

# Emisiones de gases de efecto invernadero y consumo de agua en varias secciones de firme utilizando la herramienta ambiental Análisis del Ciclo de Vida

Alberto Moral Quiza, albmor@cartif.es

CARTIF Centro Tecnológico

Luis Couceiro Martínez, lmartcou@uax.es

Ángel Sampedro Rodríguez, sampedro@uax.es

Universidad Alfonso X el Sabio

Las secciones de firme son una parte vital dentro del sistema global denominado "carretera". En el presente trabajo se ha realizado un estudio del impacto ambiental de varias secciones de categoría de tráfico T00 a T2, utilizando como indicadores ambientales las emisiones de gases de efecto invernadero (kg CO<sub>2</sub>e) y el consumo de agua (m<sup>3</sup> agua). Dicho estudio se ha llevado a cabo utilizando la herramienta ambiental Análisis del Ciclo de Vida (ACV), considerando un enfoque "cradle to construction", es decir, incluyendo todos los impactos asociados a la sección desde la extracción de materias primas constituyentes hasta la puesta en obra de la sección.

Este estudio ha permitido determinar los principales impactos ambientales de las secciones, ofreciendo la oportunidad de valorar nuevas estrategias de mejora en dichos impactos.

**Palabras clave:** Sección de firme, Análisis del Ciclo de Vida, emisiones de CO<sub>2</sub>, consumo de agua

Pavement sections are an important part of a whole system called "road". This study has developed an environmental assessment of several pavement sections from different traffic categories (T00 to T2), using the emissions of greenhouse gases and water consumption as environmental indicators. The environmental tool Life Cycle Assessment (LCA) has been used for developing this study, considering a "cradle to construction" approach, from the raw materials of the section to the construction works that ends with the section ready to be used by the vehicles.

The key environmental impacts have been detected, offering the possibility to focus efforts on diminish the global impact of the pavement section acting on the higher environmental impact life cycle stages and pavement structural parts.

**Keywords:** Pavement section, Life Cycle Assessment, CO<sub>2</sub> emissions, water consumption

# Emisiones de gases de efecto invernadero y consumo de agua en varias secciones de firme utilizando la herramienta ambiental Análisis del Ciclo de Vida

## 1. Introducción

Se define como firme a un conjunto de capas superpuestas horizontalmente, compuestas por distintos tipos de materiales, bien sueltos (granulares) o bien aglomerados por algún tipo de conglomerante o ligante, capaz de soportar adecuadamente las cargas del tráfico y proteger al resto de la infraestructura viaria.

La Normativa Española prescribe las características de las secciones de firme de acuerdo a la 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) [BOE 2003]; y el Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes, PG-3, de acuerdo a su última actualización mediante Orden FOM/2523/2014 de 12 de enero de 2014 [BOE 2015].

La importancia de este elemento estructural hace imprescindible la caracterización ambiental de las secciones de firmes a lo largo de su ciclo de vida y en base a distintos indicadores ambientales.

Aunque ya han sido realizados varios trabajos en torno a la caracterización ambiental de varios elementos componentes de la carretera, el presente trabajo se centra en la evaluación de la sección del firme en su conjunto, determinando los impactos ambientales asociados por etapa del ciclo de vida y por elemento estructural de la sección.

El presente artículo se basa en parte del trabajo realizado por uno de los autores en el marco de su tesis doctoral "La herramienta ambiental análisis del ciclo de vida en el estudio de secciones de firme. Evaluación ambiental de varias secciones de firme de categoría de tráfico T00 a T2 conforme a la Norma 6.1-IC" [Moral, A. 2016], desarrollada bajo la supervisión de los otros autores y presentada en la Escuela Politécnica Superior de la Universidad Alfonso X el Sabio (UAX).

## 2. La herramienta ambiental Análisis del Ciclo de Vida

Las Normas ISO 14040 [UNE EN ISO 14040, 2006] e ISO 14044 [UNE EN ISO 14044, 2006] establecen que el Análisis del Ciclo de Vida (ACV) es "una técnica para determinar los aspectos ambientales e impactos potenciales asociados a un producto mediante: la compilación de un inventario de en-

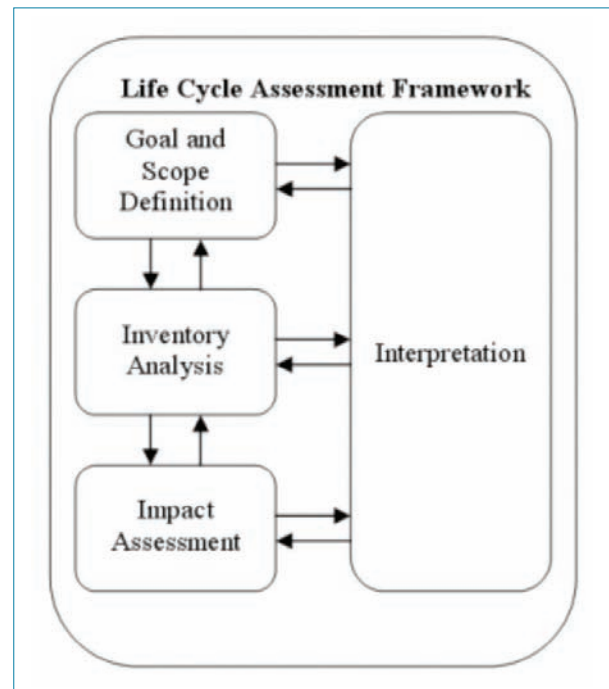


Figura 1. Etapas del Análisis del Ciclo de Vida (ISO 14040).

tradas 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".

