

IAG335-06-2013
HUELLA DE CARBONO DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS
CARBON FOOTPRINT DE MIXTURAS ASFÁLTICAS

Ángel Sampedro
Universidad Politécnica de Madrid (UPM)
Madrid, España
sampedro@uax.es

Miguel Ángel del Val
Universidad Politécnica de Madrid (UPM)
Madrid, España
miguel.delval@upm.es

Nuria Querol
Grupo Sorigué
Lleida, España
nquerol@sorigue.com

Julio del Pozo
Grupo Sorigué
Lleida, España
juliodelpozo@telefonica.net

Resumen

La presente comunicación analiza y describe el análisis de huella de carbono (*Carbon Footprint*) desarrollado por los autores para la valoración, desde el punto de vista ambiental, de los distintos tipos de mezclas asfálticas, estableciendo una comparación entre las mezclas en caliente, semicalientes, templadas y en frío. Este análisis se ha desarrollado de forma específica a partir de una metodología de análisis de ciclo de vida que ha considerado, como unidad funcional, la tonelada de mezcla asfáltica fabricada y colocada en obra y, como ecoindicador, el kilogramo de CO₂ equivalente. La metodología presentada, además de basarse en datos de consumos y emisiones reales de instalaciones de extracción y procesamiento de áridos, plantas asfálticas y obras de pavimentación, considera dos aspectos fundamentales desde el punto de vista ambiental: la durabilidad y la reciclabilidad. Se exponen los resultados obtenidos de la aplicación de la metodología a los distintos tipos citados de mezclas.

Resumo

Este artigo analisa e descreve a análise da pegada de carbono (Carbon Footprint) desenvolvido pelos autores para a avaliação, do ponto de vista ambiental, os diferentes tipos de misturas asfálticas, fazendo uma comparação entre HMA, semi-quente, temperado e frio. Esta análise foi especificamente desenvolvido como uma metodologia de análise do ciclo de vida considerado como uma unidade funcional, a tonelada de

asfalto produzido e colocado no local e como ECO-gauge, o quilo de CO₂ equivalente. A metodologia apresentada, bem como os dados com base no consumo e emissões de mineração e instalações de processamento de agregados, usinas de asfalto e obras de pavimentação real, considerar dois aspectos fundamentais do ponto de vista ambiental: a durabilidade e reciclabilidade. Mostra os resultados obtidos com a aplicação da metodologia referida os diferentes tipos de misturas.

INTRODUCCIÓN

En esta comunicación se analiza y se describe el análisis de huella de carbono (*carbon footprint*) desarrollado por los autores para la valoración, desde el punto de vista ambiental, de los distintos tipos de mezclas asfálticas en función de su temperatura de fabricación. El objeto es poder evaluar las posibles reducciones de emisiones que se consiguen con los nuevos tipos de mezclas semicalientes y templadas, así como con las mezclas en frío.

Los cálculos para determinar esta huella de carbono se han realizado según una metodología de análisis de ciclo de vida (ACV o LCA) de la construcción de pavimentos asfálticos de carreteras desarrollada por el equipo investigador de la Universidad Politécnica de Madrid (España) dentro de la actividad 11 (Reciclado en caliente de pavimentos) del “*Proyecto Fénix*”.

Las huellas de carbono determinadas se han aplicado a mezclas asfálticas reales empleadas en capas de rodadura. Para las mezclas en caliente, semicalientes y templadas se han considerado mezclas de los tipos AC 16 D y AC 22 D, mientras que para las mezclas en frío se ha considerado una mezcla AF-8.

Los resultados obtenidos en el presente análisis consideran tanto la durabilidad como la reciclabilidad de cada una de los tipos de mezclas analizadas. Para ello, los parámetros se han calculado de forma unitaria, es decir, la unidad funcional considerada ha sido la tonelada de mezcla asfáltica fabricada y colocada en obra (t MA); con el objeto de incorporar la reciclabilidad de los materiales se ha considerado que los impactos de cualquier residuo o material reciclado empleado en el proceso son nulos, a efectos de cálculo de la huella o del ACV, pues ya han sido considerados en la fase inicial de su ciclo de vida.

El interés del presente trabajo radica en que se procede a la evaluación de la huella de carbono que implican los distintos tipos de mezclas asfálticas en función de su temperatura de fabricación, aspecto que preocupa de forma especial al sector de fabricantes de estas mezclas.

