

METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN DE LA SOSTENIBILIDAD DE LOS FIRMES MEDIANTE INDICADORES

Concepción Toribio Díaz¹, Jose Solís Hernández²

¹ CEMOSA, Málaga, España, concepcion.toribio@cemosa.es

² CEMOSA, Málaga, España, jose.solis@cemosa.es

Resumen

El presente artículo desarrolla una metodología para la evaluación de la sostenibilidad de secciones de firme basada en el uso de indicadores. La propuesta metodológica permite comparar diferentes alternativas de diseño de manera homogénea, considerando de forma integrada aspectos estructurales, ambientales, sociales y económicos. El enfoque se basa en la definición de un sistema de indicadores agrupados en tres categorías principales: durabilidad, medioambiente, y aspectos sociales e innovación, cuyos resultados se agregan en un índice global de sostenibilidad. Complementariamente, se incorpora un análisis económico basado en el coste del ciclo de vida (LCC), proporcionando una visión integral del desempeño de las soluciones evaluadas. La metodología se ha aplicado a diferentes tipologías de firmes, comparando soluciones convencionales frente a alternativas que incorporan materiales reciclados y prácticas sostenibles. Los resultados obtenidos evidencian que la combinación de estrategias orientadas a mejorar la durabilidad y reducir el impacto ambiental permite alcanzar los mayores niveles de sostenibilidad. Asimismo, se destaca el carácter práctico y replicable del enfoque, que ha sido aplicado en distintos contextos territoriales.

Palabras Clave: firmes sostenibles, economía circular, ciclo de vida.

1 Introducción

El desarrollo sostenible se ha consolidado en las últimas décadas como un objetivo prioritario en el ámbito de la ingeniería civil y, en particular, en el diseño y construcción de infraestructuras viarias. El sector de las carreteras presenta un elevado potencial de contribución a la sostenibilidad, debido al significativo consumo de recursos naturales, energía y materias primas asociado a la construcción y mantenimiento de firmes, así como a su impacto en las emisiones de gases de efecto invernadero y en el entorno socioeconómico.

En este contexto, la implementación de prácticas sostenibles en el diseño de firmes ha experimentado un notable crecimiento, destacando iniciativas como la incorporación de materiales reciclados, la reducción de la temperatura de fabricación de mezclas bituminosas o la optimización de la durabilidad de las estructuras. Estas estrategias se orientan a reducir el impacto ambiental, mejorar la eficiencia en el uso de recursos y aumentar la vida útil de las infraestructuras. Sin embargo, la diversidad de soluciones disponibles plantea la necesidad de disponer de herramientas que permitan evaluar de forma objetiva su contribución a la sostenibilidad.

Uno de los principales retos actuales radica en la ausencia de metodologías homogéneas que permitan comparar, de manera consistente, diferentes alternativas de diseño. La sostenibilidad no

es un concepto absoluto, sino relativo, que sólo puede evaluarse en términos comparativos entre distintas soluciones. Por ello, resulta imprescindible definir marcos metodológicos que integren criterios técnicos, ambientales, económicos y sociales, y que faciliten la toma de decisiones en el proceso de diseño.

En este sentido, el empleo de indicadores de sostenibilidad se presenta como una estrategia adecuada para cuantificar el comportamiento de diferentes secciones de firme bajo un enfoque integrado. Este tipo de metodologías permite descomponer el concepto de sostenibilidad en variables medibles y agregables, proporcionando un índice global que facilite la comparación entre alternativas. Asimismo, la incorporación de análisis económicos basados en el coste del ciclo de vida (LCC) permite complementar la evaluación técnica y ambiental con la dimensión económica, clave en la toma de decisiones en infraestructuras públicas.

El presente artículo tiene como objetivo presentar una metodología simplificada para la evaluación de la sostenibilidad de firmes basada en indicadores, así como su aplicación a diferentes soluciones de pavimentación. La metodología propuesta permite a los proyectistas evaluar y comparar de forma homogénea distintas alternativas de diseño, facilitando la selección de aquellas más adecuadas desde un punto de vista técnico, económico y sostenible. Además, se muestran ejemplos de aplicación en diferentes contextos territoriales, lo que pone de manifiesto su carácter práctico y su potencial de replicabilidad.

En conjunto, este trabajo pretende contribuir al desarrollo de herramientas operativas que faciliten la integración efectiva de la sostenibilidad en el diseño de infraestructuras viarias, alineándose con los objetivos actuales de transición hacia una economía circular y de reducción del impacto ambiental en el sector de la construcción.

