

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería de
Camino, Canales y Puertos



Desarrollo de una herramienta de toma de decisiones para la gestión del mantenimiento de pavimentos bajo criterios de sostenibilidad. Aplicación a la red vial urbana de la ciudad de Valencia.

Trabajo final de máster

Titulación: Máster Universitario en Planificación y Gestión en
Ingeniería Civil.

Autor:

Pedro Antonio Espinoza Valarezo

Tutor y cotutor:

Tatiana García Segura
Laura Montalbán Domingo

Curso 2017/2018
OCTUBRE - 2018

AGRADECIMIENTOS

A Madeleine, mi compañera de vida que en todo este tiempo me ha brindado su apoyo incondicional.

A mis padres y mi hermana que me han apoyado y motivado siempre, a pesar de la distancia.

A mi tutora y cotutora Tatiana García y Laura Montalbán, quienes durante el desarrollo del presente trabajo me han dedicado parte de su valioso tiempo y me han servido de guía. En lo académico y profesional, trabajar con ustedes ha sido una experiencia enriquecedora.

A todos mis compañeros y profesores del Master Universitario de Gestión y Planificación en Ingeniería Civil 2017-2018, lo vivido y aprendido con ustedes dentro y fuera de las aulas me ha hecho crecer como persona. Mención especial a mi amigo y compañero Antonio Araque, quien desde el primer día de clases me brindó su ayuda y amistad.

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	16
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	16
1.2. ALCANCE	17
1.3. OBJETIVOS	17
1.3.1. OBJETIVO PRINCIPAL	17
1.3.2. OBJETIVOS SECUNDARIOS	17
2. MARCO TEÓRICO	18
2.1. GESTIÓN DE PAVIMENTOS	18
2.1.1. SISTEMA DE GESTIÓN DE PAVIMENTOS (PMS)	19
2.2. CRITERIOS DE EVALUACIÓN DE ALTERNATIVAS	25
2.2.1. CRITERIOS ECONÓMICOS – FINANCIEROS	25
2.2.2. CRITERIOS TÉCNICOS	44
2.2.3. CRITERIOS AMBIENTALES	50
2.2.4. CRITERIOS SOCIALES	51
2.3. TOMA DE DECISIONES	51
2.3.1. PROCESO DE TOMA DE DECISIONES	51
2.3.2. MÉTODOS	53
2.4. PREDICCIÓN DEL DETERIORO DE PAVIMENTOS	57
2.4.1. MÉTODOS DE CONSTRUCCIÓN DE MODELOS DE PREDICCIÓN DEL DETERIORO DEL PAVIMENTO	57
2.4.2. MODELOS DE DETERIORO DE PAVIMENTOS	61
2.5. ESTRATEGIAS EN LA GESTIÓN DEL MANTENIMIENTO DE PAVIMENTOS	64
3. PROPUESTA DE IMPLEMENTACIÓN DE UNA TOMA DE DECISIONES PARA LA GESTIÓN DEL MANTENIMIENTO DE PAVIMENTOS EN LA CIUDAD DE VALENCIA	69
3.1. OBJETIVOS Y POLÍTICAS	69
3.2. ESTRATEGIA	69
3.3. EVALUACIÓN DE ALTERNATIVAS: CRITERIOS	76
3.3.1. CRITERIO 1: CONFORT DE LOS USUARIOS	76
3.3.2. CRITERIO 2: COSTE DE ACCIDENTALIDAD	78
3.3.3. CRITERIO 3: EFICIENCIA ECONÓMICA DE LA ACTUACIÓN	78

3.3.4.	CRITERIO 4: PROXIMIDAD A INFRAESTRUCTURA SOCIAL Y TURÍSTICA	79
3.3.5.	CRITERIO 5: EFICIENCIA AMBIENTAL DE LA ACTUACIÓN	83
3.3.6.	CRITERIO 6: MOLESTIAS GENERADAS CON LA ACTUACIÓN	84
3.4.	PRIORIZACIÓN DE ALTERNATIVAS: TOMA DE DECISIONES	84
4.	APLICACIÓN DEL MÉTODO A LA CIUDAD DE VALENCIA	88
4.1.	GESTIÓN DEL MANTENIMIENTO DE PAVIMENTOS EN LA CIUDAD DE VALENCIA	89
4.2.	HIPÓTESIS PLANTEADAS	90
4.2.1.	EMISIONES DE CO2 GENERADAS	91
4.2.2.	RENDIMIENTOS DE CONSTRUCCIÓN DE LOS MANTENIMIENTOS TIPO	92
4.2.3.	MODELO DE DETERIORO A UTILIZAR	94
4.2.4.	PRESUPUESTO ANUAL DESTINADO A MANTENIMIENTO	98
4.2.5.	CLASIFICACIÓN DE INFRAESTRUCTURA ECONÓMICA Y SOCIAL	98
4.2.6.	CALCULO DEL VALOR RESIDUAL DE LA RED AL FINAL DEL ANÁLISIS	99
4.3.	SELECCIÓN DE LA MUESTRA A UTILIZAR	102
4.4.	CARACTERIZACIÓN DE LA MUESTRA	104
5.	ANÁLISIS DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN	111
5.1.	EVALUACIÓN DE LAS ALTERNATIVAS EN BASE A LOS CRITERIOS PLANTEADOS	111
5.2.	PRIORIZACIÓN DE ALTERNATIVAS, TOMA DE DECISIONES	117
5.3.	ANÁLISIS EN UN PERÍODO DE 4 AÑOS	118
6.	ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	124
6.1.	DISCUSIÓN GENERAL	140
7.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	142
8.	BIBLIOGRAFÍA	144
9.	ANEXOS	149

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1.- Esquema del PMS según Johnson. (Adaptada de Johnson, 2009)	20
Fig. 2.- Esquema del PMS según la FHAA. (Adaptada de FHAA, 1999).....	21
Fig. 3.- Esquema del flujo de trabajo de un análisis coste beneficio (Fuente: El Autor).....	27
Fig. 4.- Esquema del flujo de trabajo de un análisis coste beneficio (Fuente: El Autor).....	33
Fig. 5.- Esquema de toma de decisiones mediante el VAN. (Tomada de Fomento España, (2010))	36
Fig. 6.- Curva de deterioro de un pavimento para el cálculo de la efectividad de un tratamiento (Tomado de (Torres-Machi et al., 2015).	48
Fig. 7 Esquema del proceso de toma de decisiones (Fuente: El Autor)	52
Fig. 8.- formas típicas de las funciones de valor (tomado de (Penadés 2017))	56
Fig. 9.- PCI vs. Año de vida (tomada de (G. P. Muñoz 2017)).....	59
Fig. 10.- Funciones objetivo propuestas por Torres-Machi et al. (2017)	65
Fig. 11.- Conjunto de soluciones óptimas obtenidas por (Torres-Machi et al. 2017)	65
Fig. 12.- Gráfica de soluciones óptimas encontradas (Meneses and Ferreira 2015)	67
Fig. 13.- Gráfica de soluciones óptimas encontradas por (Z. Wu, Flintsch, and Asce 2009).....	68
Fig. 14.- Flujo de trabajo de análisis a corto y largo plazo para el desarrollo de la herramienta de toma de decisiones.	75
Fig. 15.- Función de Valor para el criterio 1	77
Fig. 16.- Imagen ejemplo de propuesta de valoración de infraestructura cercana.	80
Fig. 17.- PCI vs Valor en función de proximidad a Infraestructuras de importancia N2, N1 y N0 (fuente: el autor)	82
Fig. 18.- Fotografía satelital de la ciudad de Valencia (Fuente: Google Earth)	88
Fig. 19.- Compilación de modelos de deterioro de pavimentos	95
Fig. 20.-Curvas de deterioro a utilizar en el análisis (Fuente: El autor)	97
Fig. 21.- Curva de deterioro para el cálculo del valor residual de un pavimento. (Fuente: El autor).....	101
Fig. 22.- Vista satelital de la zona a estudiar.	102
Fig. 23.- Imagen satelital de la muestra a analizar (Tomada de Google Earth)	103
Fig. 24.- Flujo de trabajo a utilizar para la ejecución de la herramienta de toma de decisiones.	125
Fig. 25.- Análisis de sensibilidad del criterio 1.	128
Fig. 26.- Análisis de sensibilidad del criterio 2.	130
Fig. 27.- Análisis de sensibilidad del criterio 3.	132
Fig. 28.- Análisis de sensibilidad del criterio 4.	133
Fig. 29.- Análisis de sensibilidad del criterio 5.	134
Fig. 30.- Variación del beneficio/coste con cada escenario	138
Fig. 31.- Variación del valor residual final de la red vial con cada escenario.....	138
Fig. 32.- Variación de emisiones de CO2 generadas con cada escenario.	139
Fig. 33.- Variación de molestias generadas con cada escenario expresadas en días.....	139
Fig. 34.- Variación de molestias generadas con cada escenario expresadas en millones/usuarios día.....	140

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.- Tomada de ((NCHRP 2011a), adaptada por (Fullana and Puig 2012)	29
Tabla 2.- Tomada de ((NCHRP 2011a), adaptada por (Fullana and Puig 2012)	31
Tabla 3.- Tomada de ((NCHRP 2011a), adaptada por (Fullana and Puig 2012)	32
Tabla 4.- Rangos del PCI (tomada de (Díaz Cárdenas 2013)).....	46
Tabla 5.- Emisiones unitarias de CO2 producto de los tratamientos típicos de rehabilitación y mantenimiento de pavimentos (tomada de (Torres-Machí et al. 2015))	50
Tabla 6.- Valores de parámetros en funciones de valor (Tomado de (Penadés 2017)	56
Tabla 7.- coeficientes del modelo de George, Rajagopal, and Lim 1989	62
Tabla 8.- Valores de Zo en base a nivel de incertidumbre	63
Tabla 9.- Resumen de metodologías de evaluación económica – financiera.	71
Tabla 10.- Resumen de costos y beneficios a utilizar en la evaluación económica – financiera.72	
Tabla 11.- Criterios utilizados en la toma de decisiones para la gestión de mantenimiento de pavimentos.....	74
Tabla 11.- Rangos del PCI (tomada de (Díaz Cárdenas 2013)).....	77
Tabla 12.- Función de Valor para el Criterio 1.....	77
Tabla 14.- Funciones de valor a utilizar en función de los niveles de importancia de la infraestructura	82
Tabla 15.- Tabla resumen de la metodología de valoración propuesta utilizando el método SAW	86
Tabla 13.- Clasificación de las vías según su intensidad de tráfico pesado (Tomada y adaptada de (Guaita, Serra 2016))	90
Tabla 14.- Actuaciones típicas de rehabilitación y mantenimiento de pavimentos en la ciudad de Valencia (Tomada y adaptada de (Guaita, Serra 2016), Fuente: PAVASAL)	90
Tabla 15.- Emisiones unitarias de CO2 generadas por las actuaciones típicas de rehabilitación y mantenimiento utilizadas en la ciudad de Valencia.	91
Tabla 16.- Rendimientos promedio de las actuaciones.	92
Tabla 17.- tabla resumen de actuaciones tipo a considerar.	93
Tabla 18.- Curvas de deterioro y rangos de uso.....	96
Tabla 19.- Infraestructuras clasificadas según sus niveles de importancia.....	99
Tabla 20.- Listado de vías a analizar.....	103
Tabla 21.- Tabla resumen de daños presentados en los pavimentos de la muestra seleccionada.	107
Tabla 22.- Datos de entrada al año 2016 (Fuente: El Autor).....	109
Tabla 23.- Cálculo del valor residual de la muestra a inicios del año 2016.....	110
Tabla 24.- Valoración de Alternativas con respecto a Criterio 1.....	111
Tabla 25.- Valoración de alternativas con respecto a criterio 2	112
Tabla 26.- Valoración de alternativas con respecto a Criterio 3	113
Tabla 27.- Valoración de alternativas con respecto a Criterio 4	114
Tabla 28.- Valoración de alternativas con respecto a Criterio 5	115
Tabla 29.- Valoración de alternativas con respecto a Criterio 6	116
Tabla 30.- Priorización de alternativas, escenario inicial, año 2016.	117
Tabla 31.- datos de entrada al año 2017, escenario inicial.....	118
Tabla 32.- Priorización de alternativas, escenario inicial, año 2017.	119

