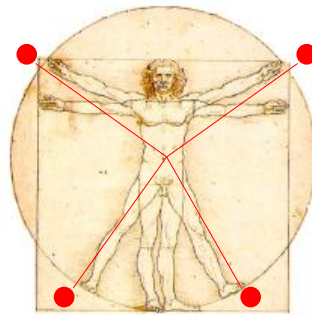


TECNOLOGÍ@ y DESARROLLO

Revista de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente

VOLUMEN XIII. AÑO 2015

SEPARATA



EL ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA COMO HERRAMIENTA DE EVALUACIÓN AMBIENTAL EN LAS SECCIONES DE FIRME

Alberto Moral Quiza , Luis Couceiro Martínez , Ángel Sampedro Rodríguez



UNIVERSIDAD ALFONSO X EL SABIO
Escuela Politécnica Superior
Villanueva de la Cañada (Madrid)

© Del texto: Alberto Moral Quiza , Luis Couceiro Martínez , Ángel Sampedro Rodríguez
Diciembre, 2015.
<http://www.uax.es/publicacion/el-analisis-del-ciclo-de-vida-como-herramienta-de-evaluacion-ambiental.pdf>
© De la edición: *Revista Tecnol@ y desarrollo*
Escuela Politécnica Superior.
Universidad Alfonso X el Sabio.
28691, Villanueva de la Cañada (Madrid).
ISSN: 1696-8085
Editor: Javier Morales Pérez – tecnologia@uax.es

No está permitida la reproducción total o parcial de este artículo, ni su almacenamiento o transmisión ya sea electrónico, químico, mecánico, por fotocopia u otros métodos, sin permiso previo por escrito de la revista.

EL ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA COMO HERRAMIENTA DE EVALUACIÓN AMBIENTAL EN LAS SECCIONES DE FIRME

Alberto Moral Quiza (a), Luis Couceiro Martínez (b), Ángel Sampredo Rodríguez (c)

a) Licenciado en Ciencias Químicas. Investigador de la División de Agroalimentación y Procesos Sostenibles de la Fundación CARTIF.

Tf: 983143803, email: albmor@cartif.es

b) Dr Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos, Área de Ingeniería Ambiental. UAX

Tf: 918109128, email: lmartcou@uax.es

c) Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos, Área de Ingeniería Civil. UAX

Tf: XXXXXXXXXX, email: sampredo@uax.es

Fundación CARTIF. Parque Tecnológico de Boecillo p.205. 47151 Boecillo (Valladolid)
Universidad Alfonso X el Sabio. Avda de la Universidad nº 1, Villanueva de la Cañada, 28691

RESUMEN:

Las infraestructuras viarias están ligadas al desarrollo socioeconómico de un país, hasta el punto de ser uno de los indicadores de bienestar y desarrollo del mismo. Estas infraestructuras tienen un impacto ambiental asociado al consumo de energético y de recursos importante. Con este trabajo se pretende aplicar la herramienta ambiental Análisis del Ciclo de vida a tres secciones de firme de la categoría de tráfico T00 catalogadas en la norma 6.1-IC de la Instrucción de Carreteras a lo largo del ciclo de vida de las mismas.

PALABRAS CLAVE: sección de firme, análisis del ciclo de vida, huella de carbono.

ABSTRACT:

Road infrastructure is linked to the socio-economic development of a country, to the point of being one important indicator in the development and welfare of it. These infrastructures imply an important environmental impact associated to the energy and resources consumption. This work tries to apply the environmental tool Life Cycle Assessment to three pavement sections from the T00 traffic category included in the Spanish normative 61.1-C of the Road Instruction along their whole life cycle.

KEY-WORDS: Pavement section, life cycle assessment, carbon footprint.

SUMARIO: 1. Introducción 2. Secciones de firme de la categoría T00, 3. El análisis del ciclo de vida como herramienta de evaluación, 4. Despliegue del Análisis del ciclo de vida en secciones de firme, 5. Conclusiones, 6. Agradecimientos, 7. Referencias

SUMMARY: 1. Introduction 2. T00 pavement sections, 3. Life cycle assessment as evaluation tool, 4. Life cycle assessment deployment in pavement sections, 5. Conclusions, 6. Acknowledgments 7. References.

1. Introducción

La carretera ha sido, es y sin duda será un elemento crucial en el desarrollo y bienestar del ser humano, como lo ha demostrado a lo largo de la historia y como queda patente en la actualidad.

Prácticamente cualquier actividad a desarrollar en el día a día bien por una persona individual o por un colectivo, independientemente del grupo social al que pertenezca, la franja de edad en la que esté incluido, esté relacionado con su vida personal o laboral, y de cualquier sector industrial y económico pasa inexorablemente por la necesidad de acudir a estas infraestructuras que facilitan el transporte de personas y mercancías, conectando distintas localizaciones y facilitando que la sociedad disponga de un soporte para realizar su actividad cotidiana.

Las infraestructuras viarias determinan en gran medida decisiones estratégicas para realizar asentamientos industriales o comerciales, son generadores de riqueza y bienestar, condicionan el entorno que nos rodea y se convierten en una pieza clave para la toma de decisiones.

Todos estos factores hacen que la carretera sea un elemento interesante de estudiar, no sólo desde el punto de vista conceptual, sino desde otros puntos de vista que pueden ofrecer otra perspectiva de este elemento tan cotidiano y asumido como básico por la sociedad actual.

El presente trabajo trata de establecer cómo interactúa la carretera con el medio ambiente, utilizando la herramienta ambiental más comúnmente aceptada en la actualidad, el Análisis del Ciclo de Vida (ACV).

El ACV es una herramienta que determina los aspectos ambientales e impactos potenciales asociados a un producto mediante: la compilación de un inventario de entradas y salidas del sistema; la evaluación de los impactos ambientales potenciales asociados a estas entradas y salidas y la interpretación de los resultados de las fases de inventario y de impacto con relación a los objetivos del estudio.

Una parte fundamental de la carretera son las secciones de firme, que en marco regulatorio español vienen definidas por la norma 6.1 IC de la Instrucción de Carreteras del Ministerio de Fomento ¹, donde quedan determinados los distintos tipos de secciones normalizados en función de las distintas categorías de tráfico existentes.

Pese a que existen numerosas iniciativas que han tratado de cuantificar el impacto ambiental de dichas estructuras, en muchos casos se trata de datos agregados o “cajas negras” que no permiten identificar y cuantificar los impactos generados por los distintos componentes de la

¹ Orden FOM/3460/2003, de 28 de noviembre, por la que se aprueba la norma 6.1 IC secciones de firme, de la Instrucción de Carreteras (BOE de 12 de diciembre de 2003).

sección, no existe una trazabilidad adecuada de los datos de inventario o etapas del ciclo de vida importantes como la etapa de mantenimiento o fin de vida quedan fuera de los objetivos del evaluador.

Algunos de los ejemplos en los que el ACV ha penetrado en el sector de la carretera pueden encontrar su enfoque en el desarrollo de herramientas de evaluación adaptada al sector viario [HUAN09], muy útil por la facilidad con la que diseñadores e ingenieros pueden calcular los impactos generados por el pavimento en la etapa de diseño, o como es el caso de [HOAN05], trabajo en el que se despliega una metodología para calcular la sostenibilidad de las carreteras.

También la reciclabilidad de diversos materiales ha sido evaluada utilizando dicha herramienta, tal y como se aprecia en los trabajos realizados por [MROU01] estudiando la incorporación de sub-productos industriales, [OLSO06] con la valorización material de cenizas procedente de la incineración de residuos municipales o [SAYA10] incorporando diversas metodologías de asignación para los procesos de reciclado.

El ACV también ha servido como herramienta comparativa, [HÄKK98], valorando desde el punto de vista ambiental los impactos generados por pavimentos de hormigón y pavimentos asfálticos.

Por todo ello, la herramienta ambiental ACV ha demostrado ser una herramienta útil y muy utilizada para determinar los impactos ambientales asociados a los pavimentos a lo largo de todo el ciclo de vida de éstos.

El presente trabajo pretende comparar el impacto ambiental de tres tipos de secciones de firme incluidas dentro de la categoría de tráfico T00 (Intensidad Media de Diaria de vehículos pesados superior a 4.000) a lo largo de todo el ciclo de vida de las mismas y utilizando como indicadores ambientales las emisiones de gases de efecto invernadero (expresadas en kg de CO₂ equivalente) y el consumo de agua (expresado en m³).

2. Secciones de firme de la categoría T00

Englobado dentro del complejo sistema que es la carretera, el presente trabajo se centra en el estudio de las denominadas secciones de firme, y más concretamente en aquellas secciones pertenecientes a la categoría de tráfico T00.

