

b. Fabricación mezcla reciclada de reposición

La reposición de material se realiza con la misma composición porcentual de betún y áridos (ver *Tabla 2*) pero reciclando un 10% del material fresado. El total será de 0,0155 t/m² de betún, 0,295 t/m² de áridos y 0,0345 t/m² de material reciclado (RAP). Los materiales se han mezclado a 190°C, ya que el RAP viene frío. En este caso, el consumo de combustible diésel de la mezcladora es de 10,55 L/t, siendo el consumo total del proceso de mezclado de betún y áridos de **139,29 MJ/m²**.

c. Transporte mezcla de reposición y residuo generado

En cuanto al transporte se ha considerado el transporte por camión de la mezcla de reposición (0,345 t/m²), desde la planta de mezclas hasta la puesta en obra, tomando una media de 40 km, por lo que se obtiene un valor de 13,82 tkm/m² para esta etapa. Además, se ha considerado el transporte por camión del residuo generado, tomando una media de 40 km, por lo que se considera un valor también de 13,8 tkm/m² para esta etapa.

d. Puesta en obra (extendido y compactación)

La puesta en obra se ha realizado con una maquinaria cuyo consumo es de 0,18 L/m², por lo que el consumo total de este proceso asciende a **6,89 MJ/m²**.

e. Riego de imprimación

En esta fase se aplican tanto riego de imprimación como de adherencia, cuya composición se muestra en la *Tabla 7*. Los consumos energéticos para su fabricación y puesta en obra y el transporte considerado desde la mezcladora hasta la puesta (80 km de distancia) son los mismos que la *Tabla 8*.

A continuación, se muestra una tabla resumen con el inventario de consumos relacionados con la fase de reciclado y reposición:

Tabla 15. Inventario de consumos asociados a la fase de reciclado y reposición.

Procesos de la fase de reciclado y reposición	Valor	Unidad
Material retirado	0,345	t/m ²
Consumo energético fresadora	25,26	MJ/m ²
Consumo energético barredora	3,21	MJ/m ²
Transporte residuo generado	13,80	tkm/m ²
Fabricación mezcla de reposición	139,29	MJ/m ²
Transporte mezcla de reposición	13,80	tkm/m ²
Puesta en obra (extendido)	6,89	MJ/m ²

Continuación Tabla 15

Riego de imprimación (fabricación electricidad)	0,00098	kWh/m ²
Riego de imprimación (fabricación combustible)	0,00080	kWh/m ²
Riego de imprimación (puesta en obra)	0,15308	kWh/m ²
Riego de imprimación (transporte)	0,08800	tkm/m ²
Riego de adherencia (fabricación electricidad)	0,00045	kWh/m ²
Riego de adherencia (fabricación combustible)	0,00070	kWh/m ²
Riego de adherencia (puesta en obra)	0,00535	kWh/m ²
Riego de adherencia (transporte)	0,15308	tkm/m ²

4.1.5. Fase de demolición

En esta fase se retira el firme de la carretera, es decir todas las capas y la zahorra, mediante excavadora-perforadora y se transporta el residuo a vertedero. Los consumos de la maquinaria correspondiente son 0,04 L/m² para el martillo hidráulico, 0,04 L/m² para la cortadora radial y de 1,2 L/m² para el camión dúmper. Por tanto, el consumo total de **48,99 MJ/m²**.

En el transporte de los residuos a vertedero se considera una distancia media de 80 km obteniéndose **89,2 tkm/m²**.

A continuación, se muestra una tabla resumen con el inventario de consumos asociados a la fase de demolición de la carretera con la mezcla convencional expresados en MJ/m², kWh/m² y tkm/m².

Tabla 16. Inventario de consumos asociados a la fase de demolición de la carretera convencional.

Procesos de la fase de reciclado y reposición	Valor	Unidad
Material construido	1,115	t/m ²
Consumo martillo hidráulico y cortadora manual	1,53	MJ/m ²
Consumo martillo hidráulico y cortadora manual	1,53	MJ/m ²
Consumo camión dúmper	45,92	MJ/m ²
Transporte residuo	89,2	tkm/m ²

4.2. Carretera con mezcla bituminosa con caucho

A continuación, se presentan los datos de inventario para cada una de las fases consideradas en la vida útil de una carretera fabricada con una mezcla bituminosa con betún mejorado con caucho.

4.2.1. Fase de construcción

El firme de la carretera es el mismo que el considerado en la mezcla convencional con la única distinción de que la capa de rodadura se ha fabricado con un betún mejorado con caucho. En la siguiente tabla se muestran los espesores y los materiales de cada una de ellas.

Tabla 17. *Espesor y porcentajes de materiales de las distintas capas de la carretera con caucho.*

Capa (tipo)	Espesor (cm)	% betún	% áridos	% caucho
Rodadura (AC16 surf D BC 50/70)	5	4,5	95	0,5
Intermedia (AC22 bin S 50/70)	10	5	95	-
Zahorra	35	0	100	-

Los datos para el cálculo de la cantidad de materiales (betún, áridos y caucho) para cada una de las capas se muestran a continuación. Se considera una densidad aparente de 2,3 t/m³ para las mezclas de las capas de rodadura e intermedia, y de 2,2 t/m³ para la zahorra.

Tabla 18. *Cantidad de materiales por capa y por m².*

	Betún (t/m ²)	Áridos (t/m ²)	Caucho (t/m ²)
Capa de rodadura	0,0052	0,1093	0,0006
Capa intermedia	0,0115	0,2185	-
Zahorra	-	0,7700	-

La fase de construcción de una carretera implica los siguientes subprocesos:

- Fabricación de las mezclas bituminosas de la capa de rodadura y de la capa intermedia.
- Transporte de los materiales que componen las capas desde la planta de mezclas hasta la obra.
- Extendido y compactación de las capas.
- Riego de imprimación y de adherencia.

Tanto para la puesta en obra de los materiales de las capas, el transporte por camión desde la planta de mezclas hasta la puesta en obra, y lo correspondiente a la zahorra, se toman los mismos valores que para la fase de construcción de la mezcla convencional. La única distinción es el impacto en la fabricación de la mezcla de rodadura que contiene un betún mejorado con caucho.