Tabla 33.- datos de entrada al año 2018, escenario inicial.....	120
Tabla 34.- Priorización de alternativas, escenario inicial, año 2018.	120
Tabla 35.- datos de entrada al año 2019, escenario inicial.....	121
Tabla 36.- Priorización de alternativas, escenario inicial, año 2019.	122
Tabla 37.- Condición de la red vial al final del 2019, escenario inicial.....	122
Tabla 38.- Resultados obtenidos en 4 años con la utilización de la herramienta de toma de decisiones, escenario inicial	123
Tabla 39.-Tabla resumen de coste y afecciones sociales y medioambientales, escenario inicial.	124
Tabla 40.- Resultados del análisis de sensibilidad.....	127
Tabla 41.- Análisis de Sensibilidad del criterio 1	128
Tabla 42.- Condición de la red vial al final del 2019, escenario 14.	129
Tabla 43.- Análisis de sensibilidad del criterio 2	130
Tabla 44.- Condición de la red vial a finales de 2019, escenario 7.....	131
Tabla 45.- Análisis de sensibilidad del criterio 3.	131
Tabla 46.- Condición de la red vial a finales de 2019, escenario 10.	133
Tabla 47.- Análisis de sensibilidad del criterio 4.	133
Tabla 48.- Análisis de sensibilidad del criterio 5.	134
Tabla 49.- Análisis de sensibilidad del criterio 6.	135
Tabla 50.- Análisis de sensibilidad del criterio 6.	135
Tabla 51.- Resumen de escenarios planteados.....	137

<p>TÍTULO DEL TRABAJO DE FIN DE MASTER: Desarrollo de una herramienta de toma de decisiones para la gestión del mantenimiento de pavimentos bajo criterios de sostenibilidad. Aplicación a la red vial urbana de la ciudad de Valencia.</p> <p>AUTOR: Pedro Antonio Espinoza Valarezo</p> <p style="text-align: center;">RESUMEN EJECUTIVO</p>	
<p>1. Planteamiento del problema a resolver:</p>	<p>La red vial de un país, comunidad, provincia o ciudad constituye uno de sus mayores bienes patrimoniales. El mantenimiento de una red vial en buen estado es vital para reducir costes de transporte, contribuyendo a la economía de un país. Es por esto que, una correcta gestión de los pavimentos puede traducirse en beneficios económicos, ambientales, sociales y, sobre todo, una mejora significativa de los bienes patrimoniales. Sin embargo, las agencias gestoras de redes viales deben tratar con un problema: contar con un presupuesto limitado. Es aquí cuando dicha gestión se dificulta, puesto que se debe procurar invertir de manera correcta el dinero disponible con la finalidad de alcanzar beneficios a corto y largo plazo.</p>
<p>2. Objetivos:</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Desarrollar una herramienta de toma de decisiones para la gestión del mantenimiento de pavimentos bajo criterios de sostenibilidad con aplicación a la red vial urbana de la ciudad de Valencia que garantice el mayor incremento de valor de la red a largo plazo utilizando la menor inversión posible. • Definir criterios sociales, ambientales y económicos para la evaluación objetiva del mantenimiento de pavimento urbanos. • Definir una metodología de toma de decisiones que permita establecer el plan de mantenimiento anual • Cuantificar el incremento de valor de la red vial a largo plazo tras implantar el sistema de toma de decisiones.
<p>3. Estructura organizativa:</p>	<p>El presente trabajo ha sido desarrollado siguiendo la estructura descrita a continuación:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Introducción. – En donde se describe el problema a resolver, los objetivos a conseguir y el alcance del trabajo. 2. Marco teórico. – Capítulo en el cual se recogen todos los conceptos necesarios para el desarrollo del trabajo. Entre ellos: Gestión de pavimentos, criterios de evaluación de alternativas en la gestión de pavimentos, procesos y métodos para la toma de decisiones, predicción del deterioro de los pavimentos y estrategias utilizadas en la gestión de pavimentos. 3. Propuesta de implementación de una toma de decisiones para la gestión del mantenimiento de pavimentos en la ciudad de Valencia. – Capítulo en donde se describe los objetivos y políticas a conseguir con la herramienta de toma de decisiones, los criterios de valoración seleccionados y la metodología de toma de decisiones seleccionada para puntuar las alternativas, estableciendo un ranking de priorización anualmente. 4. Aplicación del método a la ciudad de Valencia. – En este capítulo se describe la gestión del mantenimiento de pavimentos en la ciudad de Valencia. Se plantean hipótesis previas a la implementación de la herramienta de toma de decisiones. El capítulo culmina con la selección de una muestra de la red vial urbana de Valencia en donde se aplicará la herramienta desarrollada y la caracterización de la misma. 5. Análisis de resultados y discusión. – En este punto, la herramienta de toma de decisiones es aplicada a la muestra seleccionada, para ello, se asigna a los 6 criterios de valoración el mismo peso relativo.

	<p>Posteriormente, se realiza un análisis a largo plazo, en un período de 4 años y se cuantifica la ratio beneficio-coste conseguido.</p> <p>6. Análisis de sensibilidad y Discusión de resultados. – Capítulo en donde se plantean 22 escenarios variando los pesos relativos de los criterios de valoración buscando conseguir un mayor ratio coste-beneficio. Los 22 escenarios son analizados y se plantea una discusión acerca del aporte de cada uno de los criterios a la consecución del fin último: conseguir la mayor ratio coste-beneficio en un horizonte de 4 años.</p> <p>7. Conclusiones y recomendaciones. - El trabajo culmina en este capítulo, en donde se señalan las conclusiones extraídas y las recomendaciones en caso de querer implementar la herramienta de toma de decisiones desarrollada.</p>
4. Método:	La metodología utilizada consiste en partir de un marco teórico para establecer e identificar criterios y estrategias de valoración utilizados en la gestión de mantenimiento de pavimentos. Posteriormente se propone 6 criterios de valoración y un sistema de toma de decisiones. Finalmente, mediante la aplicación de la herramienta propuesta a una muestra de la red vial urbana de Valencia, se realiza un análisis de sensibilidad en donde a través de 22 escenarios se calibra la herramienta con los pesos relativos más convenientes para cada criterio.
5. Cumplimiento de objetivos:	A partir del análisis de sensibilidad y de la calibración de los pesos relativos de la herramienta, se cumplen los objetivos principales encontrando el escenario óptimo que permite la obtención de una ratio coste beneficio de 2.90. Mediante el análisis de sensibilidad se demuestra también que el escenario óptimo genera beneficios adicionales de €1.906.125 con respecto a un escenario en el que la toma de decisiones se realiza únicamente en función de la condición del pavimento, que es la práctica común en aquellas agencias gestoras que carecen de una herramienta de análisis.
6. Contribuciones:	La contribución principal del presente trabajo es la de demostrar que La toma de decisiones basada en criterios sostenibles permite a largo plazo obtener un mayor ratio beneficio - coste. Otro aporte importante es el desarrollo de una herramienta de toma de decisiones que podría ser aplicada a la red vial urbana de Valencia para la gestión del mantenimiento de pavimentos.
7. Recomendaciones:	La aplicación de la herramienta a una red vial urbana que difiera en condiciones con la muestra analizada, debe estar antecedida por un análisis de sensibilidad similar al planteado en el presente trabajo, con la finalidad de definir el escenario óptimo en cuanto a pesos relativos.
8. Limitaciones:	El presente trabajo se encuentra limitado por su aplicación y análisis a una muestra de la red vial de Valencia.

RESUMEN

La red vial es uno de los mayores bienes patrimoniales de un país, comunidad o ciudad. Además, proporciona una base fundamental para el crecimiento y desarrollo económico, dotando de amplios beneficios económicos y sociales. De igual manera, contribuye significativamente con daños medioambientales durante su construcción, mantenimiento y uso. Cabe recalcar que, el mantenimiento de una red vial en buen estado es vital para reducir costes de transporte de personas y bienes, contribuyendo a la economía de un país. Es por ello que, una correcta gestión de los pavimentos puede traducirse en beneficios económicos, ambientales, sociales y sobre todo, una mejora significativa de los bienes patrimoniales. El presente trabajo se centra en desarrollar y proponer una herramienta de toma de decisiones para la gestión de mantenimiento de pavimentos de redes viales urbanas. Con esto se pretende conseguir el mayor incremento del valor de la red vial, utilizando la menor inversión posible y garantizando la sostenibilidad de las infraestructuras.

La metodología propuesta establece una serie de criterios económicos, técnicos, ambientales y sociales, los cuales son valorados de manera cuantitativa. Esta valoración combinada con el método SAW (Simple additive weighting/ponderación aditiva simple) permite establecer anualmente un ranking de priorización de las vías en las que se debe actuar con trabajos de mantenimiento y rehabilitación. Para la calibración de los pesos relativos de cada criterio, la herramienta de toma de decisiones, es aplicada a una muestra de la red vial urbana de Valencia. Para ello, se plantea un análisis de sensibilidad en el que se comparan 22 escenarios con combinaciones de pesos diferentes. El criterio de comparación utilizado, es el ratio beneficio-coste, obtenido de la evaluación económica en un horizonte de 4 años para cada uno de los escenarios.

Este trabajo concluye planteando el escenario óptimo de pesos relativos a utilizar en la herramienta de toma de decisiones para la gestión del mantenimiento de pavimentos. La cuantificación del incremento del valor de la red vial y el ratio beneficio-coste obtenido, permiten demostrar y concluir que la toma de decisiones utilizando la herramienta desarrollada, genera a largo plazo beneficios económicos mayores a los obtenidos con las prácticas tradicionales.

ABSTRACT

The road network is one of the greatest patrimonial assets of a country, state or city. It also provides a fundamental basis for the growth and economic development, giving huge economic and social benefits. Likewise, it contributes significantly with environmental damages during its construction, maintenance and use. It is important to say that the maintenance of a road network in good conditions is vital to reduce transportation costs, aiding to the economy of a country. Thus, a good pavement management could translate in economics, environmental and social benefits but above all in a significant improvement of the patrimonial assets. The present work focuses on the development of a making decisions tool for the management of maintenance of pavements of urban road networks. With it, it is intended to achieve the better increase of the road network value using the least possible investment and warranting the sustainability of the infrastructures.

The proposed methodology establishes a set of economics, technical, environmental and social criteria, which are quantitatively valued. This valuation combined with the SAW method (Simple Additive Weighting) allows to establish an annual priority ranking of the roads in which one must act with maintenance and rehabilitation works. For the calibration of the relative weights of each criterion, the making decision tool, is applied to a Valencia's urban road network sample. For this, a sensitivity analysis is proposed in which 22 scenarios with different combinations of relative weights are compared. The comparison criterion used, is the ratio benefit-cost, it is obtained from the economic assessment in a horizon of 4 years for each of the scenarios.

This work concludes by setting the optimal scenario of relative weights to use in the making decision tool for the pavement maintenance management. The quantification of the improvement of the road network's value and the benefit-cost ratio, allows to demonstrate and conclude that the making decisions using the development tool, generates in long-term greatest economics benefits than those obtained with the common practices.

RESUM

La xarxa vial és un dels majors béns patrimonials d'un país, comunitat o ciutat. A més, proporciona una base fonamental per al creixement i desenrotllament econòmic, dotant d'amplis beneficis econòmics i socials. De la mateixa manera, contribueix significativament amb danys mediambientals durant la seua construcció, manteniment i ús. Cal recalcar que, el manteniment d'una xarxa vial en bon estat és vital per a reduir costos de transport de persones i béns, contribuint a l'economia d'un país. És per això que, una correcta gestió dels paviments pot traduir-se en beneficis econòmics, ambientals, socials i sobretot, una millora significativa dels béns patrimonials. El present treball se centra a desenrotllar i proposar una ferramenta de presa de decisions per a la gestió de manteniment de paviments de xarxes vials urbanes. Amb açò es pretén aconseguir el major increment del valor de la xarxa vial, utilitzant la menor inversió i garantint la sostenibilitat de les infraestructures.

La metodologia proposada estableix una sèrie de criteris econòmics, tècnics, ambientals i socials, els quals són valorats de manera quantitativa. Esta valoració combinada amb el mètode SAW (Simple additive weighting/ ponderació additiva simple) permet establir anualment un rànquing de prioritització de les vies en què s'ha d'actuar amb treballs de manteniment i rehabilitació. Per al calibratge dels pesos relatius de cada criteri, la ferramenta de presa de decisions, és aplicada a una mostra de la xarxa vial urbana de València. Per a això, es planteja una anàlisi de sensibilitat en què es comparen 22 escenaris amb combinacions de pesos diferents. El criteri de comparació utilitzat, és el ràtio benefici-cost, obtingut de l'avaluació econòmica en un horitzó de 4 anys per a cada un dels escenaris.