Se define firme como cualquier tipo de infraestructura viaria, formado por un conjunto de capas superpuestas horizontalmente, compuestas por distintos tipos de materiales, bien sueltos o bien aglomerados por algún tipo de ligante, capaz de transmitir adecuadamente las cargas del tráfico.

La sección transversal de una carretera puede estructurarse, tal y como se representa en la figura 2.1, en varios sub-apartados, cada uno de las cuales cumple un función determinada.



Figura 2.1. Estructura de la carretera y detalle de la sección de firme

Sobre el terreno subyacente, se encuentra, en caso de que haya sido necesario, la coronación del terraplén o el fondo del desmorte. Por encima de la coronación del terraplén o el fondo del desmorte se sitúa la explanada. La explanada es la superficie sobre la que se apoya el firme, debiendo proporcionar una buena base de sustentación y buena capacidad portante. Existen distintas configuraciones de explanadas en función del tráfico que soporte la carretera, y que exigen distintas características a los materiales que la componen, y que serán detalladas posteriormente en este capítulo.

Ubicado sobre la explanada, se sitúa la sección de firme propiamente dicha. Ésta está compuesta por una sub-base, una capa o capas de base, una capa intermedia y por último una capa de rodadura, que supone el límite superior de la carretera y que es el punto de contacto con los vehículos que utilizan la vía.

La capa sub-base (que normalmente está constituida por zahorras o suelocemento), tiene como función proporcionar un buen sustento a la capa base, de forma que facilite su posterior compactación.

La capa base es el principal elemento portante de la estructura, por lo que debe proporcionar unas buenas condiciones de resistencia y durabilidad. En función de las exigencias del tráfico pueden ser bases granulares, granulares estabilizadas o mezclas bituminosas.

A continuación se sitúa la capa intermedia, cuyo principal cometido es proporcionar una base regular para la extensión y compactación de la capa de rodadura.

Finalmente, la capa de rodadura, se encarga de proporcionar el contacto directo con los usuarios de la vía y está sometida a la intemperie. Debe proporcionar cualidades de

durabilidad, resistencia, buenas propiedades antideslizantes y de evacuación del agua, por lo que es la capa que más prestaciones técnicas debe proporcionar.

Las secciones de firme objeto de estudio en este trabajo son la sección S0031, S0032 y S0033 (figura 2.2)

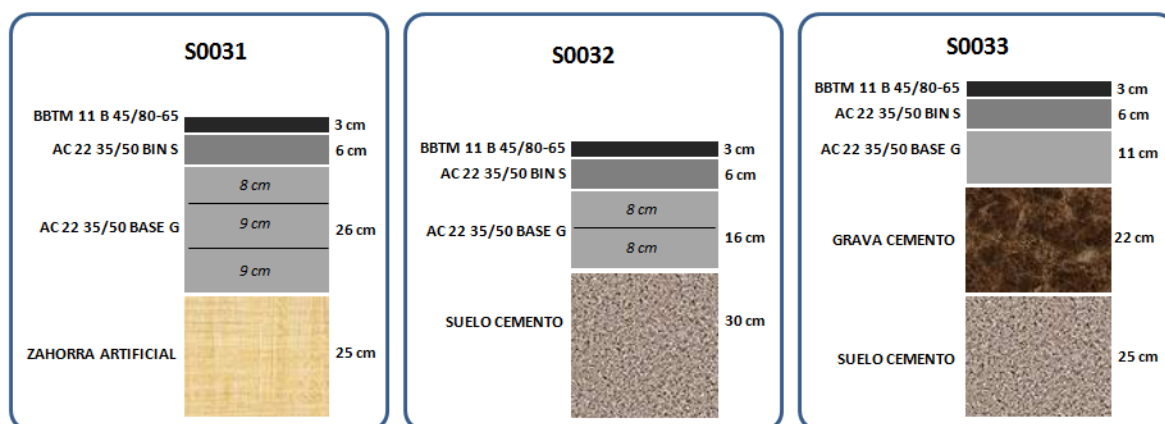


Figura 2.2. Secciones de firme de la categoría de tráfico T00 objeto de estudio.

Estas tres secciones responden a tres de las cuatro tipologías de secciones de firme dentro de la categoría T00. Únicamente se han estudiado secciones que incluyen mezclas bituminosas en la capa de rodadura, dejando fuera del estudio secciones de hormigón.

3. El Análisis del Ciclo de Vida como herramienta de evaluación

Previo a la aplicación de la metodología del Análisis del Ciclo de Vida, a continuación se presenta un breve resumen de las principales etapas que lo componen, y que marcan una serie de pasos que permitirán obtener unos resultados basados en el rigor científico, la trazabilidad y la transparencia en su realización.

De acuerdo a las normas ISO 14040² e ISO 14044³, el ACV consta de cuatro etapas bien diferenciadas, tal y como queda descrito en la figura 3.1:

² Gestión ambiental. Análisis de ciclo de vida. Principios y marco de referencia. (ISO 14040:2006).

³ Gestión ambiental. Análisis de ciclo de vida. Requisitos y directrices. (ISO 14044:2006).

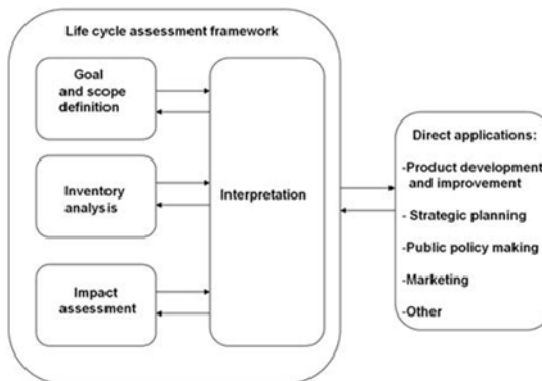


Figura 3.1. Estructura del Análisis del Ciclo de Vida

Estas etapas son:

1) Definición de objetivo y alcance

Esta primera etapa de un ACV debe dar respuesta a una serie de cuestiones que determinarán la naturaleza del ACV y que constituyen el objetivo, tales como las razones que llevan a realizar el estudio, el público previsto y público objetivo o la aplicación prevista.

Por otro lado, dentro del alcance del ACV se definen una serie de criterios que marcarán el curso del ACV. Se debe proporcionar información del producto a estudiar, la función del mismo, cuáles son los límites del sistema y cuál va a ser la unidad funcional de estudio o cómo se asignarán las cargas ambientales.

Dentro de esta primera etapa cobra especial importancia el término Unidad Funcional (UF). Éste queda definido como el desempeño cuantificado de un sistema del producto para su uso como unidad de referencia a la cual se relaciona las entradas y salidas. La definición de esta UF permitirá establecer criterios rigurosos para los procesos de comparación, y debe ser coherente con el objetivo y alcance del estudio.

2) Análisis de Inventario del Ciclo de Vida (ICV)

En esta etapa se recopilan los datos y procedimientos de cálculo que darán lugar a la cuantificación de las entradas y salidas del sistema. Este proceso es una labor iterativa, lo cual implica que según se avanza en el inventario se podrá optar por un cambio en el procedimiento de recopilación de datos, o incluso puedan replantearse los objetivos y el alcance del estudio.

Dentro de los datos recopilados se puede hacer referencia a entradas de energía, materias primas, generación de productos, co-productos, subproductos o residuos, emisiones al aire, suelo y agua

3) Evaluación del Impacto del Ciclo de Vida (EICV)

La tercera etapa del ACV se encarga de determinar la cuantía del impacto asociado a los datos recopilados en la fase de inventario del ciclo de vida. Los datos de inventario quedarán relacionados con las categorías de impacto seleccionadas en el estudio y con sus correspondientes indicadores.

Por tanto, la secuencia que la norma exige para esta etapa incluye la selección de categorías de impacto y modelos de caracterización, la asignación de los resultados del ICV y el correspondiente cálculo de resultados de indicador de categoría. Estos pasos terminan en los resultados del indicador de categoría y los correspondientes resultados de la evaluación del impacto del ciclo de vida.

4) Interpretación del Ciclo de Vida

En esta fase se extraen todos los resultados derivados de las dos etapas anteriores, en la línea de los objetivos y alcance del estudio, y que puedan proporcionar conclusiones y recomendaciones para la toma de decisiones en lo relativo a estrategia de producto.

En esta etapa se verifica la adecuación de las categorías de impacto seleccionadas 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 del producto, proceso o servicio estudiado.

El despliegue de estas cuatro etapas permitirá aplicar la metodología del ACV a las tres secciones objeto de estudio.

4. Despliegue del Análisis del Ciclo de Vida en secciones de firme

4.1 Objetivo y alcance

El objetivo de este estudio es la obtención de los valores de impacto ambiental para tres tipos de secciones de firme catalogadas dentro de la categoría de tráfico T00.