Sobre estos materiales, fundamentales en la ingeniería de carreteras, la aplicación del *Protocolo de Kioto* ha introducido nuevos factores a considerar, tanto en relación con las materias primas empleadas como con su proceso de fabricación. Por un lado, los betunes o cementos asfálticos, procedentes del refinado del petróleo, se han visto afectados precisamente debido a este proceso industrial: en la Unión Europea la Directiva 2003/87/CE, de Comercio de Derechos de Emisión de gases de efecto invernadero (GEI),

ha considerado a la actividad de refino de hidrocarburos como uno de los sectores industriales regulados directamente.

Además, las grandes plantas de fabricación de mezclas asfálticas en caliente (MBC) ya están incluidas en España en el Plan Nacional de Asignación (PNA) 2008-2012, de tal forma que algunas, las de mayor capacidad de producción, tienen reguladas y autorizadas sus emisiones anuales de GEI. Éstas 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, el PNA considera el subsector industrial de asfaltos (en España hay más de diez instalaciones repartidas por todo el territorio nacional).

METODOLOGÍA

La metodología empleada para el cálculo de las emisiones de CO₂ equivalente está basada en el empleo de datos y ratios reales, medidos en instalaciones y obras representativas de estas técnicas de pavimentación en España, además de otros contrastables que han sido obtenidos en diferentes sectores industriales. Para poder aplicarla a cualquier tipo de obra que pudiera surgir, todos los indicadores se han manejado en función de los parámetros o grados de libertad de los que se ha podido observar que dependen: distancias de transporte, potencia y rendimiento de los equipos, tipo de combustible, etc.

Para ello se puso en marcha en 2007 un sistema de recogida y análisis de datos que permitiera cuantificar los inputs y los outputs de los diferentes subsistemas considerados; se han realizado mediciones y controles de series de datos durante los años 2007, 2008, 2009 y 2010. Durante este tiempo, además, se han realizado estas mediciones para distintos tipos de obras (urbanizaciones, carreteras convencionales, autopistas, etc.) y con mezclas asfálticas con distintas granulometrías, todo ello con el objetivo de poder asegurar la representatividad de los datos manejados.

En cuanto al control de los *inputs*, se han medido y controlado materias primas (áridos, betún asfáltico, cal, cemento, etc.) en todas las fases o subsistemas, consumos de combustibles (fuel, gasóleo y gas natural licuado), de electricidad y 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. Aunque en algunos casos no se hayan podido medir directamente las emisiones de gases, pueden inferirse del control de consumos de combustibles; 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.

Para determinar la huella de carbono el ecoindicador utilizado es el kilogramo de CO₂ equivalente emitido por tonelada de mezcla asfáltica (**kg CO₂ eq / t mezcla**).

Este es un parámetro que va ligado directamente con la eficiencia energética de los procesos y evalúa uno de los potenciales daños ambientales que más preocupan: los GEI.

El CO₂ eq indica el potencial de calentamiento global de todos los GEI (vapor de agua, dióxido de carbono, óxido nitroso, metano y ozono) referidos a la masa del CO₂.

SUBSISTEMAS

El sistema “mezcla asfáltica”, cuyo ACV se lleva a cabo, está compuesto por una serie de subsistemas, cada uno de los cuales se evalúa por separado. Estos subsistemas se refieren a los distintos procesos necesarios para la puesta en servicio de un pavimento asfáltico, su posterior funcionamiento en perfectas condiciones y su demolición y retirada tras la vida útil.

La clave está en el inventario de ciclo de vida (ICV) o inventario de cargas ambientales en cada fase, realizando los balances de materia y de energía empleados tras definir correctamente el sistema estudiado y presentarlo mediante un diagrama de flujo donde deben aparecer todas las etapas del proceso (subsistemas). Como criterio general, el transporte entre etapas de proceso debe aparecer de forma agrupada como una sola actividad o subsistema.

Subsistema 1: “Producción de agregados o áridos”

La procedencia de los agregados puede ser muy diversa: áridos naturales, triturados y artificiales, entre los cuales podría encuadrarse el material procedente del fresado y retirada de firmes asfálticos envejecidos (*Recycling Asphalt Pavement, o RAP*). En el caso de las mezclas analizadas todos los agregados son triturados, pues se trata de mezclas para capa de rodadura.