Aquest treball conclou plantejant l'escenari òptim de pesos relatius a utilitzar en la ferramenta de presa de decisions per la gestió del manteniment de paviments. La quantificació de l'increment del valor de la xarxa vial i el ràtio benefici-cost obtingut, permeten demostrar i concloure que la presa de decisions utilitzant la ferramenta desenvolupada, genera a llarg termini beneficis econòmics majors als obtinguts amb les pràctiques tradicionals."

1. INTRODUCCIÓN

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La red vial de un país, comunidad, provincia o ciudad constituye uno de sus mayores bienes patrimoniales. Además, proporciona una base fundamental para su crecimiento y desarrollo económico, brindando amplios beneficios económicos y sociales. De igual manera, influye de manera significativa con daños medioambientales durante su construcción, mantenimiento y uso. Cabe recalcar que, el mantenimiento de una red vial en buen estado es vital para reducir costes de transporte de personas y bienes, contribuyendo a la economía de un país.

Bajo las premisas mencionadas en el párrafo anterior, una correcta gestión de los pavimentos puede traducirse en beneficios económicos, ambientales, sociales y, sobre todo, una mejora significativa de los bienes patrimoniales. Sin embargo, las agencias gestoras de redes viales deben tratar con un problema: contar con un presupuesto limitado. Es aquí cuando dicha gestión se dificulta, puesto que se debe procurar invertir de manera correcta el dinero disponible con la finalidad de alcanzar beneficios a corto y largo plazo.

Una correcta gestión de pavimentos, debe procurar también velar por la sostenibilidad de las infraestructuras. Para su efecto, la gestión debe enfocarse también en la reducción de daños medioambientales y molestias generadas a la sociedad.

El presente trabajo se centra en desarrollar y proponer un método de toma de decisiones para la gestión de mantenimiento de pavimentos de redes viales urbanas. Con esto se pretende conseguir el mayor incremento en el valor de la red vial, utilizando la menor inversión posible y garantizando la sostenibilidad de las infraestructuras.

Para ello, se identificarán primero los posibles criterios de valoración y se establecerá una metodología objetiva a partir de la valoración cuantitativa de

cada uno de los criterios establecidos. Seguido a esto, se propondrá un sistema de toma de decisiones que, basado en los criterios establecidos, evaluará las vías del ámbito de estudio priorizándolas según su urgencia de recibir mantenimiento.

Se aplicará el sistema de toma de decisiones a una muestra de la red vial urbana de Valencia, tomando como hipótesis un presupuesto anual destinado a mantenimiento y unas condiciones iniciales reales. Finalmente se cuantificará el incremento de valor de la red vial en estudio, la inversión necesaria y el ratio beneficio/coste conseguidos a largo plazo aplicando el sistema de toma de decisiones desarrollado, de manera que se pueda evaluar la conveniencia de su implementación.

1.2. ALCANCE

El alcance del trabajo, se centra en estudiar una muestra de la red vial de Valencia conformada por 13 vías, entre las cuales se considerarán vías con categorías de tráfico 1, 2, 3 y 4. El análisis del incremento de valor residual tras la aplicación del sistema de toma de decisiones se analizará a largo plazo, en un horizonte de 4 años.

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. OBJETIVO PRINCIPAL

- Desarrollar una herramienta de toma de decisiones para la gestión del mantenimiento de pavimentos bajo criterios de sostenibilidad con aplicación a la red vial urbana de la ciudad de Valencia que garantice el mayor incremento de valor de la red a largo plazo utilizando la menor inversión posible.

1.3.2. OBJETIVOS SECUNDARIOS

- Conocer el estado del arte en cuanto a gestión de pavimentos y toma de decisiones.

- Definir criterios sociales, ambientales y económicos para la evaluación objetiva del mantenimiento de pavimento urbanos.
- Definir una metodología de toma de decisiones que permita establecer el plan de mantenimiento anual
- Cuantificar el incremento de valor de la red vial a largo plazo tras implantar el sistema de toma de decisiones.

2. MARCO TEÓRICO

El presente apartado, recoge las definiciones generales sobre la gestión de pavimentos junto con sus objetivos y políticas comúnmente utilizados. Se recoge también el estado del arte de los criterios utilizados para su evaluación junto con propuestas para su medición cuantitativa. Finalmente, se resumen las metodologías más comunes utilizadas en la toma de decisiones.

2.1. GESTIÓN DE PAVIMENTOS

La red vial de una nación, provincia o ciudad forma parte de uno de sus mayores bienes patrimoniales. La infraestructura vial, proporciona una base fundamental para el rendimiento y desarrollo económico, dotando de amplios beneficios económicos y sociales. De igual manera, contribuye significativamente con daños medioambientales durante su construcción, mantenimiento y uso. (Santero and Horvath, 2009).

Cabe recalcar que, el mantenimiento de una red vial en buen estado es vital para reducir costes de transporte de personas y bienes, contribuyendo a la economía de una nación. Bull (2003), establece que: "Un país que permita el deterioro de su infraestructura vial tendrá sobrecostos de operación vehicular en un rango que se puede ubicar entre 1 y 3% de su producto interno bruto nacional". Por otro lado, Hajj et al (2010), establece que el coste típico de mantenimiento de una red vial, equivale al 15-20% del coste de su rehabilitación o reconstrucción.

La American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO, 1985), ha definido la gestión de pavimentos como la dirección eficaz y eficiente de varias actividades involucradas en proporcionar y mantener los pavimentos en condiciones aceptables para los usuarios al menor coste de ciclo de vida. La gestión de pavimentos tiene como objetivo base la utilización de información segura y consistente para el desarrollo de criterios de decisión, planteamiento de alternativas realistas de inversión y contribución a la eficiente toma de decisiones (Solminihac,2001).

Por otro lado, Vitillo (2013) define la gestión de pavimentos como un plan para mejorar la calidad y el rendimiento de los pavimentos, minimizando costos a través de la puesta en marcha de buenas prácticas.

2.1.1. SISTEMA DE GESTIÓN DE PAVIMENTOS (PMS)

Para conseguir una eficaz y eficiente gestión de pavimentos, es necesario utilizar herramientas y procesos estandarizados como lo es la implementación de un Sistema de Gestión de Pavimentos. Un Sistema de Gestión de Pavimentos, conocido como PMS (por sus siglas en inglés: Pavement Management System), es un conjunto de herramientas utilizadas y diseñadas para proporcionar, evaluar y mantener los pavimentos en condiciones de servicio aceptables durante un período de tiempo establecido(AASHTO, 1985).

Se define también al PMS como un conjunto de procesos definidos para recolectar, analizar, mantener y reportar datos con los que se pueda tomar decisiones en busca de estrategias óptimas para mantener los pavimentos en condiciones de servicio, durante un período de tiempo al menor coste posible (Vitillo 2013).

Modelos de Sistemas de Gestión de Pavimentos

El nivel de desarrollo de un Sistema de Gestión de Pavimentos puede ir desde una simple base de datos informativos, una hoja de cálculo diseñada por el usuario o un sistema computacional de alto nivel de desarrollo. Son las

necesidades de las administraciones junto con su presupuesto quienes determinan el nivel de desarrollo de un PMS (Johnson, 2009).

Steger (1978) puntualiza que un PMS se debe a dos características fundamentales: enfocarse en monitorear los pavimentos y poseer una **herramienta de toma de decisiones para los trabajos de reposición, restauración o rehabilitación**. Por otro lado, Daryl et al (1979) establece que un PMS debe ser desarrollado de manera que pueda ser utilizado por los gestores de todas o de la mayoría de niveles encargados de la gestión de pavimentos, sea de proyectos individuales o redes viales. Define también que un PMS debe considerar 5 requisitos esenciales:

1. Capacidad de actualización y/o modificación a medida que se posea nueva información o modelos.
2. Capacidad de considerar estrategias alternativas.
3. Capacidad de determinar la alternativa óptima
4. Capacidad de basar las decisiones en procesos racionales con atributos cuantitativos, criterios y restricciones.
5. Capacidad de retroalimentarse en base a los resultados de las decisiones tomadas

Johnson (2009), esquematiza el PMS como un conjunto de herramientas y procesos configurados de manera cíclica.

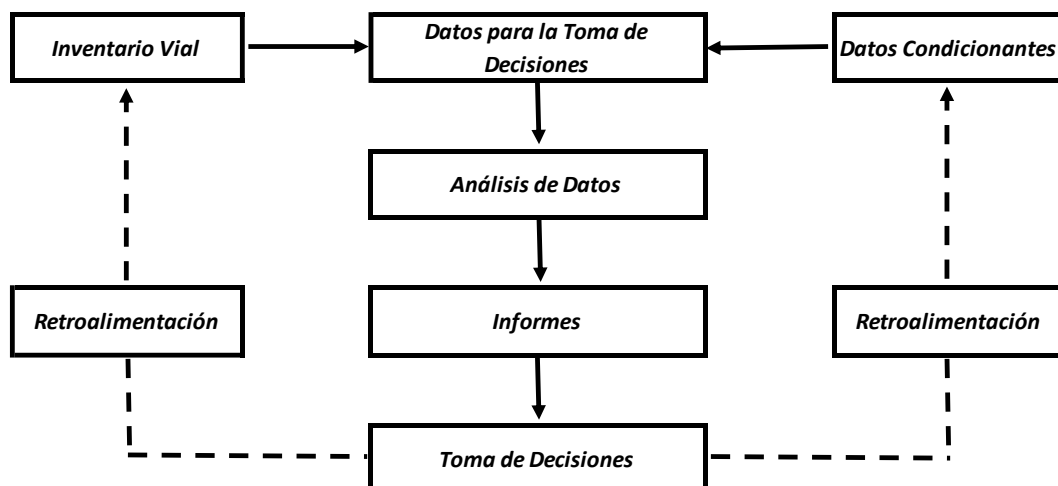


Fig. 1.- Esquema del PMS según Johnson. (Adaptada de Johnson, 2009)

Federal Highway Asociación of América (1999), en cambio, esquematiza el PMS como la siguiente estructura:

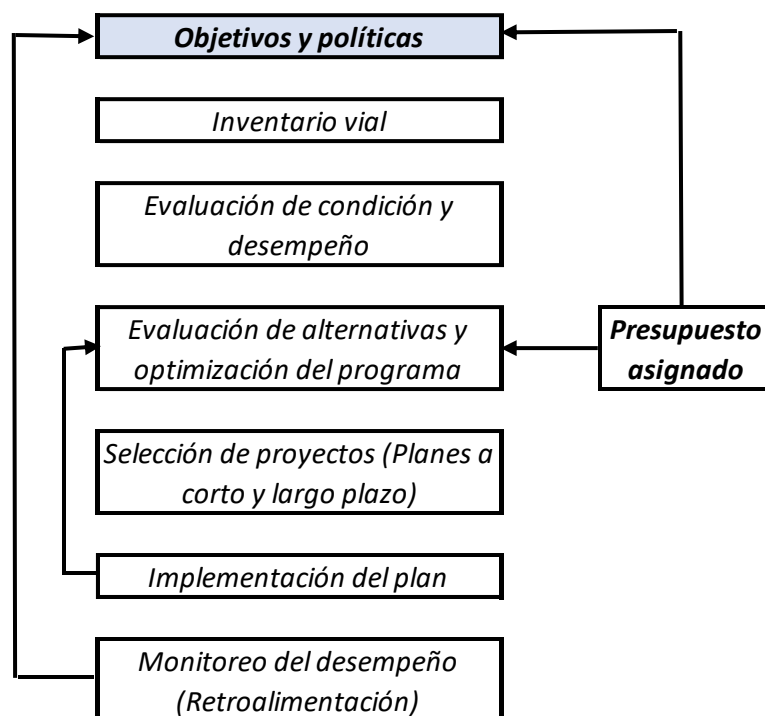


Fig. 2.- Esquema del PMS según la FHAA. (Adaptada de FHAA, 1999)

Los PMS, deben estar diseñados además para proveer información objetiva y útil de manera que, quien lo opera pueda tomar decisiones efectivas y consistentes en cuanto al coste – efectividad relacionadas con la preservación de una red de pavimentos.

