



premio internacional
A LA INNOVACIÓN EN CARRETERAS

JUAN ANTONIO FERNÁNDEZ DEL CAMPO

Séptima
Edición
2017 • 2018

CONVOCA:

 **Fundación**
Asociación Española de la Carretera

Texto completo del trabajo:

Determinación de la huella de carbono de las mezclas asfálticas en caliente y sus técnicas sostenibles

Autor:

Ángel Sampedro Rodríguez, Profesor e investigador en el área de Ingeniería de Carreteras de la Escuela Politécnica de la Universidad Alfonso X el Sabio (UAX)

Publicado como artículo en el número Especial de la Revista Carreteras 225 (julio/agosto 2019)



VII EDICIÓN #VIIPremioJAFC

TRABAJO DE INVESTIGACIÓN (Documento de síntesis):

DETERMINACIÓN DE LA HUELLA DE CARBONO DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE Y SUS TÉCNICAS SOSTENIBLES



Madrid (España), 2018

Resumen

El presente trabajo de investigación ha consistido en el desarrollo de una metodología específica que, basada en datos reales y contrastados, permite calcular la huella de carbono de las mezclas bituminosas, con el objeto final de determinar las emisiones de gases de efecto invernadero que implican estos materiales, con perspectiva de análisis del ciclo de vida, y poder analizar así las posibles ventajas ambientales que puede suponer el empleo de técnicas más sostenibles que las habitualmente empleadas, las mezclas bituminosas o asfálticas en caliente, en la pavimentación de carreteras.

Dentro de estas técnicas sostenibles se han analizado, por un lado, el empleo de distintos porcentajes de asfalto recuperado, procedente del fresado y retirada de mezclas bituminosas envejecidas, para la fabricación de mezclas nuevas.

Y, por otro lado, también se han evaluado las posibles ventajas ambientales que, aplicando la metodología desarrollada, supone la fabricación de mezclas bituminosas a menores temperaturas que las mezclas en caliente, analizando las mezclas semicalientes, templadas y en frío.

Palabras clave: sostenibilidad, mezclas bituminosas, mezclas asfálticas, cambio climático, huella de carbono.

Abstract

This research work has consisted of the development of a specific methodology based on real and verified data that allows the carbon footprint of the asphalt mixtures to be calculated with the final objective of determining the emissions of greenhouse gases involving this materials, with a life cycle analysis prospect, and to be able to analyze the possible environmental advantages that may be involved in the use of more sustainable techniques than those normally used, hot mix asphalt, in road paving.

Within these sustainable techniques have been analyzed, on the one hand, the use of different percentages of reclaimed asphalt pavement for the mixing of new mixtures.

Furthermore, the possible environmental advantages that, applying the methodology developed, the production of bituminous mixtures at lower temperatures than the hot mix asphalt, analyzing warm mix asphalt, half-warm mix asphalt, and cold mix asphalt have also been evaluated.

Key words: sustainability, asphalt, bitumen, climate change, carbon footprint.

INDICE:

CAPITULO 1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS	6
1.1 Introducción	6
1.2 Objetivos.....	7
1.3 ACV. Riesgos e incertidumbres	10
CAPITULO 2. EL ACV PARA MEZCLAS BITUMINOSAS.....	12
2.1 Introducción	12
2.2 Fases del ACV para mezclas bituminosas.....	12
2.3 Fase I: Definición de objetivos y alcance del estudio.....	13
2.4 Fase II: Análisis del inventario del ciclo de vida (AICV) o inventario del ciclo de vida (ICV).....	23
2.5 Fase III: Evaluación de impacto del ciclo de vida (EICV).....	24
2.6 Fase IV: Presentación e interpretación	24
2.7 Fase V: Revisión crítica.....	24
CAPITULO 3. AICV Y EICV DE HCP PARA MEZCLAS BITUMINOSAS.....	26
3.1 Introducción	26
3.2 Recopilación y validación de datos	26
3.3 Consideraciones previas	28
3.4 Relación de los datos con los procesos unitarios y la unidad funcional	28
3.5 Factores de emisión	29
3.6 Asignación subsistema 1: Extracción y procesamiento de los áridos.....	30
3.7 Subsistema 2: Polvo mineral.....	33
3.8 Subsistema 3: Producción del ligante asfáltico.....	35

3.9 Subsistema 4: Planta asfáltica	37
3.10 Subsistema 5: Puesta en obra de las mezclas bituminosas	39
3.11 Subsistema 6: Conservación y rehabilitación.....	40
3.12 Subsistema 7: Demolición de la mezcla bituminosa	41
3.13 Subsistema 8: Transporte	41
CAPITULO 4. RESULTADOS DE LA HCP MEZCLAS BITUMINOSAS.....	43
4.1 Introducción	43
4.2 Resultados de HCP para mezclas bituminosas	43
4.3 Análisis del Subsistema Transporte de la HCP	44
4.4 Mezclas bituminosas con distintos porcentajes de RAP	46
4.5 Mezclas bituminosas a menor temperatura	47
4.5.1 Mezcla de referencia F1	47
4.5.2 HCP de las mezclas bituminosas semicalientes.....	48
4.5.3 HCP de las mezclas bituminosas templadas	49
4.5.4 HCP de las mezclas bituminosas en frío.....	50
CAPITULO 5. CONCLUSIONES	53

CAPITULO 1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1 Introducción

El presente documento tiene por objeto describir, de forma resumida, el proceso de investigación y desarrollo, así como los resultados obtenidos y su posterior análisis, de la metodología que, de forma específica, ha sido desarrollada por el autor para poder estimar y comparar las posibles ventajas ambientales que puede suponer el empleo de técnicas más sostenibles que las habitualmente empleadas en la fabricación y colocación en obra de las mezclas bituminosas o asfálticas en caliente.

Tal como se establece en las Bases de la *Séptima Edición 2017-2018*, consiste en un documento de síntesis cuya extensión se limita a unas 50 páginas, y es anónimo, sin contener referencias al autor ni a la organización en la que desarrolla su ejercicio profesional.

El trabajo de investigación completo, que se corresponde con la tesis doctoral del autor, ha sido entregado con el resto de documentación solicitada en las citadas Bases. Esta tesis contiene los capítulos correspondientes al estado del arte y de las técnicas estudiadas, así como las referencias empleadas y citadas, como corresponde a este tipo de estudios, así como todo el proceso seguido explicado y analizado en detalle.

El desarrollo de esta metodología ha partido de un objetivo primario, el de realizar la evaluación y comparación de las ventajas ambientales, si las hubiera, cuando, en la construcción de firmes bituminosos para carreteras se emplea la técnica de reciclado en central o en planta, que consiste en la reutilización de distintos porcentajes de material procedente del fresado y retirada de las mezclas bituminosas ya envejecidas. Este material viene denominado por el término *RAP*, correspondiente a las siglas de su definición anglosajona *Reclaimed Asphalt Pavement*.

Posteriormente, dado que la metodología a desarrollar debe ser aplicable a cualquier tipo de mezcla bituminosa y la realización de este trabajo de investigación ha coincidido en el tiempo con el desarrollo e implantación en España de otras técnicas sostenibles en la pavimentación asfáltica, también se han evaluado las posibles ventajas ambientales que, aplicando dicha metodología, pudieran suponer la fabricación de mezclas bituminosas a menores temperaturas que las mezclas en caliente.

Los trabajos de investigación han sido realizados, en su gestación, dentro de un proyecto de investigación que ha supuesto una referencia absoluta en la I+D+i a nivel europeo, dentro del área de la pavimentación de carreteras.

Este proyecto, de cuatro años de duración, fue estructurado en torno a 12 líneas de investigación originales que iban desde el desarrollo de nanomateriales activos para la reducción de las emisiones

de los vehículos, al desarrollo de nuevas tecnologías de producción en plantas asfálticas más eficientes, al desarrollo de nuevas mezclas bituminosas obtenidas mediante procedimientos más amigables con el medio ambiente y más seguras ante el riesgo de accidentes, al desarrollo de sistemas proactivos de la seguridad integrados en la carretera, y al aprovechamiento energético de la irradiación solar sobre el pavimento filtrante.

El objeto de esta descripción es mostrar el privilegiado marco tecnológico e investigador dentro del cual se han desarrollado los trabajos que han dado lugar al presente trabajo, contando con la colaboración de casi todos los agentes del sector, en todo el territorio nacional, y dentro del principal clúster investigador de la historia del sector viario en Europa.

También, durante este mismo periodo y motivado, en parte, por este alto nivel de desarrollo e innovación, se ha producido un cambio sustancial en las prescripciones y normativa vigentes, tanto para las mezclas asfálticas como para la evaluación de la sostenibilidad, a todos los niveles: internacional, europeo, nacional y regional.

Todo ello ha obligado a un continuo estado de revisión y actualización del trabajo de investigación aquí reflejado, el cual podría ser considerado, de alguna manera, un relato parcial, objetivo y razonado de este proceso de cambio normativo y desarrollo de las técnicas analizadas.

1.2 Objetivos

Como ya se ha dicho, el primer objetivo del presente trabajo de investigación ha sido el de desarrollar una metodología específica que, basada en el Análisis del Ciclo de Vida (ACV), permita evaluar y cuantificar las posibles ventajas que presenta, desde el punto de vista de su sostenibilidad ambiental, el **empleo de altas tasas de asfalto recuperado** en la fabricación de mezclas bituminosas en caliente.

Con este objetivo, se ha realizado un análisis de la sostenibilidad ambiental de un producto como son las mezclas bituminosas, basado en datos reales o, en su defecto, valores contrastados, que permita realizar una cuantificación de impactos para, a partir de él, su aplicación y análisis de los resultados obtenidos para mezclas con empleo de distintos porcentajes de RAP.

Hasta el año 2014, la normativa vigente en España permitía el empleo de hasta el 10 por ciento de RAP en la fabricación de las mezclas nuevas, de forma convencional, permitiendo llegar hasta el 50 por ciento en plantas de fabricación específicas y con un tratamiento previo del material a reciclar.

Gracias a los proyectos de investigación y desarrollo que han permitido mostrar las bondades y viabilidad de su empleo, la normativa hoy vigente permite el empleo de material procedente del fresado de mezclas bituminosas envejecidas en mayores proporciones para la fabricación de mezclas

nuevas, según el tipo de capa en el que se empleen, pudiendo llegar, teóricamente, al intervalo 80-100 por cien, en determinadas condiciones.



Figura 1: Planta con doble tambor, para altas tasas.

Las prescripciones técnicas generales hoy vigentes permiten el empleo de porcentajes de RAP de hasta el 15 por ciento, sin prescripciones especiales ni considerarlo reciclado como tal; entre el 15 y el 60 por ciento, fijando condiciones particulares para el proceso de tratamiento del RAP y la planta de fabricación de las mezclas bituminosas en caliente; y llegando a permitir superar el 60 por ciento, en lo que ahora se denominarían *altas tasas de reciclado*, fijando unas condiciones muy especiales.

Sin embargo, en la práctica, la tasa total de RAP empleado no se aproxima a ninguno de esos porcentajes. Si bien es verdad que es conocido el empleo de porcentajes de RAP en el entorno del 10-15 por ciento en casos (obras) muy contados, sin problemas de ningún tipo, cuando se analizan las cifras globales, el porcentaje de reciclado no llega al 3 por ciento sobre el total de mezclas bituminosas fabricadas.

Así, en el año 2014, en España, se fabricaron 14,5 millones de toneladas de mezclas bituminosas, en las cuales, tan sólo se emplearon un total de 390.000 toneladas de asfalto recuperado procedente del RAP, según las estadísticas elaboradas por EAPA (2016), la Asociación Europea de Pavimentación Asfáltica.

El porcentaje global de reciclado es muy inferior al de los países que deberían ser la referencia en este ámbito. Así, en 2014 y según la misma fuente, la tasa global de reciclado en Francia fue del 29 por ciento, en Alemania del 28 por ciento, y en Estados Unidos del 22 por ciento.

Una de las líneas de investigación que se vienen desarrollando desde hace muchos años es el estudio de la viabilidad del empleo de mayores proporciones de material procedente del fresado de mezclas envejecidas, tratando de lograr alcanzar esas *altas tasas de reciclado* (> 60%).

Partiendo de que la metodología a desarrollar debe ser aplicable a cualquier tipo de mezcla bituminosa, se ha decidido aplicarla también, como objetivo secundario del presente trabajo de investigación, a la evaluación ambiental de otras de las técnicas que se han desarrollado en España durante el mismo periodo, las **mezclas bituminosas fabricadas a menores temperaturas**: mezclas semicalientes, mezclas templadas, y mezclas en frío.

Aunque estas últimas están contempladas en la normativa y se vienen aplicando desde hace muchos años, especialmente en vías de baja intensidad de tráfico y aplicaciones puntuales, ha sido recientemente cuando se ha vuelto a replantear su uso a mayor escala, pero ahora justificado por su sostenibilidad económica y ambiental.

Las mezclas bituminosas son unidades de obra fundamentales en la construcción y conservación de los firmes y pavimentos de carreteras, implicando, en el caso de las mezclas bituminosas en caliente (MBC), las usadas de forma convencional, grandes consumos energéticos y emisiones de gases durante su fabricación y puesta en obra. Las *mezclas en caliente (MBC) o hot mix asphalt (HMA)* son aquellas cuya temperatura de fabricación se fija en torno a 165°C, siempre por encima de 150°C.

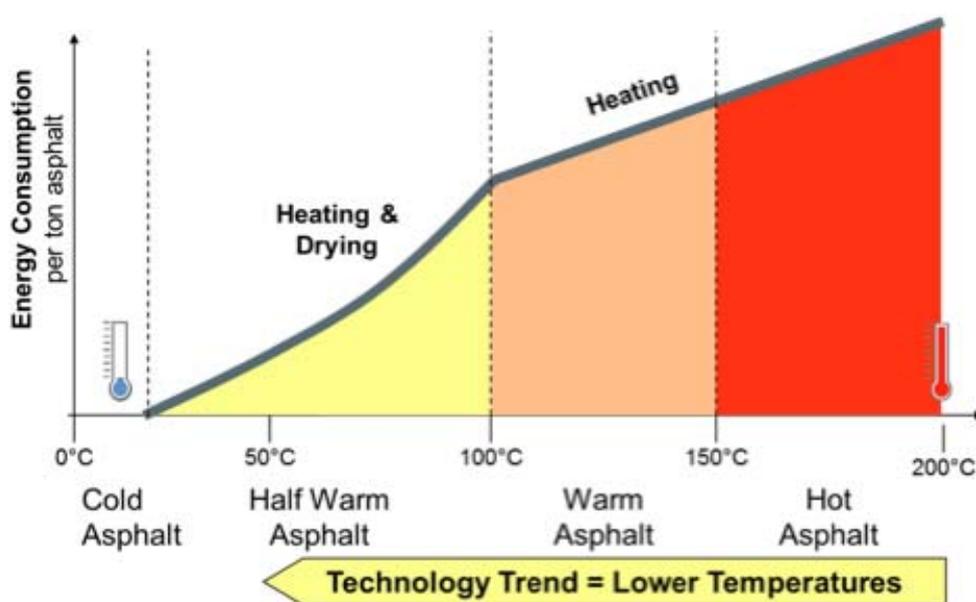


Figura 2: Diagrama de temperaturas de fabricación de las mezclas asfálticas (Fuente: EAPA).

Frente a ellas, las *mezclas semicalientes (MBS) o warm mix asphalt (WMA)* son en las que, mediante el empleo de betunes especiales, aditivos u otros procedimientos, se logra disminuir la temperatura mínima de mezclado en torno a 25-30°C respecto a la mezcla equivalente, de tal forma que sus temperaturas de fabricación se sitúan entre 100 y 140°C.