La mezcla que se podría considerar como referencia, una mezcla asfáltica en caliente del tipo AC 16 surf D, está compuesta por un 92 % de agregado triturado. A partir de ella, en los demás tipos de mezclas, se han considerado las granulometrías específicas de sus fórmulas de trabajo. En el caso de mezclas templadas se incorpora en torno a un 30 % de arena.

Subsistema 2: “Filler o polvo mineral”

Dentro de los tipos de filleres que pueden emplearse en las mezclas asfálticas se encuentran el propio de los agregados (filler de recuperación) y los de aportación (polvo calizo o productos comerciales pulverulentos más activos, como cemento, hidrato de cal o cenizas volantes de central térmica).

Si las especificaciones no impiden emplear el filler de recuperación, no cabe duda de que ello supone, a priori, grandes ventajas; pero no siempre es así y, en determinadas ocasiones, es necesario un filler activo que mejore las prestaciones de la mezcla (por ejemplo, la mejora de la adhesividad con agregados ácidos para capas de rodadura). Otra posibilidad, que pocas veces se emplea, por razones de comodidad, es una combinación de varios tipos de filleres.

Para el caso del filler de recuperación, aquí se vuelve a considerar la reciclabilidad del material y, por lo tanto, sus emisiones unitarias son nulas, ya que han sido consideradas anteriormente, lo cual implica claras ventajas ambientales frente a las demás opciones. El filler de aportación calizo se consideraría de manera análoga a un árido natural, aunque con un proceso de tratamiento algo más complejo. En las mezclas analizadas se han empleado filler de recuperación y filler calizo de aportación.

Subsistema 3: “Ligante”

Dentro de este subsistema se consideran cementos o betunes asfálticos, emulsiones asfálticas y aditivos modificadores. Las emisiones unitarias consideradas son las proporcionadas por la Asociación Europea de Fabricantes de Betún Asfáltico (Eurobitume), que se muestran en la tabla 1.

Tabla 1. Emisiones unitarias de ligantes asfálticos y aditivos. Fuente: EUROBITUME

LIGANTE EMPLEADO	kg CO₂ eq/t
Betún	241,266
Aditivos o modificadores	88,874
Emulsión bituminosa	276,522

Este es un subsistema fundamental, pues los tipos de mezclas analizadas se basan en el empleo de distintos tipos de ligante (cemento o emulsión), combinados en algunos casos con aditivos para la reducción de la viscosidad del cemento asfáltico y de la propia mezcla.

Las mezclas en caliente analizadas se han fabricado con un cemento asfáltico 50/70; para el caso de las mezclas semicalientes se ha considerado el empleo de aditivos para reducir su viscosidad; en el caso de las mezclas templadas se ha considerado la posibilidad de emplear cemento o emulsión, analizando por separado ambos casos; y en cuanto a las mezclas en frío se ha considerado el empleo de emulsión asfáltica, con porcentajes de cemento asfáltico residual algo mayores que las anteriores.

3.4. Subsistema 4: “Planta asfáltica”

Para el control de los consumos energéticos y de las emisiones de las mezclas asfálticas en caliente se ha contado con plantas tanto continuas como discontinuas de la empresa Sorigué.

Los autores han realizado una estimación de las emisiones para las otras mezclas fabricadas a temperaturas inferiores; es obvio que para contar con unos datos aún más reales y ajustados hubiera sido necesario poder haber desarrollado procesos específicos para su obtención en la fabricación de todos los tipos de mezclas analizados.

En esta metodología no se han podido evaluar en detalle los consumos energéticos que suponen, por separado, los procesos de calentamiento de los agregados, del cemento asfáltico, etc. Se han realizado suposiciones en base a los datos de origen manejados, en

los que están desglosados los distintos equipos de una planta de fabricación de mezclas asfálticas. No obstante, los datos obtenidos se consideran bastante ajustados a la realidad, en base a la consulta de distintos autores y al análisis de la evolución de las distintas plantas consideradas.

Así, para el caso de la fabricación de las mezclas semicalientes y templadas con cemento asfáltico la reducción de emisiones puede considerarse lineal, comparada con la fabricación de mezclas en caliente. Sin embargo, para el caso de mezclas templadas con emulsión, la reducción es algo mayor, pues se prescinde totalmente del calentamiento del emulsión asfáltica (se maneja la hipótesis de que sólo se calientan los áridos). Y para el caso de mezclas en frío, sólo se tienen en cuenta los procesos de clasificación y mezclado para su fabricación.