Vitillo (2013) advierte que, cuando un PMS no sea capaz de tomar la decisión final, este deberá proveer las bases para una comprensión de las posibles consecuencias de cada una de las alternativas.

De manera general, se puede concluir que, los PMS deben satisfacer las necesidades de cada empresa o institución en las que será implantado. Deben desarrollarse también acorde a las características y dimensiones de la red vial que se manejará a través del mismo.

En base a las referencias anteriores, se debe destacar que la retroalimentación es un requisito fundamental al momento de su diseño. El PMS debe permitir la

actualización de datos. Es importante señalar que debe ser capaz de proporcionar información suficiente para que, los gestores, contrasten la decisión final tomada por el sistema contra las demás alternativas. La decisión final siempre será tomada por el gestor, mas no por el PMS, aunque será la herramienta la que proporcionará los datos para la correcta toma de decisiones

Los modelos y características descritos, son de aplicación a todo tipo de redes viales, sean estas: urbanas, interurbanas, provinciales, estatales, etc.

OBJETIVOS Y POLÍTICAS

Un Sistema de Gestión de Pavimentos eficiente es aquel que es capaz de mantener la red vial en un nivel de servicio aceptable, permitiendo bajos costes a los usuarios, pero utilizando el menor presupuesto posible y sin afectar de manera significativa al medio ambiente, a la seguridad vial y a las actividades de la sociedad (Fwa et al. 2000). Sin embargo, estos requisitos son conflictivos entre sí. Es por eso que el proceso de toma de decisiones en programas de rehabilitación y mantenimiento depende de múltiples objetivos y consideraciones (Wu and Flintsch 2009).

En el caso de los programas de rehabilitación y mantenimiento, por ejemplo, la lista de proyectos prioritarios se basa en la condición/serviciabilidad presente de los pavimentos. Es importante aclarar que, la condición presente es el resultado de las actuaciones y decisiones tomadas en el pasado, por lo tanto, las decisiones tomadas en el presente tienen incidencia directa en la condición de la red en años futuros. Es por esto que las decisiones deben ser tomadas a la luz de sus efectos inmediatos y futuros (Daryl & Hudson & Haas & Pedigo 1979).

El éxito de un Sistema de Gestión de Pavimentos o de alguna de sus herramientas depende de manera directa de la formulación de objetivos y políticas claros. Los objetivos y políticas deben ser formulados por los gestores previo al desarrollo del PMS puesto que son quienes definen el norte del mismo.

En el desarrollo de la herramienta de toma de decisiones para el mantenimiento de pavimentos, la definición de objetivos marcará el hito de inicio.

Guaita y Serra (2016) señalan que en cuanto a objetivos y políticas utilizados en la gestión de pavimentos alrededor del mundo, se puede destacar la ciudad de Londres. La alcaldía de esta ciudad ha establecido como objetivo el mantener un nivel de serviciabilidad constante en la red. Entre sus políticas consta el mantener las superficies de las vías exentas de irregularidades, y que cualquier deformación con probabilidad de causar daños personales o a la propiedad debe ser atendida como urgencia. Otra de sus políticas es la de fijar presupuestos de inversión basados en la eliminación del “backlog” (acumulación de trabajos y tareas incompletas) y en la minimización de los costes del ciclo de vida de la infraestructura. Es decir, invertir en mantenimientos rutinarios (Transport for London, 2007)

Por otra parte, París, en su sistema de gestión de pavimentos, incluye criterios para minimizar los contaminantes emitidos y prioriza las soluciones medioambientalmente aceptables. Incluye entre sus políticas las de reutilización de materiales (Council of Paris, 2015).

El ayuntamiento de Milán en cambio, ha incluido dentro de sus políticas sanciones a las empresas que incurran en retrasos o ejecuciones incorrectas en el mantenimiento de la red vial. Con ello persigue mejorar la eficiencia de las actuaciones (Comune di Milano, 2015).

En cuanto a los gestores de la red vial de Sidney, considera como principal objetivo de los mantenimientos, el de maximizar el valor de la red vial a largo plazo. Consideran como restricciones las afecciones ambientales y sociales (Sydney City Council, 2012).

En cambio el Ayuntamiento de Madrid ha optado por implantar dentro de su gestión de pavimentos una plataforma de recogida y gestión de incidencias en la vía pública denominada “MADRID AVISA” (Área de Gobierno de Medio Ambiente y Movilidad, 2013f). Lo que señala que dentro de sus políticas considera el confort de los usuarios de la red vial.

INVENTARIO

Picado-Santos (2004), señala que un inventario recoge de manera sistemática y organizada la información de la red vial, siendo los parámetros más comunes recopilados los mencionados a continuación:

- Características básicas
- Posición en coordenadas X e Y
- Características geométricas de cada una de las vías
- Características de la estructura de pavimento
- Volumen de tráfico

EVALUACIÓN DE LA CONDICIÓN Y DEL DESEMPEÑO

Componente en el cual se debe definir un indicador que defina la condición de cada uno de los pavimentos de las vías de la red vial. La aplicación de estos indicadores depende de la capacidad y medios de los que disponga la agencia (Solminihaç, 2001).

Posterior a la definición de un indicador que defina la condición, se debe definir modelos de desempeño que permitan predecir la evolución de la condición de cada tramo de la red con respecto al tiempo. Contando con este componente, se podrá definir los tratamientos mas adecuados para mejorar la condición de la red vial o impedir el deterioro de la misma (Guaita y Serra 2016).

EVALUACIÓN DE ALTERNATIVAS

Posterior a la obtención de los índices de condición para un intervalo temporal, se debe definir los tipos de actuaciones a aplicar, así como las posibles alternativas a considerar. Para ello, se torna necesario definir criterios de valoración que permitan evaluar las alternativas propuestas (Guaita y Serra 2016). Es en esta evaluación de alternativas, en donde se seleccionará de manera óptima de entre los proyectos propuestos, aquellos en los que resulta más conveniente invertir el presupuesto disponible.

El presente trabajo se centra en el desarrollo de una herramienta de toma de decisiones, cuyo principal objetivo sea el de realizar la evaluación de alternativas

de manera que, a un horizonte de 4 años, se obtenga un mayor ratio beneficio-coste

2.2. CRITERIOS DE EVALUACIÓN DE ALTERNATIVAS

La definición de criterios sociales, ambientales y económicos para la evaluación del mantenimiento de pavimento urbanos, constituye uno de los objetivos del presente trabajo. A continuación, se recoge criterios utilizados para la toma de decisiones u optimización en el proceso de rehabilitación y mantenimiento de pavimentos por distintos autores.

2.2.1. CRITERIOS ECONÓMICOS – FINANCIEROS

En el presente apartado, se presentan las distintas metodologías de evaluación económica y financiera. Posteriormente, se detallan los indicadores económicos utilizados en la toma de decisiones en el mantenimiento de pavimentos. Finalmente, se resumen los costes y beneficios comúnmente utilizados en la evaluación económica de proyectos relacionados a redes viales.

2.2.1.1. METODOLOGÍAS DE EVALUACIÓN ECONÓMICAS – FINANCIERAS

2.2.1.1.1. Análisis Coste Beneficio (ACB)

FHWA (2003) define el Análisis Coste Beneficio como una metodología de evaluación que identifica los beneficios netos de una inversión comparando sus costes y beneficios presentes y futuros. La metodología considera que la selección de un proyecto se justifica si el valor de sus beneficios excede sus costes.

El análisis coste-beneficio trata de evaluar si los recursos reales que la sociedad sacrifica para un proyecto determinado están compensados por beneficios

suficientes de acuerdo con las preferencias sociales entre presente y futuro.(Ministerio de Fomento España 2010).

En este análisis se identifican y evalúan en términos monetarios todas las posibles ganancias o pérdidas de una determinada alternativa con el objeto de comparar y determinar cuál de ellas resultará más beneficioso desde el punto de vista social. Una vez evaluados estos costes y beneficios, son empleados en el cálculo de los indicadores: Valor Actual Neto (VAN), Tasa Interna de Rentabilidad (TIR), Ratio Beneficio Coste (B/C), Coste Anual Equivalente (CAE) y Tiempo de Recuperación de la Inversión (TRI). Son estos indicadores quienes ayudan a decidir cuál de las alternativas proporcionará mayores beneficios a la sociedad. El análisis, considera beneficios y costes directos, así como costes indirectos e intangibles, todos convertidos a valor monetario.

Los beneficios y costes directos corresponden a los flujos de caja (ingresos y egresos) obtenidos por la empresa gestora. Por otro lado, los beneficios y costes indirectos, intangibles o también llamados sociales, corresponden a la valoración total de un determinado producto o servicio por parte de los beneficiarios. Entre los costes sociales tenemos por ejemplo externalidades como: ruido, contaminación ambiental, costes de retraso de viaje, etc. (Ministerio de Fomento España 2010).

En resumen, el flujo de trabajo a seguir para un análisis coste beneficio es el siguiente:

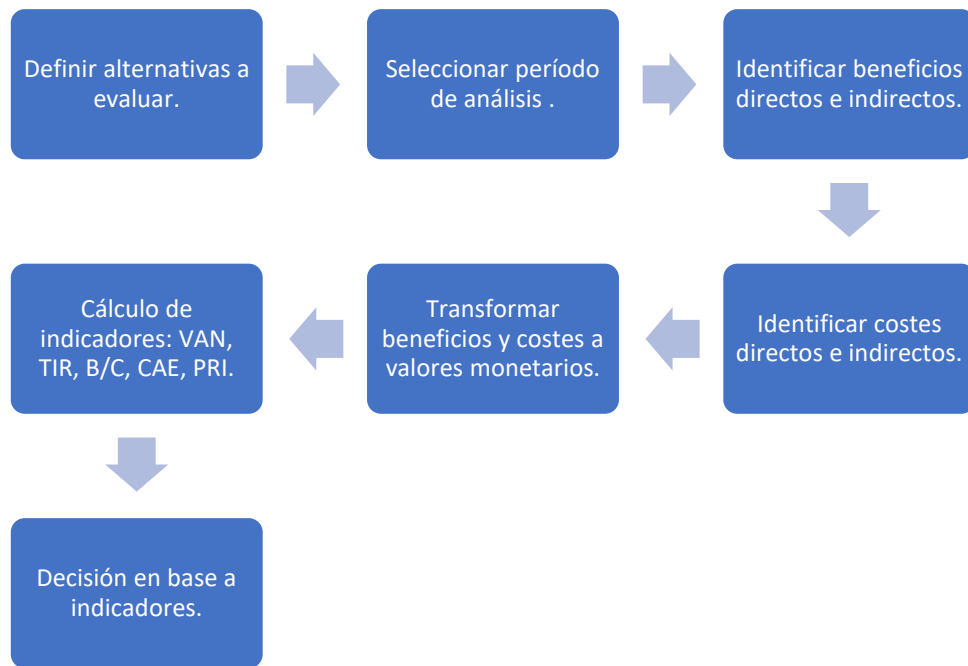


Fig. 3.- Esquema del flujo de trabajo de un análisis coste beneficio (Fuente: El Autor)

2.2.1.1.2. Análisis de Coste del Ciclo de Vida (LCCA)

Conocido también como LCCA por sus siglas en inglés (Life Cycle Cost Analysis). Es definido por la *building and construction asset standard* ISO15686-5 como una técnica utilizada para predecir y evaluar la rentabilidad de los activos construidos a lo largo de un periodo específico de tiempo mientras cumple con todas las rehabilitaciones y mantenimientos necesarios, tomando en cuenta todos los factores económicos de carácter relevante tanto en términos de coste operativo inicial como futuro.

El LCCA se basa en suponer varias opciones de diseño que puedan satisfacer las necesidades, lograr un rendimiento aceptable y que esas opciones poseen diferentes costes iniciales, costes de operación y posiblemente diferentes ciclos de vida. Comparando los costos del ciclo de vida de varios diseños, LCCA puede evaluar compensaciones entre costos iniciales y ahorros en costos a largo plazo, identificando el coste-efectividad y determinando el tiempo necesario para la recuperación del coste incremental (University of Stanford, 2005).

Entre las aplicaciones del LCCA, se tiene las siguientes (FHWA 2003a):

- Diseño, selección y documentación de los medios más rentables para construir un proyecto.
- Evaluación de las estrategias de conservación del pavimento.
- Análisis o ingeniería.
- Planificación e implementación del proyecto.