De acuerdo a la norma, el ACV consta de cuatro etapas bien diferenciadas:

### Definición de objetivo y alcance

Esta primera etapa 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 define una serie de criterios que marcarán el curso del ACV. Se debe proporcionar información del producto que se va 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.

También debe especificarse qué categorías de impacto y metodología van a ser usadas, el tipo de datos que se van a utilizar y cuál es la calidad de los mismos, o cuáles son las limitaciones e hipótesis que se llevarán a cabo.

Cobra especial importancia el término Unidad Funcional (UF). Este queda definido como el desempeño cuantificado de un sistema del producto para su uso como unidad de referencia a la cual se relacionan las entradas y salidas.

En contra de lo que pudiera parecer, esta es la fase fundamental, pues de ella depende todo lo demás, incluyendo el rigor y la validez del análisis realizado.

### **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.

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

Estos datos deberán ser validados y perfectamente documentados, determinando su origen y fecha de adquisición, para garantizar la trazabilidad de los mismos. Todos los cálculos necesarios para su vinculación a la unidad funcional deberán también estar justificados.

En esta etapa deben también quedar claras las reglas de asignación. Estas reglas se encargan de vincular los impactos a un sistema determinado, así como de determinar los criterios elegidos para dicha asignación.

### **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 lo 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.

### **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.

### **3. Secciones de firme objeto de evaluación. Ámbito de estudio**

El objetivo de este estudio ha sido la evaluación ambiental de 10 secciones de firme incluidas en la norma 6.1 IC, quedando excluidos los pavimentos rígidos, y abarcando secciones dentro de las categorías de tráfico T00, T0, T1 y T2.

La unidad funcional seleccionada ha sido el m<sup>2</sup> de sección de firme. Y los límites del sistema que se establecen coinciden con el enfoque de la cuna a la construcción (*cradle to construction*), quedando por tanto incluidas las siguientes etapas:

- Extracción de materias primas
- Transporte de materias primas
- Procesos de fabricación
- Distribución hasta la obra
- Puesta en obra

Pese a que el ciclo de vida debería incluir las etapas de mantenimiento y fin de vida de las secciones de firme, estas dos etapas han sido eliminadas del alcance del estudio. El principal motivo ha sido debido a la incertidumbre asociada a las mismas. El mantenimiento de una sección de firme está condicionado por muchos factores imponderables para los autores (diseño de la sección, adecuación de la sección al tráfico real, presupuesto disponible para conservación de infraestructuras, etc.); mientras que el fin de vida de las secciones también es confuso en el sentido en que las secciones se perpetúan a lo largo del tiempo mediante sucesivos refuerzos y operaciones de conservación de menor o mayor intensidad. Debido a este motivo, los esfuerzos de los autores se han centrado en un estudio parcial del sistema, con el citado enfoque "*cradle to construction*", pero con una mayor robustez y fidelidad de la realidad.

Con respecto a las secciones de firme evaluadas desde el punto de vista estructural, los elementos que quedan incluidos en el estudio han sido:

## Emisiones de gases de efecto invernadero y consumo de agua en varias secciones de firme utilizando la herramienta ambiental Análisis del Ciclo de Vida

- Capa sub-base: zahorra artificial, suelo-cemento y grava-cemento
- Riego entre capa sub-base y capa base
- Capa base: mezcla bituminosa (incluidos riegos entre diferentes tongadas)
- Riego entre capa de base y capa intermedia
- Capa intermedia: mezcla bituminosa (incluidos riegos entre capa intermedia y capa de rodadura)
- Riego entre capa intermedia y capa de rodadura
- Capa de rodadura: mezcla bituminosa

Las secciones de firme que han sido evaluadas han sido, en función de la categoría de tráfico:

- T00: 0031, 0032 y 0033
- T0: 031, 032 y 033
- T1: 131 y 132
- T2: 231 y 232

Tal y como se aprecia, todas las secciones seleccionadas están apoyadas sobre explanada tipo 3, debido a que es la única explanada que soporta las cuatro categorías de tráfico seleccionadas, y porque se considera que proporciona igualdad de condiciones de partida a las secciones estudiadas.

En la Figura 2 se observa el diseño estructural de las 10 secciones de firme objeto de estudio.