Otra técnica son las *mezclas templadas (MBT) o half-warm mix asphalt (WMA)*, que son aquellas fabricadas a temperaturas aún menores, entre 50 y 100°C. Este tipo de mezclas pueden fabricarse a partir de betunes asfálticos aditivados o espumados, o empleando como ligante emulsiones bituminosas, siendo estas las dispersiones de pequeñas partículas de un ligante hidrocarbonado (betún) y eventualmente un polímero, en una solución de agua y un agente emulsionante.

Frente a todas ellas, también están las *mezclas bituminosas en frío (MBF) o cold mix asphalt*, que son aquellas en las que no se calientan los componentes, y el proceso de fabricación y puesta en obra

tiene lugar a temperatura ambiente, gracias al empleo también de emulsiones bituminosas como ligante y, eventualmente, aditivos.

Es también a partir de 2014 cuando la normativa española ha empezado a contemplar la reducción de las temperaturas de fabricación de las mezclas bituminosas, en sustitución de las MBC, dejando abierta la posibilidad de empleo de las mezclas semicalientes.

En un nivel más innovador, la Junta de Andalucía ya viene contemplando estas técnicas, incluso las mezclas templadas, desde el año 2012, a través de las Recomendaciones de la Agencia de Obra Pública (2012).

Volviendo a las estadísticas de EAPA (2015), en España, durante el año 2014, de los 14,5 millones de toneladas de mezclas bituminosas fabricadas, tan sólo se produjeron 140.000 toneladas de mezclas semicalientes (0,97%), 5.000 toneladas de mezclas templadas (0,03%), y 150.000 toneladas de mezclas en frío (1,03%).

Estos porcentajes también son muy inferiores al de los países ya citados anteriormente. En 2014, según las citadas estadísticas, la tasa de empleo de mezclas semicalientes en Francia fue del 12,6%, y en Estados Unidos del 32,3%.

1.3 ACV. Riesgos e incertidumbres

Para la evaluación y cuantificación de las posibles ventajas e inconvenientes que puedan presentar la aplicación de estas líneas de investigación se ha contemplado recurrir a la metodología del análisis del ciclo de vida (ACV).

Un Análisis del Ciclo de Vida (Life Cycle Assessment – LCA), también conocido como *análisis de la cuna a la tumba*, *balance ambiental* o *evaluación del ciclo de vida (ECV)*, es una herramienta de diseño que investiga y evalúa los impactos ambientales de un producto o servicio durante todas las etapas de su existencia: extracción, producción, distribución, uso y fin de vida (reutilización, reciclaje, valorización y eliminación/disposición de los residuos y desechos).

El ACV es por tanto una metodología empleada en el estudio del ciclo de vida de un producto y de su proceso de producción, con el fin de evaluar el impacto potencial sobre el ambiente de un producto, proceso o actividad a lo largo de todo su ciclo de vida mediante la cuantificación del uso de recursos ("entradas o *inputs*" como energía, materias primas y agua) y emisiones ambientales ("salidas u *outputs*" al aire, agua y suelo) asociados con el sistema que se está evaluando.

Con el auge del **Ecodiseño** este enfoque ha ido integrando con más frecuencia diferentes criterios y parámetros de evaluación del impacto ambiental. Ecodiseñar es identificar, en el momento mismo en que se proyecta un producto o servicio, todos los impactos ambientales que se pueden producir en

cada una de las fases de su ciclo de vida, con el fin de intentar reducirlos al mínimo, sin menoscabo de su calidad y prestación del servicio.

La metodología basada en ACV desarrollada se ha aplicado a fórmulas de mezclas bituminosas ensayadas en laboratorio, habiendo sido validadas previamente desde el punto de vista técnico.

Y, tras un proceso deductivo justificado adecuadamente, la metodología finalmente desarrollada ha consistido en una huella de carbono de producto (HCP), siendo la primera publicada que, para el producto mezclas bituminosas, se ha aplicado conforme a la norma UNE-CEN ISO/TS ISO/TS 14067:2015.

Las metodologías de ACV han experimentado una gran aceptación y desarrollo durante los últimos años, pudiéndose aplicar a cualquier tipo de producto o servicio. En el momento actual, el estado de la técnica indica que los ACV presentan una serie de incertidumbres y riesgos aún pendientes de resolver:

- Existen numerosas metodologías susceptibles de aplicar a cada caso, lo cual lleva a resultados, en muchas ocasiones, dispares y heterogéneos.
- Generalmente se aplican de forma parcial lo cual, en opinión del autor, impide obtener conclusiones sólidas.
Son numerosos los artículos y referencias encontrados que suponen ejemplos de lo dicho en el ámbito de los materiales de construcción.
- Los datos de consumos energéticos y de emisiones, fundamentales en el proceso y resultados, se obtienen, en la mayoría de los casos, de bases de datos o estimaciones difíciles de comprobar. Durante el desarrollo de este trabajo se irán comentando algunos ejemplos.
- En general, a pesar de existir normas internacionales sobre los ACV, su aplicación es muy heterogénea, incluso, dentro de cada sector, producto o servicio.
- Los ACV se expresan, cuantificados, según distintos tipos de ecoindicadores, con lo cual los resultados varían mucho de unos casos a otros.
- Incluso, para el cálculo de la huella de carbono, existen distintas normativas y metodologías que llevan a resultados dispares, para un mismo producto o servicio. El autor ha analizado diversos estudios sobre HCP de mezclas asfálticas, realizados en España, Francia y China, y los resultados obtenidos difieren, entre ellos, en más del doble.

Es por ello que se ha considerado necesario e importante el desarrollo de una metodología específica para el caso y objetivos de los que se ocupa la presente tesis doctoral, debidamente justificada, con el objeto de garantizar la fiabilidad tanto de los datos empleados como de los resultados obtenidos y poder obtener así unas conclusiones ajustadas, basadas en datos reales y en una aplicación razonada y debidamente justificada.

CAPITULO 2. EL ACV PARA MEZCLAS BITUMINOSAS

2.1 Introducción

El presente capítulo tiene por objeto describir las líneas y principios de la metodología a desarrollar, siguiendo los pasos y directrices que deben seguirse en cualquier Análisis del Ciclo de Vida, definiéndolos y particularizándolos, de forma justificada, para el caso de las mezclas asfálticas o bituminosas como sistema de producto.

El ACV nace como una herramienta de análisis y comparación de productos, pero teniendo en cuenta que el objetivo en sí no es el producto en términos físicos, sino el servicio o función que éste desempeña, lo cual se considera como sistema de producto. Esto implica que dos productos o sistemas diferentes no se deben comparar directamente, salvo que presten la misma función o estas puedan relacionarse de una forma clara y objetiva.

Así, la comparación, por ejemplo, entre una mezcla bituminosa del tipo hormigón bituminoso (AC) y un tratamiento superficial (TS), materiales que son parecidos en cuanto a su composición, sólo podrá hacerse cuando se planteen como alternativas para una misma prestación funcional, y teniendo en cuenta las secciones de firme equivalentes en su totalidad, incluyendo la durabilidad previsible de cada una de ellas.

Otro de los principios básicos del ACV es evitar la doble contabilidad, y así viene establecido en las normas internacionales. Se debe evitar la asignación de afecciones que ya hayan sido tenidas en cuenta dentro de otros sistemas producto.

2.2 Fases del ACV para mezclas bituminosas

A partir de aquí, la metodología propuesta para el Análisis de Ciclo de Vida consistirá en, según la ya citada Norma ISO 14040, *“la recopilación y evaluación de las entradas y salidas de los potenciales impactos medioambientales del sistema (en este caso “mezcla asfáltica”) a lo largo de su ciclo de vida”*.

Esta metodología de Análisis de Ciclo de Vida, como cualquier otra, considera una serie de fases de trabajo interrelacionadas, que siguen una secuencia más o menos definida. Estas son las siguientes:

- I. Definición de objetivos y alcance del estudio
- II. Análisis de inventario de ciclo de vida (AICV) o inventario del ciclo de vida (ICV)
- III. Evaluación de impacto del ciclo de vida (EICV)

- IV. Presentación e interpretación
- V. Revisión crítica

2.3 Fase I: Definición de objetivos y alcance del estudio

El objeto de esta fase es definir el objetivo y el uso previsto del presente estudio, así como el alcance, de acuerdo con los límites del sistema y los flujos dentro del ciclo de vida, para, a partir de aquí, definir la unidad funcional, que será función de la calidad exigida a los datos y los parámetros tecnológicos y de evaluación.

Esta es la fase crucial, en la que se van a establecer las estrategias y criterios que van a condicionar todo el análisis, así como los resultados y su utilidad. El autor pretende, de esta manera, realizar un estudio bien estructurado, trazable y transparente.

Para poder obtener unas conclusiones válidas existen dos aspectos que, a juicio del autor, son fundamentales y que, sin embargo, no son considerados del todo por las metodologías y aplicaciones informáticas de ACV disponibles en el mercado. Estos aspectos son la *durabilidad* y la *reciclabilidad* de los sistemas de producto analizados.

Para poder evaluar correctamente la sostenibilidad de las distintas soluciones posibles es necesario considerar adecuadamente la durabilidad de cada una de ellas, sobre todo en el caso de que cada una de ellas fuera distinta, de tal forma que los resultados comparados puedan considerarse homogéneos.

Por ejemplo, un mayor espesor de capa de MBC implica mayores impactos en su fabricación y puesta en obra pero, también implica, por otro lado, un incremento de la durabilidad, que repartirá más en el tiempo esos impactos, necesitando menores labores de conservación y rehabilitación, lo cual debe ser tenido en cuenta para poder imputar esos impactos correctamente y obtener así unos resultados coherentes y adecuados que puedan ser comparables frente a otras soluciones posibles.

Por otro lado, también se hace necesario la consideración adecuada de la reciclabilidad del material una vez que haya finalizado su período de vida. Así, no debe suponer los mismos impactos un material que al final de su vida se convierta directamente en un residuo que haya que llevar a vertedero frente a otro material que puede seguir reutilizándose, una o varias veces, lo cual reduce, a priori, sus impactos, especialmente cuando sea reutilizado.

Aunque la reutilización y el reciclaje son dos conceptos que la sociedad tiene muy claros, como básicos para la sostenibilidad en sus tres vertientes (económica, social y ambiental), es la ***Economía Circular*** la estrategia que ha venido a reforzar y terminar de impulsar estos conceptos.

Esta tiene por objeto reducir tanto la entrada de los materiales como la producción de desechos vírgenes, cerrando los bucles o flujos económicos y ecológicos de los recursos. Consiste en una filosofía de organización de sistemas inspirada en los seres vivos, que persigue el cambio de una economía lineal (producir, usar y tirar) hacia un modelo circular, tal y como ocurre en la naturaleza.

Por lo tanto, se van a considerar los impactos para obtener los resultados de tal forma que, como se viene diciendo, no sean comparables con otras actividades ajenas y consideren de forma implícita los aspectos de durabilidad y reciclabilidad.

Por otro lado, los **límites del sistema** definen los procesos a incluir en él, en función de los objetivos del estudio. El sistema producto considerado es el de las mezclas bituminosas o asfálticas para firmes u otras aplicaciones similares, considerando su fabricación y puesta en obra.

Para el establecimiento de estos límites, se han tenido en cuenta las indicaciones marcadas por la norma UNE-CEN ISO/TS 14067 (2015) y las recomendaciones tanto de la Asociación Europea de Pavimentación Asfáltica (EAPA) como de la Asociación Nacional de Pavimentación Asfáltica norteamericana (NAPA), publicadas en el año 2016.

Como pautas generales, se han establecido, los siguientes límites para el sistema producto mezcla bituminosa:

- *Límites entre el sistema tecnológico y la naturaleza.* El ciclo de vida de las mezclas bituminosas empieza con la extracción de las materias primas y el transporte de la energía de la naturaleza. La etapa final incluye la demolición, tras su vida útil, con la generación de residuos correspondiente o la posibilidad de su reutilización, que para el caso de las mezclas bituminosas puede llegar al 100% del producto, siendo totalmente reciclables o, lo que es lo mismo, suponen un balance de *residuos cero*.
- *Actualización de los datos.* Las recomendaciones internacionales sobre estos temas (EAPA, 2016), para el caso de las mezclas asfálticas, recomiendan actualizar los datos de los que se nutre el sistema, al menos cada cinco años, con el objeto de incorporar y considerar las mejoras tecnológicas que se vayan desarrollando e implantando en los sistemas de producto analizados.

Aunque el grueso de los datos para esta metodología se han tomado durante los años 2008 a 2010, estos se han ido actualizando periódicamente, desde entonces hasta hoy, para las distintas comunicaciones que se han ido presentando a congresos cada uno o dos años.

Además, la última versión del documento editado por EAPA sobre *Mejores Técnicas Disponibles (MTD o BAT)* para la fabricación de mezclas asfálticas data de 2007, lo cual implica que desde entonces no ha habido grandes cambios en las tecnologías disponibles en el sector, por lo cual los datos manejados no se han quedado desfasados.

- *Representatividad de los datos.* Los datos manejados proceden de todas las fases, instalaciones y equipos necesarios para el objeto de la metodología, y se han obtenido durante tres años, controlando muchas y diversas obras de pavimentación de carreteras y viales. Precisamente, esa es la razón principal de haber desarrollado una metodología específica.

Cuando ha sido necesaria la incorporación de otros datos al modelo, estos han sido recogidos de datos oficiales, auditados, y contrastados con los propios del autor.

Además, los datos han sido, en todo momento, lo más locales posibles, de cara a afinar lo máximo posible en cuanto a su representatividad. Por ejemplo, para el cálculo de las emisiones debidas a la energía eléctrica consumida, se ha considerado el factor de emisión del *mix energético* en España durante el año del cual se ha manejado el mayor número de datos.

Puede considerarse, por lo tanto, que los datos son muy representativos del sistema producto analizado.

- *Área geográfica.* La geografía juega un papel crucial en este caso, pues se está analizando un material cuyo ámbito es local, cercano a las plantas de fabricación. Los datos obtenidos sirven para todo el territorio español y, por extensión, para el ámbito europeo.

En el caso de aplicarse en otros países, especialmente fuera de Europa, deberían realizarse ajustes sobre muchos de los parámetros, en función de las materias primas suministradas, tecnologías aplicadas, tipos de obras, etc. Esto sería fácil de realizar, pues la metodología desarrollada se plasmará en una hoja de cálculo abierta que el autor podría adaptar.

- *Horizonte de tiempo.* En el caso de las mezclas bituminosas, los periodos de tiempo a considerar pueden tener como primera referencia el de los de proyecto, que son, para el caso de firmes flexibles (con MBC), de 15-25 años, adoptándose de forma habitual el de 20 años.

Sin embargo, para este caso, es más realista considerar la durabilidad media de una mezcla bituminosa del tipo hormigón bituminoso (AC), la cual está establecida, a nivel europeo, en 14-15 años, según los datos publicados por EAPA (2016) y reflejados en la siguiente figura.

Por lo tanto, la **vida útil de referencia (RSL)**, que es el periodo de tiempo conocido o esperado de la vida útil de un producto de construcción bajo un conjunto particular de condiciones de uso, queda establecido, para el caso de las mezclas bituminosas, **en 15 años**.