Estas secciones son las secciones S0031, S0032 y S0033. La unidad funcional objeto de estudio será 1 m² de dichas secciones, incluyéndose dentro del alcance las etapas de materias primas, transporte de materias primas, fabricación, distribución hasta obra, puesta en obra, mantenimiento a lo largo de 30 años de la vida útil de la sección y fin de vida.

4.2 Análisis del inventario del ciclo de vida

Para afrontar el análisis del ciclo de vida, y una vez establecida la unidad funcional en la sección anterior, la figura 4.1 muestra cómo se estructurará el inventario.

Esta estructura es una matriz de dos entradas, en las que por una parte se especifica la parte de la sección que se evalúa y por otra la etapa del ciclo de vida estudiada:



MP: Materias primas, TMP: Transporte de materias primas, F: Fabricación, D: Distribución, PEO: Puesta en obra, MT: Mantenimiento, FDV: Fin de Vida
 CR: Capa de rodadura, R (I-R): Riego entre capas Rodadura e Intermedia, CI: Capa intermedia, R (B-I): Riego entre capas intermedia y Base, CB: Capa base, R (S-B): Riego entre capa sub-base y base, CS: Capa sub-base

Figura 4.1. Matriz de doble entrada componente / etapa del ciclo de vida.

A partir de esta configuración de inventario, se procede a presentar los datos de esta etapa, que determinarán los posteriores impactos ambientales.

La estructura del inventario sigue un esquema ascendente dentro de la propia sección de firme, comenzando por la sub-base y terminando en la capa de rodadura.

- Sub-bases

La sub-base de la sección de la sección S0031 está compuesta por zahorra artificial de 25 cm de espesor, lo que implica un volumen de $0,25 \text{ m}^3$ y una masa de $578 \text{ kg} / \text{m}^2$. No existe transporte de materias primas ni fabricación como tal, ya que la zahorra es trasladada directamente desde la cantera hasta la obra.

La etapa de fabricación no presenta valores de referencia, ya que únicamente hace referencia a la elaboración de materiales compuestos, y el proceso de extracción y triturado de la zahorra está incluido en la etapa de extracción de materias primas.

La distribución de la zahorra hasta la obra se ha establecido en 30 km, y las labores de puesta en obra, que incluyen una motoniveladora, apisonadora de compactación y equipo de riego con agua implican un consumo de 0,07 L de diesel /m².

Para la sección S0032, la sub-base está compuesta por 30 cm de suelocemento, con una masa total de 661,5 kg. El suelocemento presenta un 91 % de material inerte, un 3 % de cemento y un 6 % de agua. La distancia del suelo hasta central es de 5 km, mientras que la del suelo es de 30 km. El proceso de fabricación del suelocemento conlleva un consumo de 0,1 L de diesel por tonelada, y la distribución hasta la obra implica recorrer 30 km. Para la puesta en obra se utilizan un rodillo, una apisonadora de compactación y un rodillo adaptado que implican un consumo de 0,067 L de diesel por m² de suelocemento puesto en obra.

La sub-base de la sección S0033 está constituida por 25 cm de suelocemento (551,25 kg) y 22 cm de gravacemento (496,75 kg). La formulación, distancias en el transporte procesos de fabricación, distribución y puesta en obra para el suelocemento son equiparables a las descritas en la sección S0032.

La gravacemento tiene una composición de 3,5 % de cemento, fabricada también en central (igualdad de distancias que en la sección S0032 para todos los materiales), y con los mismos consumos de fabricación.

La distancia desde central hasta obra es de 30 km y la puesta en obra es equivalente a la descrita para el suelocemento. Entre la capa de suelocemento y gravacemento se aplica un riego de curado con una dosificación de 0,526 kg/m², cuya fabricación implica un consumo de gasoil de 9E-05 L diesel y 4,6E-04 kWh. La distancia desde el punto de fabricación hasta la obra es de 37 km y la puesta en obra incluye la utilización de un equipo de riego que consume 4E-03 L diesel por cada m² tratado.

- Riego entre capa sub-base y capa base

Para la sección S0031, sobre la zahorra se aplicará un riego de imprimación con una dosificación de 1,11 kg /m².

Las materias primas de dicho riego distan 80 km del punto de fabricación, y la fabricación de dicho riego implica el consumo de 9,8 E-04 kWh y 2,1 E-04 L de diesel. La distancia desde el punto de fabricación hasta la obra es de 37 km y la puesta en obra incluye la utilización de un equipo de riego que consume 4E-03 L diesel por cada m² tratado.

Las secciones S0032 y S0033 incorporan el mismo tipo de riego de entre las capas sub-base y base. Se trata de un riego de curado con una dosificación de 0,526 kg, cuya fabricación implica un consumo de gasoil de 9E-05 L diesel y 4,6 e-04 kWh. La distancia desde el punto de fabricación hasta la obra es de 37 km y la puesta en obra incluye la utilización de un equipo de riego que consume 4E-03 L diesel por cada m² tratado.

- Capa base

La sección S0031 presenta una capa base de 26 cm de espesor, con una masa total de 616,46 kg de mezcla bituminosa AC 22 35/50 BASE G, con un 3,8 % de porcentaje en masa de ligante bituminoso. Los áridos se encuentran a 30 km de la planta de fabricación asfáltica, y el betún tiene dos procedencias. El 90 % se transporta por carretera desde 80 km de distancia, mientras el 10 % restante está situado a 360 km en barco y 10 km por carretera. El proceso de fabricación de la mezcla bituminosa implica el consumo de 0,182 L de diesel, 2,57 kWh eléctricos y 3,69 m³ de gas natural.

La distancia desde planta hasta obra es de 37 km, y en la puesta en obra intervienen los siguientes equipos: minifresadora, extendedora, camión de equipo, apisonadora neumática y apisonadora tándem, con un consumo de diesel total de 0,28 L de diesel, extendido en tres tongadas.

La sección S0032 presenta una capa base de 16 cm de espesor de la misma tipología que la anterior. Las distancias de las materias primas a planta son las mismas que en el caso anterior, mientras que los consumos de fabricación son 0,11 L de diesel, 1,58 kWh eléctricos y 2,27 m³ de gas natural. La distancia desde planta hasta obra es de 37 km, y el consumo de las operaciones de puesta en obra es de 0,18 L de diesel extendido y compactado en dos tongadas.

La capa base de la sección S0033 consta de 11 cm de espesor de una mezcla bituminosa AC 32 35/50 BASE G, con un 3,6 % de betún. Las distancias para el transporte de materias primas y la distribución son equivalentes a los casos anteriores. El consumo en fabricación es de 0,078 L de diesel, 1,1 kWh eléctricos y 1,58 m³ de gas natural. La puesta en obra se realiza en una única tongada que implica el consumo de 0,099 L de diesel.

- Riego entre capa base y capa intermedia

Este riego es equivalente para las tres secciones estudiadas. Se trata de un riego de adherencia con una dotación de 0,35 kg. Las distancias de las materias primas a planta y la distribución son equivalentes a las de los otros riegos descritos anteriormente, mientras que el proceso de fabricación implica el consumo de 3,1E-04 kWh eléctricos y 6E-05 L de diesel. El equipo de riego consume 4E-3 L de diesel en su puesta en obra.

- Capa intermedia

La capa intermedia es común a las tres secciones estudiadas. Se trata de 6 cm de mezcla bituminosa AC 22 35/50 BIN S (147 kg), con un 4,6 % de betún. Todos los transportes, tanto de materias primas hasta planta como de distribución hasta obra son equivalentes a los descritos en las capas bases.

El proceso de fabricación de la mezcla bituminosa implica el consumo de 0,05 L de diesel, 0,62 kWh eléctricos y 0,87 m³ de gas natural. La puesta en obra conlleva un consumo total de 0,086 L de diesel, extendido en una única tongada.

- Riego entre capa intermedia y capa de rodadura

Este riego es equivalente para las tres secciones estudiadas. Se trata de un riego de adherencia con una dotación de 0,447 kg. Las distancias de las materias primas a planta y la distribución son equivalentes a las de los otros riegos descritos anteriormente, mientras que el proceso de fabricación implica el consumo de 3,9E-04 kWh eléctricos y 8E-05 L de diesel. El equipo de riego consume 4E-3 L de diesel en su puesta en obra.

- Capa de rodadura

La capa rodadura es también equivalente para las tres secciones objeto de estudio. Se trata de 3 cm de mezcla bituminosa BBTM 11B 45/80-65 (60,12 kg), con un 4,8 % de betún modificado.

Todos los transportes, tanto de materias primas hasta planta como de distribución hasta obra son equivalentes a los descritos en las mezclas bituminosas anteriores, a excepción del árido pórfido, que se encuentra a una distancia muy superior (300 km) de la planta.