Una vez más la metodología aquí aplicada no permite separar las emisiones obtenidas en los distintos elementos de la planta, por lo cual se ha procedido a realizar unas estimaciones en base a distintos autores.

Subsistema 5: "Puesta en obra"

La puesta en obra de las mezclas asfálticas en caliente comprende, de modo genérico, las siguientes operaciones: preparación de la superficie existente, transporte del material desde la central de fabricación al lugar de extensión (esta tarea se incluye en el subsistema "Transporte", como es obligado en cualquier metodología de ACV), extensión de la mezcla y compactación.

Durante el período de tiempo citado se han ido controlando y realizando mediciones en distintas obras representativas en España. Se han controlado todos los equipos y fases necesarios para una correcta ejecución: todos los elementos de transporte, que han sido incluidos en el subsistema correspondiente, las máquinas fresadoras y barredoras necesarias para la preparación de la superficie, los equipos para los riegos de imprimación y de adherencia, el silo móvil de transferencia, la extendedora y los distintos equipos de compactación.

Subsistema 6: "Conservación"

Se ha estimado que no es necesario ni conveniente la consideración de la conservación en el ICV debido a que no tiene realmente sentido para la unidad funcional analizada, pues ésta no es el pavimento o la carretera, sino simplemente la mezcla asfáltica como material de construcción.

La eventual toma en consideración de la conservación no sirve para la consecución de los objetivos buscados con este análisis, pues la durabilidad y las necesidades de conservación no dependen, al menos en teoría, de la temperatura de fabricación de la mezcla.

Además, la consideración de este subsistema en el ICV incorporaría nuevos elementos de incertidumbre: por ejemplo, habría que plantear el período de vida útil de una mezcla

asfáltica para evaluar los impactos de las distintas labores de conservación y de rehabilitación (15, 20, 25 años...), habría que analizar si la rehabilitación supone el fin del ciclo de vida total o parcialmente, etc.

Subsistema 7: "Demolición"

Cuando, tras la acción de los vehículos y de los factores climáticos, las mezclas asfálticas alcanzan un cierto nivel de deterioro, deben ser retiradas para que el pavimento del que forman parte pueda prestar servicio en unas nuevas condiciones. Así, estas capas de pavimento ya deterioradas se retiran mediante fresado, para ser repuestas con mezclas nuevas; estos materiales fresados (*RAP*) son los que dan lugar a las técnicas de reciclado de pavimentos. En los cálculos realizados se han hecho intervenir, por tanto, los consumos de los equipos empleados para el fresado y para el barrido.

3.8. Subsistema 8: "Transporte"

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 asfáltica fabricada y extendida, pues a partir de ella se calculan los viajes necesarios. En este subsistema también se han considerado los transportes necesarios para el personal de las plantas y de las obras en sus desplazamientos.

RESULTADOS OBTENIDOS Y CONCLUSIONES

Como ya se ha indicado, el objeto de la investigación a la que se refiere esta comunicación era el de, aplicando la metodología de ACV para la determinación de la huella de carbono de mezclas asfálticas, poder evaluar la reducción de emisiones de GEI que implican las tecnologías de fabricación de mezclas asfálticas semicalientes, templadas y en frío.

La primera de las mezclas analizadas es la mezcla de referencia, una mezcla en caliente densa para capa de rodadura del tipo AC 16 o 22 surf D. Su huella de carbono se refleja en la tabla 2. Como puede apreciarse, las emisiones de CO₂ equivalente se producen, fundamentalmente, en los procesos o subsistemas de agregados, ligantes, fabricación y transporte.

Tabla 2. Huella de carbono de una mezcla asfáltica en caliente.

	Huella de carbono	Proporción
Subsistemas	kg CO ₂ eq/t mezcla	(%)
1. Estr. y proc. áridos	6,73	14,0
2. Filler	0,00	0,0
3. Ligante asfáltico	11,58	24,1
4. Fabricación mezcla	18,13	37,7

5. Puesta en obra	1,49	3,1
7. Demolición	0,21	0,4
8. Transporte	9,89	20,6
Total:	48,02	100,0

A partir de aquí, se ha continuado el análisis obteniendo la huella de carbono de una **mezcla semicaliente**. Este tipo de mezclas se fabrica a menores temperaturas, por debajo de 125-130 °C, en base al empleo de sustancias para la reducción de la viscosidad del ligante o que facilitan la envuelta y cementos asfálticos aditivados.