La capa base seleccionada ha sido una mezcla AC 22 35/50 BASE G para las secciones 0031, 0032, 031 y 131, mientras que el resto de secciones incluye una mezcla tipo AC 32 35/50 BASE G. Para la capa intermedia se ha considerado una mezcla tipo AC 22 35/50 BIN S, mientras que la capa de rodadura en todos los casos ha sido una BBTM 11B 45/80 -65.

Los indicadores ambientales seleccionados para expresar los resultados ambientales de este estudio han sido:

- las emisiones de gases de efecto invernadero expresadas en kg CO<sub>2</sub>e

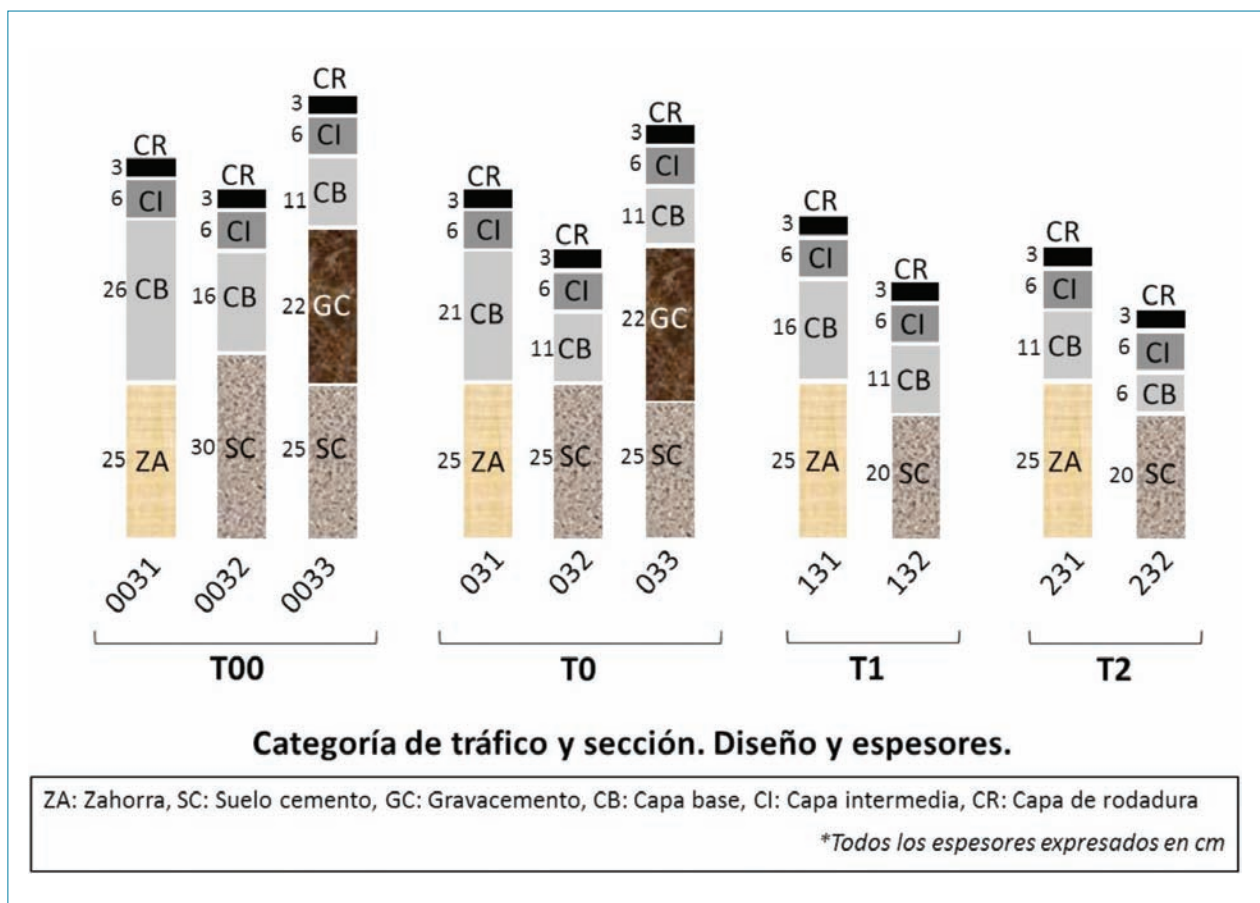


Figura 2. Descripción de las Secciones de firme objeto de estudio y categoría de tráfico correspondiente.

- el consumo de agua expresado en m<sup>3</sup> de agua

La base de datos utilizada ha sido Ecoinvent 3.1 [Weidema et al, 2013]. Mientras que el consumo de agua ha sido directamente obtenido a partir de los inventarios de los distintos flujos seleccionados, las emisiones de CO<sub>2</sub> e se han obtenido mediante el método IPCC GWP 100 yr. El software empleado para realizar este estudio ha sido SimaPro® [Pre-sustainability.com 2015].

#### 4. Análisis de inventario

Todos los datos de inventario están basados en datos reales proporcionados por la empresa constructora PAVASAL [Pavasal.com 2015].