- *Límites entre el actual ciclo de vida y los ciclos de vida de otros sistemas técnicos relacionados.* Sólo se van a considerar las mezclas asfálticas, no teniendo en cuenta el tráfico que circula por ellas, ni ningún otro sistema asociado, tal como se ha justificado al comienzo del capítulo.

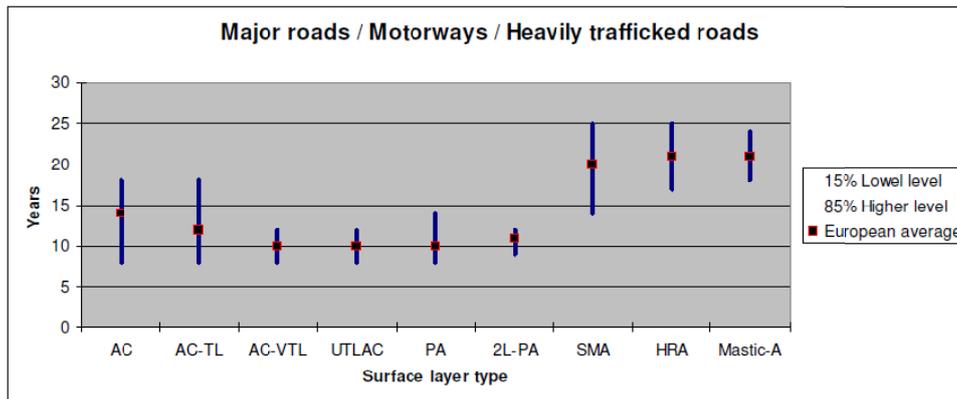


Figura 3: Durabilidad de los tipos de mezclas en carreteras de primer orden (Fuente: EAPA).

El **diagrama de flujo** correspondiente al sistema analizado es el que se muestra a continuación, en el que se marcan, de forma clara, los límites del sistema a considerar.

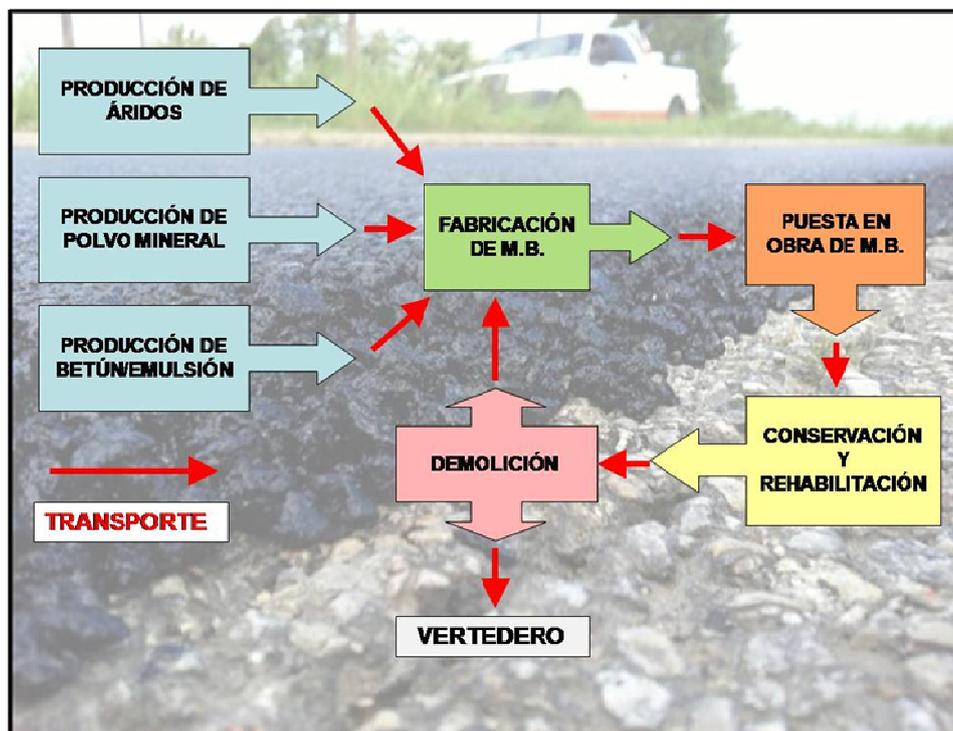


Figura 4: Diagrama de flujo de la metodología propuesta.

Como puede apreciarse, está considerada la posibilidad de reutilización del asfalto recuperado (RAP) para la fabricación de la mezcla bituminosa, tras la demolición de la mezcla envejecida, y su posterior tratamiento y clasificación.

Y también está considerado como tal el proceso de fabricación, en el cual se considerará, entre todos los factores, la temperatura, lo que permitirá evaluar las técnicas de mezclas a menores temperaturas.

El *transporte* entre etapas de proceso, representado por las flechas de color rojo, actividad fundamental a considerar, se ha agrupado como una sola actividad, como criterio general. Dentro del subsistema, se ha evaluado de forma desglosada en sus componentes o fases.

El sistema “mezclas asfálticas”, está compuesto por una serie de **subsistemas** que deben evaluarse por separado. Estos subsistemas comprenden los distintos procesos necesarios para su puesta en servicio, posterior funcionamiento en perfectas condiciones, y demolición y retirada tras su vida útil.

Así, los subsistemas considerados y analizados son los siguientes:

- **Subsistema 1: Extracción y procesamiento (producción) de los áridos.** Se han considerado la maquinaria y las instalaciones necesarias para la extracción y tratamiento de los áridos: retroexcavadoras, cintas transportadoras, sistemas de cribas, palas cargadoras, etc.

Se ha considerado, incluso, el caso de poder emplear tasas de asfalto recuperado (RAP), procedente del fresado de mezclas envejecidas, convenientemente tratado y clasificado.

- **Subsistema 2: Extracción y procesamiento (producción) del polvo mineral o filler.** Se han considerado las posibilidades de emplear polvo mineral de recuperación y de aportación (polvo calizo, cemento o cal).

Aunque este último caso supone mayores afecciones ambientales, a priori, pues han de computarse los consumos y las emisiones de su fabricación y su transporte hasta la planta asfáltica, en realidad puede suponer mejoras en la durabilidad de la mezcla que, en el resultado final, impliquen una reducción importante de dichas afecciones.

- **Subsistema 3: Extracción y procesamiento (producción) del ligante asfáltico.** Este subsistema es muy complejo de evaluar. Deben considerarse las afecciones del proceso de extracción petrolífera, su transporte a refinerías, su refinado, y su transporte final hasta la planta asfáltica.

Además, se añade la complejidad de que, para realizar un análisis completo y universalmente válido, deben considerarse las dos formas posibles de incorporar este tipo de ligante a las mezclas, betún asfáltico como tal, o en forma de emulsión bituminosa, con implicaciones ambientales distintas.

Debe tenerse presente al respecto que el sector de refinado de hidrocarburos está sujeto a numerosas normativas ambientales como, por ejemplo, los Planes de Asignación de Derechos de Emisión de CO₂. Se trata de uno de los llamados *Sectores Regulados*, al igual que otros sectores suministradores de componentes de las mezclas bituminosas, como es el caso de los fabricantes de cal y de cemento, lo cual supone una gran facilidad para la presente investigación, pues se dispone de datos fiables, públicos, y fáciles de comprobar.

- **Subsistema 4: Fabricación de la mezcla bituminosa en la planta asfáltica.** En el tipo de mezclas de referencia, las mezclas bituminosas en caliente (MBC), los principales consumos y emisiones se producen como consecuencia de la actividad del quemador principal, de la caldera, y del grupo electrógeno necesario para alimentación auxiliar. Debe considerarse el tipo de combustible empleado: gas natural, fuel, posibilidad de cogeneración, etc.

Además, juega un papel importante, para los objetivos de la presente metodología de ACV, la posibilidad de empleo de altas tasas de reciclado, lo cual puede llegar a implicar la necesidad de un doble tambor secador en la planta, modificando los impactos de este subsistema.

- **Subsistema 5: Ejecución de las capas del firme.** Se han considerado los equipos de extendido y compactación habituales en estas unidades de obra, pero de forma completa y sobre casos de obra reales.
- **Subsistema 6: Conservación y rehabilitación.** Se han estudiado las estrategias y posibles tareas de conservación y rehabilitación para que el firme siga prestando su servicio en condiciones óptimas.
- **Subsistema 7: Demolición.** Se han considerado las labores necesarias para el fresado y retirada del material asfáltico una vez que ha envejecido, siendo necesaria la rehabilitación del firme, previa retirada de este y posterior retirada a vertedero o reutilización.
- **Subsistema 8: Transporte** (entre todas las distintas actividades anteriores). Este último subsistema es, desde el punto de vista de la sostenibilidad, uno de los que más impactos puede ocasionar. Se ha evaluado de forma desglosada, entre las distintas actividades y considerando los distintos materiales y elementos a transportar, para poder analizarlos de forma separada.

Para cada uno de estos subsistemas deben definirse y cuantificarse las afecciones ambientales en términos de consumo de energía y materias primas, emisiones de gases y generación de residuos.

Esta división en los subsistemas citados cubre todos los aspectos necesarios para la fabricación y puesta en obra de los materiales a analizar, y se pueden establecer de forma clara los límites entre ellos. Esto es muy importante de cara a realizar el cómputo de la asignación de impactos, para no caer en el error de la doble asignación de alguno de ellos, o en la no asignación de otros.

Esta división cumple con las normas de ACV y con las recomendaciones (2016) tanto de la Asociación Europea de Pavimentación Asfáltica (EAPA), relativas a la información necesaria en ACV para pavimentos de carreteras y los límites del sistema, como de la Asociación Nacional de Pavimentación Asfáltica norteamericana (NAPA), reflejados en el siguiente gráfico.

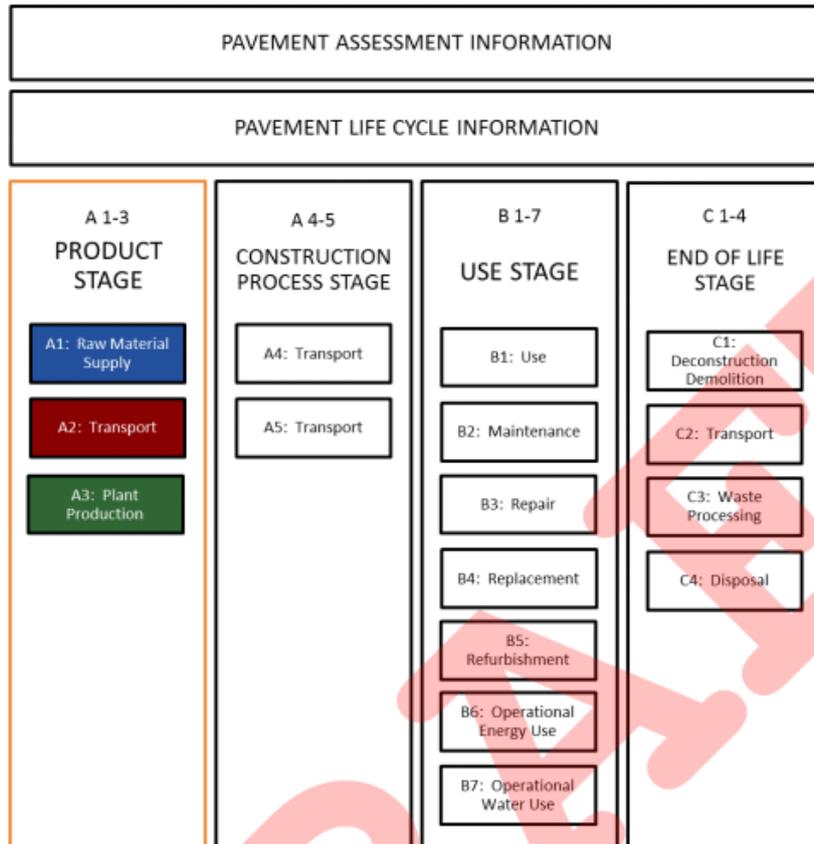


Figura 5: Diagrama de la información necesaria en ACV para pavimentos (Fuente: NAPA).

En la metodología aquí planteada, los subsistemas planteados se corresponden con los siguientes módulos:

- Subsistemas 1 a 3 → Módulo A1 Suministro de materias primas
- Subsistema 4 → Módulo A3 Fabricación del producto
- Subsistema 5 → Módulo A5 Construcción
- Subsistema 6 → Módulos B2 a B5
- Subsistema 7 → Módulos C1, C3 y C4
- Subsistema 8 → Módulos de transporte A2, A4 y C2

También se tiene en cuenta la información complementaria, marcada en estas recomendaciones, más allá del ciclo de vida del pavimento, relativa a la reutilización, recuperación, y reciclado.

Continuando con esta primera etapa del ACV a desarrollar, cobra especial importancia el concepto de **Unidad Funcional (UF)**, que se define como el modo en el que se cuantifican las funciones o las características de comportamiento del sistema producto consideradas en el estudio.

El principal propósito de la unidad funcional es obtener una referencia que permita normalizar los resultados del ACV relativos a los flujos de entrada y salida del producto de construcción y cualquier otra información que permita expresar los datos en una base común.

Su definición permite establecer criterios rigurosos para los procesos de comparación, y debe ser coherente con el objetivo y alcance del estudio. Debe basarse en el uso funcional del producto y en su vida útil de referencia.

La unidad funcional es el elemento clave del ACV y ha de ser definido claramente. Es la medida de la función del sistema estudiado y da una referencia de cuáles son las entradas y salidas relacionadas, considerando un periodo de tiempo que se corresponde con la vida útil durante la cual es previsible que desempeñe sus funciones.

Y esto es lo que permitirá la comparación de dos o más sistemas diferentes, pero con iguales prestaciones funcionales y temporales, teniendo en cuenta que la durabilidad media, a nivel europeo, es de 14-15 años.

La definición de esta UF ha de ser precisa y suficientemente comparable para ser utilizada como referencia. Debe incluir una cuantificación, teniendo en cuenta la duración del producto “mezcla bituminosa”, así como unos requerimientos de calidad.

Por todo ello, la Unidad Funcional del producto “mezcla asfáltica” determinada, para la cual se han calculado los parámetros de forma unitaria, es la **tonelada de mezcla bituminosa o asfáltica fabricada y colocada en obra durante 15 años (t MB₁₅)**.

De esta forma, el autor considera que los resultados obtenidos no serán comparables con otras actividades ajenas a ella ni productos con funcionalidades distintas y, además, de esta forma no habrá distorsiones por las diferencias que podrían suponer los distintos espesores de capas considerados en distintas secciones de firme.

Otra razón a su favor es que la presente metodología ha establecido claramente un horizonte temporal de la durabilidad, por lo cual, ya se han fijado los límites temporales del sistema; y la comparación de resultados obtenidos sólo será válida para cualquier tonelada de mezcla asfáltica cuya vida útil esperable sea de 15 años.

Por lo tanto, esta unidad funcional sirve de base para el cálculo de entradas y salidas y va a permitir tratar de forma equivalente a productos alternativos de cara a su comparación, que es el objeto de este trabajo.

Esta unidad funcional, elegida por el autor después de muchos procesos de reflexión, desde el comienzo de los trabajos de investigación, allá por el año 2008, ha resultado ser la que se está imponiendo en el sector a nivel mundial, de tal forma que es la propuesta por las asociaciones europea EAPA y norteamericana NAPA (2016) como unidad para las Declaraciones de Producto de mezclas asfálticas.

Y, por último, la reciclabilidad de esta UF va a ser considerada, de forma directa, como se verá más adelante, en el próximo capítulo, y conforme a lo estipulado en la norma UNE-CEN ISO/TS 14067.