A continuación, se calculan los consumos correspondientes a la fabricación de las mezclas de la capa de rodadura e intermedia expresados en MJ/m².

a. *Fabricación de las mezclas bituminosas de la capa de rodadura y de la capa intermedia*

La capa de rodadura se ha fabricado con un ligante que contiene polvo de caucho. En este caso, se ha considerado un consumo energético de 13,5 kWh/t para la fabricación del polvo de caucho que equivale a **0,028 MJ/m²**. Por otro lado, el consumo de los equipos de fabricación de betún mejorado con caucho es de 4,9 L/t de diésel que equivale a **0,12 MJ/m²**.

Los materiales de las capas se han mezclado a 165°C (rodadura) y 170°C (intermedia) en una mezcladora cuyo consumo de combustible diésel es de 8,88 L/t y 9,21 L/t respectivamente. Considerando la densidad del mismo (0,89 kg/L) y su poder calorífico (43 MJ/kg), el consumo total de los procesos de mezclado de betún, áridos y caucho es de **120,15 MJ/m²**.

A continuación, se muestra una tabla resumen con el inventario de consumos asociados con la fase de construcción de la carretera con la mezcla con betún mejorado con caucho expresados en MJ/m², kWh/m² y tkm/m².

Tabla 19. Inventario de consumos asociados a la fase de construcción de la carretera con caucho.

Procesos de la fase de reciclado y reposición	Valor	Unidad
Material construido	1,114	t/m ²
Fabricación polvo de caucho + betún mejorado con caucho	0,144	MJ/m ²
Fabricación mezcla de rodadura e intermedia	120,29	MJ/m ²
Transporte de materiales desde la planta a la obra	36,9	tkm/m ²
Puesta en obra (extendido y compactación)	13,39	MJ/m ²
Riego de imprimación (fabricación electricidad)	0,00098	kWh/m ²
Riego de imprimación (fabricación combustible)	0,00080	kWh/m ²
Riego de imprimación (puesta en obra)	0,15308	kWh/m ²
Riego de imprimación (transporte)	0,08800	tkm/m ²
Riego de adherencia (fabricación electricidad)	0,00045	kWh/m ²
Riego de adherencia (fabricación combustible)	0,00070	kWh/m ²
Riego de adherencia (puesta en obra)	0,00535	kWh/m ²
Riego de adherencia (transporte)	0,15308	tkm/m ²

4.2.2. Fase de fresado y reposición

En esta etapa se han tenido en cuenta los mismos impactos que los considerados en la carretera con la mezcla convencional, con la excepción del impacto asociado a la fabricación del material de reposición que se realiza con la misma composición y maquinaria que la fase de construcción de la mezcla con caucho, siendo un total de 0,0052 t/m² de betún, 0,1093 t/m² de áridos y 0,0006 t/m² de caucho. Los materiales se han mezclado a 165°C en una mezcladora cuyo consumo de combustible diésel es de 8,88 L/t, siendo el consumo total del proceso de mezclado de betún, áridos y caucho de 39,08 MJ/m².

A continuación, se muestra una tabla resumen con el inventario de consumos asociados con la fase de fresado y reposición expresados en MJ/m², kWh/m² y tkm/m².

Tabla 20. Inventario de consumos asociados a la fase de fresado y reposición de la carretera con caucho.

Procesos de la fase de fresado y reposición	Valor	Unidad
Material retirado	0,115	t/m ²
Consumo energético fresadora	25,26	MJ/m ²
Consumo energético barredora	3,21	MJ/m ²
Transporte residuo generado	4,6	tkm/m ²
Fabricación mezcla de reposición	39,08	MJ/m ²
Transporte mezcla de reposición	4,6	tkm/m ²
Puesta en obra (extendido)	2,99	MJ/m ²
Riego de adherencia (fabricación electricidad)	0,00039	kWh/m ²
Riego de adherencia (fabricación combustible)	0,00306	kWh/m ²
Riego de adherencia (puesta en obra)	0,15308	kWh/m ²
Riego de adherencia (transporte)	0,03576	tkm/m ²

4.2.3. Fase de demolición

El inventario de esta fase es igual al considerado en la mezcla convencional (ver *tabla 16*).

5. CÁLCULO DE LOS RESULTADOS DE LA EVALUACIÓN DE IMPACTO DE LA HUELLA AMBIENTAL

Una vez compilados los inventarios, se procede a la evaluación del ciclo de vida de ambas carreteras (la fabricada con betún mejorado con caucho y la convencional), es decir, la tercera etapa formal del ACV, donde se obtienen los resultados ambientales de todos los procesos y etapas en función de las categorías de impacto seleccionadas, en este caso las englobadas en el cálculo de HA del método ILCD 2011 *midpoint* (EF 2.0).

Como se destacó anteriormente, los indicadores de impacto *midpoint* derivados de este método tienen la capacidad de definir el impacto ambiental, pero sin llegar a identificar el daño que pueden causar al hombre, a la naturaleza o a los recursos, tal y como reflejan los indicadores *endpoint*. Son impactos de efecto intermedio, cuantificando el efecto ambiental del proceso sobre las distintas categorías seleccionadas [15].

A continuación, se presentan los resultados totales comparados en tablas: en primer lugar los procesos completos referidos a la unidad de impacto y, posteriormente, los referidos a la unidad funcional en cada uno de los casos ($m^2 \cdot \text{año}$). En el anexo se presentan los resultados de forma que queden diferenciadas los diferentes procesos y materiales en cada una de las mezclas.

Finalmente, se presenta una figura comparativa porcentual con la mejora o empeoramiento de cada categoría con respecto a la mezcla convencional para el caso de la carretera con betún mejorado con caucho.

En el apartado 6 se realiza un análisis de sensibilidad modificando la vida útil de la carretera fabricada con la mezcla de betún mejorado con caucho, variable crítica en este tipo de proceso, desde los 32 a los 20 años con intervalo de 2 años para ver cómo afectaría una ampliación o disminución del horizonte temporal.