Con el fin de evitar el típico enfoque de caja negra (black box), en el que resulta muy complejo determinar y ubicar los impactos ambientales y su trazabilidad, se ha recurrido a una matriz de doble entrada, tal y como se refleja en la Figura 3.

Esta matriz permite identificar la ubicación de los impactos ambientales en función de la etapa del ciclo de vida estudiada y en función del elemento estructural considerado.

#### 5. Resultados ambientales

Una vez establecido el inventario, se procedió a la modelización ambiental del sistema. En esta etapa, con la ayuda del software comercial SimaPro, se procedió a seleccionar todos los flujos y procesos relativos al inventario previamente obtenido.

Los resultados obtenidos se presentan en varios modos de desagregación, de manera que sea posible identificar claramente los impactos más importantes, ubicándolos de forma sencilla en la etapa del ciclo de vida o elemento estructural correspondiente.

A continuación se muestran los resultados ambientales obtenidos, expresados de acuerdo a los dos indicadores ambientales seleccionados.

La Tabla 1 muestra los resultados para cada una de las secciones, expresados en emisiones de gases de efecto inver-

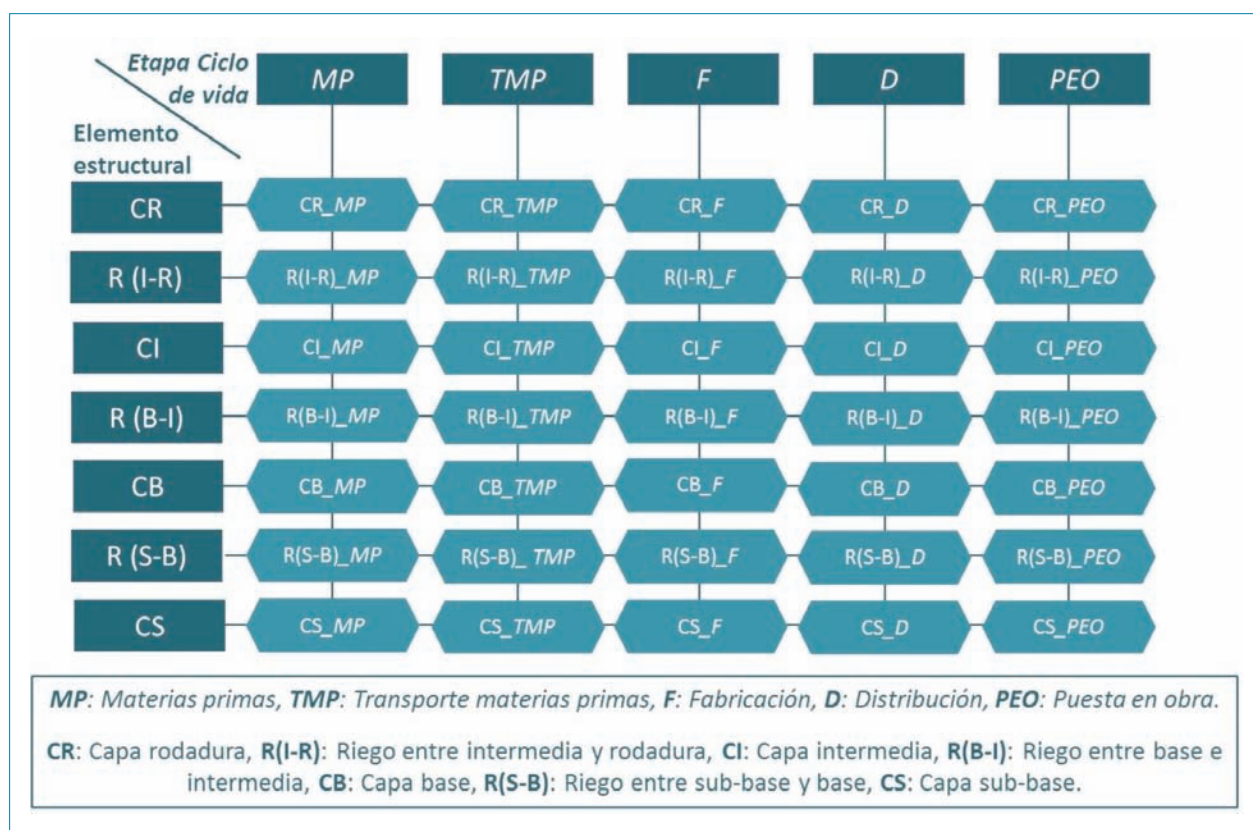


Figura 3. Matriz de doble entrada para inventario y expresión de resultados.



## Emisiones de gases de efecto invernadero y consumo de agua en varias secciones de firme utilizando la herramienta ambiental Análisis del Ciclo de Vida

nadero y desagregados en función de la etapa del ciclo de vida y el elemento estructural.

La Figura 4 muestra gráficamente los resultados obtenidos para las diez secciones de firme en términos de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI).