2 Metodología de evaluación de la sostenibilidad

La metodología propuesta se basa en un enfoque comparativo para evaluar la sostenibilidad de diferentes alternativas de diseño de firmes. Dado que la sostenibilidad es un concepto relativo, su análisis se plantea mediante la comparación homogénea de soluciones, utilizando un conjunto de indicadores representativos de los principales pilares de la sostenibilidad.

El proceso metodológico (ilustrado en la Figura 1) se estructura en dos etapas principales:

- **Evaluación mediante indicadores**, en la que se analizan aspectos relacionados con la durabilidad, el impacto ambiental y la dimensión social e innovación de las distintas soluciones de firme. Cada indicador se valora de forma independiente y posteriormente se integra en un índice global de sostenibilidad.
- **Análisis económico**, basado en el coste del ciclo de vida (LCC por sus siglas en inglés), que permite incorporar la dimensión económica a la evaluación, considerando tanto los costes iniciales como los derivados de la conservación, rehabilitación y uso de la infraestructura.

La combinación de ambas etapas proporciona un marco de evaluación integral que facilita la comparación entre alternativas y apoya la toma de decisiones en el diseño de firmes desde un punto de vista técnico, económico y sostenible. La metodología está concebida como una herramienta flexible, adaptable a diferentes contextos de proyecto y niveles de información disponible.

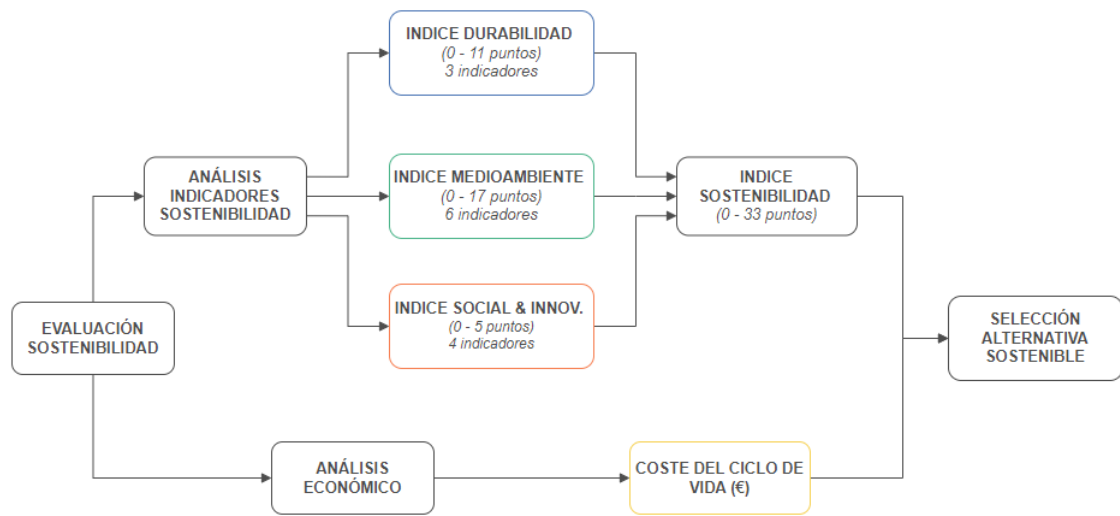


Figura 1. Esquema metodología propuesta

3 Sistema de indicadores

La metodología propuesta se fundamenta en un sistema de indicadores que permite descomponer el concepto de sostenibilidad en variables cuantificables. Estos indicadores se agrupan en tres categorías principales que representan los pilares de la sostenibilidad en el ámbito de los firmes: durabilidad, medioambiente, y aspectos sociales e innovación. A partir de la evaluación individual de cada indicador, se obtiene un índice global que facilita la comparación entre alternativas.