Tabla 21. Resultados ambientales TOTALES de la carretera convencional y la carretera con caucho.

Categoría de impacto (unidad)*	GWP (kg CO ₂ eq)	ODP (kg CFC-11 eq)	IRP (Bq U ²³⁵ eq)	POFP (kg NMVOC eq)	RIP (DI)	HTP _{nc} (CTUh)	HTP _c (CTUh)	ACP (mol H ⁺)	FEP (kg P eq)	MEP (kg N eq)	TEP (mol N eq)	FECp (CTUe)	LUP (Pt)	WDP (m ³)	RU _{ec} (J)	RU _{mm} (Kg Sb eq)
<i>Mezcla</i>																
Convencional	93,95	2,62E-04	12,24	1,13E+00	1,25E-05	5,63E-06	1,03E-06	6,39E-01	5,78E-03	2,69E-01	2,93	51,97	208,20	5251,48	3079,43	2,55E-04
Caucho	62,25	1,51E-04	8,67	7,02E-01	7,77E-06	3,97E-06	7,20E-07	4,15E-01	4,26E-03	1,73E-01	1,89	34,94	164,05	3919,37	1896,62	1,68E-04

*ACP: Acidificación; WDP: Agotamiento de Recursos (Agua); ODP: Agotamiento de Ozono; RU: Agotamiento de Recursos (ec: energéticos; mm: minerales y metales); GWP: Cambio Climático; FECp: Ecotoxicidad agua dulce; HTP_c: Efectos en la salud humana (cancerígenos); HTP_{nc}: Efectos en la salud humana (no cancerígenos); RIP: Elementos respiratorios inorgánicos; FEP: Eutrofización agua dulce; MEP: Eutrofización marina; TEP: Eutrofización terrestre; POFP: Formación de ozono fotoquímico; IRP: Radiación ionizante (humana); LUP: Uso del terreno.

Tabla 22. Resultados ambientales por unidad de referencia (m² · año) de la carretera convencional y la carretera con caucho.

Categoría de impacto (unidad)	GWP (kg CO ₂ eq)	ODP (kg CFC-11 eq)	IRP (Bq U ²³⁵ eq)	POFP (kg NMVOC eq)	PMFP (DI)	HTP _{nc} (CTUh)	HTP _c (CTUh)	AP (mol H ⁺)	FEP (kg P eq)	MEP (kg N eq)	TEP (mol N eq)	FETp (CTUe)	LUP (Pt)	WDP (m ³)	RU _{ec} (J)	RU _{mm} (Kg Sb eq)
<i>Mezcla</i>																
Convencional	4,70	1,31E-05	6,12E-01	5,63E-02	6,27E-07	2,81E-07	5,14E-08	3,19E-02	2,89E-04	1,35E-02	1,47E-01	2,60E+00	10,41	262,57	153,97	1,28E-05
Caucho	2,07	5,03E-06	2,89E-01	2,34E-02	2,59E-07	1,32E-07	2,40E-08	1,38E-02	1,42E-04	5,77E-03	6,29E-02	1,16E+00	5,47	130,65	63,22	5,60E-06

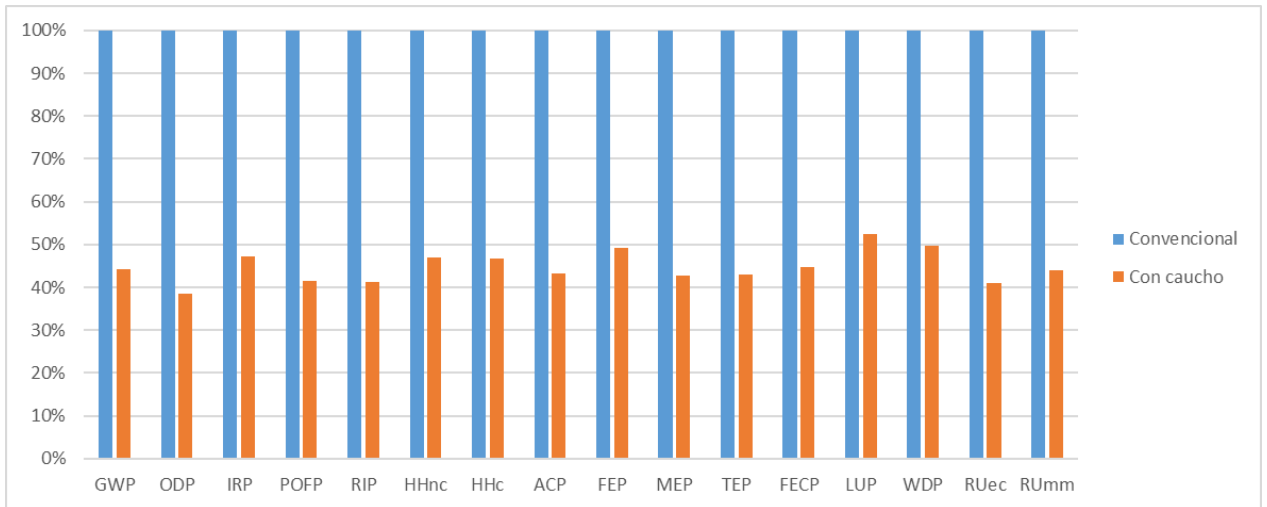


Figura 1. Comparativa porcentual sobre la carretera convencional para cada categoría de impacto con la vida máxima en cada caso

5.1. Limitaciones de los resultados con el objetivo y alcance

Estos resultados reflejan solamente los impactos potenciales de los procesos de construcción y rehabilitación sin considerar la totalidad de materiales o procesos completos como la adecuación del terreno, pintado, señalización, etc., ya que el objetivo del estudio es determinar la comparación entre las mezclas convencionales y una mezcla con betún mejorado con caucho y los procesos que son completamente iguales no aportan información adicional relevante para la consecución del mismo. Otras limitaciones del estudio recaen en que la mayoría de datos se han basado principalmente en la base de datos ecoinvent o adaptaciones de la misma por lo que, aunque es una de las más utilizadas por las comunidad científica, potente y de calidad, no deja de tener su grado de incertidumbre al no considerar datos directos de fabricación.

6. INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS DE HUELLA AMBIENTAL

6.1. Discusión de los resultados

En la Figura 1 se puede observar que, una vez comparados los impactos ambientales de ambos tipos de carreteras objeto de estudio de este ACV, se puede comprobar que existe una notable disminución en **todas las categorías de impacto cuando la carretera se fabrica con betún mejorado con caucho comparado con una carretera convencional.**

Esto es debido principalmente al aumento de la vida útil de las carreteras cuando se incorpora caucho procedente del neumático que hace que las operaciones de mantenimiento o rehabilitación sean menores, no siendo necesario realizar microaglomerados o reciclados.

Asimismo, el proceso de preparación del caucho para que luego pueda ser usado para la fabricación del ligante afecta de forma despreciable.

6.2. Evaluación de la calidad de los datos

Los datos recopilados en el inventario provienen de datos reales de cantidades de materiales para la fabricación de mezclas para la construcción de carreteras. Los datos de fabricación del polvo de caucho a partir del neumático al final de su vida útil han sido suministrados directamente por la empresa SIGNUS Ecovalor. Los datos de maquinaria empleada, transporte y diferentes características técnicas proceden de otros proyectos adecuados para la extrapolación de los mismos a este estudio. No obstante, los procesos aguas arriba como la extracción de materias primas y otros procesos de fabricación, se han elegido de bibliografía específica y base de datos internacionalmente reconocidas comoecoinvent, lo que confiere un grado de calidad elevado en la evaluación de este proceso.

6.3. Transparencia e incertidumbre

En cuanto a la transparencia en términos de juicios de valor y justificaciones, se ha perseguido por todos los medios la obtención de un grado de confianza elevado para la obtención de datos para compilar el inventario, como ha sido el caso, ya que la mayoría proceden de datos reales de empresas y otros proyectos ejecutados.

Cuando no ha sido posible establecer una aseveración con un grado alto de confianza se ha recurrido a realizar suposiciones, juicios de valor e hipótesis basadas en la experiencia en la realización de estudios de ACV por parte de los autores.

6.4. Análisis de sensibilidad

Dado que el horizonte temporal de vida útil de la mezcla con betún mejorado con caucho puede variar respecto de una mezcla convencional, se ha decidido realizar un **análisis de sensibilidad modificando la vida útil de la carretera** fabricada con mezclas de betún mejorado con caucho, variable crítica en este tipo de proceso, desde los 32 años de vida útil a los 20 años de vida útil (coincidiendo con la durabilidad de una carretera convencional) con intervalo de 2 años para poder observar cómo afectaría una ampliación o disminución del horizonte temporal.

La siguiente tabla muestra el porcentaje de reducciones en cada una de las categorías de impacto con respecto a la mezcla convencional.

Tabla 23. Porcentaje de reducción de cada categoría de impacto con diferentes horizontes temporales de la mezcla con betún mejorado con caucho respecto de una carretera convencional.

Categoría de impacto / Años	32	30	28	26	24	22	20
GWP	58,6%	55,8%	52,7%	49,0%	44,8%	39,8%	33,7%
ODP	63,9%	61,5%	58,8%	55,6%	51,9%	47,6%	42,3%
IRP	55,7%	52,8%	49,4%	45,5%	41,0%	35,6%	29,2%
POFP	61,0%	58,4%	55,4%	52,0%	48,0%	43,3%	37,6%
RIP	61,3%	58,7%	55,8%	52,4%	48,4%	43,7%	38,1%
HH _{nc}	55,9%	52,9%	49,6%	45,7%	41,2%	35,8%	29,4%
HH _c	56,2%	53,3%	50,0%	46,1%	41,7%	36,4%	30,0%
ACP	59,4%	56,7%	53,6%	50,0%	45,8%	40,9%	35,0%
FEP	53,9%	50,9%	47,4%	43,3%	38,6%	33,0%	26,3%
MEP	59,9%	57,2%	54,1%	50,6%	46,5%	41,6%	35,8%
TEP	59,8%	57,1%	54,0%	50,5%	46,4%	41,5%	35,7%
FECP	58,0%	55,2%	52,0%	48,3%	44,0%	38,9%	32,8%
LUP	50,8%	47,5%	43,7%	39,4%	34,3%	28,4%	21,2%
WDP	53,4%	50,2%	46,7%	42,6%	37,8%	32,2%	25,4%
RU _{ec}	61,5%	58,9%	56,0%	52,6%	48,7%	44,0%	38,4%
RU _{mm}	58,8%	56,1%	53,0%	49,3%	45,1%	40,1%	34,1%

Con este análisis se demuestra la mejora medioambiental de las mezclas con betún mejorado con caucho en todas las estimaciones de muestras temporales, llevando incluso a mejorar entre un 20-40% cuando la vida útil se iguala a la de las convencionales.

7. CONCLUSIONES

En este estudio que lleva por título: ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA COMPARATIVO DE UNA CARRETERA FABRICADA CON UNA MEZCLA CON BETÚN MEJORADO Y UNA CARRETERA CONVENCIONAL, se ha podido comprobar que existe una notable disminución en **todas las categorías de impacto cuando la carretera se fabrica con betún mejorado con caucho comparado con una carretera convencional.**

En este estudio se ha usado un Análisis de Ciclo de Vida (ACV) para comparar los impactos medioambientales de una carretera convencional y una carretera que lleva en su capa de rodadura una mezcla con betún mejorado con caucho. Como resultados se presentan los valores obtenidos en todas las categorías determinadas en el método ILCD 2011 midpoint recomendado en la guía de Huella Ambiental (HA) y desarrollada por la Comisión Europea.

Asimismo, en este proyecto se ha realizado un análisis de sensibilidad modificando la vida útil de la carretera fabricada con mezclas de betún mejorado con caucho, variable crítica en este tipo de proceso, desde los 32 a los 20 años con intervalo de 2 años para ver cómo afectaría una ampliación o disminución del horizonte temporal.