Las mezclas bituminosas son un material 100% reciclable y, además, de una forma activa, pues parte del betún del asfalto recuperado todavía servirá como ligante de la mezcla nueva, lo que permitirá ahorrar en el consumo de betún asfáltico, que es el componente de mayor coste.

Esto implica una valorización final mayor, como residuo, más allá del ahorro de áridos vírgenes en la fabricación de la mezcla nueva. Y esto es muy importante y redundante en la sostenibilidad de estos materiales de construcción frente a otros alternativos.

Para finalizar esta primera fase del ACV, se debe especificar qué categorías de impacto ambiental van a ser usadas, en función del tipo de datos que se van a utilizar.

En el siguiente capítulo se va a analizar la calidad y fiabilidad de los mismos, así como las limitaciones e hipótesis que se llevarán a cabo.

Dados los datos que se han podido medir realmente en las instalaciones y obras relacionadas, correspondientes a consumos energéticos y emisiones de gases, el autor ha considerado que la categoría de impacto ambiental será la de **Calentamiento Global**, cuyo parámetro es el Potencial de calentamiento global (GWP), y la unidad, expresada para la unidad funcional, es el *kilogramo de CO₂ equivalente (kg CO₂e)*.

Por lo tanto, el ACV a desarrollar será, en realidad, el cálculo de la **Huella de Carbono del Producto (HCP)** “**t. de mezcla bituminosa o asfáltica fabricada y colocada en obra durante 15 años (t. MB₁₅)**”, que podría representarse por las siglas **HCP – t MB₁₅**.

Tras este proceso, se ha decidido tomar como **ecoindicador** *el kilogramo de CO₂ equivalente por tonelada de mezcla bituminosa fabricada y colocada en obra durante 15 años (kg CO₂e / t MB₁₅)*, debido a las siguientes razones:

- Sirve para el objeto establecido: la evaluación de las posibles ventajas que desde el punto de vista de la sostenibilidad implica el hecho de ir incorporando en la fabricación de una mezcla bituminosa distintos porcentajes de asfalto recuperado o ir reduciendo las temperaturas de fabricación y puesta en obra.
- Es un parámetro sencillo, que puede ser fácilmente medido u obtenido a partir de cálculos estequiométricos en base a los procesos y combustibles empleados.
- Como se ha ido comprobando en las mediciones realizadas, tiene el suficiente grado de sensibilidad para poder analizar la eficacia de posibles mejoras en los procesos.
- Es un factor que va ligado directamente con la eficiencia energética de los procesos, luego permitirá la evaluación de la sostenibilidad desde los puntos de vista ambiental y económico.
- Contempla de forma directa uno de los potenciales daños de mayor impacto social y político, los Gases de Efecto Invernadero (GEI) y que, debido a ello, suele ser fuertemente ponderado en las metodologías convencionales. El CO₂ equivalente (CO₂e) indica el potencial de

calentamiento global de todos los gases de efecto invernadero (vapor de agua, dióxido de carbono, óxido nitroso, metano y ozono) referidos a la masa del CO₂.

- Debido precisamente a lo anterior, también se disponen de datos completos y fiables de otros sectores, necesarios para los subsistemas considerados (betún, cal, cemento, etc.).

A partir de la firma del Protocolo de Kioto (1997), los sectores industriales han visto reguladas sus emisiones de CO₂ mediante los Planes Nacionales de Asignación de Derechos de Emisión de GEI. Esta regulación ha generado un desarrollo del conocimiento sobre estas emisiones que permiten disponer de estos datos, de forma fiable, para, prácticamente, cualquier actividad humana.

- Este parámetro refleja, además, otro de los indicadores de sostenibilidad que se están implantando en todos los sectores, la huella de carbono, ya citada. Este concepto nació del de la huella ecológica, de la cual es un subconjunto.
- Otra de las razones por las que se considera interesante el ecoindicador elegido es por sus implicaciones en el sector de las mezclas asfálticas. Sobre estas unidades de obra, fundamentales en la ingeniería de carreteras, la aplicación del Protocolo de Kioto ha introducido nuevos factores a considerar, tanto por los materiales empleados como por su proceso de fabricación.

Por un lado, los materiales bituminosos, procedentes del refinado del petróleo, se han visto afectados precisamente debido a este proceso industrial. La Directiva Europea 2003/87/CE de Comercio de Derechos de Emisión de GEI ha considerado a la actividad de Refinado de Hidrocarburos como uno de los sectores industriales regulados directamente.

Y, además, por otro lado, las grandes plantas de fabricación de mezclas bituminosas en caliente (MBC) también están incluidas en los citados Planes Nacionales de Asignación, de tal forma que algunas, las de mayor capacidad de producción, tienen reguladas y autorizadas sus emisiones anuales de GEI.

Estas están incluidas dentro del epígrafe “1c – Otras instalaciones de combustión con una potencia térmica nominal superior a 20 MW”. Dentro de este grupo heterogéneo de instalaciones incluidas, el PNA considera el *Subsector Industrial de Asfaltos*. Dentro de este tipo, hay más de diez instalaciones incluidas, repartidas por todo el territorio nacional.

Actualmente, estas instalaciones están sometidas a unas asignaciones gratuitas decrecientes mediante un régimen transitorio, basado en un benchmarking a nivel europeo por sector, debiendo acudir, en caso de exceder en sus emisiones, a una subasta de derechos regulada por la Comisión Europea.

No debe olvidarse que una de las utilidades que debe tener siempre una metodología de ACV es servir para establecer las estrategias de reducción de impactos, y con este ecoindicador una de las utilidades complementarias de la presente metodología es la de suponer una herramienta útil y eficaz para establecer estrategias de reducción de las emisiones de CO₂ en la fabricación y ejecución de mezclas bituminosas.

Además, también podrá servir para Declaraciones Ambientales de Producto (DAP), debido a que cumple gran parte de lo especificado, como se viene demostrando, en las Reglas de Categoría de Producto (RCP) para mezclas asfálticas, tanto a nivel europeo como a nivel mundial.

2.4 Fase II: Análisis del inventario del ciclo de vida (AICV) o inventario del ciclo de vida (ICV)

Esta fase corresponde al inventario de cargas ambientales en las mezclas bituminosas. Desde el punto de vista de la sostenibilidad, los principales **inputs o entradas** a considerar son los recursos energéticos, que dependen de los combustibles analizados (gas natural, coque de petróleo, fuel, etc.) y de los recursos materiales empleados (áridos y betún principalmente).

Por otro lado, los principales **outputs o salidas** son las emisiones de gases y la generación de residuos.

No se van a considerar en la presente investigación, al contrario de lo que hacen otros autores, otros factores que, desde el punto de vista del investigador, no deben incluirse en este ACV, como son los referidos al del sistema “mezcla bituminosa o asfáltica”.

Por ejemplo, aspectos relacionados con el tráfico que circulará previsiblemente por los firmes analizados no se van a imputar, pues no queda claro que entren en los parámetros a considerar según las normas de ACV. En este caso, no se trata del uso del “producto firme”, sino más bien del “producto vehículo” y, como ya se ha justificado en el primer apartado de este capítulo, considerarlo implicaría caer en el error de una doble contabilidad de afecciones, incumpliendo así uno de los principios básicos del ACV.

Tampoco se van a considerar otros materiales que van ligados a este tipo de firmes como pueden ser, por ejemplo, los riegos bituminosos que se aplican para la imprimación o adherencia entre capas. Esto se saldría de los objetivos de esta investigación, pues no se pretende analizar el concepto de firme como tal, sino un tipo de materiales para ellos, las mezclas asfálticas.

Como ya se ha dicho anteriormente, se ha realizado un proceso de análisis y deducción justificado durante todo el período de duración del presente trabajo de investigación para la consideración o no de múltiples aspectos o subsistemas, en función de las normas de ACV y en función de los objetivos de la metodología desarrollada.

Para la evaluación de los diferentes subsistemas aplicados a casos concretos (obras) deberá existir la posibilidad de diferentes grados de libertad, en función de la producción, distancias, maquinaria y plantas empleadas, etc. Como se verá más adelante, todos ellos son datos de entrada en la metodología desarrollada.

Existe una gran diversidad de materiales asfálticos para firmes y pavimentos, en función de los materiales disponibles, tipos de tráfico, climatología, prestaciones exigidas, etc. La metodología propuesta permite analizar cualquier tipo de mezcla bituminosa.

Los datos en los que se basa esta metodología son reales, obtenidos de la fabricación y ejecución de mezclas asfálticas concretas, para distintos tipos de carreteras, urbanas e interurbanas, de las habitualmente empleadas, en el momento de la realización de estos trabajos, en España.

Los datos obtenidos han sido validados y perfectamente documentados, conociendo su origen y fecha de adquisición, con el objeto de garantizar la trazabilidad de los mismos. Todos los cálculos necesarios para su vinculación a la unidad funcional también están justificados.

2.5 Fase III: Evaluación de impacto del ciclo de vida (EICV)

Una vez consideradas las fases anteriores, se pasará a realizar la evaluación de los impactos establecidos para, finalmente, convertir el resultado del inventario en una lista de pocos datos interpretados según su capacidad de afectar al medio. El proceso se ha llevado a cabo en varios pasos llamados: clasificación, caracterización, normalización y valoración.

Como ya se viene citando, los resultados obtenidos van a tener en cuenta dos aspectos fundamentales, la *durabilidad* y la *reciclabilidad* de cada una de las soluciones analizadas.

2.6 Fase IV: Presentación e interpretación

Esta fase consiste en la correcta presentación de los resultados obtenidos, según los objetivos marcados y según a quién vaya dirigido el estudio. La presentación de dichos resultados se ha hecho utilizando un gran soporte gráfico (sectores, barras, etc.).

Hasta la fecha, se han ido presentando los trabajos realizados y los resultados que se han ido obteniendo en varios Foros Técnicos del sector, de alcance internacional, así como en numerosas publicaciones técnicas. Las más representativas han sido incluidas, tal como se solicita en las Bases, en la propuesta de esta candidatura.

2.7 Fase V: Revisión crítica

Para completar los requerimientos que exige la metodología del ACV se ha realizado una revisión crítica, pues, además, este caso está encuadrado dentro de los que son especialmente adecuados para ella, debido a que su objeto es realizar aseveraciones comparativas.

La misión de esta fase es asegurar que los métodos utilizados en el ACV son coherentes con la ISO 14040, los métodos usados son técnica y científicamente válidos, los datos utilizados son apropiados y razonables con el objetivo del estudio, las interpretaciones reflejan las limitaciones identificadas y el objetivo del estudio, y el informe del estudio es transparente y coherente.

En este caso, tras las presentaciones citadas en el apartado anterior, en las que se han mostrado los resultados obtenidos, se ha recabado la opinión de distintos expertos, los cuales han confirmado la validez de la metodología.

Por otro lado, varios capítulos de este trabajo se han enviado, para su revisión crítica, a distintos especialistas en la materia, ajenos al procedimiento desarrollado, para que, con total independencia e imparcialidad, aportasen los comentarios que considerasen oportunos. Estos expertos están citados en la tesis doctoral ya comentada, y entregada, y, además, han redactado cartas de apoyo a la presente candidatura.

Como los comentarios de los expertos y cualquier respuesta a las recomendaciones hechas por los revisores deben ser incluidas en el estudio de ACV, así se ha hecho en el presente trabajo de investigación, siendo estas aportaciones muy útiles, de cara a la calidad final del estudio.

De esta forma, se ha cumplido, en cierto modo, con los tres posibles tipos de revisión crítica establecidos: revisión por expertos internos, que han trabajado también con el autor en el proyecto de investigación dentro del cual se realizaron los primeros trabajos; revisión por expertos externos, completamente ajenos al trabajo de investigación y familiarizados con la norma ISO 14040 y con experiencia científica y técnica; y revisión por partes interesadas, en el caso del Tribunal que evaluó, en su día, la tesis doctoral realizada.

CAPITULO 3. AICV Y EICV DE HCP PARA MEZCLAS BITUMINOSAS

3.1 Introducción

En este capítulo se desarrolla la fase de Análisis del Inventario del Ciclo de Vida (AICV) para la HCP de las mezclas bituminosas, lo cual supone la recopilación y cuantificación de las entradas y salidas para el citado producto a lo largo de su ciclo de vida. Para ello, el autor ha seguido los siguientes pasos:

- Recopilación de datos medidos, calculados y recopilados
- Validación de los datos para garantizar su calidad
- Relación de los datos con los procesos unitarios y la unidad funcional, calculando así los datos de entrada y salida de cada uno de los subsistemas considerados
- Ajuste de los límites del sistema, para determinar la importancia de todas las entradas y salidas necesarias a incorporar en el cálculo
- Asignación de los datos de entradas y salidas correspondientes a cada proceso unitario

Como ya se ha dicho, las emisiones de GEI del ciclo de vida del producto mezclas bituminosas serán calculadas durante su ciclo de vida completo, incluyendo la etapa de uso y la etapa término de vida.

Para que este Inventario del Ciclo de Vida (ICV) pueda ser aplicable a cualquier tipo de mezcla bituminosa o aplicación particular (tipo y ubicación de la obra, tipo de aplicación de la mezcla bituminosa, nuevos avances tecnológicos, etc.), todos los indicadores se dejan en función de los parámetros o grados de libertad de los que se ha podido observar, durante la realización de los trabajos de campo, laboratorio y análisis de datos, que dependen: distancias, potencia, rendimiento, tipo de combustible, equipos, componentes de la mezcla, etc.

3.2 Recopilación y validación de datos

Para el desarrollo de la metodología se puso en marcha un sistema de recogida y análisis de datos que permitiera cuantificar los *inputs* y *outputs* de los subsistemas considerados. Y para ello se ha contado con una empresa líder del sector, que tenía en propiedad casi todos los equipos, instalaciones y plantas necesarios para asegurar la representatividad de los datos manejados.

Sobre estas instalaciones y todo tipo de obras se realizaron mediciones y controles de series de datos durante los años 2008, 2009 y 2010. De esta manera, se ha cumplido sobradamente con unos de los requisitos de las recomendaciones de la asociación europea EAPA (2016), en su documento sobre las reglas de categoría de producto (PCR) y las declaraciones ambientales de producto (DAP) para mezclas asfálticas, en donde se establece un periodo mínimo de 12 meses consecutivos para obtener los datos relativos a plantas asfálticas.

Como fue el año 2008 el primero, y durante el cual se recogieron el mayor número de datos, se ha considerado como el año más representativo y, por lo tanto, el de referencia.

Durante el periodo considerado, los controles y mediciones realizados lo fueron para todo tipo de obras de pavimentación (urbanizaciones, carreteras convencionales, autovías y autopistas, etc.) y tipologías de mezclas asfálticas (densas, semidensas y gruesas). Todo ello permite tener la certeza de la representatividad de las series de datos manejados.

Aunque han pasado más de ocho años desde la toma de los primeros datos, el autor los ha seguido analizando y actualizando, cada uno o dos años, para las distintas comunicaciones a congresos que se han ido presentando, como ya se ha dicho.

De esta forma, se puede asegurar que siguen vigentes. No han variado de forma apreciable ni las materias primas, ni las plantas de fabricación, ni las mezclas bituminosas fabricadas, ni los equipos de puesta en obra, ni los tipos de obras que hoy se ejecutan.

El único factor que ha variado desde entonces ha sido la posibilidad del empleo de instalaciones de cogeneración en las plantas asfálticas. Estos sistemas suponen un ahorro importante en el consumo energético en la fabricación de las mezclas asfálticas, pero en la actualidad permanecen cerrados por su nula rentabilidad, debido al cambio en la legislación energética española.