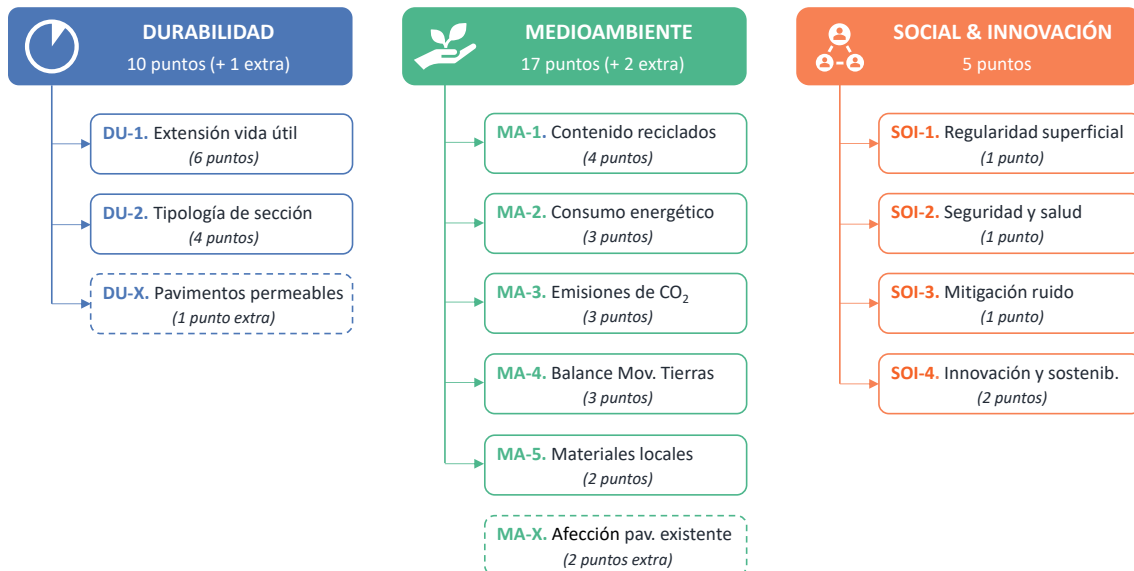


Figura 2. Indicadores y categorías para la evaluación de la sostenibilidad de los firmes

3.1 Indicadores de durabilidad

Los indicadores de durabilidad tienen como objetivo fomentar el diseño de firmes con una mayor vida útil y menores necesidades de mantenimiento, reduciendo así el consumo de recursos y las intervenciones a lo largo del ciclo de vida.

En esta categoría se evalúan los siguientes indicadores:

- **DU-1: Vida útil de la sección de firme**, que evalúa el incremento de la durabilidad de la sección elegida respecto a los valores mínimos de diseño. Su puntuación oscila entre 0 y 6 puntos y una mayor puntuación indica mayor incremento de vida útil y por tanto mayor contribución a la sostenibilidad.
- **DU-2: Tipología de firme**, valorando aquellas soluciones que presentan un mejor comportamiento estructural y menores necesidades de conservación. Su puntuación oscila entre 0 y 4 puntos.
- **DU-X: Pavimentos permeables (indicador adicional)**, adicionalmente, se incluye este indicador extra con el fin de promover el diseño de soluciones con capacidad de drenaje y beneficios asociados a la gestión del agua.

En conjunto, estos indicadores permiten estimar un índice de durabilidad que refleja la capacidad de la solución para mantenerse en servicio durante periodos prolongados con un impacto reducido.

$$\text{Índice Durabilidad} = DU-1 + DU-2 + DU-X$$

3.2 Indicadores ambientales

La categoría ambiental se centra en la minimización del impacto asociado a la construcción y explotación de los firmes, evaluando el uso eficiente de recursos y la reducción de emisiones.

Los indicadores considerados en esta categoría son:

- **MA-1: Contenido de materiales reciclados**, promoviendo la reutilización de residuos como RCD, RAP o subproductos industriales en las diferentes capas de la estructura de firme proyectada. Su puntuación oscila entre 0 y 4 puntos, y una mayor puntuación indica mayor contenido en reciclado y por tanto mayor contribución a la sostenibilidad.
- **MA-2: Consumo energético**, evaluando el consumo energético asociado a la fabricación de materiales y ejecución de las secciones proyectadas. Su puntuación oscila entre 0 y 3 puntos, y una mayor puntuación indica un menor consumo energético en la producción de material y/o construcción de la sección y, por tanto, mayor contribución a la sostenibilidad.
- **MA-3: Emisiones de gases de efecto invernadero**, especialmente CO₂, vinculadas a los procesos productivos y constructivos. Su puntuación oscila entre 0 y 3 puntos, y una mayor puntuación indica menores emisiones asociadas a la producción del material y/o construcción de la sección y, por tanto, mayor contribución a la sostenibilidad.
- **MA-4: Balance de movimiento de tierras**, evaluando el equilibrio en los volúmenes de excavación y de relleno, con el fin de minimizar la necesidad de transporte de materiales de aportación. Su puntuación oscila entre 0 y 3 puntos.
- **MA-5: Materiales locales**, evaluando la distancia de transporte entre las fuentes de materiales hasta el lugar del proyecto. Se prioriza el uso de materiales locales con el

fin de minimizar el transporte de materiales y, por tanto, disminuir las emisiones de CO₂ y el consumo de combustible. Su puntuación oscila entre 0 y 2 puntos.