Los resultados obtenidos muestran que para la categoría de Cambio climático (GWP), medido en kg equivalente de CO₂, las carreteras con betún mejorado son capaces de disminuir en un 56% dichas emisiones cuando se considera una vida útil de las mismas de 30 años. Y es remarcable observar que cuando se considera que la vida útil de ambas carreteras objeto de estudio fuera la misma (20 años), el ahorro sigue siendo considerable, en concreto de un 34%.

Otras categorías de impacto que se ven notablemente mejoradas con la incorporación del caucho a las mezclas son la categoría de agotamiento de la capa de ozono (ODP) y la de partículas/sustancias inorgánicas con efectos respiratorios (RIP). También se puede observar a partir de los resultados presentados que la mejoría en todas las categorías es notable, variando estos entre un 48-61% cuando se considera que la vida útil de la carretera con betún mejorado es de 30 años y variando entre un 21-42 % aun considerando una misma vida útil de 20 años.

Este estudio también muestra que **el proceso de fabricación del polvo de caucho a partir del NFVU para que luego pueda ser usado para la fabricación del ligante se puede considerar que afecta de una forma despreciable.**

En los Anexos que se adjuntan se puede observar que, para ambos casos de estudio, la mayor contribución para todas las categorías de impacto consideradas es la de la etapa de construcción de las carreteras, debido a la producción de betún, al consumo de combustible para el proceso de mezcla de asfalto y al transporte, pero en ningún caso debido al caucho.

Estos notables beneficios ambientales asociados a la incorporación del caucho son debidos principalmente a que, gracias a las excelentes y más que estudiadas propiedades de este tipo de mezclas, tienen una mayor vida útil y requieren de menos operaciones de mantenimiento a lo largo de su existencia.

Finalmente, los resultados mencionados anteriormente dan una indicación positiva sobre la sostenibilidad ambiental del uso del polvo de caucho procedente de NFVU en la construcción de mezclas asfálticas para carreteras respaldando así la necesidad y utilidad de seguir gestionando e implementando el uso del polvo de caucho en la construcción de carreteras.

8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] D. Lo Presti, "Recycled Tyre Rubber Modified Bitumens for road asphalt mixtures: A literature review," *Constr. Build. Mater.*, vol. 49, pp. 863-881, 12, 2013.
- [2] R. R. Ruth BE, "Crumb rubber modifier (CRM) in asphalt pavements," in *Proceedings of the Transportation Congress*, 1995, pp. p. 768–85.
- [3] L. S. Liang RY, "Short-term and long-term aging behavior of rubber modified asphalt paving mixtures," *Transport Res Rec: J Transport Res Board*, vol. 1530:11–7., 1996.
- [4] J. Gallego *et al*, "Thermal sensitivity and fatigue life of gap-graded asphalt mixes incorporating crumb rubber from tire waste," *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, vol. 1998, pp. 132-139, 2007.
- [5] F. Moreno *et al*, "The effect of crumb rubber modifier on the resistance of asphalt mixes to plastic deformation," *Mater Des*, vol. 47, pp. 274-280, 5, 2013.
- [6] N. Abdul Hassan *et al*, "Microstructural characterisation of dry mixed rubberised asphalt mixtures," *Construction and Building Materials*, vol. 82, pp. 173-183, 2015. . DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.02.015>.
- [7] K. Aoudia *et al*, "Recycling of waste tire rubber: Microwave devulcanization and incorporation in a thermoset resin," *Waste Management*, vol. 60, pp. 471-481, 2017. . DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.10.051>.
- [8] S. Poovaneshvaran, M. R. Mohd Hasan and R. Putra Jaya, "Impacts of recycled crumb rubber powder and natural rubber latex on the modified asphalt rheological behaviour, bonding, and resistance to shear," *Construction and Building Materials*, vol. 234, pp. 117357, 2020. . DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117357>.
- [9] F. Moreno, M. C. Rubio and M. J. Martinez-Echevarria, "Analysis of digestion time and the crumb rubber percentage in dry-process crumb rubber modified hot bituminous mixes," *Construction and Building Materials*, vol. 25, (5), pp. 2323-2334, 2011. . DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.11.029>.
- [10] Leiva-Villacorta, F., Vargas-Nordbeck, A. Mejores prácticas para diseñar mezclas asfálticas con pavimento asfáltico recuperado (RAP), *Revista Infraestructura Vial / LanammeUCR* ISSN: 1409-4045 - ISSN electrónico: 2215-3705 / Volumen 19 / Número 33 / Julio, 2017 / p.p. 35-44. (<https://www.scielo.sa.cr/pdf/infraestructura/v19n33/2215-3705-infraestructura-19-33-35.pdf>)
- [11] ISO 14040:2006, Gestión ambiental. Análisis del ciclo de vida. Principios y marco de referencia.
- [12] ISO 14044:2006, Gestión ambiental. Análisis de ciclo de vida. Requisitos y directrices.

[13] DOUE. Recomendación de la Comisión de 9 de abril de 2013 sobre el uso de métodos comunes para medir y comunicar el comportamiento ambiental de los productos y las organizaciones a lo largo de su ciclo de vida, 04/05/2013, L124-1-205, <http://www.boe.es/doue/2013/124/L00001-00210.pdf>

[14] EC-JRC-IES. European Commission-Joint Research Centre - Institute for Environment and Sustainability: International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook- Recommendations for Life Cycle Impact Assessment in the European context. First edition November 2011. EUR 24571 EN. Luxemburg. Publications Office of the European Union; 2011, <http://eplca.jrc.ec.europa.eu/uploads/ILCD-Recommendation-of-methods-for-LCIA-def.pdf>

[15] Moral, A. La herramienta ambiental análisis de ciclo de vida en el estudio de secciones de firme. Evaluación ambiental de varias secciones de firme de categoría de tráfico T00 a T2 conforme a la norma 6.1-IC. Tesis doctoral, Universidad Alfonso X el Sabio, Escuela Politécnica Superior, 2016.

ANEXO: Resultados completos por materiales y etapas

Tabla A1. Resultados ambientales totales de la carretera convencional por etapas.