El proceso de fabricación de la mezcla bituminosa implica el consumo de 0,02 L de diesel, 0,25 kWh eléctricos y 0,35 m³ de gas natural. La puesta en obra conlleva un consumo total de 0,078 L de diesel, extendido en una única tongada.

Todos estos datos han sido obtenidos a partir de datos reales de fabricación proporcionados por la empresa PAVASAL E.C.S.A⁴.

Una vez descrito el inventario hasta la puesta en obra, a continuación se establece el inventario para la etapa de conservación y mantenimiento.

Las actividades de conservación y mantenimiento en una carretera implican multitud de actuaciones que a lo largo del tiempo (bien acciones pequeñas de manera regular y periódica o actuaciones de más envergadura algo más espaciadas en el tiempo), deben realizarse en el contexto de la carretera para facilitar la viabilidad de la misma y conservarla en el mejor estado posible para utilización por parte de los usuarios.

Cualquier empresa dedicada a la conservación puede corroborar que no existen dos conservaciones iguales, debido a gran cantidad de factores externos que hacen variar mucho las condiciones finales del firme.

⁴ PAVASAL E.C., S.A. www.pavasal.com

Uno de los factores más determinantes a la hora de la futura conservación de la infraestructura es la correcta ejecución de la puesta en obra de los materiales y el proceso de construcción de la sección, por lo que asignar a cada sección objeto de estudio un tipo de mantenimiento es complejo y puede resultar en muchos casos subjetivo.

Pese a ello, se ha identificado un documento de la Consejería de Obras Públicas y Transportes de la Junta de Andalucía⁵ donde se recogen diversos escenarios de conservación en función del tipo de tráfico que soporta la sección y el diseño de la misma.

La figura 4.2 muestra, en un horizonte temporal de 30 años, las principales actuaciones de conservación recomendadas para los tipos de secciones que se han estudiado.

En este caso, no se ha entrado a valorar cómo una sección de firme puede alargar su vida en función de distintos condicionantes, asunto tratado en distintas publicaciones [ESTE15], sino que se aplica como una etapa más del ciclo de vida, incluida con criterios de neutralidad. [ZANG10] evaluó en su momento cómo el deterioro de una carretera puede repercutir en su futura rehabilitación y en el consumo asociado a la circulación.

[CROS11] ya realizó una aproximación al impacto generado en la etapa de conservación de los firmes, focalizándose en la energía consumida, emisiones de gases de efecto invernadero, CO₂, NO_x y CO, al igual que [CASS11] estudió la conservación y rehabilitación de firmes focalizándose únicamente en los gases de efecto invernadero.

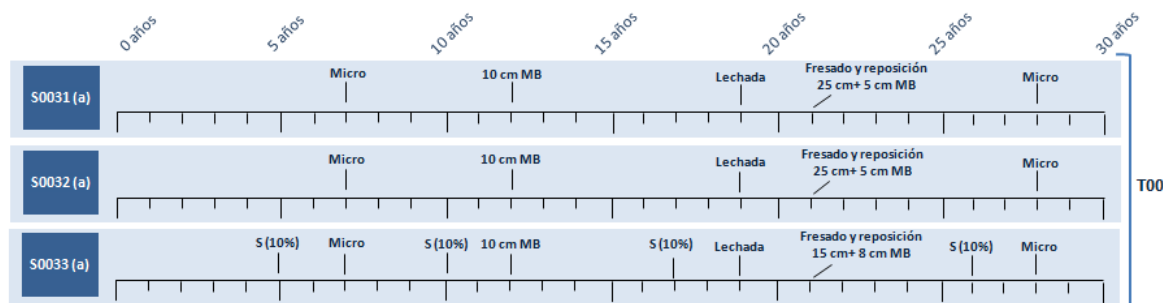


Figura 4.2. Esquema de mantenimiento para las secciones objeto de estudio.

Como se puede observar, las actuaciones para las secciones S0031 y S0032 son equivalentes, mientras que la sección S0033 presenta un protocolo de conservación diferente.

⁵ Instrucción para el diseño de firmes de la red de carreteras de Andalucía. Junta de Andalucía, Consejería de obras públicas y transportes nº registro JAOP/GIASA-47-2007

Las tablas 4.1 y 4.2 describen cómo se despliegan cada uno de los protocolos de conservación recomendados por la Consejería de Obras Públicas y Urbanismo de la Junta de Andalucía y que han sido tomados como referencia en este estudio.

AÑOS	ACTUACIÓN	DESCRIPCIÓN
7	Micro	<p>Consiste en la aplicación directa sobre la capa de rodadura original de una nueva capa de rodadura de 3 cm de espesor de mezcla bituminosa BBTM 11B 45/80 -65.</p> <p>Se incluye en esta actuación la aplicación del riego correspondiente y de la capa de rodadura.</p> <p>Se consideran para estos dos elementos los procesos de extracción de materias primas, transporte de materias primas hasta las plantas de elaboración, proceso de fabricación, transporte hasta la obra y puesta en obra de los mismos.</p>
12	10 cm MB	<p>Consiste en la aplicación directa, sobre la capa inmediatamente anterior, de 7 cm de MB AC 22 35/50 BIN S y 3 cm de capa de rodadura BBTM 11B 45/80 -65.</p> <p>Se incluye en esta actuación la aplicación del riego sobre la capa antigua y el riego entre la capa intermedia y de rodadura.</p> <p>Se consideran para todos los elementos los procesos de extracción de materias primas, transporte de materias primas hasta las plantas de elaboración, proceso de fabricación, transporte hasta la obra y puesta en obra de los mismos.</p>
19	Lechada	<p>Se procede al vertido sobre la última capa existente de una lechada bituminosa tipo LB1, con una dotación de 18 kg/m².</p> <p>Se consideran para la lechada procesos de extracción de materias primas, transporte de materias primas hasta las plantas de elaboración, proceso de fabricación, transporte hasta la obra y puesta en obra de los mismos.</p>
21	Fresado y reposición de 25 cm + 5 cm de MB	<p>Se retirarán 25 cm de contabilizando a partir de la capa superior. Dentro de esta retirada de material se computa el impacto del fresado, el transporte del fresado a vertedero (20 km) y la disposición final en vertedero de inertes.</p> <p>Una vez fresado, los elementos que se incluyen son: riego de adherencia, 16 cm de MB AC 22 35/50 BASE G, extendida en dos tongadas con su correspondiente riego de adherencia intermedio, otro riego de adherencia y la capa intermedia de MB AC 22 35/50 BIN S (9 cm).</p> <p>Con esto se recuperan los 25 cm fresados. A continuación se incorpora un nuevo riego y finalmente 5 cm de MB AC16 35/50 S.</p> <p>Para todos los elementos de esta actuación se incluyen los procesos de extracción de materias primas, transporte de materias primas hasta las plantas de elaboración, proceso de fabricación, transporte hasta la obra y puesta en obra de los mismos.</p>
28	Micro	Equivalente al micro del año 7

Tabla 4.1 Inventario de operaciones de conservación en secciones S0031 y S0032.

Como se puede observar en este listado de actuaciones, existen dos aplicaciones de refuerzo de rodadura (a los 7 y 28 años), un refuerzo más intensivo a los 12 años con 10 cm de mezcla

bituminosa, una lechada y una actuación de gran envergadura a los 21 años.

AÑOS	ACTUACIÓN	DESCRIPCIÓN
5	Sellado 10 %	Se procede al sellado del 10 % de las grietas que aparecen. Según la instrucción de la junta de Andalucía éstas aparecen cada 7 m. Teniendo en cuenta que se está trabajandado sobre un metro cuadrado de sección y que las grietas aparecen cada 7 m, por cada m2 de sección existirán 0,14 m de grietas. Teniendo en cuenta que sólo se sella el 10 %, únicamente se sellarán 0,014 m de grieta por cada m2 de sección. La dotación de material será 0,3 L/m de grieta, y quedan incluidos extracción de materias primas, transporte de materias primas hasta las plantas de elaboración, proceso de fabricación, transporte hasta la obra y puesta en obra de los mismos.
7	Micro	Consiste en la aplicación directa sobre la capa de rodadura original de una nueva capa de rodadura de 3 cm de espesor de mezcla bituminosa BBTM 11B 45/80 -65. Se incluye en esta actuación la aplicación del riego correspondiente y de la capa de rodadura. Se consideran para estos dos elementos los procesos de extracción de materias primas, transporte de materias primas hasta las plantas de elaboración, proceso de fabricación, transporte hasta la obra y puesta en obra de los mismos.
10	Sellado 10 %	Equivalente al sellado del año 5
12	10 cm MB	Consiste en la aplicación directa, sobre la capa inmediatamente anterior, de 7 cm de MB AC 22 35/50 BIN S y 3 cm de capa de rodadura BBTM 11B 45/80 -65. Se incluye en esta actuación la aplicación del riego sobre la capa antigua y el riego entre la capa intermedia y de rodadura. Se consideran para todos los elementos los procesos de extracción de materias primas, transporte de materias primas hasta las plantas de elaboración, proceso de fabricación, transporte hasta la obra y puesta en obra de los mismos.
17	Sellado 10 %	Equivalente al sellado del año 5
19	Lechada	Se procede al vertido sobre la última capa existente de una lechada bituminosa tipo LB1, con una dotación de 18 kg/m ² . Se consideran para la lechada procesos de extracción de materias primas, transporte de materias primas hasta las plantas de elaboración, proceso de fabricación, transporte hasta la obra y puesta en obra de los mismos.
21	Fresado y reposición de 15 cm + 8 cm de MB	Se retirarán 15 cm de contabilizando a partir de la capa superior. Dentro de esta retirada de material se computa el impacto del fresado, el transporte del fresado a vertedero (20 km) y la disposición final en vertedero de inertes. Una vez fresado, los elementos que se incluyen son: riego de adherencia, 10 cm de MB AC 22 35/50 BASE G, otro riego de adherencia y la capa intermedia de MB AC 22 35/50 BIN S (7 cm). A continuación se incorpora un nuevo riego y finalmente 5 cm de MB AC16 35/50 S. Para todos los elementos de esta actuación se incluyen los procesos de extracción de materias primas, transporte de materias primas hasta las plantas de elaboración, proceso de fabricación, transporte hasta la obra y puesta en obra de los mismos.
26	Sellado 10 %	Equivalente al sellado del año 5
28	Micro	Equivalente al micro del año 7