Todos estos aditivos y sustancias suponen un aumento de la huella de carbono que se ha considerado en el Subsistema 3. Los datos de emisiones unitarias se han obtenido de Eurobitume. Los resultados se reflejan en la tabla 3.

Tabla 3. Huella de carbono de una mezcla asfáltica semicaliente

	M. Caliente	M. Semicaliente	
Subsistemas	kg CO ₂ eq/t mezcla	kg CO ₂ eq/t mezcla	Variación
1. Estr. y proc. áridos	6,73	6,69	0,5%
2. Fíller	0,00	0,00	
3. Ligante asfáltico	11,58	12,03	-3,8%
4. Fabricación mezcla	18,13	13,86	23,5%
5. Puesta en obra	1,49	1,49	0,0%
7. Demolición	0,21	0,21	0,0%
8. Transporte	9,89	9,88	0,1%
Total:	48,02	44,16	8,0%

Como puede apreciarse, se obtiene una gran reducción, del orden del 24 %, en el proceso de fabricación, debido a la menor temperatura necesaria, mejora que se ve algo reducida por la necesidad de emplear los aditivos, lo que supone un incremento de las emisiones de GEI consideradas en el Subsistema 3, que al final implican una reducción total de las emisiones de CO₂ eq del 8 %.

Por otro lado, están las **mezclas templadas**, fabricadas a temperaturas aún menores, por debajo de 100 °C, cuya huella de carbono también se ha determinado sobre una mezcla de granulometría similar a las anteriores. Este tipo de mezclas puede fabricarse a partir de emulsiones asfálticas o de cementos asfálticos aditivados o espumados, lo cual implica distinta huella en el Subsistema 3.

Por ello, se han realizado dos análisis por separado, considerando mezclas templadas de ambos tipos. Los resultados, comparados también con una mezcla asfáltica en caliente, se recogen en la tabla 4.

Tabla 4. Huella de carbono de las mezclas templadas

	M. Caliente	M. Templada Em		M. Templada Bt	
Subsistemas	kg CO ₂ eq/t mezcla	kg CO ₂ eq/t mezcla	Variación	kg CO ₂ eq/t mezcla	Variación
1. Estr. y proc.	6,73	6,79	-1,0%	6,88	-2,3%

áridos					
2. Filler	0,00	0,11		0,00	
3. Ligante asfáltico	11,58	12,17	-5,1%	11,58	0,0%
4. Fabricación mezcla	18,13	9,06	50,0%	10,66	41,2%
5. Puesta en obra	1,49	1,49	0,0%	1,49	0,0%
7. Demolición	0,21	0,21	0,0%	0,21	0,0%
8. Transporte	9,89	10,09	-2,1%	9,91	-0,2%
Total:	48,02	39,92	16,9%	40,73	15,2%

Con la mezcla templada fabricada a partir de emulsión asfáltica se logra una reducción total de emisiones de GEI de casi el 17 %, debido fundamentalmente a la reducción del 50 % en el proceso de fabricación, y a pesar de que el empleo de emulsión supone un incremento del 5 % en el Subsistema 3. La reducción total que se consigue con las mezclas templadas con cemento asfáltico, es bastante parecida, del orden del 15 %.

Hay que aclarar que el pequeño incremento que se produce en el subsistema 8 al considerar las mezclas templadas con respecto a las mezclas en caliente, y que en cambio es una reducción en las mezclas en frío (tabla 5) se debe simplemente a que, a igualdad de condiciones de suministros, plantas y obra, influye la proporción sobre mezcla de los distintos componentes.

Por último, se ha realizado el cálculo para una **mezcla asfáltica en frío**, también colocada en una capa de rodadura. En este caso, las emisiones de fabricación son mínimas, correspondiendo únicamente a los procesos de clasificación de los agregados y de mezcla sin calentamiento alguno. Los resultados obtenidos, comparados también con la mezcla inicial o patrón, se exponen en la tabla 5.

Como puede apreciarse, esta mezcla en frío implica una reducción del 90 % en las emisiones del proceso de fabricación, lo cual se traduce en una reducción final del 36 % de la huella de carbono con respecto a la mezcla asfáltica en caliente.

Ello se debe a que en este tipo de mezclas no se calientan los agregados y el proceso de fabricación tiene lugar a temperatura ambiente.