Categoría de impacto (unidad)*	GWP (kg CO ₂ eq)	ODP (kg CFC-11 eq)	IRP (Bq U ²³⁵ eq)	POFP (kg NMVOC eq)	RIP (DI)	HTP _{nc} (CTUh)	HTP _c (CTUh)	ACP (mol H ⁺)	FEP (kg P eq)	MEP (kg N eq)	TEP (mol N eq)	FECP (CTUe)	LUP (Pt)	WDP (m ³)	RU _{ec} (J)	RU _{mm} (Kg Sb eq)
<i>Etapas</i>																
Construcción	32,04	1,13E-04	6,02	0,41	4,21E-06	2,06E-06	3,84E-07	2,12E-01	2,18E-03	8,91E-02	9,71E-01	18,95	103,69	2634,96	1225,65	1,60E-04
Microaglom.	0,64	4,86E-06	0,12	0,01	3,02E-08	4,21E-08	7,08E-09	2,34E-03	2,38E-05	1,11E-03	1,17E-02	0,56	1,28	40,94	40,75	3,53E-06
Fresado	10,11	3,76E-05	1,13	0,14	1,47E-06	5,37E-07	9,92E-08	6,99E-02	4,90E-04	3,01E-02	3,26E-01	5,60	14,89	433,58	394,00	2,94E-05
Reciclado	31,63	1,02E-04	3,43	0,42	4,98E-06	1,62E-06	3,05E-07	2,30E-01	1,54E-03	9,89E-02	1,07E+00	16,31	43,29	1294,01	1126,18	8,14E-05
Demolición	19,54	3,64E-06	1,54	0,15	1,85E-06	1,37E-06	2,33E-07	1,25E-01	1,54E-03	5,02E-02	5,49E-01	10,57	45,04	847,98	292,84	4,13E-05
Total	93,95	2,62E-04	12,24	1,13	1,25E-05	5,63E-06	1,03E-06	6,39E-01	5,78E-03	2,69E-01	2,93E+00	51,97	208,20	5251,48	3079,43	3,16E-04

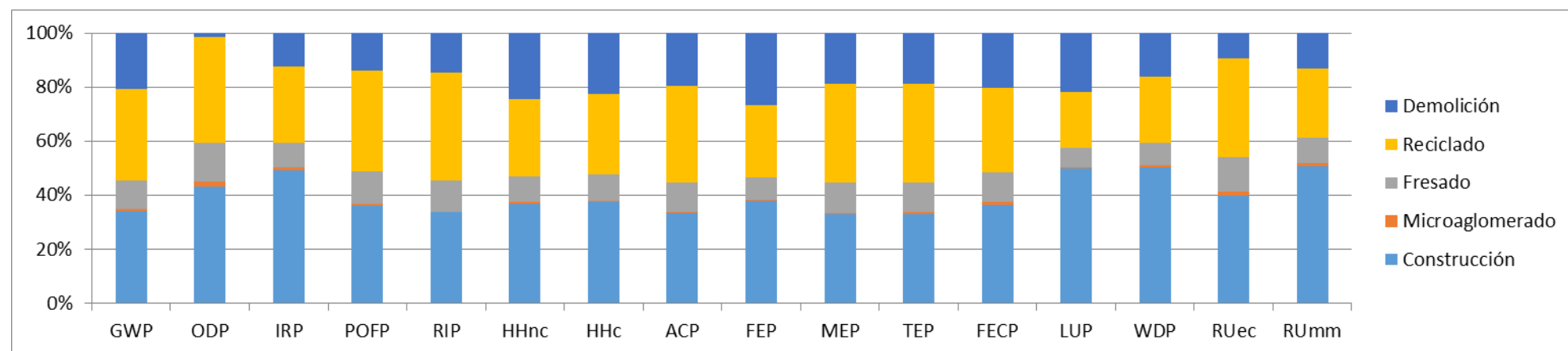


Figura A1. Resultados ambientales porcentuales de la mezcla convencional por etapas.

Tabla A2. Resultados ambientales totales de la carretera con caucho por etapas.

Categoría de impacto (unidad)*	GWP (kg CO ₂ eq)	ODP (kg CFC-11 eq)	IRP (Bq U ²³⁵ eq)	POFP (kg NMVOC eq)	RIP (DI)	HTP _{nc} (CTUh)	HTP _e (CTUh)	ACP (mol H*)	FEP (kg P eq)	MEP (kg N eq)	TEP (mol N eq)	FECF (CTUe)	LUP (Pt)	WDP (m ³)	RU _{ec} (J)	RU _{mm} (Kg Sb eq)
<i>Etapas</i>																
Construcción	32,79	1,13E-04	6,04	4,16E-01	4,42E-06	2,08E-06	3,90E-07	2,20E-01	2,22E-03	9,26E-02	1,01E+00	19,09	104,05	2645,85	1236,19	9,97E-05
Fresado	9,91	3,40E-05	1,08	1,32E-01	1,50E-06	5,23E-07	9,73E-08	7,06E-02	4,96E-04	3,03E-02	3,28E-01	5,28	14,96	425,54	367,59	2,71E-05
Demolición	19,54	3,64E-06	1,54	1,55E-01	1,85E-06	1,37E-06	2,33E-07	1,25E-01	1,54E-03	5,02E-02	5,49E-01	10,57	45,04	847,98	292,84	4,13E-05
Total	62,25	1,51E-04	8,67	7,02E-01	7,77E-06	3,97E-06	7,20E-07	4,15E-01	4,26E-03	1,73E-01	1,89E+00	34,94	164,05	3919,37	1896,62	1,68E-04