- **MA-X: Afección al pavimento existente (indicador adicional)**, adicionalmente, se incluye este indicador extra que evalúa el nivel de afección al firme existente con el fin de fomentar la reutilización de la estructura del firme existente ya que permite el ahorro en recursos y disminuye emisiones.

Estos indicadores se integran en un índice ambiental que permite evaluar el impacto global de cada alternativa desde el punto de vista ecológico.

$$\text{Índice Medioambiental} = MA-1 + MA-2 + MA-3 + MA-4 + MA-5 + MA-X$$

3.3 Indicadores sociales e innovación

Esta categoría incorpora aspectos relacionados con la seguridad, el confort de los usuarios y la aplicación de soluciones innovadoras que contribuyen a mejorar la sostenibilidad global del proyecto.

Los indicadores considerados en esta categoría son los siguientes:

- **SOI-1: Características superficiales**, evaluando las características superficiales del pavimento, las cuales influyen tanto en la comodidad y seguridad de la circulación, así como en el consumo de combustible por parte de los vehículos.
- **SOI-2: Seguridad y salud**, indicador vinculado al uso de técnicas constructivas que reduzcan riesgos para los operarios.
- **SOI-3: Mitigación del ruido**, evaluando la capacidad de las capas de rodadura para reducir el impacto acústico del tráfico.
- **SOI-4: Innovación y sostenibilidad**, indicador que valora la incorporación de nuevas tecnologías o prácticas sostenibles no recogidas en otros indicadores.

$$\text{Índice Social e Innovación} = SOI-1 + SOI-2 + SOI-3 + SOI-4$$

El índice resultante permite considerar dimensiones sociales que, aunque menos visibles que las ambientales o económicas, son clave en el desempeño global de la infraestructura.

3.4 Índice global de sostenibilidad

El índice global de sostenibilidad se obtiene mediante la agregación de las puntuaciones de los indicadores de las tres categorías anteriores. Este índice permite comparar de manera sintética distintas alternativas de firme, facilitando la identificación de aquellas soluciones que presentan un mejor comportamiento global.

El uso de un índice único simplifica la toma de decisiones, manteniendo al mismo tiempo la trazabilidad de los resultados a través de los diferentes indicadores parciales. De este modo, la metodología permite no solo identificar la opción más sostenible, sino también comprender los factores que determinan su desempeño.

4 Análisis económico

Una vez analizados los indicadores anteriores, se realizará una evaluación económica de las alternativas de firme consideradas.

Para ello, se recomienda realizar un análisis del Coste del Ciclo de Vida (LCC, por sus siglas en inglés Life Cycle Cost analysis) de la estructura de firme proyectada. El análisis LCC es un análisis técnico que se usa con frecuencia para evaluar la eficiencia económica a largo plazo entre diferentes alternativas de opciones de inversión.

En el caso de los pavimentos, este análisis se utiliza para evaluar y comparar el coste para la administración de una serie de secciones de firme alternativas, incluyendo diferentes tipologías. Este análisis, junto con la evaluación de la sostenibilidad descrita en el presente documento, permitirá a los proyectistas realizar una comparación homogénea entre las diferentes secciones de firme y elegir la solución más adecuada desde el punto de vista de técnico, económico y sostenible.

La realización de un análisis LCC constará de las siguientes cinco etapas:

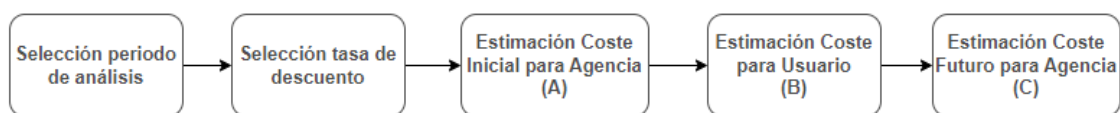


Figura 3. Procedimiento para realización de análisis LCC

5 Aplicación de la metodología

Para ilustrar la aplicación práctica de la metodología propuesta, se ha aplicado a un conjunto de secciones de firme representativas de condiciones habituales en proyectos de carreteras. El objetivo de esta aplicación es comparar soluciones convencionales y alternativas que incorporan prácticas sostenibles, evaluando su desempeño mediante el sistema de indicadores definido.