Fullana and Puig (2012), consideran que para el análisis LCCA de un proyecto de diseño o rehabilitación vial, es necesario seguir la siguiente metodología:

1. Selección de periodo de análisis.
2. Selección de una tasa de descuento.
3. Estimación del coste inicial para la agencia (A).
4. Estimación del coste para el usuario (B).
5. Estimación de los costos a futuro para la agencia (C).
6. Estimación del valor residual.
7. Comparación de las alternativas.

A continuación, se detalla el análisis a realizar en cada una de las etapas seleccionadas según (Fullana and Puig 2012).

1.- Selección del periodo de análisis:

El período de análisis se constituye en el marco cronológico en que se compararán los tratamientos alternativos. El marco debe tener la extensión suficiente para reflejar las diferencias de desempeño entre las alternativas a comparar. Para su efecto se recomienda que dicho periodo, abarque el tiempo de desempeño inicial y que se incluya al menos una actividad importante de conservación o rehabilitación. FHWA (1996) propone que el período de análisis para todos los proyectos de pavimentación sea de al menos 35 años.

2.- Selección de una tasa de descuento

Al igual que en el cálculo del VAN, en el LCCA es necesario establecer una tasa de descuento. La tasa de descuento se utiliza para incorporar en el análisis la variación en el tiempo del valor verdadero del dinero considerando las fluctuaciones de las tasas de interés, de la inversión y de la inflación.

Thuesen et al (1984), recomiendan para su cálculo utilizar la siguiente ecuación:

$$d = \frac{1 + i_{int}}{1 + i_{inf}} - 1$$

Donde:

d= tasa de descuento real, %.

i_{int} = Tasa de interés, %.

i_{inf} = Tasa de inflación, %.

Cabe recalcar que tanto las tasas de interés (i_{int}) como las tasas de inflación (i_{inf}) fluctúan en el tiempo, sin embargo, la diferencia entre ellas es poco variable.

MDOT 2009 y Rangaraju et al. (2008) resume las tasas de descuento utilizadas por las agencias estatales de carreteras de USA en sus LCCA.

Tasa de descuento real (%)	Porcentaje de agencias que respondieron
<3	18,00%
3	15,00%
3 a 4	10,00%
4	49,00%
4 a 5	3,00%
5	5,00%

Tabla 1.- Tomada de ((NCHRP 2011a), adaptada por (Fullana and Puig 2012)

3.- Estimación del Coste Inicial Para la Agencia (A)

Los costos de la agencia vienen dados por todos los costes incurridos por la agencia gestora en el período de análisis. Estos costos incluyen por lo general:

- Costos de diseño e inspecciones iniciales
- Coste de construcción
- Costos de conservación/rehabilitación
- Costos técnicos y control de tráfico
- Costos de mantenimiento y operación
- Costos de personal técnico

Cabe recalcar que los costes administrativos tales como audiencias públicas, reuniones informativas, permisos, gastos legales y similares, pueden ser omitidos puesto que suelen ser iguales para todas las alternativas en análisis.

$$A = \sum_0^n \text{Costes Agencia}$$

4.- Estimación de los costos para el usuario (B)

Son todos los costos asociados a la alternativa en análisis y que son contraídos por los usuarios a lo largo del período de análisis. Bajo este contexto, existen 3 costes fundamentales contraídos por el usuario: Los ocasionados por el cierre de vías debido a trabajos de construcción y mantenimiento, denominados “costos de impacto por cierre”. Los “costos de operación vehicular” que son contraídos durante el uso normal de la vía y los “costos de retraso de viaje” ocasionados por accidentes, congestión de la vía o disminución de velocidades de circulación.

$$B = \sum_0^n \text{Costes Usuarios}$$

Es responsabilidad de la agencia gestora decidir cuales son los componentes de coste de usuario a considerar en un análisis LCCA. Se debe escoger en función de la identificación de costes que van a diferir en las diferentes alternativas y cuales se es capaz de estimar de manera razonable. NCHRP (2011), Shah, et al. (2011), MDOT (2009) y Rangaraju et al (2008), en su resumen de las prácticas de las agencias de vialidad de USA, señala que, por la complejidad de la estimación de los costes al usuario, el 58% de las agencias gestoras no los consideran en sus LCCA.

Costos para el usuario considerados	Porcentaje de agencias que respondieron
SI	42%
NO	58%

Tabla 2.- Tomada de ((NCHRP 2011a), adaptada por (Fullana and Puig 2012)

5.- Estimación de los costos a futuro para la agencia (C)

Los costos a futuro contraídos por una agencia durante el período de análisis pueden dividirse en dos: costes de mantenimiento y operación y costos de conservación o rehabilitación.

A diferencia de los costes iniciales, en los costes a futuro deben incorporarse todos los costes a futuro para la agencia, indistintamente de que sean similares en todas las alternativas de análisis. EL valor actual de los costes relacionados a ingeniería, administración, control de tráfico, etc; Se verán influenciados por el momento en que se espera se materialicen y por la tasa de descuento que puede variar según el tipo de material de pavimentación.

$$C = \sum_0^n \text{Costes a Futuro}$$

6.- Estimación del Valor Residual

Fullana and Puig (2012) Define el valor residual de tres maneras:

- El valor neto que tendría el pavimento en el mercado si es reciclado al final de su período de desempeño.
- El valor de la vida remanente al final del análisis.
- El valor del pavimento existente como estructura de soporte a una capa adicional asfáltica al final del período de análisis.

La forma de cuantificar el valor residual debe ser definida de igual manera para todas las alternativas en análisis, además debe reflejar la realidad de lo que la

agencia espera hacer con el pavimento en el horizonte de análisis. Cabe recalcar que el valor residual debe ser utilizado siempre y cuando se considere que las diferencias entre las alternativas en análisis sean considerables. ACPA (2011) y Rangaraju, et al.(2008) señalan que solamente el 51% de las agencias de vialidad de USA utilizan el valor residual en sus LCCA.

7.- Comparación de Alternativas

Finalmente, las alternativas deben ser comparadas utilizando un indicador económico que puede ser medido de diversas maneras. Las dos alternativas más utilizadas son el “Valor Actual neto” VAN y el “Coste Anual Equivalente” CAE. NCHRP (2011) indica que el 66% de las agencias de Usa utilizan el VAN en sus LCCA.

Método de cálculo utilizado	Porcentaje de agencias que respondieron
Valor actual neto (VAN), solamente	66%
Coste anual equivalente (CAE), solamente	17%
Ambos, VAN y CAE	17%

Tabla 3.- Tomada de ((NCHRP 2011a), adaptada por (Fullana and Puig 2012)

El flujo de trabajo de un LCCA se resume en el siguiente diagrama:

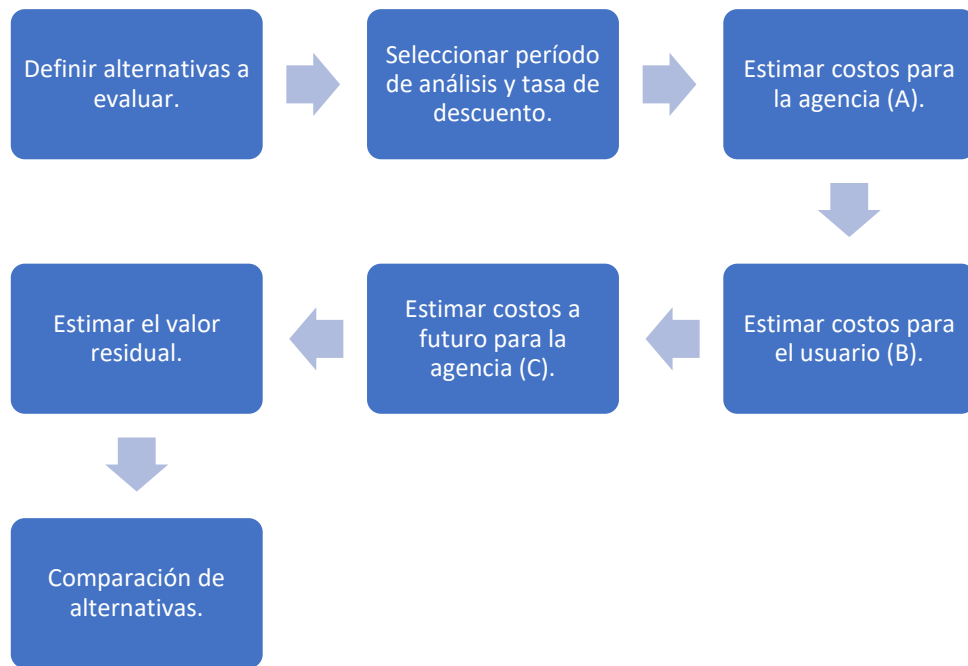


Fig. 4.- Esquema del flujo de trabajo de un análisis coste beneficio (Fuente: El Autor)

2.2.1.2. INDICADORES ECONÓMICOS – FINANCIEROS

A continuación, se detalla los conceptos y ecuaciones de cálculo de los indicadores económicos – financieros mencionados en el apartado anterior.

2.2.1.2.1. Valor Actual Negro (VAN)

EL Valor Actual Neto es un indicador que permite medir el flujo de ingresos y egresos de un proyecto, para determinar, si posterior al descuento de la inversión inicial existirán ganancias. El método considera una determinada tasa de descuento o tipo de interés para todo el periodo de análisis. La tasa corresponde a la rentabilidad mínima esperada, por tanto, cuando la inversión resulta mayor que el beneficio, el VAN será negativo. Un VAN igual cero indica que la inversión ha cumplido con las expectativas de rentabilidad, mientras que un VAN positivo indicaría que además de haberse cumplido la tasa de interés propuesta, se han de obtener ganancias (M. P. Muñoz, n.d.).

Los beneficios y costes a utilizarse para el cálculo del VAN, pueden ser evaluados desde el punto de vista privado como social, perspectivas que por lo

general no coinciden en proyectos de transporte. Los beneficios sociales reflejan la valoración total de un determinado producto o servicio por parte de los beneficiarios, en cambio, el beneficio privado suele ser menor, ya que se limita a los ingresos obtenidos por parte de las empresas gestoras. Existe también el caso en el que el beneficio privado incluye subvenciones o ingresos adicionales derivados del tráfico generado debido a la actuación, lo cual puede hacer al beneficio privado mayor al social. Los costes sociales son calculados añadiendo a los costes privados todos los efectos externos (por ejemplo, contaminación y ruido), costes que generalmente son difíciles de monetizar. Su monetización se realiza estimando un valor de disposición al pago para su reducción como por ejemplo el valor que estaría dispuesto a pagar el estado por evitar la generación de 1 kilogramo de CO₂ (Mendoza, Cruz, and Méndez 2006).

Es por esto que se pueden utilizar dos tipos de VAN: el VAN Social (VAN_S), que es utilizado para calcular el beneficio neto social del proyecto y el VAN Financiero (VAN_F), que es utilizado para calcular el resultado financiero del mismo. Cabe recalcar que, aunque estos dos se relacionan, los resultados cuantitativos y cualitativos son diferentes.

Mendoza, Cruz, and Méndez (2006) utilizan para el cálculo de ambas expresiones las siguientes ecuaciones:

$$VAN_S = -I_o + \frac{BS_1 - CS_1}{1 + i} + \frac{BS_2 - CS_2}{(1 + i)^2} + \dots + \frac{BS_T - CS_T}{(1 + i)^T}$$

$$VAN_f = -I_o + \frac{p_1q_1 - CP_1}{1 + i} + \frac{p_2q_2 - CP_2}{(1 + i)^2} + \dots + \frac{p_Tq_T - CP_T}{(1 + i)^T}$$

Donde:

VAN_S= Valor actual neto social

VAN_f= Valor actual neto financiero

I_o= Costes de inversión en el año base

T= Duración del proyecto

i = Tasa de descuento
 BS_1, \dots, BS_T = Beneficios sociales anuales
 CS_1, \dots, CS_T = Costes sociales anuales
 p_1q_1, \dots, p_Tq_T = Ingresos anuales
 CP_1, \dots, CP_T = Costes privados anuales

La tasa de descuento (i), es un parámetro que por lo general debe asumirse igual para todos los años en los que se analiza el proyecto. Esta tasa, refleja el grado de preferencia por el presente frente al futuro que se adopta en la evaluación y es un valor cuya correcta elección es importante para el cálculo del VAN.