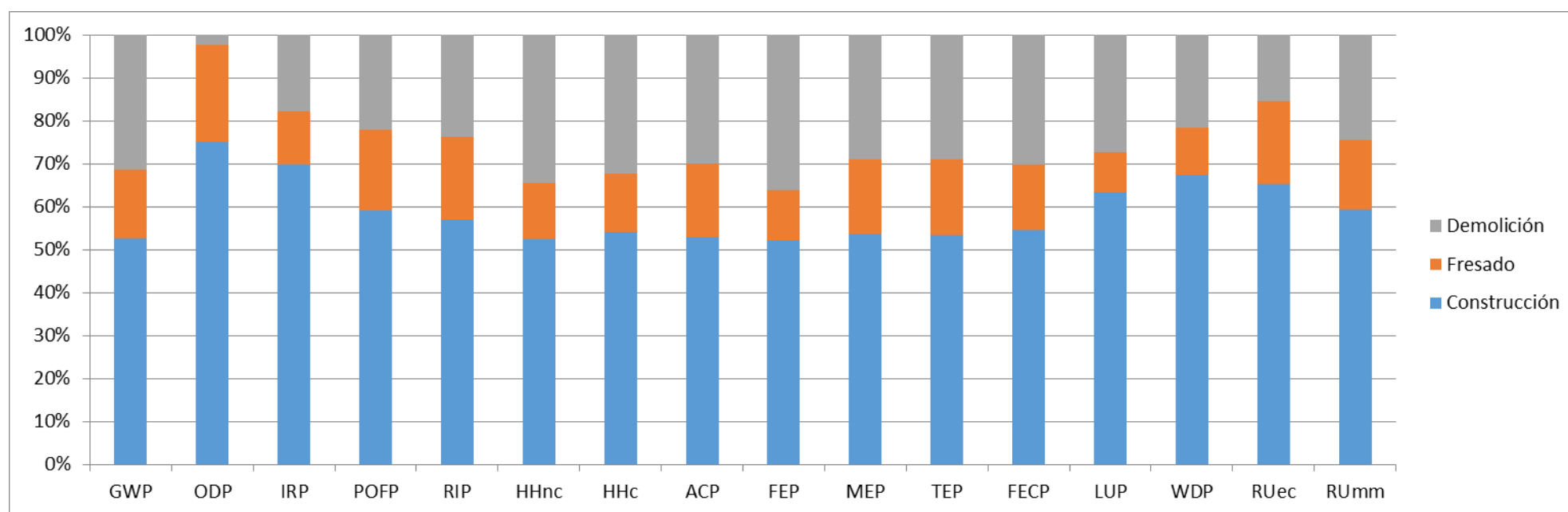


Figura A2. Resultados ambientales porcentuales de la carretera con caucho por etapas.

Tabla A3. Resultados ambientales totales de la mezcla convencional por materiales y/o procesos.

Categoría de impacto (unidad)*	GWP (kg CO ₂ eq)	ODP (kg CFC-11 eq)	IRP (Bq U ²³⁵ eq)	POFP (kg NMVOC eq)	RIP (DI)	HTP _{nc} (CTUh)	HTP _c (CTUh)	ACP (mol H*)	FEP (kg P eq)	MEP (kg N eq)	TEP (mol N eq)	FECp (CTUe)	LUP (Pt)	WDP (m ³)	RU _{ec} (J)	RU _{mm} (Kg Sb eq)
<i>Etapa</i>																
Betún	23,57	2,49E-04	3,44	4,06E-01	5,68E-07	1,32E-06	2,07E-07	5,85E-02	3,81E-05	3,33E-02	3,37E-01	23,43	0,00	692,72	1943,17	1,60E-04
Áridos	4,35	5,63E-07	4,57	3,48E-02	6,91E-07	7,48E-07	1,57E-07	3,56E-02	1,36E-03	1,15E-02	1,37E-01	2,71	109,59	2442,00	99,97	1,43E-05
Riego imp.	0,88	9,11E-07	0,53	4,28E-03	2,89E-08	7,03E-08	1,20E-08	6,34E-03	8,24E-05	8,91E-04	9,56E-03	0,76	1,14	118,93	54,46	4,38E-07
Riego adh.	0,40	4,52E-07	0,05	2,68E-03	1,90E-08	3,37E-08	4,68E-09	5,11E-03	7,53E-05	5,22E-04	5,62E-03	0,29	1,00	23,27	40,48	1,31E-07
Diésel	37,21	5,77E-06	1,06	5,08E-01	1,01E-05	1,22E-06	2,83E-07	3,93E-01	1,79E-03	1,69E-01	1,85E+00	6,92	17,71	537,67	520,10	5,79E-06
Electricidad	0	3,84E-10	0	5,38E-06	7,21E-12	1,58E-10	6,21E-11	3,29E-06	2,23E-08	1,74E-06	1,89E-05	0	0	0	0,04	0
Transporte	27,55	5,38E-06	2,59	1,70E-01	1,13E-06	2,24E-06	3,64E-07	1,41E-01	2,43E-03	5,43E-02	5,94E-01	17,86	78,76	1436,89	421,21	7,46E-05
Total	97,41	2,62E-04	12,34	1,17E+00	1,35E-05	5,74E-06	1,05E-06	6,75E-01	5,94E-03	2,85E-01	3,10E+00	52,62	209,84	5301,46	3127,78	2,56E-04