5.1 Descripción de los casos de estudio

Para el análisis se han considerado cuatro secciones tipo de firme, definidas de forma que presenten prestaciones estructurales equivalentes bajo unas mismas condiciones de tráfico y explanada. Las soluciones analizadas incluyen:

- **Sección 1:** Firme flexible convencional, sin incorporación de materiales reciclados.
- **Sección 2:** Firme flexible convencional con uso de materiales reciclados en distintas capas.
- **Sección 3:** Firme semirrígido con mejora en la capa de rodadura (mezclas tipo SMA con alto contenido en caucho), sin materiales reciclados.
- **Sección 4:** Firme semirrígido que combina alta durabilidad estructural con el uso de materiales reciclados.

En todos los casos, se ha considerado una explanada de características equivalentes y un tráfico de proyecto representativo de condiciones reales, garantizando así la comparabilidad de las soluciones. Asimismo, las secciones han sido diseñadas para cumplir los requisitos estructurales exigidos, de modo que las diferencias en los resultados se deban exclusivamente a criterios de sostenibilidad.

5.2 Evaluación de los indicadores de sostenibilidad

La evaluación de cada alternativa se ha llevado a cabo mediante la aplicación del sistema de indicadores descrito en la sección 3. Para cada sección de firme, se ha asignado una puntuación a cada indicador en función de sus características constructivas, materiales empleados y procesos asociados.

En la categoría de **durabilidad**, todas las secciones alcanzan valores elevados en el indicador de vida útil, al haber sido diseñadas para garantizar prestaciones estructurales adecuadas. Sin embargo, las diferencias aparecen en el indicador de tipología de firme, donde las soluciones semirrígidas presentan mejores resultados debido a su mayor capacidad portante y menor necesidad de mantenimiento.

Tabla 1. Indicadores categoría durabilidad

Parámetro	Sección 1	Sección 2	Sección 3	Sección 4
Indicador DU-1	6,00	6,00	6,00	6,00
Indicador DU-2	0,00	0,00	4,00	3,00
Indicador DU-X	1,00	1,00	1,00	1,00
Índice de Durabilidad	7,00	7,00	11,00	10,00

En la categoría **ambiental**, las soluciones que incorporan materiales reciclados obtienen puntuaciones significativamente superiores, especialmente en el indicador de contenido reciclado. Asimismo, la utilización de técnicas como la reducción de la temperatura en la fabricación de mezclas contribuye a mejorar los resultados en términos de consumo energético y emisiones.

Tabla 2. Indicadores categoría ambiental

Parámetro	Sección 1	Sección 2	Sección 3	Sección 4
Indicador MA-1	0,00	2,75	0,14	3,14
Indicador MA-2	0,20	2,25	0,08	2,20
Indicador MA-3	0,25	2,25	0,08	2,20
Indicador MA-4	3,00	3,00	3,00	3,00
Indicador MA-5	1,00	1,00	1,00	1,00
Indicador MA-X	0,00	0,00	0,00	0,00
Índice de Medioambiente	4,45	11,25	4,30	11,54

En cuanto a los indicadores de **carácter social e innovador**, las diferencias entre soluciones son menos acusadas, aunque las secciones que incorporan mezclas especiales, como las tipo SMA, presentan ventajas en términos de reducción de ruido y mejora de las prestaciones superficiales.

Tabla 3. Indicadores categoría social e innovación

Parámetro	Sección 1	Sección 2	Sección 3	Sección 4
Indicador SOI-1	1,00	1,00	1,00	1,00
Indicador SOI-2	1,00	1,00	1,00	1,00

Parámetro	Sección 1	Sección 2	Sección 3	Sección 4
Indicador SOI-3	0,00	0,00	1,00	1,00
Indicador SOI-4	0,00	0,00	0,00	0,00
Índice Social & Innovación	2,00	2,00	3,00	3,00

5.3 Resultados del índice de sostenibilidad

Los resultados obtenidos muestran diferencias significativas entre las distintas soluciones analizadas. En términos generales:

- Las secciones convencionales sin materiales reciclados presentan los valores más bajos del índice global de sostenibilidad.
- Las soluciones que incorporan materiales reciclados mejoran notablemente su comportamiento ambiental, incrementando su puntuación total.
- Las secciones con tipologías estructurales más duraderas, como las semirrígidas, obtienen mejores resultados en la categoría de durabilidad.
- La combinación de ambas estrategias (durabilidad + materiales reciclados), representada por la Sección 4, da lugar a la puntuación global más elevada.