Tabla 4.2 Inventario de operaciones de conservación en sección S0033

En este caso, además de los distintos refuerzos (años 7, 12 y 28) y actividades de mayor envergadura (21 años), se aprecia cómo se realiza un sellado periódico (años 5, 10, 17 y 26).

Por último, a continuación se presenta el escenario de fin de vida.

La evaluación del escenario de fin de vida en una estructura como la carretera, al igual que la etapa de mantenimiento descrita anteriormente, es un elemento complejo de valorar debido a varios factores.

Generalmente, las carreteras son infraestructuras que tienden a perpetuarse en el tiempo de forma continua, aplicando sucesivas operaciones de mantenimiento de forma periódica permitiendo su uso durante largos periodos de tiempo.

Pese a que las estructuras se proyectan con un periodo de vida útil, en la práctica éstas reciben tratamientos de conservación “menores” de forma regular y actuaciones de más envergadura en periodos más espaciados de tiempo, por lo que en realidad la sección va alargando su vida útil años y años.

Son poco frecuentes los casos en los que una carretera se abandona o clausura al tráfico, ya que en caso de que un tramo carretera sea sustituido por otra vía nueva, la primera suele quedar a disposición del usuario ya que en su entorno existen accesos y vías de comunicación utilizadas, ya que la carretera siempre ha servido para unir espacios o los propios espacios se han creado en su entorno.

Para el caso concreto que nos ocupa, se valorarán únicamente el escenario de fin de vida de vertedero, ya que valorar escenarios de reciclado implica un número de variables muy elevadas a la hora de realizar el estudio, que incluye valorar la normativa vigente, la tasa de reciclado, el tipo de mezcla bituminosa en la que se recicla, con qué técnica, etc.

A la hora de realizar el cálculo de la cantidad de material que debe ser retirado para cada una de las secciones estudiadas, no debe tenerse en cuenta la estructura inicial de la carretera, sino la estructura de la misma en el momento de deconstrucción.

Las distintas operaciones de mantenimiento pueden haber incluido aportación de material, por lo que la masa de la sección al principio de su vida útil y en el momento de la deconstrucción puede no coincidir.

Debido a que los únicos escenarios de mantenimiento valorados han sido aquellos que incluían capa de rodadura BBTM 11B 45/80 -65, ya que la climatología de Andalucía así lo indicaba, serán únicamente estas secciones las que sean valoradas desde el punto de vista de la etapa de fin de vida.

Los elementos que se tendrán en cuenta para este cálculo serán la retirada del material con perforadora-retroexcavadora, el transporte hasta vertedero y disposición final en vertedero.

Es importante incidir en que este escenario de fin de vida es virtual, ya que las secciones han estado siendo mantenidas y conservadas hasta el año 28 ó 29, lo que implica que realmente

podrían dar servicio durante más tiempo, pero se establecerán los 30 años como momento de fin de vida.

La masa a retirar de cada una de las secciones serán 1,895 toneladas para la sección S0031, 1,741 t para la sección S0032 y 2,059 t para la sección S0033.

El desmantelamiento de cada una de las secciones implica el consumo de 0,505, 0,464 y 0,549 L de diesel respectivamente, utilizando para el proceso una perforadora y una retroexcavadora.

La distancia a vertedero considerada será 20 km para todos los casos.

4.3 Evaluación del impacto del ciclo de vida

Una vez definida la unidad funcional objeto de estudio y el inventario del ciclo de vida para cada una de las secciones objeto de estudio, se acomete la etapa de evaluación del impacto del ciclo de vida.

Los resultados se presentarán de forma separada, indicando en primer lugar los impactos ambientales en la etapa “cradle to construction”, es decir, desde la etapa de extracción de materias primas hasta la puesta en obra, valorando posteriormente de manera independiente los escenarios de mantenimiento y de fin de vida.

La representación de los resultados ambientales (expresados en emisiones de CO₂ equivalente y consumo de agua), para la etapa de “cradle to construction”, se representarán de acuerdo al esquema previamente descrito de matriz de doble entrada.

Esto permitirá valorar los resultados obtenidos desde el punto de vista estructural, conociendo el impacto de cada uno de los elementos que compone la sección de firme, pero también desde el punto de vista de la etapa del ciclo de vida considerada.

Esta forma de expresar los resultados permitirá focalizar potenciales esfuerzos por parte de todos los actores involucrados en el sector, con el fin de invertir dichos esfuerzos en aquellas partes del ciclo de vida más demandantes desde el punto de vista ambiental.

Las figuras 4.3 y 4.4 muestran los resultados ambientales para las tres secciones estudiadas, proporcionando información acerca de las emisiones de gases de efecto invernadero y de consumo de agua respectivamente.

En el eje de ordenadas aparecen los distintos componentes de la sección, clasificados por capas y riegos, mientras que el código de colores indica la etapa del ciclo de vida correspondiente.

Todos los datos están referidos a un metro cuadrado de sección incluyendo las etapas de ciclo de vida de extracción de materias primas, transporte de materias primas, procesos de fabricación, distribución de materiales elaborados desde planta hasta obra y por último los procesos de puesta en obra.

En la figura 4.3 se presentan los resultados para la categoría de impacto de calentamiento global:

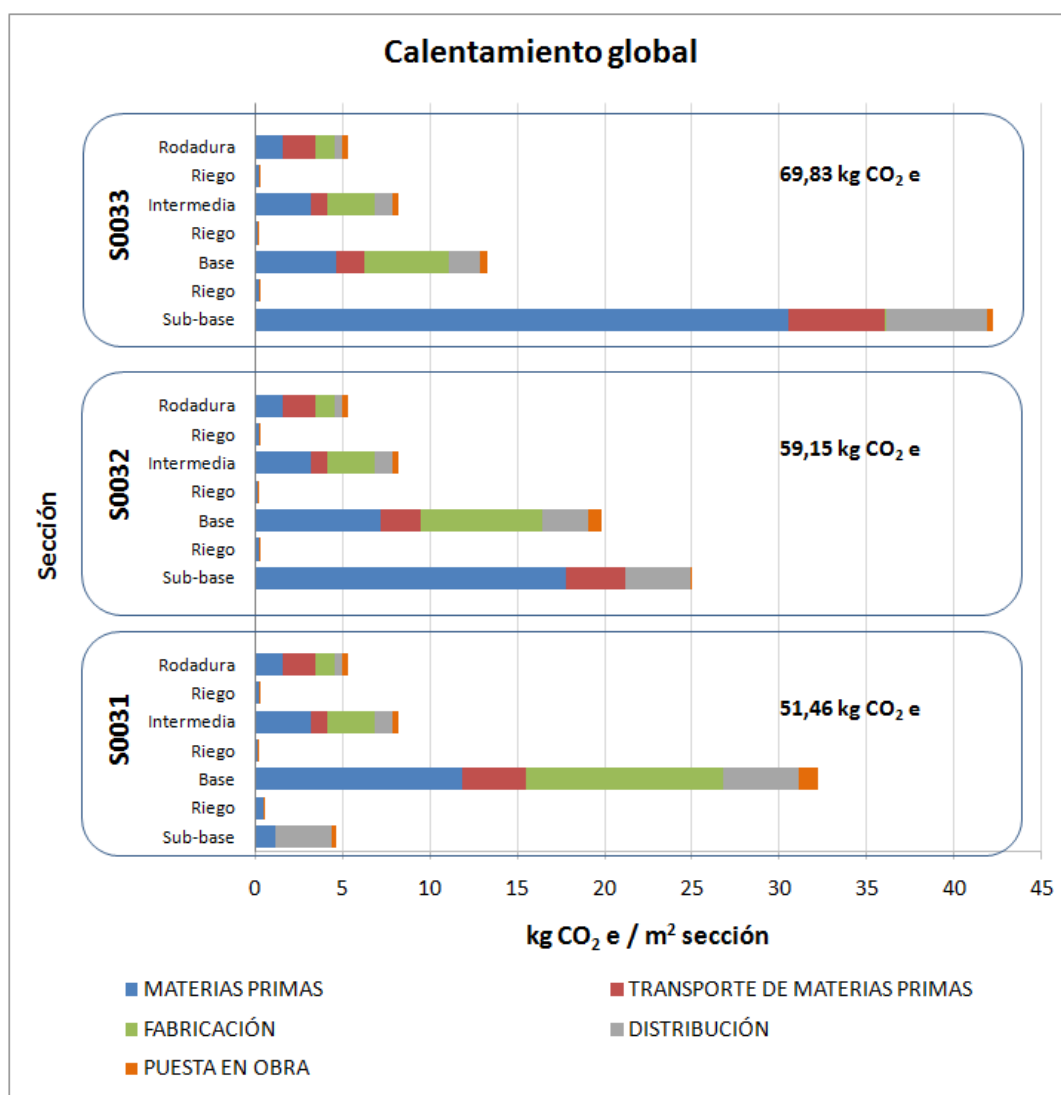


Figura 4.3. Resultados de las tres secciones objeto de estudio para la categoría de impacto de calentamiento global. “Cradle to construction”.

En la figura 4.4 se presentan los resultados para la categoría de impacto de consumo de agua.

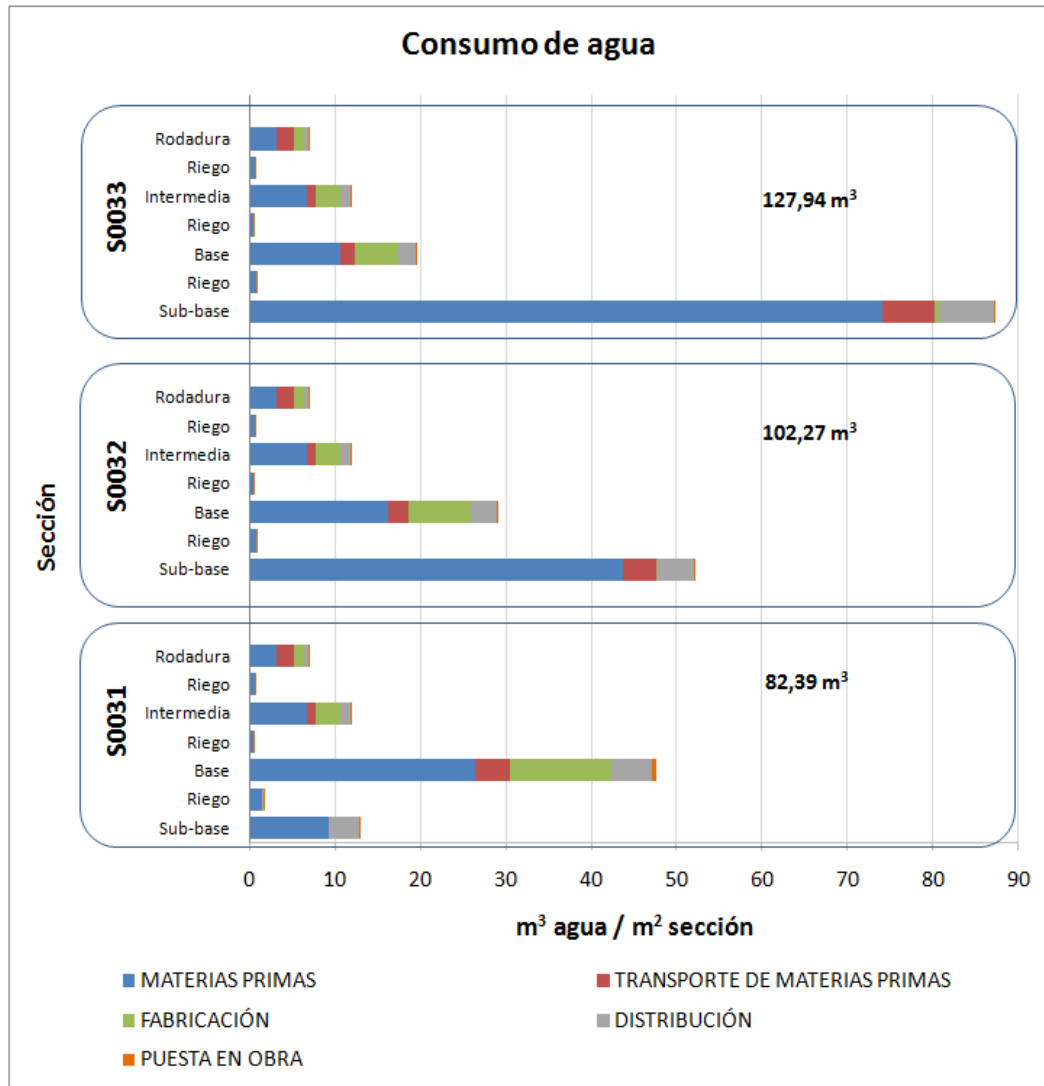


Figura 4.4. Resultados de las tres secciones objeto de estudio para la categoría de impacto de consumo de agua. “Cradle to construction”

Una vez presentados los resultados para las etapas que comprenden el ámbito “cradle to construction”, a continuación se muestran (figuras 4.5 y 4.6) los resultados para un periodo de 30 años de mantenimiento, de acuerdo a los protocolos establecidos en las tablas 4.1 y 4.2.

Los resultados que se presentan son acumulativos, lo que implica que las operaciones individuales vienen determinadas por el salto producido en la gráfica en el año de actuación.

La línea roja punteada indica el impacto ambiental de la sección original, es decir, desde la etapa de extracción de materias primas hasta la puesta en obra, mientras que la línea azul indica los impactos asociados a las operaciones de mantenimiento expresadas de forma acumulativa, quedando registrado el punto en el que las operaciones de conservación alcanzan el impacto producido por la sección original.

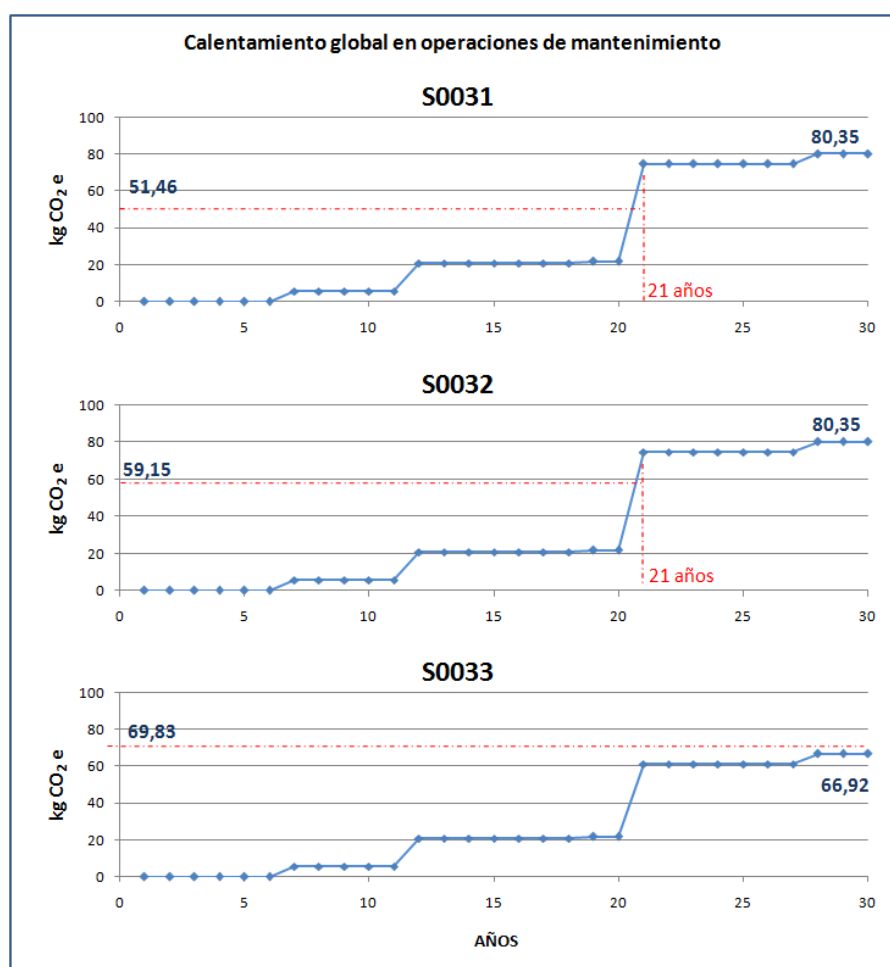


Figura 4.5. Resultados para las operaciones de mantenimiento de las tres secciones objeto de estudio para la categoría de impacto de calentamiento global.