En cuanto al control de *inputs*, se han medido y controlado materias primas (áridos, betún, cal, cemento, etc.) en todas las fases o subsistemas, consumos de combustibles (fuel-oil, gas-oil y gas natural licuado o GNL), consumos de electricidad, y consumos de lubricantes.

En lo referente al control de *outputs*, se han controlado los rechazos y residuos en todas las fases o subsistemas, así como las emisiones de gases en todos ellos.

En la mayoría de los casos, las emisiones de gases se obtienen del control de consumos de combustibles y energía eléctrica. De esta forma, se han obtenido series completas de datos de emisiones de O₂, CO₂, SO₂, NO, NO₂, NO_x, CO, N₂O, HC, CH₄, etc.

3.3 Consideraciones previas

Cuando no se ha dispuesto de los datos concretos, se ha recurrido al análisis de bases de datos (BBDD) de procedencias diversas: bases de datos y referencias, software, etc. Muchos autores han detectado grandes diferencias entre los datos obtenidos mediante mediciones experimentales y los expresados en las bases de datos habituales.

En la presente metodología sólo se han utilizado los que están convenientemente justificados y son fácilmente contrastables. Y, cuando se ha dispuesto de datos oficialmente considerados y registrados, debido a la regulación de emisiones, son estos los que se han adoptado.

Como punto de partida, quedan establecidos estos como factores fundamentales para empezar a desarrollar la metodología:

- La *unidad funcional* considerada es la **tonelada de mezcla bituminosa fabricada y colocada en obra durante 15 años (t MB₁₅)**.
- El *ecoindicador* considerado es el **kilogramo de CO₂ equivalente por tonelada de mezcla bituminosa fabricada y colocada en obra durante 15 años (kg CO₂e / t MB₁₅)**.
- El ICV se va a aplicar para una mezcla bituminosa concreta, empleada como mezcla de referencia, y denominada **mezcla "F0"**. Es una mezcla bituminosa convencional del tipo AC22 surf S, concebida para capa de rodadura, en la que no se emplea ningún porcentaje de asfalto recuperado.

Su composición, expresada en porcentaje en peso sobre el total de la mezcla, viene dada por áridos silíceos procedentes de machaqueo (90,72%), polvo mineral de recuperación (3,25%) y cemento portland (1,53%), y betún asfáltico convencional 50/70 (4,50%).

3.4 Relación de los datos con los procesos unitarios y la unidad funcional

Una vez determinados los flujos adecuados para cada proceso o subsistema, tal como se estableció en el capítulo anterior, se pasa a calcular los datos cuantitativos de entrada y salida para el proceso unitario en relación con cada uno de estos flujos.

Las mediciones de las emisiones de CO₂ se han realizado de distintas maneras. En primer lugar, se han analizado distintas bases de datos disponibles para todos los subsistemas. Como ya se ha dicho, en muchos casos, estas son imprecisas, no contemplan los procesos específicos de las mezclas asfálticas e, incluso, presentan datos muy dispares entre sí, lo cual ha hecho desconfiar de su fiabilidad.

El autor ha realizado una criba previa para utilizar sólo los datos de estas fuentes cuando no se pudieran obtener de ninguna otra de las maneras posibles, y siempre procedentes de fuentes oficiales y autorizadas, y debidamente justificadas.

Otra de las posibilidades ha sido la obtención de las emisiones de CO₂ a partir de consumos de materiales y combustibles, acudiendo a tablas y relaciones estequiométricas fijadas.

Esta se ha mostrado como una de las fuentes de datos más eficaces, pues no se olvide que el consumo de estos inputs es fácil de controlar, medir y cuantificar. Para ello, se han tomado como referencia los factores de emisión más recientes publicados por la Oficina Española de Cambio Climático – OECC (2016). Estos son los oficialmente aceptados para el Registro de huella de carbono, compensación de emisiones y proyectos de absorción de dióxido de carbono.

Y para algunos de los procesos analizados, en los que se ha considerado viable, se han realizado, de forma esporádica, mediciones directas de gases, con el objeto de poder contrastar los datos obtenidos con los anteriores métodos.

Así se hizo en el subsistema planta asfáltica, pudiendo comprobar que las mediciones de gases, coincidían, con escaso margen de variación, con los cálculos realizados en base a los consumos energéticos.

3.5 Factores de emisión

Para la asignación de emisiones de GEI a los distintos procesos es necesario, en primer lugar, establecer los factores de emisión que se van a considerar, para los distintos consumos energéticos (combustibles y energía eléctrica).

Como los factores de emisión oficiales van cambiando a lo largo de los años, debido al *mix* de combustibles y energía utilizados en los principales sectores responsables de las emisiones de GEI, se ha tomado como año de referencia el 2008, año al que, como ya se ha dicho, pertenecen la mayor cantidad de datos de las series manejadas.

Según los factores de emisión publicados por la Oficina Española de Cambio Climático, para ese año, se tendría un factor de emisión de 2,786 kg CO₂/l de gasóleo C, para equipos de combustión fija, que es el corresponde a las instalaciones de referencia.

Pero el dióxido de carbono no es el único GEI, luego hay que tener en cuenta las emisiones de metano y óxido nitroso. Estas, para este tipo de combustible y las instalaciones que se van a evaluar, suponen unas emisiones adicionales, proporcionalmente a las emisiones de CO₂, de $4,05 \times 10^{-5}$ kg CH₄ y $0,81 \times 10^{-5}$ kg N₂O.

Esta relación de emisiones se ha obtenido de documento del IPCC – Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático de la ONU (2006), para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero.

El CO₂ equivalente es el resultado de contabilizar las emisiones de estos gases, ponderando el potencial de calentamiento global (PCG) de cada uno de ellos, que son muy diferentes.

Para esta ponderación, se han tenido en cuenta los PCG de 100 años de horizonte temporal establecidos por la norma ISO/TS 14067 (2013) que, en su Anexo A establece un PCG de 25 para el metano y 298 para el óxido nitroso.

Por lo tanto, un litro de gasóleo C implica unas emisiones de CO₂ equivalente de:

$$\text{kg CO}_2\text{e} = 2,786 \text{ kg CO}_2 + 2,786 \times 4,05 \times 10^{-5} \text{ kg CH}_4 \times 25 + 2,786 \times 0,81 \times 10^{-5} \text{ kg N}_2\text{O} \times 298 = \mathbf{2,79554}$$

Por otro lado, para el caso de consumos de energía eléctrica, la Oficina Española de Cambio Climático también publica los factores de emisión reales, en función del *mix* eléctrico de cada año.

Para el año de referencia, el 2008, se ha considerado el segundo factor más desfavorable (0,38 kg CO₂/kWh). De esta forma se considera un dato realista, dentro de un factor que no siempre es posible elegir, dependiendo de la ubicación de las instalaciones.

De igual forma que se hizo con el combustible, hay que tener en cuenta también las emisiones de metano y óxido nitroso. Estas, suponen unas emisiones adicionales, proporcionalmente a las emisiones de CO₂, de 4,05 x 10⁻⁵ kg CH₄ y 0,81 x 10⁻⁵ kg N₂O.

Y el CO₂ equivalente es el resultado de contabilizar las emisiones de estos gases, ponderando el potencial de calentamiento global (PCG) de cada uno de ellos, de igual forma que se hizo para el consumo de gasóleo.

Por lo tanto, un kWh implica unas emisiones de CO₂ equivalente de:

$$\text{kg CO}_2\text{e} = 0,38 \text{ kg CO}_2 + 0,38 \times 4,05 \times 10^{-5} \text{ kg CH}_4 \times 25 + 0,38 \times 0,81 \times 10^{-5} \text{ kg N}_2\text{O} \times 298 = \mathbf{0,38130}$$

3.6 Asignación subsistema 1: Extracción y procesamiento de los áridos

Para la fabricación de cualquier tipo de mezcla bituminosa se emplean áridos, o elementos de naturaleza pétreo, que le aportan el adecuado esqueleto mineral, que es necesario para la obtención de la resistencia necesaria por rozamiento interno.

Las proporciones de estos son variables, aunque generalmente superan el 90 por cien en masa. Por lo tanto, se necesitan grandes volúmenes para la construcción de los firmes de carreteras y otras aplicaciones. Es por todo ello que estos elementos son muy importantes, desde los puntos de vista técnico y económico, en los estudios de firmes de carreteras.

Su procedencia puede ser muy diversa. De forma general, se habla de:

- **Áridos naturales**, cuando se extraen de yacimientos (areneros, graveras, etc.) de origen fluvial, eólico o marino.
- **Áridos de machaqueo**, cuando se extraen de canteras abiertas en formaciones rocosas.
- **Y áridos artificiales**, procedentes de subproductos de la construcción (RCD, RAP, etc.), industriales (escorias, cenizas, desechos, etc.), o de otras actividades. Es, por tanto, en esta última categoría en la se encuadra el asfalto recuperado, el RAP, cuyo papel es clave en el presente estudio.

Las emisiones obtenidas, para el año de referencia (2008), se han obtenido midiendo los consumos de los distintos equipos que participan en la extracción y manipulación de los áridos y, a partir de ellos, estos consumos se han dividido entre la producción total anual de áridos, para poder obtener así los consumos de combustible o energía unitarios, los cuales, multiplicados por los factores de emisión correspondientes, para el año 2008, permiten obtener las emisiones de CO₂e de cada uno de los procesos.

Las emisiones unitarias consideradas para los cálculos, a partir de los consumos energéticos y de combustibles en estos procesos, han sido las obtenidas de multiplicar dichos consumos por los factores de emisión ya calculados en el apartado anterior.

Dividiendo estas emisiones entre la producción total de áridos y la de los distintos tipos de mezclas bituminosas en caliente que fueron fabricadas en las plantas y obras controladas, se obtienen los datos de emisiones unitarias para los distintos equipos considerados.

Para considerar el caso de los áridos que provengan de machaqueo (cantera) habría que considerar las emisiones producidas por la voladura y extracción para la explotación de la cantera. Estos procesos, más costosos, son también más consumidores de recursos y, por tanto, generadores de una mayor cantidad de emisiones. Este tipo de áridos, más caros que los anteriores, se emplean en mayor proporción en capas de rodadura, debido a que su mayor dureza les confiere unas mejores prestaciones en cuanto a la comodidad y seguridad del tráfico por su mejor resistencia frente al desgaste o pulimento.

Al no tener posibilidad de obtener datos reales de estos procesos de extracción, se ha procedido de la siguiente manera: se han buscado distintas fuentes y bases de datos que contemplen estas

emisiones y se han cotejado con las que se tienen para el caso de áridos naturales, con el fin de analizar su grado de fiabilidad.

Como ya se ha dicho, muchas de las bases de datos y estudios de ACV disponibles manejan datos sin justificar, muy dispares entre ellos, y que cuando se cotejan con los disponibles en el presente estudio, obtenidos de mediciones y controles sobre equipos y obras reales, no se corresponden con la realidad medida.

Para el caso del Subsistema de “Extracción y procesamiento de los áridos” sólo uno de los documentos que fueron analizados manejaba datos muy similares a los obtenidos por el autor.

Se trata del Documento titulado “*WP6 – Life Cycles Evaluation*”, redactado en noviembre de 2009 por el ECRPD (Energy Conservation in Road Pavement Design, Maintenance and Utilisation) de la República Checa.

Este estudio ha realizado un análisis detallado de los principales impactos producidos en la construcción y conservación de carreteras en distintos países de Europa, incluyendo las emisiones de CO₂ y, al comprobar que las consideradas para la extracción y manipulación de áridos naturales eran muy similares a las manejadas en el presente trabajo, se han tomado de él las emisiones generadas en el proceso de extracción de los áridos en canteras.

Así, la metodología desarrollada trabaja en función de los datos de entrada que son los distintos porcentajes, en masa y sobre la mezcla bituminosa, de áridos, ya sean naturales, de machaqueo y asfalto recuperado, que compondrán cada fórmula de trabajo analizada.

Para considerar la *reciclabilidad* de los materiales, sobre el porcentaje de RAP empleado sólo se computan las emisiones correspondientes a su tratamiento y manipulación en planta, en la medida (tasa) en que sea reutilizado. De esta forma, es una fracción más del árido, para la que se computan las emisiones correspondientes a su tratamiento.

Otras emisiones, que corresponderían al fresado o demolición necesarios para su obtención y al transporte desde el punto de fresado a la planta, ya están consideradas en los subsistemas correspondientes.

Los datos de entrada de este subsistema serían, por lo tanto, las distintas fracciones de áridos que entrarían a formar parte de la nueva mezcla bituminosa fabricada.

A partir de ellos se obtienen por separado las emisiones subtotaes por cada tipo de árido y las emisiones totales. También se obtienen las emisiones que implican los distintos equipos o fases empleados, lo cual también puede ser de interés para, como se viene diciendo, poder establecer medidas eficaces de reducción de emisiones y consumos energéticos.

Como ya se ha establecido, para un caso de aplicación concreto, se ha considerado una muestra como *muestra patrón o de referencia*, la denominada “F0”, compuesta por un 90,72% de árido procedente de machaqueo, y sin ningún porcentaje de RAP.

El ICV del Subsistema 1 quedaría, para esta muestra patrón, de la siguiente manera:

Tabla 1: Ejemplo de ICV para el Subsistema 1 “Producción de áridos”.

ETAPAS	Consumo gasoil o kWh/t	kg CO ₂ e/t áridos	ÁRIDOS NATURALES	ÁRIDOS MACHAQUEO	RAP	TOTAL
			kg CO ₂ e/t MB			
Extracción	N.D.	3,31		3,00		3,00
Retroexcavadora	0,11	0,308	0,00	0,28		0,28
Dúmper	0,09	0,252	0,00	0,23		0,23
Planta clasificación	6,13	2,337	0,00	2,12		2,12
Pala alimentación	0,09	0,252	0,00	0,23		0,23
METSO (Trat. RAP)	0,38	1,062			0,00	0,00
Manipulación RAP	0,20	0,559			0,00	0,00
		TOTALES	0,00	5,86	0,00	5,86

Luego, para la fórmula de trabajo de la muestra patrón F0, la HCP del subsistema “Producción de áridos” es de 5,86 kg CO₂e/t mezcla bituminosa. Como puede apreciarse, apenas existe diferencia, desde el punto de vista de las emisiones de GEI, entre los áridos procedentes de machaqueo o de extracción de yacimientos granulares.

3.7 Subsistema 2: Polvo mineral

Se define polvo mineral o filler a la fracción de árido cuya mayor parte pasa por el tamiz 0,063 mm (norma UNE-EN 933-2). Este componente de las mezclas asfálticas desempeña, por su elevada superficie específica, un papel fundamental en su comportamiento en función de su naturaleza, finura, actividad y la proporción en la que entra a formar parte de la mezcla.

Dentro de los tipos de filleres que pueden emplearse en las mezclas bituminosas se encuentra el propio de los áridos, procedente de su trituración, que es el denominado polvo mineral de recuperación.

También puede emplearse un polvo mineral de aportación, generalmente calizo, o productos comerciales de naturaleza pulverulenta, más activos. En España, para estos casos, se pueden emplear cemento portland o cal hidratada o apagada.

En otros países también se emplean cenizas volantes de central térmica y otros tipos de desechos y subproductos. Estos no se van a considerar por no estar sancionados por la práctica ni estar contemplados en la normativa vigente.

Para la determinación de las emisiones unitarias, en este caso, se han ido estudiando los distintos tipos de polvo mineral por separado, tal como se describe a continuación.