En el caso analizado, la sección semirrígida con materiales reciclados alcanza el mayor índice de sostenibilidad, seguida de la solución flexible con materiales reciclados. Las secciones convencionales presentan los peores resultados al no incorporar medidas que reduzcan su impacto ambiental ni mejoren su comportamiento a largo plazo.

Tabla 4. Resumen evaluación de la sostenibilidad

Máx.	Indicadores	Puntuación asignada			
		Sección 1	Sección 2	Sección 3	Sección 4
11	DURABILIDAD	7,00	7,00	11,00	10,00
6	DU-1 Extensión de la vida útil	6,00	6,00	6,00	6,00
4	DU-2 Tipología de sección	0,00	0,00	4,00	3,00
1	DU-X Pavimento permeable	1,00	1,00	1,00	1,00
17	MEDIOAMBIENTE	4,45	11,25	4,30	11,54
4	MA-1 Contenido de reciclados	0,00	2,75	0,14	3,14
3	MA-2 Consumo energético	0,20	2,25	0,08	2,20
3	MA-3 Emisiones de CO2	0,25	2,25	0,08	2,20
3	MA-4 Balance movimiento de tierras	3,00	3,00	3,00	3,00
2	MA-5 Materiales locales	1,00	1,00	1,00	1,00
2	MA-X Afección al pavimento existente	0,00	0,00	0,00	0,00
5	SOCIAL & INNOVACIÓN	2,00	2,00	3,00	3,00
1	SOI-1 Regularidad superficial	1,00	1,00	1,00	1,00
1	SOI-2 Seguridad y salud	1,00	1,00	1,00	1,00

			Puntuación asignada			
Máx.	Indicadores		Sección 1	Sección 2	Sección 3	Sección 4
1	SOI-3	Mitigación del ruido	0,00	0,00	1,00	1,00
2	SOI-4	Innovación y sostenibilidad	0,00	0,00	0,00	0,00
33	PUNTUACION TOTAL		13,45	20,25	18,30	24,54

5.4 Discusión de resultados

El análisis realizado pone de manifiesto que la sostenibilidad de los firmes depende de la combinación de varios factores, entre los que destacan principalmente la durabilidad estructural y el uso de materiales de bajo impacto ambiental.

Por un lado, el incremento de la vida útil de los firmes contribuye a reducir las intervenciones de mantenimiento y, por tanto, el consumo de recursos y emisiones asociadas a lo largo del ciclo de vida. Por otro lado, la incorporación de materiales reciclados permite disminuir la explotación de recursos naturales y reducir el impacto ambiental asociado a la producción de materiales.

Los resultados también evidencian que la aplicación aislada de una sola estrategia (por ejemplo, mejora de la durabilidad sin uso de reciclados) no es suficiente para maximizar la sostenibilidad. La mayor mejora se obtiene mediante la integración de múltiples prácticas sostenibles en el diseño.

Finalmente, la aplicación de la metodología demuestra su capacidad para discriminar entre alternativas y apoyar la toma de decisiones en el diseño de firmes. El uso de un índice global permite identificar de forma clara la solución más favorable, mientras que el análisis de indicadores individuales aporta información detallada sobre los factores que influyen en el resultado.

En conjunto, este ejemplo práctico confirma la utilidad de la metodología como herramienta operativa para la evaluación comparativa de soluciones de pavimentación, facilitando la integración de criterios de sostenibilidad en el diseño de infraestructuras viarias.

6 Implementación de la metodología

La metodología descrita en este trabajo está siendo aplicada actualmente en diversas regiones de España, tales como Málaga, Principado de Asturias, País Vasco y Comunidad de Aragón, lo que pone de manifiesto su carácter práctico y su capacidad de adaptación a distintos contextos territoriales.

7 Referencias

- Federal Highway Administration (FHWA), "Pavement Sustainability," FHWA's Sustainable Pavement Program, Illinois, 2014.
- F. Corriere and A. Rizzo, "Sustainability in Road Design: a Methodological Proposal for the Drafting of Guideline," Elsevier Ltd., 2012.
- E. Asres, T. Ghebrab and S. Ekwaro-Osire, "Framework for Design of Sustainable Flexible Pavement," *Infrastructures*, 2022.