Por otro lado, los resultados en términos de consumo de agua quedan representados en la Tabla 2. Análogamente al caso anterior, los resultados se presentan desagregados por etapa de ciclo de vida y por elemento estructural para cada una de las secciones de firme.

**Tabla 1. Emisiones de gases de efecto invernadero en función de etapa del ciclo de vida y elemento estructural (kg CO<sub>2</sub>e / m<sup>2</sup> sección).**

Categoría /sección	Etapa del ciclo de vida					Total	Elemento estructural							
	MP	TMP	F	D	PEO		CR	R (I-R)	CI	R (B-I)	CB	R (S-B)	CS	
T00	0031	18,91	6,96	15,20	8,95	2,08	52,10	5,94	0,27	8,22	0,19	32,26	0,53	4,69
	0032	30,63	8,97	10,87	7,75	2,06	60,28	5,94	0,27	8,22	0,19	19,83	0,29	25,54
	0033	40,85	10,37	8,76	9,10	2,17	71,25	5,94	0,27	8,22	0,19	13,32	0,29	43,02
T0	031	16,68	6,27	13,01	8,13	2,03	46,12	5,94	0,27	8,22	0,19	26,28	0,53	4,69
	032	25,13	7,71	8,73	6,11	1,63	49,30	5,94	0,27	8,22	0,19	13,32	0,29	21,07
	033	37,04	9,49	7,87	8,16	2,15	64,71	5,94	0,27	8,22	0,19	10,96	0,29	38,84
T1	131	14,30	5,56	10,83	7,30	1,68	69,67	5,94	0,27	8,22	0,19	19,83	0,53	4,69
	132	22,17	7,11	8,73	5,73	1,56	45,29	5,94	0,27	8,22	0,19	13,32	0,29	17,06
T2	231	11,76	4,87	8,71	6,49	1,34	33,16	5,94	0,27	8,22	0,19	13,32	0,53	4,69
	232	20,04	6,40	5,97	4,90	1,51	38,81	5,94	0,27	8,22	0,19	6,84	0,29	17,06

**MP:** Materias primas, **TMP:** Transporte materias primas, **F:** Fabricación, **D:** Distribución, **PEO:** Puesta en obra.

**CR:** Capa rodadura, **R (I-R):** Riego entre intermedia y rodadura, **CI:** Capa intermedia, **R(B-I):** Riego entre base e intermedia, **CB:** Capa base, **R(S-B):** Riego entre sub-base y base, **CS:** Capa sub-base.

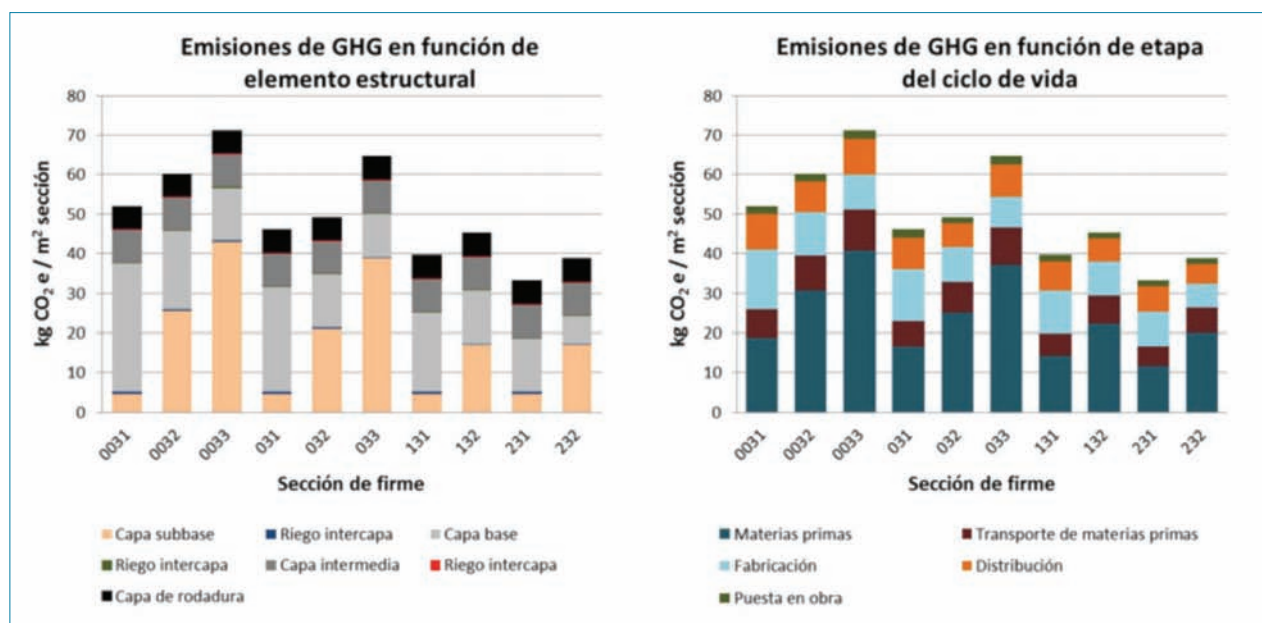


Figura 4. Expresión gráfica de los resultados ambientales en términos de emisiones de gases de efecto invernadero en función de etapa del ciclo de vida y de elemento estructural de la sección.