Ministerio de Fomento España (2010) recomienda que para el VAN Financiero, la tasa (privada) de descuento que se utiliza más habitualmente coincide con el tipo de interés vigente en el mercado. Sin embargo, para la elección de la tasa social de descuento en la evaluación económica de proyectos se deben plantear tres posibilidades:

- El tipo de interés de mercado,
- La tasa marginal de preferencia temporal, o
- La tasa marginal de productividad del capital.

Como se puede apreciar en las expresiones anteriores, el VAN social y el VAN financiero están estrechamente ligados: el primero engloba al segundo, sin embargo, es este quien matiza la interpretación del primero. El Ministerio de Fomento España (2010) señala en su manual de evaluación de proyectos de transporte, que tanto se puede tomar decisiones sobre la ejecución de proyectos en base al VAN social y Financiero, para ello propone el siguiente gráfico:

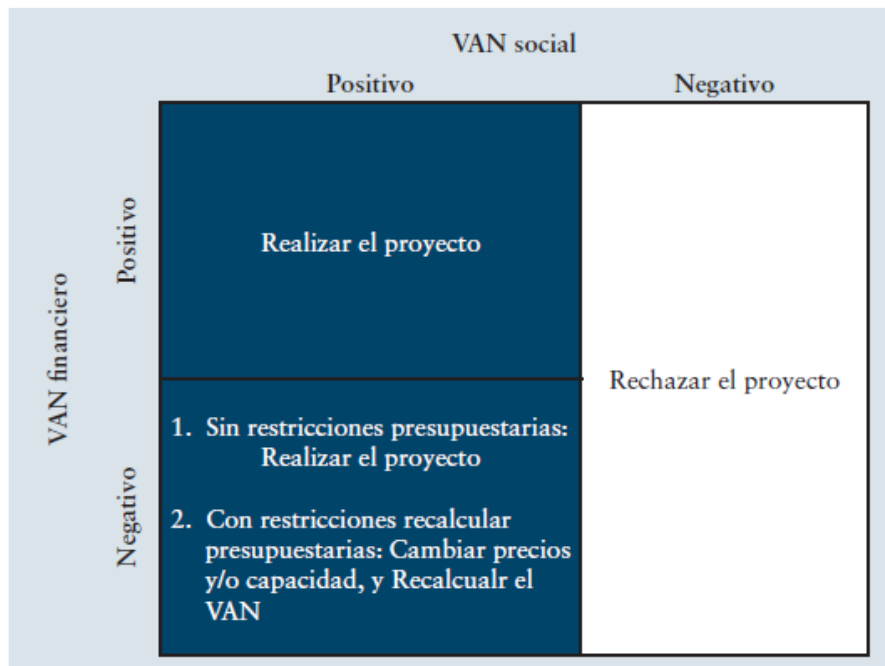


Fig. 5.- Esquema de toma de decisiones mediante el VAN. (Tomada de Fomento España, (2010))

De esta manera, cuando el VAN Social resulta negativo, Mendoza et al (2006) recomiendan no llevar a cabo el proyecto puesto que, la suma actualizada de sus beneficios sociales no resulta suficiente para compensar la suma de sus costes sociales (los cuales incluyen los privados). Por otro lado, en caso de resultar el VAN social positivo, el proyecto debería realizarse solo si el VAN Financiero es positivo o si, aunque sea este negativo, las restricciones presupuestarias son nulas (Ministerio de Fomento España 2010)

Al utilizar el VAN para la toma de decisiones, se debe tener en cuenta la manera en la que se internalizará la incertidumbre en la evaluación. Para su efecto, (Ministerio de Fomento España 2010) dispone de tres posibilidades:

1. Ignorar la existencia de incertidumbre. Esta posibilidad es conveniente adoptar en proyectos con incertidumbre reducida, riesgo a equivocarse en el análisis sea bajo o tenga un bajo coste para el evaluador.
2. Incorporar la Incertidumbre mediante análisis de sensibilidad. Se adopta cuando se considera la posibilidad de que los resultados de la evaluación, varíen tras la modificación de ciertos parámetros. Para ello, se repite el

análisis variando los valores de dichos parámetros en función del planteamiento de posibles escenarios.

3. Incorporar la incertidumbre en las herramientas de decisión. Se trata de considerar al VAN Social y al VAN Financiero como distribuciones de probabilidad sobre dichos valores, motivo por el cual, las decisiones deberán tomarse en función de las propiedades de las distribuciones en mención. Aunque esta posibilidad es la más completa, requiere de mayor información.

Mendoza et al (2006), hace mención también a que tanto en el VAN social como en el financiero los costes y beneficios del proyecto, son expresados en magnitudes monetarias correspondientes a diferentes momentos del tiempo. Cuando el flujo de costes y beneficios varía como consecuencia de la inflación, lo más práctico y habitual es ignorar el cambio, pues los valores son puramente monetarios y no afectan a los valores reales durante la vida del proyecto.

2.2.1.2.2. Tasa Interna de Retorno (TIR)

La Tasa Interna de Retorno (TIR), consiste en determinar el valor de la tasa de descuento (i) que iguala a cero el valor actual neto (VAN) de un proyecto (Ministerio de Fomento España 2010). La métrica del indicador se realiza en unidades porcentuales, su cálculo se torna complejo puesto que el número de años en análisis es quien define la ecuación a resolver. El problema de cálculo puede ser resuelto mediante calculadoras financieras o programas informáticos como Excel.

2.2.1.2.3. Beneficio - Coste

El indicador Beneficio - Coste, consiste en establecer un marco de evaluación con el cual se pueda establecer si, en un momento determinado, el coste de una medida específica es mayor que los beneficios derivados de la misma. El análisis permite también estimar en caso de tener varias opciones, cuál de ellas es la más adecuada en términos económicos. El análisis coste – beneficio, representa para el sector público lo que un estado de pérdida y ganancia representa para

una empresa privada (Leal 2010). La métrica del indicador es un coeficiente adimensional que permite decidir la conveniencia de efectuar o no una inversión. Su cálculo está definido por la siguiente ecuación:

$$\frac{B}{C} = \frac{\sum_i^n Beneficios}{\sum_i^n Costes}$$

En donde “n” representa el número de años considerados en el período de análisis

2.2.1.2.4. Coste Anual Equivalente

Alvaréz (2001) define al Coste Anual Equivalente como la suma algebraica de sus costes e ingresos presentes y futuros medidos en términos del coste anual uniforme al cual equivalen. El indicador se emplea con frecuencia para la evaluación de proyectos que constituyen una fuente de gastos y que no son generadores directos de ingresos. EL indicador se puede estimar a través de la suma algebraica de los equivalentes anuales de ingresos y egresos. Se puede obtener también obteniendo el valor presente neto de todos los ingresos y egresos y llevándolos posteriormente a su equivalente anual. La métrica del indicador se realiza en unidades monetarias.

$$CAE = VAN * \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1}$$

Donde:

VAN= Valor Actual Neto

N= Período de Análisis

I= Tasa de Descuento

2.2.1.2.5. Período de Recuperación de la Inversión

Campo (2007) define al Periodo de Recuperación de la Inversión, como el tiempo exacto que requiere una empresa para recuperar su Inversión inicial en un proyecto estimado a partir de los ingresos en efectivo.

2.2.1.3. COSTES Y BENEFICIOS

Como se ha descrito en los apartados anteriores, existen distintas metodologías de evaluación económica. Cada una de estas metodologías considera uno o más indicadores. Sin embargo, para el cálculo de dichos indicadores se torna necesario identificar los costes y beneficios a utilizar.

Torres-Machi et al. (2014), clasifican los costes y beneficios en tres grupos principales:

- Agencia Gestora
- Efecto en los Usuarios
- Externalidades

En base a esta clasificación, estos grupos se desglosan de la siguiente manera:

2.2.1.3.1. Agencia gestora

Contemplan los costes en los que incurre la agencia gestora para ejecutar la alternativa de mantenimiento propuesta, así como los costes asociados a futuros mantenimientos dentro del período de análisis. Se considerarán también, en caso de existir, los ingresos adicionales que obtendría la agencia gestora en caso de ejecutar alternativa alguna. Los costes en los que se incurre por personal administrativo, socialización, trámites legales, proceso de licitación y costes similares que resultan similares para todas las alternativas serán omitidos.

2.2.1.3.2. Efecto en los usuarios

Torres-Machi et al. (2014), señalan que el efecto en los usuarios se cuantifica integrando tres conceptos:

- Accidentalidad
- Tiempo de viaje
- Coste de operación vehicular

El beneficio para los usuarios que puede tener una alternativa sobre otra, se constituye en la disminución de los costes anteriormente mencionados como consecuencia del mejoramiento de la condición del pavimento.

A continuación, se recoge metodologías que permiten cuantificar de manera monetaria los efectos en el usuario.:

Accidentalidad

Uno de los motivos por los cuales las agencias deciden invertir en el mejoramiento de una red vial, es para mejorar su nivel de seguridad. El nivel de seguridad de una vía, genera beneficios económicos reduciendo los costos de accidentalidad. Forkenbrock and Foster (1997) proponen, para cuantificar estos costes, un modelo en el que se calcula el coste de accidentes por millón de VMT (Vehículos Mile Travel/ Vehículos por milla de viaje). Para su efecto, se utiliza la siguiente ecuación:

$$\frac{\text{Coste de Accidente}}{\text{Millones de VMT}} = 1.587.580(0,994^{PSR}) (1,111^{TOPCURV}) (1,442^{PASRES}) (1,741^{ADTLANE}) (0,952^{RIGHTSH}) (0,936^{LANES}) (1,085^{TOPGRAD})$$

$$\frac{\text{accident cost}}{\text{million VMT}} = 1,587.580 (0,994^{PSR}) (1,111^{TOPCURV}) (1,442^{PASRES}) (1,741^{ADTLANE}) (0,952^{RIGHTSH}) (0,936^{LANES}) (1,085^{TOPGRAD})$$

Donde:

PSR= Clasificación de serviciabilidad. Toma valores entre 0 (pobre) a 5 (excelente), medida de la calidad de la superficie de rodadura (FHA 1987, p. IV-28)

TOPCURV= Número de grados del arco subtendido. Toma el valor de 0 en caso de no existir curva.

PASSRES: Variable que identifica las restricciones de paso (semáforos, rompe velocidades, etc). Toma el valor de 1 en caso de existir y 0 en caso de que no.

ADTLANE: Tráfico promedio diario expresado en millares por carril.

RIGHTSH: Ancho de la acera expresado en pies.

LANES: Variable codificada con el valor de 1 en el caso de que la vía posea 4 o más carriles.

TOPGRAD: Cambio de elevación como un porcentaje de la distancia horizontal. La variable toma los siguientes valores; 0= sin pendiente, 1= 1% al 1,9; 2= 2% al 2,9%; 3= 3% al 3,9%, 4= 4% al 4,9%, 5=5% al 5,9%, 6=6% al 6,9%, 7=7% al 7,9%, 8=8% al 8,9%, 9=9% al 9,9%, 10=10 al 11,9%, 11=12% al 14,9% y 12= 15% o más.

La obtención de coste anual de accidentes, viene dada por la división del valor resultante de la ecuación anterior para el VMT anual del segmento en análisis.

Tiempo de Viaje

Fullana and Puig (2012) señala que el valor del tiempo para los usuarios debe ser discutida. . En general, los costes de la demora para el usuario dependen de la clase de vehículo, el tipo de viaje (urbano o interurbano) y el objetivo del viaje (trabajo o particulares).

Carteni and Punzo (2007) por otro lado, presenta una función para evaluar el tiempo de viaje enfocada a redes viales urbanas, considerando los efectos de los parqueos laterales existentes, calles secundarias y la disminución del rendimiento del sistema debido a la congestión vehicular. Para su efecto, proponen la siguiente ecuación:

$$t_l^* = \frac{L_l}{\beta_0 + \beta_1 Lu_l + \beta_2 S_l + \beta_3 W_l + \beta_4 D_l + \beta_5 SP_l + \beta_6 Pv_l + \frac{\beta_7 \cdot (f_l / Lu_l)^2}{1 + W_l + SP_l + D_l}}$$

Donde:

t1= tiempo de viaje en condiciones ideales expresado en horas

L1 = longitud de la vía en km

f1= flujo vehicular expresado en vehículos/hora

Lu1= ancho de vía en metros

S1= pendiente promedio de la vía expresado en porcentaje

W1= Curvatura de la vía expresada en valores entre 0 y 1

D1= Nivel de daño de la capa de rodadura expresado en valores entre 0 y 1

SP1= porcentaje de la vía que posee parqueos laterales

P_{vi} = Variable que considera el tipo de pavimento, toma el valor de 1 para pavimento asfáltico y 0 para otros.