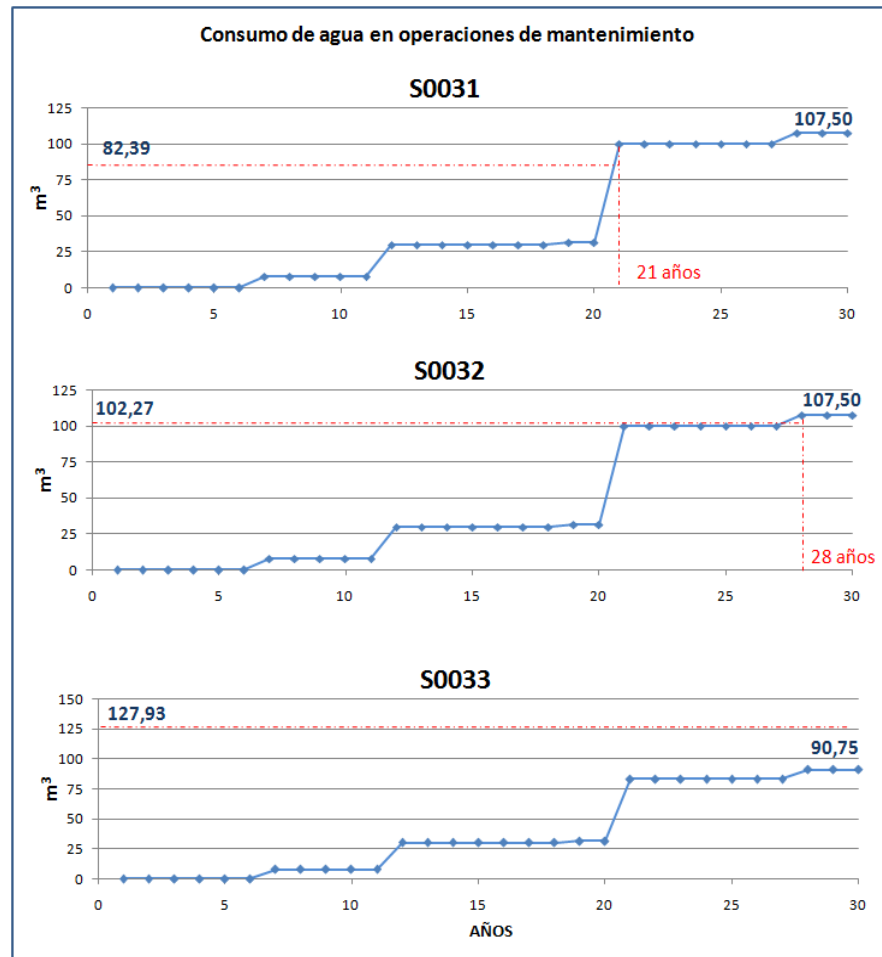


Figura 4.6. Resultados para las operaciones de mantenimiento de las tres secciones objeto de estudio para la categoría de impacto de consumo de agua.

Como se puede apreciar en ambas figuras, las operaciones de mantenimiento en las secciones S0031 y S0032 alcanzan el impacto de la sección original en ambas categorías de impacto estudiadas, mientras que la sección S0033 no llega, a lo largo de los 30 años de estudio, a superar el impacto que supone la sección original.

Para todas las secciones y categorías de impacto estudiadas, los 21 años es un punto crítico ya que en él se produce la actuación de mayor envergadura, que implica el proceso de fresado de una parte de sección y el aporte de nuevo material a la misma.

Por último, se procede a evaluar el escenario de fin de vida de las tres secciones, en el que como se ha comentado anteriormente, se incluye el proceso de desmantelado, transporte y disposición final en vertedero.

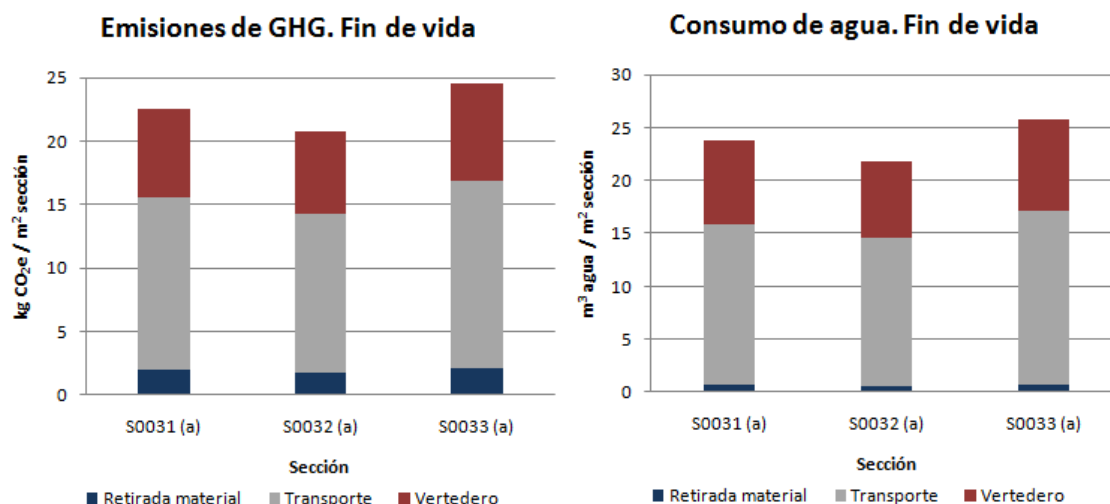


Figura 4.7. Resultados para el fin de vida de las tres secciones objeto de estudio para las categorías de calentamiento global y consumo de agua.

4.4 Interpretación de los resultados

Como se mostrado en la sección 4.3, los resultados ambientales para las distintas secciones se han expresado en tres grandes grupos independientes: el apartado cradle to gate, las operaciones de mantenimiento y el fin de vida.

En lo que respecta al primer apartado, cradle to gate, se observa como la etapa de materias primas es, en todos los casos, la etapa del ciclo de vida que más importancia presenta, tanto en el indicador de calentamiento global como en el indicador de consumo de agua.

En segundo lugar, los procesos de fabricación se posicionan como la segunda etapa del ciclo de vida en relevancia, fundamentalmente los procesos asociados a los procesos de fabricación de mezcla bituminosa, siendo la fabricación del suelocemento y la gravacemento mucho menos exigente desde el punto de vista energético.

Los transportes de materias primas y la distribución son un factor variable, en función de la ubicación de la obra. Para este caso presentan valores que deben tenerse en cuenta, pero sus resultados son particulares para el escenario que se ha estudiado y variarán en función de la ubicación de los materiales y la obra.

Queda evidenciado que los procesos de puesta en obra presentan el menor impacto de esta primera etapa estudiada (figura 4.8)

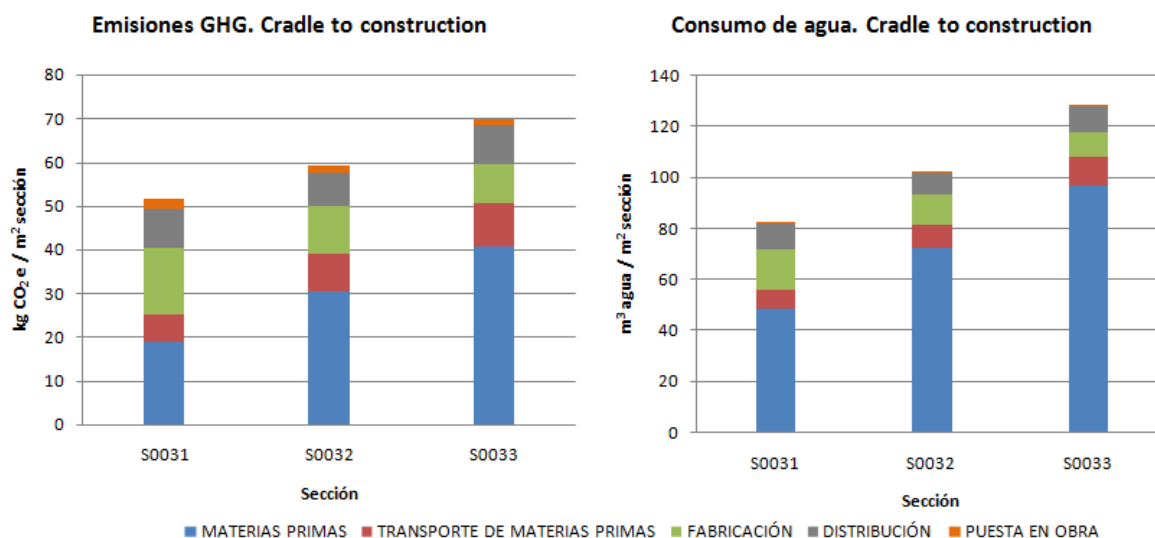


Figura 4.8. Resultados para la etapa cradle to construction de las tres secciones objeto de estudio para las categorías de calentamiento global y consumo de agua.