- Para el caso del **polvo mineral de recuperación**, aquí se vuelve a considerar la reciclabilidad del material y, por lo tanto, sus emisiones unitarias a considerar ahora son nulas, lo cual implica claras ventajas ambientales frente a las demás opciones.

Esto es debido a que ya han sido consideradas en la extracción y tratamiento de los áridos, proceso durante el cual se obtiene, como deshecho, este producto. En caso de considerarse, de nuevo, todas o parte de esas emisiones, se estaría incurriendo en el error, ya citado, de la doble contabilidad de emisiones, incumpliendo uno de los principios básicos del ACV y de la HCP.

En este caso se está dentro de lo que se denomina un sistema de circuito cerrado, pues se va a reutilizar para el mismo sistema producto dentro del cual ha sido generado como desecho. Y, según se indica en el Anexo C de la norma ISO/TS 14067 (2013), se evita la necesidad de asignación.

Habría otras emisiones correspondientes a la manipulación de este residuo, que no necesita tratamiento como tal, pero estas ya están consideradas en la planta de fabricación de mezclas asfálticas, en el subsistema correspondiente.

- El **polvo mineral de aportación** correspondería a un árido natural, con un proceso de tratamiento algo más complejo. En las planta de áridos analizadas también se elabora este tipo de material y, por lo tanto, se han obtenido las emisiones correspondientes de forma similar a las del Subsistema 1.
- Para el caso de la **cal hidratada y el cemento portland** se han obtenido las emisiones unitarias de la siguiente forma: están disponibles datos fiables y controlados (auditados) sobre las emisiones de CO₂ que implican los procesos industriales para su fabricación desde que estos sectores fueron incluidos en los Planes Nacionales de Asignación de Derechos de Emisión de GEI (PNA), a partir de la aplicación del Protocolo de Kioto.

En ambos casos, estas emisiones son muy altas debido a que la fabricación de cal o cemento implica la descarbonatación de roca caliza mediante su calcinación, lo cual supone dos tipos de emisiones de CO₂, las derivadas de la propia descarbonatación, y las derivadas de unos procesos de elevada intensidad energética. Los datos considerados para su fabricación, son

los suministrados oficialmente por ANCADE (Asociación Nacional de Fabricantes de Cales y Derivados de España) y OFICEMEN (Agrupación de Fabricantes de Cemento de España).

Ahora bien, estas emisiones corresponden sólo al proceso de fabricación de la cal o del cemento, es decir una huella de carbono “de la puerta a la puerta”. Y a ellas se han sumado las emisiones correspondientes a la extracción y tratamiento de los áridos procedentes de cantera que se emplean en su fabricación.

El autor considera inédito este cómputo de las emisiones totales de la cal o del cemento, no habiéndose encontrado ninguna referencia, a nivel internacional, que así lo haya hecho.

Los datos de entrada en este subsistema son los porcentajes de cada tipo de polvo mineral que entren en la fórmula de trabajo, en masa, sobre la mezcla bituminosa.

De esta forma, para el caso concreto de la mezcla de referencia F0, en la que se ha empleado un 3,25% de polvo mineral de recuperación y un 1,53% de cemento portland, el ICV de este subsistema quedaría de la siguiente forma.

Tabla 2: Ejemplo de ICV para el Subsistema 2 “Polvo mineral”.

Polvo mineral empleado	Porcentaje sobre MB	kg CO ₂ e/t p.m.	kg CO ₂ e/t MB
Polvo mineral de recuperación	3,25%	0,000	0,00
Polvo mineral de aportación	0,00%	3,137	0,00
Cemento Portland	1,53%	883,310	13,51
Cal Hidratada	0,00%	1.109,310	0,00
		TOTAL	13,51

Luego, para la fórmula de trabajo de la muestra patrón F0, la HCP del subsistema “Polvo mineral” es de 13,51 kg CO₂e/t mezcla bituminosa, mucho mayor que el anterior, a pesar de suponer un porcentaje de material, y en coste, dentro de lo que supone el producto mezcla bituminosa, mucho menor.

Esto se debe a una situación singular, pero real, en la que la mezcla bituminosa, en función del tipo de áridos empleados, silíceos, ha precisado el empleo de un polvo mineral activo, como es el caso del cemento portland, para lograr una buena adhesividad árido-betún.

3.8 Subsistema 3: Producción del ligante asfáltico

Existen dos formas posibles de incorporar este tipo de ligante a las mezclas bituminosas, en forma de betún asfáltico como tal, previo calentamiento, o en forma de emulsión bituminosa, a temperatura ambiente.

Los **betunes asfálticos** son los ligantes empleados en las mezclas bituminosas en caliente. Se define como betunes asfálticos, de acuerdo con la norma UNE-EN 12597, a los ligantes hidrocarbonados, prácticamente no volátiles, obtenidos a partir del crudo de petróleo o presentes en los asfaltos naturales, que son totalmente o casi totalmente solubles en tolueno, y con viscosidad elevada a temperatura ambiente.

También pueden emplearse **betunes modificados con polímeros** (norma UNE-EN 12597), que son los ligantes hidrocarbonados cuyas propiedades reológicas han sido modificadas durante su fabricación, por el empleo de uno o más polímeros orgánicos.

Frente a ellos, existe la posibilidad del empleo como ligante de **emulsiones bituminosas**, que son las dispersiones de pequeñas partículas de un ligante hidrocarbonado y eventualmente un polímero, en una solución de agua y un agente emulsionante. Estas implican unas emisiones de GEI distintas a las de los betunes, debido a su proceso de fabricación y al empleo de aditivos.

Para la determinación de las emisiones unitarias de los betunes y las emulsiones, tras un largo y complejo proceso, se han considerado las emisiones unitarias proporcionadas por *EUROBITUME*, la Asociación Europea de Fabricantes de Betún, para betunes, emulsiones y aditivos.

Esta asociación ha publicado in *Inventario de Ciclo de Vida del betún (2011)*, en el cual ha estimado los datos de emisiones unitarias correspondientes el refinado y manipulación del betún en las refinerías europeas, lo cual se ajusta mejor al caso estudiado.

Otro de los aspectos novedosos por parte de la metodología aquí desarrollada es que al tratarse de un ACV, yendo al principio del betún, se han estudiado también las emisiones correspondientes el proceso de extracción, transporte y manipulación del crudo hasta las refinerías. Estas emisiones son mayores que las anteriores, incluyendo las llamadas *emisiones fugitivas*, que son aquellas emisiones de gases que se producen por fugas en trasvases, conducciones, etc.

Por lo tanto, están incluidas las emisiones del la extracción de crudo, su transporte a Europa, el refinado para la producción del betún, y su almacenamiento y manipulación. También están contemplados los procesos de fabricación de emulsiones bituminosas.

Desde el punto de vista de las emisiones, se han considerado de forma distinta dos tipos de betunes, los betunes asfálticos y los betunes modificados, pues estos últimos, al incorporar aditivos, implican mayores emisiones de GEI.

Además, se ha tenido en cuenta también la posibilidad de empleo de **aditivos o modificadores del betún**, pues estos productos llevan también grandes impactos asociados.

En la siguiente tabla se representa la forma en que quedaría el ICV de este subsistema para la mezcla de referencia F0, que se ha fabricado con un betún 50/70, en un porcentaje del 4,50%.

Tabla 3: Ejemplo de ICV del Subsistema 3 “Ligante asfáltico”.

Ligante empleado	Porcentaje sobre MBC	kg CO ₂ e/t	kg CO ₂ e / t MBC
Betún asfáltico	4,50%	244,142	10,99
Betún modificado	0,00%	376,141	0,00
Aditivos (SBS)	0,0%	130,044	0,00
Emulsión bituminosa	0,0%	274,769	0,00
		TOTAL	10,99

Para la fórmula de trabajo de la muestra patrón F0, la HCP del subsistema “Ligante asfáltico” es de 10,99 kg CO₂e/t mezcla bituminosa, resultado que, al igual que el subsistema anterior, representa un valor elevado, en comparación con el subsistema primero, de producción de áridos, suponiendo también un porcentaje mucho menor para el producto mezcla bituminosa.

Sin embargo, en este caso, este subsistema sí supone un gran porcentaje dentro del coste de la mezcla bituminosa, lo cual está más en consonancia.

El empleo de un betún modificado, que, a priori, podría suponer un incremento del 54,1% de las emisiones de GEI en este subsistema (5,94 kg CO₂e/t MB), también implicaría la posibilidad de no tener que emplear un filler tan activo como el cemento, de tal forma que, sobre la mezcla F0, podría evitar todo o parte de los 13,51 kg CO₂e/t MB que supone su empleo, lo cual implicaría no un incremento, sino un ahorro de la HCP final.

3.9 Subsistema 4: Planta asfáltica

Este subsistema comprende el proceso de fabricación de la mezcla bituminosa en la planta asfáltica. Para el tipo de mezclas de referencia, las mezclas bituminosas en caliente (MBC), los principales consumos y emisiones se producen como consecuencia de la actividad del quemador principal, de la caldera, y del grupo electrógeno necesario para alimentación auxiliar.

En este proceso, debe considerarse el tipo de combustible empleado: gas natural, fuel, posibilidad de cogeneración, etc., pues es el que determina los principales insumos y costes.

Además, juega un papel importante, para los objetivos de la presente metodología de HCP, la posibilidad de empleo de altas tasas de reciclado, lo cual puede llegar a implicar la necesidad de un doble tambor secador en la planta, modificando los impactos de este subsistema.

Para el control de los consumos energéticos y emisiones se ha contado con plantas continuas y discontinuas. Se dispone de datos tomados durante los años 2008, 2009 y 2010, para distintos tipos de obras, de todos los tipos de mezclas bituminosas y empleando distintos porcentajes de asfalto recuperado. Por lo tanto, se dispone de una muestra de datos muy representativa.

Analizadas las series de datos manejadas, se ha llegado a la conclusión de que los parámetros de los que dependen las emisiones de CO₂ de una planta de fabricación de MBC son la **producción (t/h)**, que determina el régimen de funcionamiento, y el **tipo de combustible** empleado, que puede ser más o menos contaminante, desde el punto de vista del ecoindicador considerado.

Otro de los parámetros con los que en un principio, se pensó que podría estar relacionado el nivel de emisiones de CO₂ de la planta asfáltica es el porcentaje de asfalto recuperado incorporado, en la medida en que altera los consumos y funcionamiento.

Para porcentajes de RA habituales, por debajo del 30 por ciento, se ha comprobado que no hay variación apreciable de las emisiones, a igualdad del resto de factores. En el caso de mayores tasas de RA, estas emisiones son mayores, debido a los consumos que implica el doble tambor.

Para considerar este factor en la metodología desarrollada, se ha procedido a introducir una fórmula que, según el porcentaje de RA empleado, estime el sobrecalentamiento necesario y, por lo tanto, el incremento de consumo energético que esto supone, obteniendo el exceso de emisiones de CO₂e que implica.

El autor no ha encontrado ninguna referencia, ni nacional ni internacional, en la cual se considere este aspecto que, sin embargo, modifica sustancialmente los resultados obtenidos en el caso de tasas medias y altas de reciclado.

También se debe tener en cuenta que es posible que en muchos países, donde existe una mayor costumbre del empleo de altas tasas de asfalto recuperado, este se protege adecuadamente en las instalaciones hasta su empleo, lo cual evitaría, en parte, este incremento del consumo energético de la planta asfáltica.

Y, finalmente, el otro parámetro que determina el nivel de emisiones de CO₂ es el **combustible empleado**. Así, el hecho de emplear fuel-oil o gas natural (GNL) implica unas emisiones unitarias muy distintas, mucho más contaminantes en el primer caso.

Además, el hecho de instalar un **sistema de cogeneración** que aproveche el calor excedente del calentamiento de los áridos mejora aún más la eficiencia energética y, por lo tanto, reduce las emisiones de CO₂.

El combustible empleado determina las emisiones de CO₂ del proceso de fabricación, de tal forma que el cambio de fuel-oil a gas natural implicaría un ahorro de más del 28 por ciento de las emisiones en este subsistema. Además, la instalación de un sistema de cogeneración permite reducir estas emisiones en un 51 por ciento adicional.

Después de todo este proceso de estudio y análisis, el ICV de este subsistema es más sencillo de lo que podría parecer a simple vista. A continuación se representa la forma en que quedaría un caso concreto, en función de los dos parámetros de entrada ya señalados: la producción de la planta,

suponiendo una producción de 260 t/h, y una planta en la que se esté empleando gas natural como combustible.

Estos dos datos fueron los más habituales para las obras consideradas. La producción de 260 t/h es un valor habitual en las plantas. Sin embargo, el empleo de GNL depende de que la ubicación de la planta permita un enganche económico a un gasoducto de la red de distribución nacional, lo cual no siempre es posible.

Tabla 4: Ejemplo de ICV del Subsistema 4 "Planta asfáltica".

Producción	260		
Combustible Planta	Gas Natural		
Combustibles	kg CO2e/h	Producción t/h	kg CO2e/t MB
Gas Natural (GNL)	4.712,500	260	18,13
Fuel Oil	6.271,460	0	0,00
Cogeneración	2.290,860	0	0,00
		TOTAL	18,13

Por lo tanto, para una planta asfáltica típica de los entornos de ciudades y grandes poblaciones, en las que están disponibles redes de distribución de gas natural, y tienen posibilidad de abastecer a un gran número de obras de pavimentación asfáltica, funcionando a unos ritmos de producción normales, la HCP del subsistema "Planta asfáltica" es de 18,13 kg CO₂e/t mezcla bituminosa, siendo el resultado más elevado que se ha obtenido hasta ahora, lo cual era de esperar.

3.10 Subsistema 5: Puesta en obra de las mezclas bituminosas

En este subsistema se consideran los procesos necesarios para la ejecución de las capas bituminosas de un firme de carretera. Se han controlado todos los equipos y fases necesarios para una correcta ejecución: los elementos de transporte, que han sido incluidos en el subsistema correspondiente, las máquinas fresadoras y barredoras necesarias para la preparación de la superficie existente, los equipos para el extendido de riegos de emulsiones para la imprimación y adherencia, el equipo de transferencia móvil, la extendedora, y los distintos equipos de compactación necesarios.

A partir de estos resultados se han obtenido las emisiones unitarias de los distintos equipos de puesta en obra, de tal forma que, considerando el número de equipos empleado en cada obra de las analizadas, la metodología desarrollada cuantifica las emisiones de CO₂ totales. En la siguiente tabla puede apreciarse un ejemplo del ICV que resultaría para una obra tipo, en función de los equipos utilizados.

Para una obra de firme de carretera típica, con equipos funcionando a unos ritmos de producción normales, la HCP del subsistema “Puesta en obra” es de 1,49 kg CO₂e/t mezcla bituminosa, siendo un resultado también muy bajo en comparación con los ya obtenidos, y teniendo en cuenta que su coste relativo sí es importante y la importancia que tiene esta fase desde el punto de vista de la calidad para la correcta prestación de las funciones consideradas.

Tabla 5: Ejemplo de ICV del Subsistema 5 “Puesta en obra de mezclas bituminosas”.