Tabla 2. Consumo de agua en función de etapa del ciclo de vida y elemento estructural (m<sup>3</sup> agua / m<sup>2</sup> sección).

Categoría /sección	Etapa del ciclo de vida					Total	Elemento estructural							
	MP	TMP	F	D	PEO		CR	R (I-R)	CI	R (B-I)	CB	R (S-B)	CS	
T00	0031	48,71	7,73	15,86	10,05	0,71	83,06	7,64	0,71	11,95	0,52	47,64	1,61	12,99
	0032	72,12	9,97	11,59	8,72	0,70	103,10	7,64	0,71	11,95	0,52	29,20	0,81	52,27
	0033	96,80	11,55	9,54	10,23	0,81	128,88	7,64	0,71	11,95	0,52	19,61	0,81	87,64
T0	031	43,82	6,93	13,15	9,12	0,81	73,84	7,64	0,71	11,95	0,52	34,82	1,61	12,99
	032	59,24	8,57	9,31	6,89	0,55	84,57	7,64	0,71	11,95	0,52	19,65	0,81	46,29
	033	87,42	10,55	8,58	9,16	0,72	116,43	7,64	0,71	11,95	0,52	16,07	0,81	78,73
T1	131	38,39	6,14	11,32	8,20	0,57	64,62	7,64	0,71	11,95	0,52	29,20	1,61	12,99
	132	51,97	7,93	9,29	6,46	0,52	76,17	7,64	0,71	11,95	0,52	19,65	0,81	34,89
T2	231	32,80	5,38	9,11	7,33	0,46	55,07	7,64	0,71	11,95	0,52	19,65	1,61	12,99
	232	47,09	7,13	6,97	5,50	0,50	67,20	7,64	0,71	11,95	0,52	10,67	0,81	34,89

MP: Materias primas, TMP: Transporte materias primas, F: Fabricación, D: Distribución, PEO: Puesta en obra.

CR: Capa rodadura, R (I-R): Riego entre intermedia y rodadura, CI: Capa intermedia, R(B-I): Riego entre base e intermedia, CB: Capa base, R(S-B): Riego entre sub-base y base, CS: Capa sub-base.

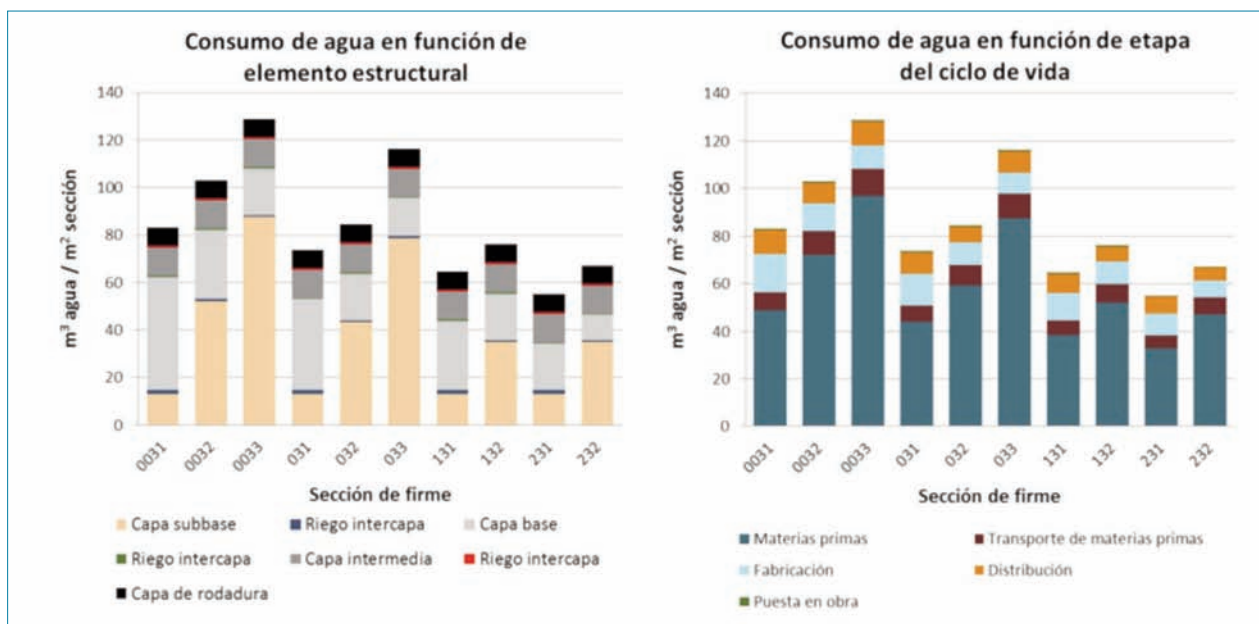


Figura 5. Expresión gráfica de los resultados ambientales en términos de consumo de agua en función de etapa del ciclo de vida y de elemento estructural de la sección.