En el caso de las operaciones de mantenimiento, la figura 4.9 representa los impactos totales generados en esta etapa para cada una de las secciones estudiadas.

En ella se aprecia como las secciones S0031 y S0032, al sufrir las mismas operaciones de mantenimiento, presentan idénticos resultados, mientras que la sección S0033 presenta resultados sensiblemente menores.

Las operaciones de mantenimiento que se realizan en la sección S0033 vinculadas al proceso de sellado de grietas (anualidades 5, 10, 17 y 26) no presentan relevancia dentro del cómputo general de operaciones de mantenimiento, mientras que el año 21 es especialmente impactante debido a que se ejecuta una operación de conservación de gran envergadura, como es el fresado y reposición de una parte de la sección.

La diferencia principal entre las secciones S0031 y S0032 y la sección S0033 se centra fundamentalmente en las diferencias existentes en esta etapa, donde el espesor fresado y la cantidad de masa repuesta varían sensiblemente.

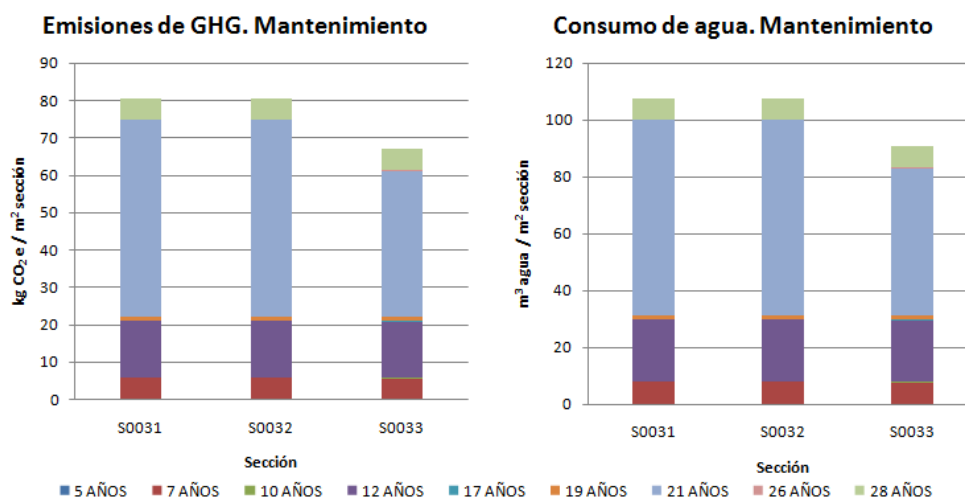


Figura 4.9. Resultados para la etapa de mantenimiento de las tres secciones objeto de estudio para las categorías de calentamiento global y consumo de agua.

Con respecto a la etapa de fin de vida, y tal y como quedó representado en la figura 4.7, el impacto es directamente proporcional a la masa de sección que se retira, transporta y deposita en vertedero, por lo que la sección S0033 es la más impactante. Los principales impactos están asociados al transporte desde la obra hasta el vertedero, etapa crucial que implica un impacto muy relevante en el ciclo de vida del producto.

5. Conclusiones

El Análisis del Ciclo de Vida ha demostrado ser una herramienta útil para valorar el impacto ambiental de tres tipos de secciones de firme incluidas en la categoría de tráfico T00 de acuerdo a la norma 6.1 IC de la Instrucción de Carreteras.

La evaluación ambiental ha comprendido todas las etapas del ciclo de vida de la sección de firme, desde la extracción de materias primas hasta el fin de vida de la sección.

En la primera etapa de vida de la sección, que incluye hasta la puesta en obra de la misma, la etapa de materias primas demuestra ser la etapa más impactante, seguida de los procesos de fabricación.

Las secciones en las que la sub-base incluye ligante hidráulico (S0032 y S0033), la sub-base es el elemento de la sección que más carga ambiental genera, seguido de la capa base de mezcla bituminosa.

Las operaciones de mantenimiento suponen un valor importante con respecto al impacto de la sección original, llegando a superar el impacto de ésta en las secciones S0031 y S0032.

El “key point” en el proceso de mantenimiento se genera a los 21 años de la puesta en obra de la sección y hace referencia al proceso de fresado y reposición de parte de la sección, representando dicha etapa aproximadamente un 60 % de los impactos ambientales generados durante 30 años de conservación.

El fin de vida que se ha establecido ha sido deconstrucción y disposición final en vertedero. Pese a que no es habitual un fin de vida de estas características, ya que las carreteras se conservan de forma indefinida, ha quedado demostrado que el transporte hasta el vertedero tendrá una relevancia crucial en el impacto de dicha etapa.

Mediante este trabajo se ha logrado determinar cuáles son los puntos de interés del ciclo de vida de una sección de firme, proporcionando información útil para focalizar los esfuerzos en aquellos elementos y aquellas etapas del ciclo de vida que presentan un impacto ambiental más elevado.

6. Agradecimientos

Los autores desean expresar su especial agradecimiento a la empresa constructora PAVASAL E.C.S.A, y más concretamente a Jesús Felipo y José Ramón López, que han facilitado los datos de inventario necesarios para desarrollar este artículo.

7. REFERENCIAS

- [CASS11] CASS, D. & MUKHERJEE, A. Calculation of Greenhouse Gas Emissions for Highway Construction Operations by Using a Hybrid Life-Cycle Assessment Approach: Case Study for Pavement Operations. *Journal of construction engineering and management-ASCE*, 137, 1015-1025 (2011).
- [CROS11] CROSS, S. A., CHESNER, W. H., JUSTUS, H. G. & KEARNEY, E. R. Life-Cycle Environmental Analysis for Evaluation of Pavement Rehabilitation Options. *Transportation research record*, 2227, 43-52 (2011)
- [ESTE15] ESTEBAN CIRIA, Alberto; COLORADO ARANGUREN, David, COUCEIRO MARTÍNEZ, Luis (2015). Estudio del incremento de la durabilidad de la sección de firme de la carretera Valle Yacus. Tramo Jauja-Ataura (Perú). *Revista Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente de la Universidad Alfonso X el Sabio*, Volumen XIII, Año 2015. Disponible en: <http://www.uax.es/publicacion/estudio-del-incremento-de-la-durabilidad-de-la-seccion-del-firme-de-la.pdf>.
- [HÄKK98] HÄKKINEN, T. & MÄKELE, K. (1998). Environmental adaptation of concrete – Environmental impact of concrete and asphalt pavements, *VTT Research notes* 1752.
- [HOAN05] HOANG, T., JULLIEN, A. & VENTURA, A. A global methodology for sustainable road – Application to the environmental assessment of French highway, *10DBMC International Conference of Building Materials and Components*, Lyon, 17–20 April, 2005.
- [HUAN09] HUANG, Y.; BIRD R., HEIDRICH, O. Development of a life cycle assessment tool for construction and maintenance of asphalt pavements. *Journal of Cleaner Production* 17 (2009) 283–296.
- [MROU01] MROUEH, U-M, ESKOLA, P. & LAINE-YLIJOKI, J. (2001). Life-cycle impacts of the use of industrial by-products in road and earth construction, *Waste Management* 21 (2001) 271–277.
- [OLSO06] OLSSON, S., KÄRRMAN, E. & GUSTAFSSON, J.P. Environmental systems analysis of the use of bottom ash from incineration of municipal waste for road construction, *Resources, Conservation and Recycling* 48 (2006) 26–40.
- [SAYA10] SAYAGH, S., VENTURAA, A., HOANGA, T., FRANC, D. & JULLIEN, A. (2010). Sensitivity of the LCA allocation procedure for BFS recycled into pavement structures, *Resources, Conservation and Recycling*, 54 (2010) 348–358.
- [ZANG10] ZHANG, H., LEPECH, M. D., KEOLEIAN, G. A., QIAN, S. Z. & LI, V. C. .Dynamic Life- Cycle Modeling of Pavement Overlay Systems: Capturing the

Impacts of Users, Construction, and Roadway Deterioration. Journal of Infrastructure Systems, 16, 299-309 (2010)