Equipos	Nº Equipos	kg CO ₂ e/t MB	kg CO ₂ e/t MB	Fuente
Fresadora	1	0,129	0,13	Sorigué
Cisterna de Emulsión	1	0,185	0,19	Sorigué
Silo de Transferencia	1	0,039	0,04	Sorigué
Extendedora	1	0,554	0,55	Sorigué
Compactador de Rodillos	1	0,277	0,28	Sorigué
Compactador de Neumáticos	1	0,219	0,22	Sorigué
Barredora	1	0,083	0,08	Sorigué
		TOTALES	1,49	

3.11 Subsistema 6: Conservación y rehabilitación

Llegados al estudio en detalle de este subsistema, no se ha considerado necesario ni conveniente su consideración en el Inventario de Ciclo de Vida (ICV), debido a los siguientes motivos:

- No tiene sentido para la unidad funcional considerada la *tonelada de mezcla bituminosa fabricada y colocada en obra durante 15 años (t MB₁₅)*, pues no se trata de un firme o una carretera, sino, simplemente, la mezcla bituminosa como material. Por lo tanto, su evaluación considera los subsistemas necesarios hasta su colocación y puesta en servicio, y la demolición necesaria para poder dar por finalizada su “vida útil”.

Las operaciones de conservación y mantenimiento, como tal, no se aplican a esta UF, sino a un sistema superior, del que formaría parte, que sería el firme de la carretera, o un sistema aún más amplio, que sería el tramo de carretera en el que se encuentra prestando su servicio.

- No se debe considerar el subsistema conservación porque depende de otros factores que se exceden de la unidad funcional considerada: tipo de mezcla, espesor de capa, tipo de firme, tipo de carretera, colocación de la mezcla (capa de base, intermedia o rodadura), etc. Así, en el caso de una capa para base del firme, esta no requerirá, como tal, ninguna operación de conservación durante los 15 años de vida útil esperada.

- No sirve para los objetivos buscados con la presente metodología, pues la durabilidad y necesidades de conservación no dependen, a priori, del porcentaje de RA incorporado en la fabricación de la mezcla bituminosa, ni de la temperatura de fabricación.

Por todo ello, como ya se ha dicho, este subsistema no se ha considerado necesario de cuantificar en el ICV de la metodología desarrollada.

3.12 Subsistema 7: Demolición de la mezcla bituminosa

Cuando, tras el paso del tráfico y las acciones climáticas, las mezclas bituminosas pierden sus características iniciales, hasta su deterioro, deben ser retiradas y el firme del que forman parte adecuadamente reconstruido para prestar servicio a las nuevas condiciones de la carretera.

Así, estas capas de firme, ya agotadas, se retiran mediante fresado, para ser repuestas con MBC nuevas. Estos materiales fresados (RAP) son los que dan lugar a las técnicas de reciclado de firmes, objeto de evaluación de la presente metodología.

Respecto a este subsistema, se han considerado las labores necesarias para el fresado y retirada de la unidad funcional considerada, la tonelada de mezcla bituminosa colocada en obra, tras pasar 15 años de prestación de servicio, tras lo cual se procederá a su demolición o retirada y posterior retirada a vertedero o reutilización.

A continuación, en la siguiente tabla, se muestran los datos y resultados para el ICV de este subsistema.

Tabla 6: Ejemplo de ICV para el Subsistema 7 “Demolición de MBC”.

Equipos	Nº Equipos	kg CO ₂ e/t MB	kg CO ₂ e/t MB
Fresadora	1	0,129	0,13
Barredora	1	0,083	0,08
		TOTALES	0,21

Transcurridos los 15 años de vida útil prevista para la unidad funcional considerada, el subsistema “Demolición” implica unas emisiones de GEI de 0,21 kg CO₂e/t mezcla bituminosa, prácticamente despreciable en comparación con el resto de subsistemas considerados.

3.13 Subsistema 8: Transporte

Tal como planteaban las normas y recomendaciones al respecto mientras se comenzaba el presente trabajo de investigación, el transporte entre etapas de los procesos analizados, actividad fundamental

a considerar, aparece en la metodología desarrollada de forma agrupada como una sola actividad, aunque debidamente desglosado, en este último subsistema.

Es un subsistema muy importante pues, aparte de los impactos que supone, estos son muy variables en función de las distancias de transporte entre el resto de subsistemas. En función de los datos obtenidos, en unos casos, podrán optimizarse estas distancias, y en otros no se dispondrá de tal posibilidad.

La forma de resolver los impactos de este subsistema ha sido la siguiente. Se han determinado las emisiones unitarias de CO₂ por kilómetro de los distintos medios de transporte utilizados.

A partir de aquí, los grados de libertad o entradas del sistema son dos: las distancias recorridas por cada uno de ellos y la cantidad total de mezcla bituminosa fabricada y puesta en obra, pues a partir de ella se calculan los viajes necesarios para el transporte de los productos necesarios: materias primas, producto fabricado, etc.

También se han considerado los transportes necesarios para el personal de las plantas y obras en sus desplazamientos. Este es otro de los aspectos que reflejan el nivel de detalle al que se ha llegado con esta metodología.

Así, se realiza el ICV del Subsistema Transporte, considerando todos los medios necesarios. En la siguiente tabla se refleja este ICV.

Tabla 7: Ejemplo de ICV del Subsistema 8 "Transporte".

Mezcla bituminosa fabricada y extendida (t)			16.000	
Elementos	Número/Viajes	Distancia (km)	kg CO ₂ e/km	kg CO ₂ e/t MB
Camiones Áridos-Planta MB	538	10,0	1,422	0,96
Cisterna Ligante-Planta MB	36	200,0	1,422	1,28
Cisterna Polvo mineral-Planta MB	12	80,0	1,422	0,17
Camiones góndola para equipos	5	35,0	1,422	0,03
Camiones bañera para MB	593	35,0	1,422	3,69
Vehículos personal	160	35,0	0,213	0,15
Camiones recogida fresado	593	35,0	1,422	3,69
			TOTAL	9,96

Según el ICV realizado, el transporte necesario para resolver de forma completa todos los procesos que permiten las prestaciones funcionales de una tonelada de mezcla bituminosa durante 15 años de vida útil implica una HCP de GEI de 9,92 kg CO₂e/t mezcla bituminosa.

CAPITULO 4. RESULTADOS DE LA HCP *MEZCLAS BITUMINOSAS*

4.1 Introducción

Esta última fase consiste en la correcta presentación de los resultados obtenidos en el AICV y EICV, según los objetivos marcados y según a quién va dirigido el estudio.

La interpretación es la combinación de los resultados del análisis de inventario y de la evaluación de impacto de la huella de carbono de producto de la tonelada de mezcla bituminosa fabricada y colocada en obra durante 15 años, en la cual se proporcionan resultados coherentes con el objetivo y el alcance ya definidos.

Durante el desarrollo del presente trabajo se ha ido realizando, durante esta fase, un proceso iterativo de revisión y actualización del alcance de esta HCP, así como de la naturaleza y la calidad de los datos recopilados, confirmando que son coherentes con los objetivos buscados.

En esta etapa se verifica la adecuación de la categoría de impacto seleccionada, el potencial de calentamiento global (PCG) en función de los resultados obtenidos, permitiendo identificar los impactos más significativos, obtener conclusiones, y perfilar posibilidades de actuación para la mejora global del comportamiento ambiental de este producto.

El análisis incluye medidas cualitativas y cuantitativas de mejoras: empleo de materiales alternativos, empleo de distintos porcentajes de asfalto recuperado, y fabricación de mezclas bituminosas a menores temperaturas.

Los resultados obtenidos, además, están mostrando estrategias claras de cara al rediseño de mezclas bituminosas, teniendo en cuenta criterios ambientales. Esto supone que la metodología desarrollada supone una herramienta para el *ecodiseño* de mezclas bituminosas y firmes de carretera.

4.2 Resultados de HCP para mezclas bituminosas

Una vez resuelto el ICV de todos los subsistemas considerados para el sistema de producto “*tonelada de mezcla bituminosa fabricada y colocada en obra durante 15 años (t MB₁₅)*”, los resultados obtenidos, para la muestra patrón F0, son los que se reflejan en la siguiente tabla.

De aquí se puede concluir que, para la fórmula de trabajo de la muestra patrón F0, la HCP del sistema de producto “*tonelada de mezcla bituminosa fabricada y colocada en obra durante 15 años (t*

MB₁₅)” es de 60,15 kg CO₂e/t mezcla bituminosa, con los pesos específicos de los distintos procesos o subsistemas indicados, en porcentaje.

Tabla 8: Resultados de HCP para t MB15.

HCP MB15	F0 - 0% RAP	
SUBSISTEMAS	kg CO ₂ e/t MB	Porcentaje
SUBSISTEMA 1: EXTR. Y PROC. ÁRIDOS	5,86	9,7%
SUBSISTEMA 2: POLVO MINERAL	13,51	22,5%
SUBSISTEMA 3: LIGANTE ASFÁLTICO	10,99	18,3%
SUBSISTEMA 4: PLANTA ASFÁLTICA	18,13	30,1%
SUBSISTEMA 5: PUESTA EN OBRA MB	1,49	2,5%
SUBSISTEMA 7: DEMOLICIÓN MB	0,21	0,4%
SUBSISTEMA 8: TRANSPORTE	9,96	16,6%
TOTAL	60,15	100,0%

El subsistema más importante, debido a sus consumos energéticos, es el de fabricación de la mezcla bituminosa en caliente en la planta asfáltica (30,1%), seguido del polvo mineral de aportación (22,5%), pues se ha empleado cemento portland, del betún asfáltico (18,3%), del transporte entre fases (16,6%), de la extracción y procesamiento de áridos (9,7%), de la puesta en obra (2,5%), y de la demolición (0,4%).

El resultado más sorprendente es, en opinión del autor, el escaso porcentaje que representa la HCP de la puesta en obra de las mezclas bituminosas, en comparación con la importancia que tiene dentro de la unidad funcional considerada, en lo referente a plazo, medios empleados, y en la importancia en la calidad del resultado final, lo cual determina el cumplimiento adecuado de sus funciones durante el período de tiempo considerado como vida útil esperable.

4.3 Análisis del Subsistema Transporte de la HCP

Dentro de los resultados obtenidos en el ICV del sistema de producto t MB₁₅, y en el análisis económico posterior de dichos resultados, ha podido apreciarse la importancia transporte entre las etapas del producto.

Este subsistema es muy variable y depende de múltiples factores y procesos, en los cuales está desglosado en el ICV correspondiente, aplicado para el caso de unas instalaciones y obra tipo.

Si se analizan los distintos procesos de transporte y su contribución al impacto final del subsistema correspondiente, se obtienen los porcentajes que se indican en la siguiente tabla.

Tabla 9: Análisis de la HCP del Subsistema "Transporte".

Elementos	kg CO ₂ e/t MB	Porcentaje
Camiones Áridos-Planta MB	0,96	9,6%
Cisterna Ligante-Planta MB	1,28	12,8%
Cisterna Polvo Mineral-Planta MB	0,17	1,7%
Camiones góndola para equipos	0,03	0,3%
Camiones bañera para MB	3,69	37,0%
Vehículos personal	0,15	1,5%
Camiones recogida fresado	3,69	37,0%
TOTAL	9,96	100,0%

De estos resultados puede verse que, para los datos de entrada considerados, la repercusión más importante, con gran diferencia, es la del transporte de la mezcla bituminosa fabricada para llevarla hasta la obra y, una vez finalizada su vida útil, el transporte de vuelta hacia la planta, para su futura reutilización, tras su retirada del firme de la carretera.

Por lo tanto, la ubicación de la planta de fabricación de mezclas asfálticas con respecto a la obra en la que se vayan a extender y compactar las toneladas de MB₁₅ cuya HCP se quiera determinar, es muy importante, tanto desde este punto de vista, siendo el cuarto responsable, como desde el económico, siendo el segundo responsable.

Además, la ubicación de la planta asfáltica también determina el impacto ambiental y económico de la mayor parte del resto de procesos de transporte considerados: áridos, ligante asfáltico, y polvo mineral.

Todos ellos suponen, sobre el total de la HCP del subsistema Transporte, para los datos de entrada considerados, el 98,1% de las emisiones de CO₂e, sobre el total de los transportes considerados.

Este subsistema, como queda demostrado, es el segundo responsable de lo que se ha denominado la HCCP de la t MB₁₅. Por lo tanto, puede considerarse a la planta de fabricación de mezclas bituminosas como el *centro neurálgico* o *punto crítico* en el subsistema Transporte y, por extensión, en la HCP de las mezclas bituminosas.

4.4 Mezclas bituminosas con distintos porcentajes de RAP

Con el objeto de analizar la viabilidad técnica del reciclado en central con altas tasas de asfalto recuperado (RAP), procedente de la demolición, retirada y tratamiento de mezclas asfálticas, preparado ya para su reutilización, se han diseñado dos tipos de mezclas.

Por un lado, una mezcla denominada "F20", con un 20% de RA, que representaría lo que se ha denominado *tasa media de reciclado*, y que, según la denominación propuesta por el autor, sería más adecuado denominarla "**ACR₂₀**".

Y, por otro lado, una mezcla denominada "F70", con un 70% de RA, en representación de las *altas tasas de reciclado*, que se ha denominado "**ACR₇₀**".

Estas mezclas se han planteado como variantes de la mezcla patrón F0, por lo cual han mantenido el objetivo de constituir una mezcla del tipo AC22 surf S, con las prestaciones finales necesarias, y cumpliendo las prescripciones vigentes para este tipo de mezcla.

Aplicando la metodología desarrollada, introduciendo los nuevos datos de entrada correspondientes a las fórmulas de trabajo de las mezclas ACR₂₀ y ACR₇₀, y considerando el resto de parámetros iguales a los que estaban establecidos, para obras y plantas asfálticas tipo, se obtienen los datos correspondientes de su HCP. De esta manera, los resultados obtenidos, comparándolos con los de la mezcla de referencia, son los que se reflejan en la siguiente tabla.

Tabla 10: HCP de las mezclas ACR20 y ACR70.

HCP MB15	F0 - 0% RA	ACR ₂₀		ACR ₇₀	
SUBSISTEMAS	kg CO2e/t MB15	kg CO2e/t MB	Ahorro	kg CO2e/t MB	Ahorro
SUBSISTEMA 1: EXTR. Y PROC. ÁRIDOS	5,86	5,78	1,4%	3,42	41,6%
SUBSISTEMA 2: POLVO MINERAL	13,51	12,72	5,9%	12,63	6,5%
SUBSISTEMA 3: LIGANTE ASFÁLTICO	10,99	8,81	19,8%	5,09	53,6%
SUBSISTEMA 4: PLANTA ASFÁLTICA	18,13	19,26	-6,3%	22,05	-21,7%
SUBSISTEMA 5: PUESTA EN OBRA MB	1,49	1,49	0,0%	1,49	0,0%
SUBSISTEMA 7: DEMOLICIÓN MB	0,21	0,21	0,0%	0,21	0,0%
SUBSISTEMA 8: TRANSPORTE	9,96	9,44	5,2%	8,60	13,7%
TOTAL	60,15	57,71	4,1%	53,50	11,1%

4.5 Mezclas bituminosas a menor temperatura

En último lugar, dado que la metodología desarrollada para el cálculo de la HCP de la t. de MB₁₅ es aplicable a cualquier tipo de mezcla bituminosa, se han evaluado las posibles ventajas que, desde el punto de vista de este ecoindicador, pueden suponer la fabricación de mezclas bituminosas a menores temperaturas que las mezclas en caliente (MBC).

Estos tipos de mezclas son las denominadas mezclas bituminosas semicalientes (MBS), mezclas bituminosas templadas (MBT), y mezclas bituminosas en frío (MBF).

Para realizar los cálculos necesarios, se han supuesto las mismas condiciones de planta asfáltica y obra que en los casos anteriores, lo cual implicaría que las plantas estarían adaptadas para su fabricación y la obra considerada permite su aplicación.