La Figura 5 proporciona información acerca del consumo de agua para cada una de las secciones en función de la etapa del ciclo de vida estudiada y el elemento de la sección estructural que compone la misma.

Tras la obtención de los resultados ambientales expresados en término de emisiones de gases de efecto invernadero y consumo de agua, se observa que existe una gran similitud en el perfil de ambos.

## Emisiones de gases de efecto invernadero y consumo de agua en varias secciones de firme utilizando la herramienta ambiental Análisis del Ciclo de Vida

Se aprecia, de forma general, que los impactos ambientales disminuyen según disminuye la categoría de tráfico estudiada. Esto es lógico, dado que se reducen las necesidades de prestaciones estructurales del firme

Desde el punto de vista de los componentes estructurales de las secciones, dentro de una misma categoría de tráfico se penalizan más aquellas que incluyen sub-bases con materiales tratados con cemento.

En todos los casos, haciendo referencia a las capas de mezclas bituminosas o asfálticas (capa de base, intermedia y de rodadura), es precisamente este orden jerárquico el que rige los impactos de mayor a menor entidad. Los riegos no representan impactos relevantes para ninguna de las secciones estudiadas. Esto también tiene su lógica, debido al espesor de los diferentes tipos de capas.

Si se atiende a las distintas etapas del ciclo de vida evaluadas, se observa de forma muy evidente que la etapa de obtención de materias primas es, para todas las secciones e independientemente del indicador utilizado, la etapa con mayores impactos.

La etapa de fabricación de los distintos materiales también presenta impactos relevantes, mientras que los resultados asociados a los transportes de materias primas y la distribución deben ser tomados con cautela, ya que son datos que dependen mucho del caso concreto de estudio.

La puesta en obra, si bien tiene una importancia fundamental desde el punto de vista de ejecución de la obra y calidad técnica del producto final, no ha demostrado ofrecer un impacto ambiental excesivamente relevante, siendo la etapa menos impactante de todas las estudiadas.

La similitud existente entre los resultados obtenidos en los dos indicadores ambientales estudiados queda patente en la Figura 6. Un estudio de este tipo, en el que, tras la valoración de distintos tipos de indicadores, se obtienen resultados que permiten ubicar de manera tan concreta los impactos ambientales, tanto a nivel estructural como a nivel de etapa de ciclo de vida, ofrece la posibilidad de establecer estrategias de mejora focalizadas, para invertir los esfuerzos en aquellas etapas o procesos con mayor impacto, con el fin de disponer así de un margen de mejora más elevado.