Con respecto a Curvatura de la vía (W1) y a su deterioro (D1), el modelo propone 4 niveles, atribuyendo valores entre 0 y 1, es decir: 0.00 – 0.33 - 0.66 – 1.00.

En cambio, los coeficientes β representan valores de calibración de la ecuación y son detallados a continuación:

	β_0 [Km/h]	β_1 [Km/h·m]	β_2 [Km/h]	β_3 [Km/h]	β_4 [Km/h]	β_5 [Km/h]	β_6 [Km/h]	β_7 [Km·h·m ²]/vehic]
<i>value</i>	29.915	3.598	-0.586	-13.865	-10.814	-6.383	4.739	-1.052E-04

Coste de Operación Vehicular

Se consideran costos de operación vehicular todos los costos relacionados con el consumo de combustible, aceite, el desgaste de neumáticos y otras piezas del vehículo. Los costos de operación vehicular son primordialmente una función de la capacidad de servicio del pavimento, es decir, rugosidad, y la rigidez de la superficie. En ocasiones, se estima que los costos de operación vehicular **se pueden eliminar de un LCCA** del pavimento, puesto que dichos costos son esencialmente los mismos para todas las alternativas. (Fullana and Puig 2012)

Entre las herramientas disponibles para estimar los costos de operación vehicular se encuentran las siguientes: Green Street Calculator de la ACPA (www.pavements4life.com/greenstreets/), Modelo de Normas para el Diseño y Mantenimiento de Carreteras del Banco Mundial (Banco Mundial 2001), Revised Highway Investment Analysis Package de la FHWA (HIAP) (FHWA HIAP), MicroBENCOST de la Texas A&M Research Foundation (TAMRF 1993), AASHTO Red Book (AASHTO 1977), CA4PRS (Caltrans 2011a), Síntesis 269 del NCHRP, Road User and Mitigation Costs in Highway Pavement Projects (Lewis 1999). Cabe recalcar que los costes anteriormente mencionados, son los

generados en la tapa de operación de un proyecto, mas no, durante la ejecución de trabajos de mantenimiento o rehabilitación.

2.2.1.3.3. Externalidades

Referida al impacto directo de una acción en los no usuarios (FHWA, 2003). Las externalidades incluyen los efectos como contaminación del aire, ruido, afecciones a fuentes de agua, etc. El análisis de las externalidades es difícil de monetizar (FHWA, 2003; Khurshid et al., 2009).

Torres-Machi et al. (2014) señalan que aunque existen investigaciones direccionadas a mejorar la cuantificación monetaria de estos efectos (Browne & Ryan, 2011; Cross et al., 2011), en la práctica, **lo más común es excluirlas de la evaluación económica y considerarlos en el proceso de toma de decisiones como indicadores adicionales**”

2.2.1.4. ANÁLISIS DE CRITERIOS ECONÓMICOS UTILIZADOS EN LA TOMA DE DECISIONES

FAA (2009) señala que, cuando el coste mínimo es el criterio de selección, se debe desarrollar un LCCA (Análisis de coste de ciclo de vida). En cambio, Peshkin et al. (2011), considera que los métodos de evaluación y comparación de coste efectividad más convenientes son: LCCA, beneficio - coste y coste anual equivalente. Walls et al (1998) y Arabali et al. (2013) consideran que, aunque el mejor método de comparación y selección en proyectos de **mantenimiento de pavimentos es el ratio beneficio - coste, ya que el coste inicial es un factor influyente en la toma de decisiones puesto que obedece a la restricción del presupuesto disponible.**

Santos et al (2017) y Han et al.(2017), consideran también como criterios de selección: “Life Cycle Highway Agency Costs LCHAC” y “Cost, VP life cycle road user costs”, los cuales hacen referencias a los costes para la agencia gestora de la red de pavimentos y los usuarios respectivamente, a lo largo del ciclo de vida

de todo el proyecto vial. Puesto que la presente investigación se centra únicamente en la etapa de mantenimiento, los criterios en mención, no son útiles.

Arabali et al (2017); Bryce et al (2014) y Flintsch et al (2014), proponen el criterio de selección “Coste/efectividad”. Cafiso et al. (2002) por otro lado, utilizan como criterios de elección en VAN financiero y VAN económico del proyecto.

Limsawasd et al (2016) propone como criterio de selección, el coste que significa para los usuarios de la red vial urbana, el retraso en los tiempos de viaje debido a los trabajos de mantenimiento; Mientras que Torres-Machi et al. (2015) consideran como criterio del tipo económico, el coste ambiental que significan las emisiones de CO₂.

2.2.2. CRITERIOS TÉCNICOS

El presente subcapítulo, recoge en primera instancia un análisis de los criterios técnicos utilizados en la toma de decisiones en investigaciones similares. Posteriormente se describe cada uno de los mismos con su respectiva metodología de valoración.

En cuanto a los criterios técnicos considerados al momento de tomar decisiones en lo referente a proyectos de mantenimiento de pavimentos, de un total de 23 investigaciones, al menos 13 (57%) consideran el estado del pavimento como criterio fundamental de selección.

El estado del pavimento puede ser evaluado mediante distintos indicadores. Arabali, Sakhaeifar, Freeman, Wilson (2016), Borowiec et al (2017) y Lu et al (2013), utilizan como indicador para evaluar la condición del pavimento el IRI (International Roughness Index), alegando que es el indicador comúnmente utilizado en todo el mundo. En cambio, Carnahan et al (1987) y Mathew et al (2014) utilizan el Pavement Condition Index (PCI). A partir de este indicador, se han desarrollado otros indicadores para evaluar la condición de pavimentos en redes viales urbanas como el UPCI (Urban Pavement Condition Index), indicador desarrollado en el proyecto “Research and Development of Solutions for Urban Pavement Management in Chile” por Osorio et al. (2014).

Otro de los criterios utilizados al momento de la toma de decisiones en el mantenimiento de pavimentos, es la efectividad del tratamiento propuesto. Carnahan et al (1987) y Limsawasd et al. (2016) utilizan una métrica en la que se cuantifica el incremento esperado en el PCI posterior a la aplicación del mantenimiento. Arabali et al (2017), por otra parte propone la utilización del indicador “PCI-years”; su métrica se realiza en base a las curvas de deterioro del pavimento.

Torres-Machí, Chamorro, Pellicer, Yepes, & Videla, (2015) en cambio, incluyen como indicador el Service Life Increase/Aumento de Vida útil que tiene como consecuencia la aplicación de un tratamiento al pavimento. Carnahan et al (1987) y Torres-Machi et al (2017) proponen en sus investigaciones, herramientas de optimización de mantenimiento de pavimentos en las que se toma en cuenta como restricción una condición mínima del pavimento, definida por el índice PCI_{mínimo}. Arabali et al., (2016) consideran también entre uno de los criterios para la toma de decisiones, el volumen de tráfico de las vías en análisis.

2.2.2.1. INDICADORES DE ESTADO DEL PAVIMENTO

INTERNATIONAL ROUGHNESS INDEX (IRI)

Se trata de uno de los indicadores más comunes en la evaluación de pavimentos, el índice mide la rugosidad de la capa de rodadura. EL IRI fue recomendado como índice estándar por primera vez a inicio de los años 80, (Sayers et al. 1986).

El cálculo matemático del Índice Internacional de Rugosidad se basa en el valor absoluto de la acumulación de desplazamientos de la masa superior con respecto a la masa inferior de un modelo estándar de vehículo, dividido para la distancia recorrida en una vía viajando a una velocidad de 80 km/h. Su unidad de medida puede ser mm/m, m/km, pulg/milla, etc. En fin, el IRI mide la respuesta de un vehículo ante las condiciones de un pavimento. Las metodologías de medición del IRI son variadas y van desde las mediciones utilizando escáner laser (altamente precisas), vigas de medición tipo (precisión media) y métodos de estimación a través de levantamientos topográficos (precisión baja). (Arriaga Patiño, Anguas, and Rico Rodriguez 1998). Tan and Mtc (2015), clasifica al IRI

como un lagging indicator, indicador con retraso, debido a que, por la metodología utilizada para su métrica, detectará fisuras solamente cuando estas sean considerables, despreciando aquellas de baja severidad. Otra de las desventajas radica en que se evalúa una sección de poco ancho y que resulta difícil controlar la velocidad del vehículo.

PAVEMENT CONDITION INDEX (PCI)

EL Pavement Condition Index (PCI) es un indicador comúnmente utilizado puesto que evalúa la condición de los pavimentos de manera visual y sin la necesidad de equipos especializados. El índice se valora a través de una inspección visual de una muestra de la vía en análisis, la inspección cuantifica los deterioros de la vía de acuerdo a su tipología, severidad y cantidad. Posterior a la inspección, se procesa los datos obtenidos para llegar a un rango de calificación adimensional entre 0 y 100 que definen el estado actual del pavimento. (Díaz Cárdenas 2013).

Rango	Clasificación
100-85	Excelente
85-70	Muy Bueno
70-55	Bueno
55-40	Regular
40-25	Malo
25-10	Muy Malo
10-0	Fallado

Tabla 4.- Rangos del PCI (tomada de (Díaz Cárdenas 2013))

El procedimiento a seguir para determinar el PCI de una vía es el siguiente:

- Determinar las unidades de muestreo a analizar
- Inspección de campo determinando los daños presentes en el pavimento, considerando: clase, severidad y cantidad.
- Cálculo de valores deducidos, utilizando “curvas de valor deducido”, se calcula valores deducidos de cada uno de los daños identificados.
- Cálculo del Máximo Valor Deducido Corregido, el valor resulta de un proceso iterativo en el que se consideran los valores obtenidos de la etapa anterior.

- Cálculo del PCI, resulta de restar a 100 el Máximo Valor Deducido Corregido.

Inicialmente, la manera de recolectar datos para evaluar la condición del pavimento se basaba en una comisión de técnicos encargados de recorrer las vías llenando formularios a mano. Sin embargo, en la actualidad se pueden implementar sistemas para captar y analizar datos que agilizan los procesos de inspección, entre ellos se destaca la utilización de imágenes digitales para la recolección de datos. (Macea-Mercado, Morales, and Márquez-Díaz 2016).

Dentro de las ventajas y versatilidad de este indicador, Tan and Mtc (2015) destacan la toma de datos, que puede realizarse mediante un recorrido de inspección tipo caminata o en un vehículo, así como métodos semi automatizados. Tan and Mtc (2015) clasifica al PCI como un leading indicator (indicador anticipado) señalando que por su metodología de inspección detecta fisuras de baja severidad, proporcionando información para realizar intervenciones de mantenimiento tempranas.

URBAN PAVEMENT CONDITION INDEX (UPCI)

El índice fue desarrollado por Osorio, Chamorro, Tighe, & Videla, (2014) como parte del proyecto "Research and Development of Solutions for Urban Pavement Management in Chile" con la finalidad de analizar las condiciones de pavimentos urbanos. El desarrollo del indicador, se basa en mediciones objetivas de los daños comúnmente existentes en la superficie del pavimento y en evaluaciones realizadas por un panel de expertos. Para la obtención del UPCI, se desarrollan 3 fórmulas: 2 para pavimentos asfálticos considerando toma de datos manual y automatizada y 1 para pavimentos de hormigón que es útil para ambos tipos de tomas de datos.

La metodología a seguir para la obtención del UPCI, es similar a la del PCI; Se realizan inspecciones visuales, en donde se debe detectar la tipología, cantidad y severidad de daños en el pavimento. Posteriormente mediante fórmulas establecidas, se determina el índice que puede ir de 1 a 10, siendo 1 la peor de las condiciones y 10 la mejor. Según la escala, un pavimento promedio necesita rehabilitación cuando $UPCI \leq 4$, preservación cuando $4 < UPCI \leq 8$ y mantenimiento rutinario cuando $UPCI > 8$.