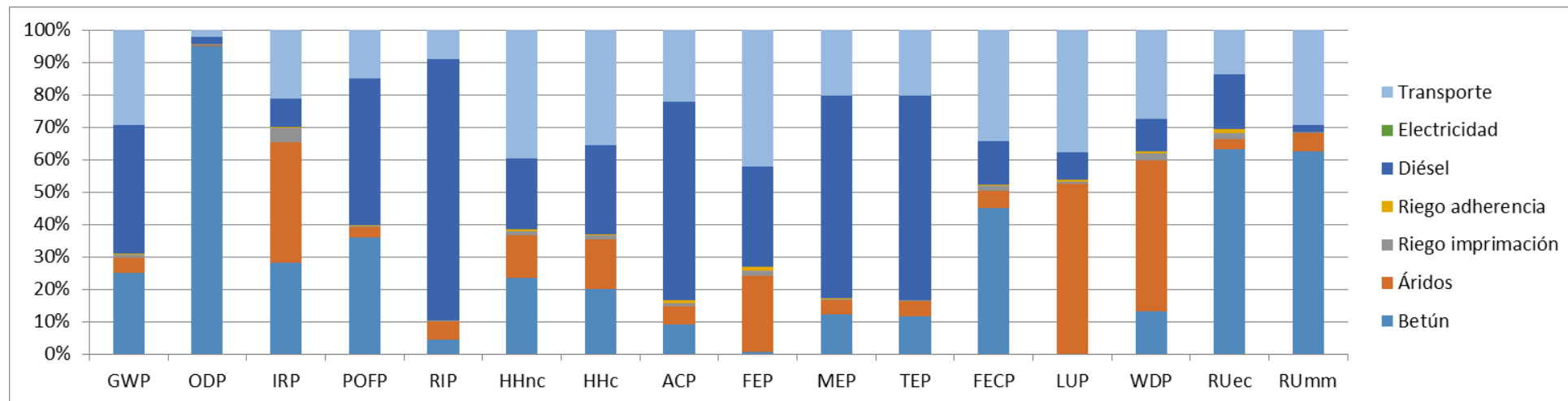


Figura A3. Resultados ambientales porcentuales de la carretera convencional por materiales y/o procesos.

Tabla A4. Resultados ambientales totales de la carretera con caucho por materiales y/o procesos.

Categoría de impacto (unidad)*	GWP (kg CO ₂ eq)	ODP (kg CFC-11 eq)	IRP (Bq U ²³⁵ eq)	POFP (kg NMVOC eq)	RIP (DI)	HTP _{nc} (CTUh)	HTP _c (CTUh)	ACP (mol H ⁺)	FEP (kg P eq)	MEP (kg eq)	TEP (mol N eq)	FECF (CTUe)	LUP (Pt)	WDP (m ³)	RU _{ec} (J)	RU _{mm} (Kg Sb eq)
<i>Etapas</i>																
Betún	13,45	1,42E-04	1,96	2,32E-01	3,24E-07	7,53E-07	1,18E-07	3,34E-02	2,18E-05	1,90E-02	1,92E-01	13,37	0,00	395,39	1109,12	9,13E-05
Áridos	3,46	4,49E-07	3,64	2,77E-02	5,50E-07	5,96E-07	1,25E-07	2,83E-02	1,08E-03	9,15E-03	1,09E-01	2,16	87,30	1945,27	79,63	1,14E-05
Riego imp.	0,44	4,55E-07	0,27	2,14E-03	1,44E-08	3,51E-08	6,00E-09	3,17E-03	4,12E-05	4,45E-04	4,78E-03	0,38	0,57	59,46	27,23	2,19E-07
Riego adh.	0,27	3,01E-07	0,04	1,79E-03	1,27E-08	2,25E-08	3,12E-09	3,40E-03	5,02E-05	3,48E-04	3,75E-03	0,20	0,66	15,51	26,98	8,76E-08
Diésel	21,82	3,38E-06	0,62	2,98E-01	5,93E-06	7,14E-07	1,66E-07	2,30E-01	1,05E-03	9,90E-02	1,08E+00	4,06	10,39	315,38	305,07	3,40E-06
Electricidad	0	2,12E-10	0	2,97E-06	3,98E-12	8,73E-11	3,43E-11	1,81E-06	1,23E-08	9,60E-07	1,04E-05	0	0	0	0,02	0
Transporte	22,78	4,45E-06	2,14	1,41E-01	9,31E-07	1,85E-06	3,01E-07	1,16E-01	2,01E-03	4,49E-02	4,91E-01	14,77	65,12	1188,05	348,26	6,17E-05
Caucho	0,02	3,33E-09	0,00	2,93E-04	5,83E-09	7,03E-10	1,63E-10	2,26E-04	1,03E-06	9,74E-05	1,07E-03	0	0,01	0,31	0,30	3,34E-09
Total	62,25	1,51E-04	8,67	7,02E-01	7,77E-06	3,97E-06	7,20E-07	4,15E-01	4,26E-03	1,73E-01	1,89E+00	34,94	164,05	3919,37	1896,62	1,68E-04

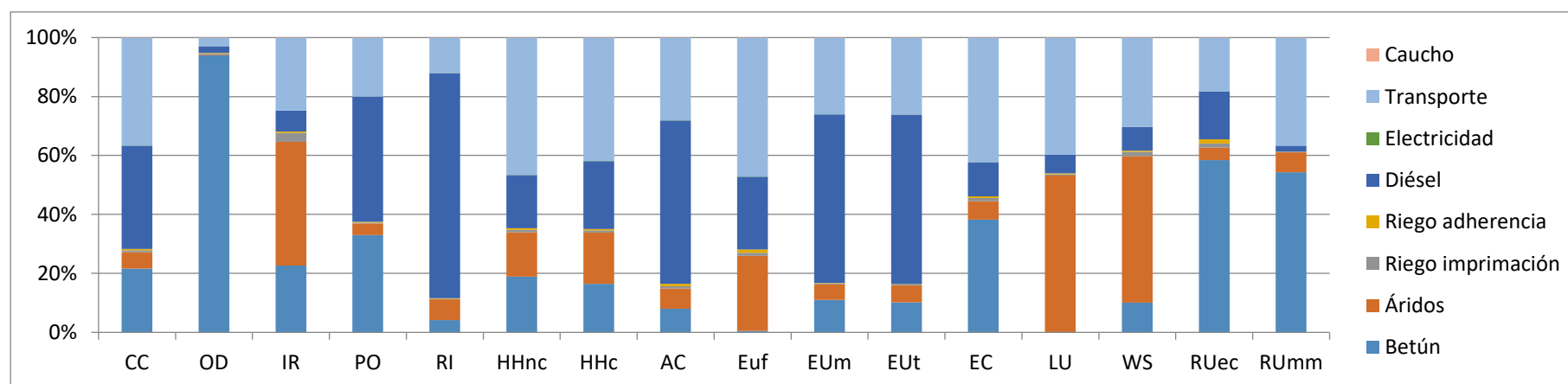


Figura A4. Resultados ambientales porcentuales de la carretera con caucho por materiales y/o procesos.



SIGNUS

SISTEMA COLECTIVO DE GESTIÓN DE NEUMÁTICOS FUERA DE USO