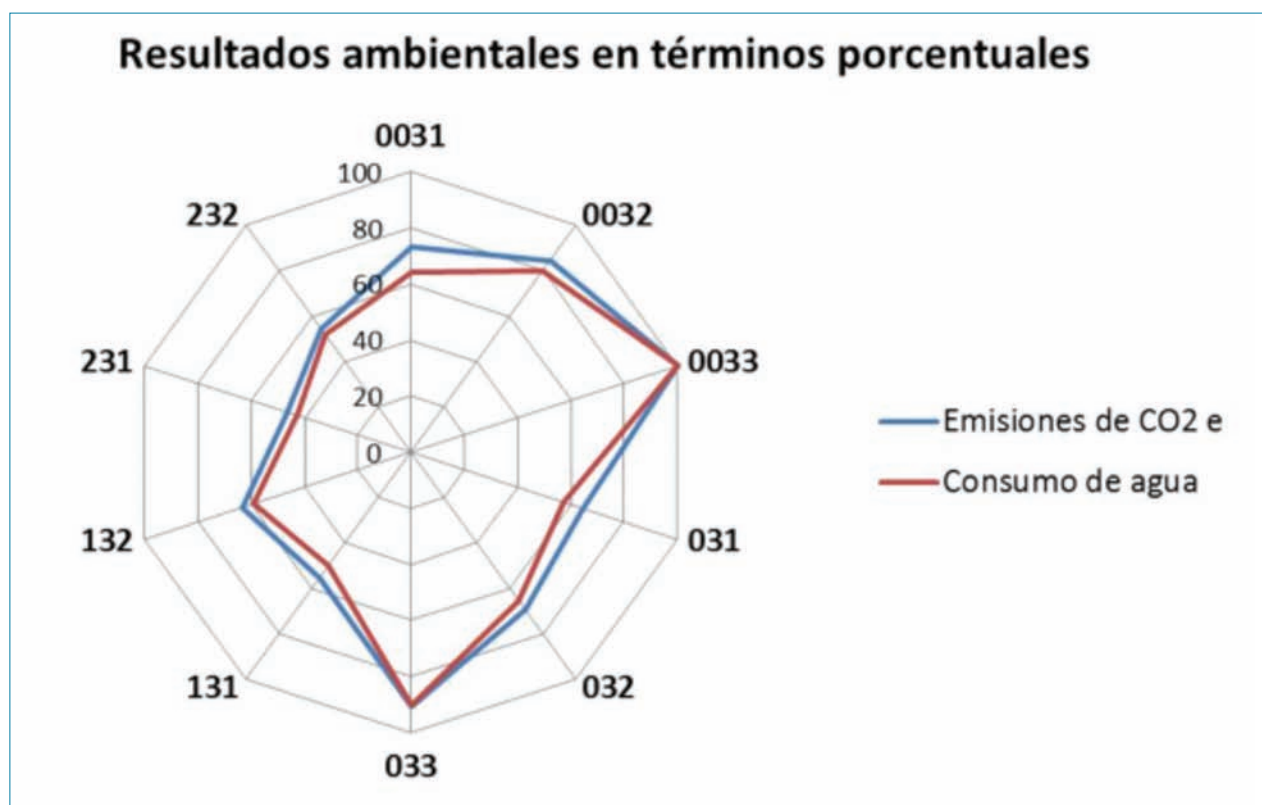


Figura 6. Expresión de los resultados ambientales en términos porcentuales para el consumo de agua y emisiones de gases de efecto invernadero.



## 6. Conclusiones

La principal conclusión de este estudio es que la herramienta ambiental "Análisis del Ciclo de Vida" ha demostrado ser adecuada para la valoración de distintas secciones de firme desde el punto de vista de la sostenibilidad.

La desagregación a la hora de realizar el inventario y los posteriores resultados ambientales han permitido ubicar y jerarquizar las etapas y procesos más impactantes en términos de emisiones de GEI y consumo de agua.

Los dos indicadores utilizados arrojan resultados muy similares, lo que aumenta la robustez del estudio.

Las etapas de materias primas y fabricación son las que más impacto generan en el enfoque "cradle to construction", por lo que los esfuerzos para las mejoras ambientales deben centrarse en ellas.

Es necesario realizar trabajos complementarios, centrados fundamentalmente en la evaluación de los escenarios de conservación más frecuentes para cada una de las secciones, ya que eso permitiría completar el ciclo de vida del producto y tener, por tanto, una visión más completa del impacto global.

También es importante abordar el fin de vida del producto, no tanto desde el punto de vista de fin de servicio, sino el de retirada de material en operaciones de conservación, ya que la reciclabilidad de los materiales puede jugar un papel crucial a la hora de minorar el impacto global de la sección.

Por último, falta realizar un estudio sobre la consideración de la durabilidad, pues es el factor que determina la sostenibilidad que pueden suponer, realmente, las soluciones que quieran compararse de forma directa.

Estos aspectos, y otros, se están considerando en otros estudios sobre estos temas que, aprovechando el trabajo investigador desarrollado por el autor principal, se siguen desarrollando en la Universidad Alfonso X el Sabio (UAX).

## 7. Agradecimientos

Los autores desean expresar su agradecimiento a la empresa PAVASAL, personalizando dicho agradecimiento en D. Jesús Felipo Sanjuán y D. José Ramón López Marco, así como a D. José Luis Peña, por las distintas aportaciones y recomendaciones de la Plataforma Tecnológica Española de la Carretera (PTC).

## 8. Bibliografía

- Ministerio de Fomento, Gobierno de España (2003). Orden FOM/3460/2003 por la que se aprueba la norma 6.1-IC "Secciones de firme" de la Instrucción de Carreteras. Madrid.
- Ministerio de Fomento, Gobierno de España (2015). Orden FOM/2523/2014, de 12 de diciembre, por la que se actualizan determinados artículos del pliego de prescripciones técnicas generales para obras de carreteras y puentes, relativos a materiales básicos, a firmes y pavimentos, y a señalización, balizamiento y sistemas de contención de vehículos. Madrid .
- Moral, A. (2016). La herramienta ambiental análisis del ciclo de vida en el estudio de secciones de firme. Evaluación ambiental de varias secciones de firme de categoría de tráfico T00 a T2 conforme a la Norma 6.1-IC. Tesis Doctoral. Universidad Alfonso X el Sabio. Villanueva de la Cañada (Madrid).
- Pavasal, empresa constructora (2015). Último acceso: 30/04/2015. Disponible en: <http://www.pavasal.com>.
- Pre-sustainability.com (2015). SimaPro-World's Leading LCA software package / PRéSustainability [online]. 2015. [Último acceso 30/04/2016]. Disponible en <http://www.pre-sustainability.com/simapro>.
- UNE EN ISO 14040, 2006. Gestión Ambiental, Análisis del Ciclo de Vida, Principios y marco de referencia. AENOR. Madrid.
- UNE EN ISO 14044, 2006. Gestión ambiental. Análisis de ciclo de vida. Requisitos y directrices. AENOR. Madrid
- Weidema et al, (2013). The ecoinvent data base: Overview and methodology, Data quality guide line for the ecoinvent data base version 3, [www.ecoinvent.org](http://www.ecoinvent.org).