Sólo se han modificado la mezcla bituminosa de referencia y las fórmulas de trabajo de los distintos tipos de mezclas analizadas. En todos los casos se trata de mezclas viables técnicamente, correspondientes a casos reales, estudiados en laboratorio y, posteriormente, colocadas en obras.

4.5.1 Mezcla de referencia F1

Para la realización de este análisis se ha decidido trabajar con otra muestra de referencia, distinta de la F0, que permita evaluar, a su vez, la variación de la HCP entre distintas composiciones en las fórmulas de trabajo.

Aunque ya se han ido comentando diversos aspectos referentes al análisis de sensibilidad conforme varían los componentes de las mezclas bituminosas, este cambio permitirá apreciarlo mejor.

La mezcla que se ha considerado en este caso se corresponde con una mezcla bituminosa en caliente del tipo AC 16 surf D, cuya composición es la siguiente:

- Árido procedente de machaqueo: 92,00%
- Asfalto recuperado (RA): 0,00%
- Polvo mineral de recuperación: 3,20%
- Cemento portland: 0,00%
- Betún asfáltico 50/70: 4,80%
- Aditivos: 0,00%

En este caso, el ICV arroja un valor de HCP menor que en la mezcla F0, debido a la no incorporación de cemento portland, frente a un mayor porcentaje de betún asfáltico. Los resultados, comparados entre las dos muestras de referencia utilizadas, se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 11: Resultados de HCP para t MB15.

HCP MB15	F0 - 0% RA	F1 - 0% RA		Ahorro
SUBSISTEMAS	kg CO2e/t MB15	kg CO2e/t MB15	Porcentaje	
SUBSISTEMA 1: EXTR. Y PROC. ÁRIDOS	5,86	6,73	14,0%	-14,8%
SUBSISTEMA 2: POLVO MINERAL	13,51	0,00	0,0%	100,0%
SUBSISTEMA 3: LIGANTE ASFÁLTICO	10,99	11,58	24,1%	-5,4%
SUBSISTEMA 4: PLANTA ASFÁLTICA	18,13	18,13	37,7%	0,0%
SUBSISTEMA 5: PUESTA EN OBRA MB	1,49	1,49	3,1%	0,0%
SUBSISTEMA 7: DEMOLICIÓN MB	0,21	0,21	0,4%	0,0%
SUBSISTEMA 8: TRANSPORTE	9,96	9,89	20,6%	0,8%
TOTAL	60,15	48,02	100,0%	20,2%

Como puede apreciarse, la nueva mezcla F1 supone un ahorro de la HCP del 20,2%, con respecto a la anterior F0, debido al ahorro de emisiones que supone el hecho de no haber empleado cemento portland, a pesar de haber empleado una mayor proporción de áridos de machaqueo y un mayor porcentaje de betún asfáltico.

4.5.2 HCP de las mezclas bituminosas semicalientes

Con de la misma fórmula de trabajo que la mezcla de referencia F1, en este caso se ha considerado el empleo de un pequeño porcentaje de aditivo para reducir la viscosidad del ligante y permitir esa reducción de temperatura. Los resultados obtenidos de HCP son los que se muestran, de forma comparada con la mezcla F1, en la siguiente tabla.

Como puede apreciarse, se obtiene una gran reducción de las emisiones, del 23,5%, en el proceso de fabricación de la mezcla asfáltica, debido a la menor temperatura necesaria, mejora que se ve algo reducida por la necesidad de emplear los aditivos ya citados, que suponen un incremento de las emisiones de GEI consideradas en el Subsistema 3.

Una vez considerado el balance global, este tipo de mezclas implican una reducción total de las emisiones de CO₂e del 8,0%.

Tabla 12: HCP de las mezclas bituminosas semicalientes.

HCP MB15	F1	MBS	Ahorro
SUBSISTEMAS	kg CO2e/t MB15	kg CO2e/t MB15	
SUBSISTEMA 1: EXTR. Y PROC. ÁRIDOS	6,73	6,69	0,5%
SUBSISTEMA 2: POLVO MINERAL	0,00	0,00	0,0%
SUBSISTEMA 3: LIGANTE ASFÁLTICO	11,58	12,03	-3,8%
SUBSISTEMA 4: PLANTA ASFÁLTICA	18,13	13,86	23,5%
SUBSISTEMA 5: PUESTA EN OBRA MB	1,49	1,49	0,0%
SUBSISTEMA 7: DEMOLICIÓN MB	0,21	0,21	0,0%
SUBSISTEMA 8: TRANSPORTE	9,89	9,88	0,1%
TOTAL	48,02	44,16	8,0%

4.5.3 HCP de las mezclas bituminosas templadas

Este tipo de mezclas puede fabricarse a partir de betunes asfálticos aditivados o espumados, o empleando emulsiones bituminosas. Por ello, se han realizado dos análisis por separado, considerando mezclas templadas de ambos tipos, que son los reflejados en la siguiente tabla.

Tabla 13: HCP de las mezclas bituminosas templadas.

HCP MB15	F1	MBT-Betún	Ahorro	MBT-Emulsión	Ahorro
SUBSISTEMAS	kg CO2e/t MB15	kg CO2e/t MB15		kg CO2e/t MB15	
SUBSISTEMA 1: EXTR. Y PROC. ÁRIDOS	6,73	6,88	-2,3%	6,79	-1,0%
SUBSISTEMA 2: POLVO MINERAL	0,00	0,00	0,0%	0,11	
SUBSISTEMA 3: LIGANTE ASFÁLTICO	11,58	11,58	0,0%	12,17	-5,1%
SUBSISTEMA 4: PLANTA ASFÁLTICA	18,13	10,66	41,2%	9,06	50,0%
SUBSISTEMA 5: PUESTA EN OBRA MB	1,49	1,49	0,0%	1,49	0,0%
SUBSISTEMA 7: DEMOLICIÓN MB	0,21	0,21	0,0%	0,21	0,0%
SUBSISTEMA 8: TRANSPORTE	9,89	9,91	-0,2%	10,09	-2,1%
TOTAL	48,02	40,73	15,2%	39,92	16,9%

Con la mezcla templada fabricada a partir de emulsión bituminosa se logra una reducción total de emisiones de GEI del 16,9%, debido, fundamentalmente, a la reducción del 50,0% en el proceso de

fabricación, y a pesar de que el empleo de emulsión bituminosa supone un incremento del 5,1% en el Subsistema 3 y el empleo de la arena también incrementa las emisiones en el Subsistema 1 en un 1,0%.

Por otro lado, la reducción total que se consigue con las mezclas templadas con betún es bastante similar, del 15,2%, no produciéndose tanto ahorro en la fabricación, como era de esperar.

Hay que aclarar que el pequeño incremento de HCP que se produce en el Subsistema 8 “Transporte”, al considerar las mezclas templadas con respecto a las mezclas en caliente, se debe simplemente a que, en igualdad de condiciones de suministros, plantas y obra, influye la proporción sobre la mezcla de los distintos componentes.

4.5.4 HCP de las mezclas bituminosas en frío

En algunos casos, este tipo de mezclas pueden ser también alternativas a las mezclas bituminosas en caliente, por lo cual se ha considerado su análisis desde el punto de vista de su huella de carbono.

Se ha buscado una fórmula de trabajo similar a la de referencia pero, en este caso, adoptando la composición y granulometría de una mezcla del tipo MICROF 8, con una emulsión bituminosa C60B4 MIC (betún residual 7%), que permita considerar también una mezcla bituminosa para capa de rodadura.

En este caso, las emisiones de la planta de fabricación son mínimas, correspondiendo únicamente a los procesos de clasificación de los áridos y de mezcla sin calentamiento alguno. Los resultados de la HCP obtenidos, comparados también con la mezcla inicial o de referencia, son los que se exponen en la siguiente tabla.

Tabla 14: HCP de las mezclas bituminosas en frío.

HCP MB15	F1	MBF	Ahorro
SUBSISTEMAS	kg CO2e/t MB15	kg CO2e/t MB15	
SUBSISTEMA 1: EXTR. Y PROC. ÁRIDOS	6,73	6,74	-0,2%
SUBSISTEMA 2: POLVO MINERAL	0,00	0,00	0,0%
SUBSISTEMA 3: LIGANTE ASFÁLTICO	11,58	10,84	6,4%
SUBSISTEMA 4: PLANTA ASFÁLTICA	18,13	1,81	90,0%
SUBSISTEMA 5: PUESTA EN OBRA MB	1,49	1,49	0,0%
SUBSISTEMA 7: DEMOLICIÓN MB	0,21	0,21	0,0%
SUBSISTEMA 8: TRANSPORTE	9,89	9,55	3,4%
TOTAL	48,02	30,65	36,2%

Aquí también hay que aclarar que la reducción de emisiones que se produce en el Subsistema 8 "Transporte", con respecto a las mezclas en caliente, se debe simplemente a que, a igualdad de condiciones de suministros, plantas y obra, influye la proporción sobre mezcla de los distintos componentes.

Como puede apreciarse, esta mezcla en frío implica una reducción del 90,0% en las emisiones de GEI del proceso de fabricación de la mezcla, lo cual se traduce en una reducción final del 36,2% de la huella de carbono con respecto a la mezcla bituminosa en caliente. Ello se debe a que en este tipo de mezclas no se calientan los áridos y el proceso de fabricación tiene lugar a temperatura ambiente.

CAPITULO 5. CONCLUSIONES

El presente trabajo de investigación ha permitido cuantificar, con perspectiva del Ciclo de Vida, la Huella de Carbono (HCP) del sistema de producto “tonelada de mezcla bituminosa fabricada y colocada en obra durante 15 años ($t MB_{15}$)”, desarrollando una metodología específica, basada en datos reales y oficiales o reconocidos, siguiendo las directrices de la norma UNE-CEN ISO/TS 14067:2015 “Gases de efecto invernadero. Huella de carbono de productos. Requisitos y directrices para cuantificación y comunicación”.

Los resultados obtenidos, de forma desglosada, pueden considerarse muy ajustados a la realidad, para los datos de entrada y objetivos considerados en el presente estudio, y permiten obtener las conclusiones ya reflejadas en el capítulo anterior y, además:

1. La HCP de una mezcla bituminosa del tipo AC22 surf S es de 60,15 kg CO₂e/t MB₁₅, para la fórmula de trabajo denominada F0, resultado de la suma de la huella de carbono de todos los subsistemas implicados en su ciclo de vida. Esta mezcla está compuesta por áridos de machaqueo, polvo mineral de recuperación, cemento portland y betún asfáltico.
2. Sin embargo, la HCP para una mezcla bituminosa AC16 surf D, con distinta composición que la anterior, incrementando el porcentaje de betún y prescindiendo del empleo de cemento como polvo mineral, con la fórmula de trabajo denominada F1, se ve reducida a 48,02 kg CO₂e/t MB₁₅, un 20,2% menor que la anterior.
3. Por lo tanto, la HCP de una mezcla bituminosa varía sensiblemente en función de la fórmula de trabajo, especialmente en el caso de que varíen los subsistemas o componentes con mayor incidencia en la huella de carbono, que son el polvo mineral y el ligante asfáltico.
4. Se obtienen, en todos los casos en los que se empleen distintos porcentajes de asfalto recuperado, ahorros de HCP. Para la mezcla ACR₂₀ el ahorro es del 4,1%, para la ACR₇₀, el ahorro llegaría al 11,1%. Este ahorro se debe, fundamentalmente, a la reducción del betún asfáltico empleado y al ahorro en la extracción y procesamiento de áridos vírgenes necesarios.
5. Para el caso de las mezclas bituminosas semicalientes (MBS), se obtiene una reducción de las emisiones de GEI del 23,5%, en el proceso de fabricación de la mezcla asfáltica, debido a la menor temperatura necesaria, y, considerando el balance global, este tipo de mezclas implican una reducción total de las emisiones de CO₂e del 8,0%.

6. En el caso de las mezclas bituminosas templadas (MBT) templada fabricadas a partir de emulsión bituminosa se logra una reducción total de emisiones de GEI del 16,9%, debido, fundamentalmente, a la reducción del 50,0% en el proceso de fabricación.
7. Por otro lado, la reducción total que se consigue con las mezclas bituminosas templadas (MBT) con betún asfáltico es similar, del 15,2%, no produciéndose tanto ahorro en la fabricación, como pudiera parecer a priori.
8. En el caso de las mezclas bituminosas en frío (MBF), su empleo implicaría una reducción del 90,0% en las emisiones de GEI del proceso de fabricación de la mezcla, lo cual se traduce en una reducción final del 36,2% de la huella de carbono con respecto a la mezcla bituminosa en caliente.
9. Los resultados obtenidos al analizar las distintas técnicas pueden sumarse, entre ellos, de tal forma que el caso de las MBT es el que mayor potencial de reducción de la HCP de las mezclas bituminosas presenta, dentro de todas las técnicas analizadas, pues, como está demostrado con aplicaciones reales, es la técnica que, en el momento actual, presenta las mejores condiciones para fabricar mezclas bituminosas con tasa total de reciclado, empleando entre el 80 y el 100% de asfalto recuperado, lo cual supondría una reducción de emisiones de GEI aún más importante, como consecuencia de la suma de las dos técnicas empleadas, reciclado en alta tasa y reducción de temperatura de fabricación.

La metodología desarrollada sirve para su aplicación, de forma completa o parcial, en la Declaración Ambiental de Producto, Ecodiseño, Compra Pública Verde, Comercio de Derechos de Emisiones de GEI, y diseño de firmes basado en criterios ambientales, dentro del campo de las mezclas asfálticas o bituminosas.

Esta metodología ha cumplido los principios que están establecidos en la norma UNE-CEN ISO/TS 14067 para la Huella de carbono de productos, y que han sido explicados en el apartado 2.4.2 de la presente tesis doctoral.

También está en consonancia con las reglas de categoría de producto de NAPA (National Asphalt Pavement Association), recientemente publicadas en EE.UU., y el también reciente documento de EAPA (European Asphalt Pavement Association), que va a ser trasladado al Comité Europeo de Normalización (CEN).

Los resultados aquí obtenidos sólo permiten su comparación con los obtenidos por otros autores para la misma unidad funcional y ecoindicador considerados, y siempre y cuando incluyan la información

necesaria para que puedan ser evaluadas y comparadas las metodologías seguidas. Esto es así establecido por el Anexo D de la norma UNE-CEN ISO/TS 14067.

Y, en base a estos resultados, puede concluirse también que la necesaria *descarbonización* de la carretera, desde el punto de vista de un material básico como son las mezclas bituminosas, es, además de necesario y deseable, posible.

Además, el análisis de la filosofía de los ACV obliga a replantear algunos paradigmas que se mantienen sobre la carretera como infraestructura. Así, no debe asignársele la externalidad negativa correspondiente a las emisiones de GEI del transporte, que debe ser asignada a los productos y servicios para los cuales se realiza.

Y por en el caso de los materiales para firmes de carretera, como es el caso de las mezclas bituminosas, si su fabricación se produce para la conservación y rehabilitación de firmes en mal estado, esto implica, en el cómputo global, una reducción de emisiones de GEI debida a la compensación de emisiones con la reducción que se logra en el transporte que circula por la carretera considerada.

Los 28 millones de toneladas de CO₂ que, según EAPA (2016), se ahorrarían anualmente con la adecuada conservación y rehabilitación de los firmes de las redes de carreteras europeas, compensarían, según la huella de carbono determinada en este trabajo, la producción total de mezclas asfálticas de todos los países de la Unión Europea durante, aproximadamente, los últimos 28 meses, según las estadísticas europeas manejadas.