Tabla 5. Huella de carbono de una mezcla en frío

	M. Caliente	Mezcla en frío	
Subsistemas	kg CO ₂ eq/t mezcla	kg CO ₂ eq/t mezcla	Variación
1. Estr. y proc. áridos	6,73	6,74	-0,2%
2. Filler	0,00	0,00	
3. Ligante asfáltico	11,58	10,84	6,4%
4. Fabricación mezcla	18,13	1,81	90,0%
5. Puesta en obra	1,49	1,49	0,0%
7. Demolición	0,21	0,21	0,0%
8. Transporte	9,89	9,55	3,4%

Total:	48,02	30,65	36,2%
---------------	--------------	--------------	--------------

Como conclusión final, debe subrayarse que las mezclas asfálticas semicalientes, templadas (con cemento o con emulsión asfáltica) y en frío, implican una reducción importante de las emisiones de CO₂, lo cual pone de manifiesto una clara ventaja desde el punto de vista ambiental (menores emisiones de GEI).

AGRADECIMIENTOS

Este artículo recoge resultados de una investigación desarrollada en el marco del *Proyecto Fénix* (www.proyectofenix.es), el cual ha sido posible gracias a la contribución financiera del Centro para el Desarrollo Tecnológico e Industrial (CDTI) de España, a través de su Programa CENIT. Las entidades que participan en el Proyecto manifiestan su reconocimiento por dicha contribución. En particular, los autores quieren mostrar su agradecimiento a todas las organizaciones y empresas participantes y a sus numerosos colaboradores cuya capacidad de trabajo y eficacia han permitido el desarrollo de este Proyecto en un ambiente de cooperación.

Así mismo los autores quieren agradecer a Lucía Miranda y a Manuel Salas su colaboración en la obtención de algunas de las fórmulas de trabajo empleadas.

REFERENCIAS

- CHOKI, S. (2005). Life cycle assessment of road maintenance works in Sweden. Enviromental Engineering and Sustainable Infrastructure (EESI) Report. Estocolmo.
- EUROBITUME (2011). Life Cycle Inventory: Bitumen. Bruselas. Bélgica.
- LANCASTER, IAN M. (2009). Bitumen Lifecycle & Footprint. UK Technical Department, Nynas UK AB. London.
- MIRANDA, L. (2011). Mezclas templadas y semicalientes: Eficacia, sostenibilidad y coste. Jornada Técnica ACEX. Vitoria.
- MROUEH, U.M., ESKOLA, P., LAINE-YLIJOKI, J., WELLMAN, K. (2000). Life cycle assessment of road construction. Finnra Reports 17/2000. The Finnish National Road Administration.
- PARÍS, A., ORTIZ, J., MONCUNILL, C. (2005). Análisis de ciclo de vida y sostenibilidad en la fabricación de mezclas bituminosas en caliente. Comunicación libre. Primera Jornada Técnica de la Asociación Española de Fabricantes de Mezclas Asfálticas (ASEFMA). Madrid.
- SAMPEDRO, A., DEL VAL, M.A., BUISSON, J. (2009). Aplicación del análisis de ciclo de vida (ACV) para la valorización de la sostenibilidad del reciclado de mezclas asfálticas en caliente. XV Congreso Ibero-Latinoamericano del Asfalto (CILA). Lisboa, Portugal.

- SAMPEDRO, A., DEL VAL, M.A., GALLEG0, J., QUEROL, N., DEL POZO, J. (2011). Huella de carbono del reciclado en planta asfáltica en caliente con altas tasas de RAP. XVI Congreso Ibero-Latinoamericano del Asfalto (CILA). Río de Janeiro, Brasil.
- STRIPPLE, H. (2001). Life Cycle Assessment of Roads. A pilot study for inventory analysis. Second revised edition. Report from IVL Swedish Environmental Research Institute. Gothenburg, Sweden.
- TEMREN, Z., TORAMAN, S. (2006). A Study on Life Cycle Analysis of Asphalt Pavements in Turkey. Documento Técnico de la Asphalt Contractors Association de Turquía. Ankara.
- TRELOAR, G.J., LOVE, P.E.D., CRAWFORD, R.H. (2004). Hybrid life-cycle inventory for road construction and use. Journal of construction engineering and management – ASCE 130.
- VENTURA, A., MONÉRON, P., JULLIEN, A. (2008). Environmental Impact of a Bonding Course Pavement Section with Asphalt Recycled at Varying Rates. Comunicación Libre. EATA-2008 “Road and Pavement Design”. París.