Cabe recalcar, que el desarrollo del indicador se realizó tomando como muestra, las redes viales de 3 municipalidades de Santiago de Chile, con un total de 810km de red vial. Es por esto, que los desarrolladores del indicador, recomiendan que se debe definir los índices de calidad UPCI en caso de querer adaptar el método a otro tipo de clima o red vial.

2.2.2.2. EFECTIVIDAD DEL TRATAMIENTO

Incremento esperado en el PCI/UPCI. - El indicador cuantifica el incremento en el PCI esperado posterior al tratamiento que se pretenda aplicar a una vía o red vial. La determinación del indicador resulta sencilla y aproximada puesto que se estima los daños existentes en el pavimento posterior al tratamiento para calcular el PCI esperado.

PCI/años.- El índice es utilizado para estimar el beneficio relativo del tratamiento aplicado. Para su cálculo, es necesario graficar las curvas de deterioro del pavimento posterior a la aplicación del tratamiento propuesto. El beneficio relativo se obtiene calculando el área comprendida entre la curva de deterioro y un umbral mínimo de servicio. (Torres-Machi et al., 2015).

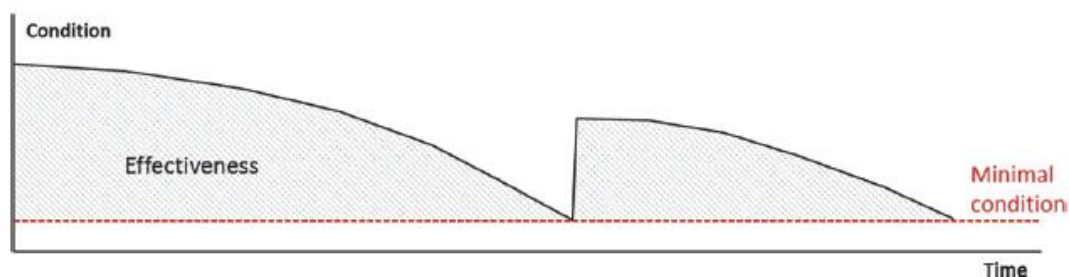


FIGURE 1 Effectiveness of treatment alternatives.

Fig. 6.- Curva de deterioro de un pavimento para el cálculo de la efectividad de un tratamiento (Tomado de (Torres-Machi et al., 2015).

Por otra parte, Arabali et al., (2017), para su métrica, proyectan la curva esperada de deterioro del pavimento posterior a la intervención y la curva de deterioro en caso de no realizarse la intervención. El área comprendida entre ambas curvas y el umbral mínimo es el valor del beneficio relativo, expresado en unidades “PCI-años”.

2.2.2.3. ANÁLISIS DE CRITERIOS TÉCNICOS

Por lo señalado en los apartados anteriores, en cuanto a indicadores de estado del pavimento, se puede señalar lo siguiente:

El **IRI** es un indicador que mide la respuesta de un vehículo a una velocidad determinada en la vía en estudio, el indicador mide el desplazamiento vertical absoluto para una distancia recorrida. Como se ha indicado en el apartado anterior, dependiendo de la precisión deseada, se torna necesario la utilización de equipos de fácil construcción hasta avanzados equipos con tecnología de medición laser. Este método, por su métrica, es considerado un índice retrasado, puesto que no detecta daños ni fisuras en el pavimento a menos que estas sean de tamaño considerable. Por consiguiente, al utilizar este método, no se podrá tomar decisiones en cuanto a intervención de manera temprana.

En cuanto al **UPCI**, aunque ha sido desarrollado especialmente para redes viales urbanas, sus autores recomiendan que, para su utilización en una locación diferente a la de donde fue desarrollado (Chile), se deben definir los índices de calidad UPCI en caso de querer adaptar el método a otro tipo de clima o red vial.

El **PCI**, en cambio, además de su principal ventaja que radica en la facilidad de su métrica, presenta la ventaja de detectar daños de baja severidad, permitiendo actuar de manera anticipada. Su métrica se puede realizar mediante recorridos caminando, en un vehículo o diversos métodos semiautomatizados como imágenes satelitales.

En cuanto a indicadores de efectividad del tratamiento, se pueden señalar los siguiente:

La medición de la efectividad mediante el indicador PCI/años resultaría conveniente en el caso de contar con las curvas del deterioro de pavimentos de la red a estudiar, de lo contrario no se estaría trabajando con datos válidos. Por otro lado, el indicador de incremento esperado en el PCI, resulta bastante sencillo y práctico para estimar efectividad en ausencia de curvas de deterioro.

2.2.3. CRITERIOS AMBIENTALES

Bryce et al (2014) y Kucukvar et al. (2014) proponen la utilización del indicador “Consumo Energético” para el análisis multicriterio de gestión de mantenimiento de pavimentos sostenible. Torres-Machi et al. (2015) en cambio consideran que el criterio a tomar en cuenta para reducir los daños al medio ambiente son las emisiones de CO₂. Otros autores, consideran diferentes criterios con la finalidad de conseguir el mismo objetivo, reducir impactos medio ambientales: Santos, Flintsch, and Ferreira (2017) por ejemplo considera el uso de materiales reciclados y el uso de recursos. Limsawasd, Orabi, and Athigakunagorn (2016) en cambio, considera el consumo de combustibles. Kucukvar et al. (2014) toma en cuenta el consumo de agua y la generación de desechos peligrosos, Salvatore Cafiso et al. (2001) utiliza como criterio, el ruido generado por los trabajos de mantenimiento.

Es importante resaltar que, tanto el “consumo energético”, “uso de recursos” y “consumo de combustible” se relacionan de manera directa con las emisiones de CO₂. La métrica del indicador se realiza en kg de CO₂ liberados. El análisis y estimación de las emisiones de CO₂, podría realizarse utilizando “ICE (Inventory of Carbón and Energy) V2.0” desarrollada por (Hammond and Jones 2006) o los valores señalados por Torres-Machí et al. (2015), mismos que se presentan a continuación:

Treatment	Classification	Service Life Increase (ASL) (years)	Unit Cost (US\$/m ²)	Unit Emissions (kg CO ₂ /m ²)
Crack sealing	Preservation	2	1.06	0.11
Fog seal	Preservation	3	1.02	0.04
Slurry seal	Maintenance	4	3.39	0.76
Microsurfacing	Maintenance	7	7.75	1.51
Single chip seal	Maintenance	5	4.90	0.4
Double chip seal	Maintenance	6	5.15	0.5
Milling and functional resurfacing	Maintenance	10	23.37	6.91
Milling and structural resurfacing	Rehabilitation	12	63.79	13.11
Hot in-place recycling	Rehabilitation	10	53.54	6.70
Cold in-place recycling	Rehabilitation	13	54.65	5.49
Full-depth reclamation	Rehabilitation	13	41.93	8.93
Reconstruction	Rehabilitation	25	143.59	27.36

Tabla 5.- Emisiones unitarias de CO₂ producto de los tratamientos típicos de rehabilitación y mantenimiento de pavimentos (tomada de (Torres-Machí et al. 2015))

Tomando en cuenta que el presente trabajo se centra en la etapa de mantenimiento de los pavimentos urbanos, los consumos de agua y la generación de desechos peligrosos, serán relativamente similares en todos los proyectos de mantenimiento. Los consumos de agua y la generación de desechos en este caso, serán también muy inferiores a los producidos en la etapa de construcción de un proyecto vial. Por lo anteriormente señalado, no se desarrolla de manera detallada las metodologías de valoración cuantitativa de los mismos.

En lo que respecta al ruido, tomando en cuenta que el presente análisis se centra en redes viales urbanas, las afecciones que el mismo provoca serán relativamente similares a la hora de comparar varios proyectos, puesto que todos se emplazarán en zonas pobladas. El criterio se torna de poca relevancia, motivo por el cual tampoco será considerado.

2.2.4. CRITERIOS SOCIALES

Identificar criterios sociales, es importante para cumplir el objetivo de toma de decisiones bajo consideraciones de sostenibilidad

Cafiso et al. (2001) consideran como criterios sociales más importantes a la hora de la toma de decisiones los siguientes: “percepción de ciudadanos beneficiarios”, “proximidad a infraestructura social y económica”, “seguridad del peatón”, “impulso al turismo” y creación de empleo. Godoy, Mourgues, and Chamorro (2015), coinciden con el anterior en los dos primeros criterios, pero además agregan: “población beneficiaria” y “existencia de vías alternas”.

La métrica de todos los criterios anteriormente mencionados, es subjetiva y dependiente de los proyectos en análisis. Es por esto que, en el presente trabajo, se desarrollará además una propuesta para la evaluación cuantitativa.

2.3. TOMA DE DECISIONES

2.3.1. PROCESO DE TOMA DE DECISIONES

Considerando que todo lo que hacemos de manera consciente o inconsciente es el resultado de alguna decisión; todos ejercemos el papel de decisores. La información que recolectamos nos ayuda a entender lo que ocurre, de manera que se desarrolle los juicios apropiados para la toma de decisiones respecto a

tales ocurrencias. Sin embargo, no toda la información es útil para mejorar nuestra comprensión y juicios. Existen numerosos ejemplos que muestran que el exceso de información es tan malo como la escasa información. (Saaty 2008)

Para tomar una decisión, necesitamos conocer el problema, la necesidad y el propósito de la misma, el criterio de la decisión. Se debe conocer también los subcriterios, partes interesadas, grupos afectados y acciones alternativas a tomar. Saaty (2008), señala que posterior a la recolección de información, se debe tratar de seleccionar la mejor alternativa. En el caso de asignación de recursos, necesitamos establecer prioridades de entre las alternativas para que dicha asignación se realice de manera apropiada.

La toma de decisiones, para la cual reunimos la mayoría de nuestra información, se ha convertido en una ciencia matemática hoy en día (Figuera et al., 2005). Es un proceso que involucra múltiples criterios y subcriterios para posteriormente puntuar las alternativas y tomar la decisión.

En base a la literatura revisada, se puede resumir el proceso de toma de decisiones a través del siguiente esquema:

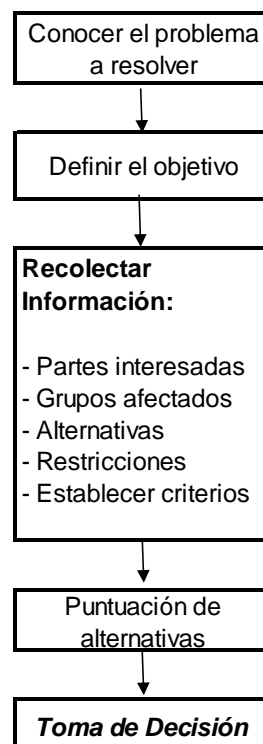


Fig. 7 Esquema del proceso de toma de decisiones (Fuente: El Autor)

Penadés-Plà et al. (2016) señala que de acuerdo a la clasificación de Hwang y Yoon, el proceso de toma de decisiones puede ser:

- Toma de decisiones multi-atributo (Multiple attribute decisión making, MADM)
- Toma de decisiones multi-objetivo (Multiple objective decisión making, MODM)

De esta manera, los MADM son útiles cuando se quiere establecer un número discreto de soluciones. En este tipo de proceso, los decisores actúan al inicio asignando pesos a los criterios establecidos para evaluar cada una de las soluciones o evaluando las soluciones en base a criterios subjetivos. El resultado del proceso es una priorización de alternativas en estudio.

En cambio, los MODM tienen como resultado un conjunto continuo de soluciones con respecto a varios criterios, conjunto denominado “frontera de Pareto”. En este proceso, el decisor actúa al final, escogiendo una solución de entre las existentes dentro de la frontera de Pareto.

Puesto que el presente trabajo se centra en un sistema de toma de decisiones para la gestión del mantenimiento de pavimentos, se utilizará un proceso MADM. De esta manera se pretende conseguir una puntuación de las alternativas en base a criterios establecidos.

En el presente caso, las alternativas serán las vías que conformen la red vial en estudio. La puntuación de cada una de ellas definirá un orden de prioridad para recibir reparaciones y mantenimientos, de manera que se realice una correcta y eficiente asignación de recursos.

2.3.2. MÉTODOS

Hajkowicz and Collins, (2007), clasifican los métodos utilizados en la toma de decisiones multi-atributo de la siguiente manera:

- Métodos de Puntuación Directa
- Métodos basados en la distancia
- Métodos de comparación por pares
- Métodos de superación

- Métodos basados en funciones de utilidad o valor

Los **métodos de puntuación directa**, son los métodos más sencillos en en MADM. Se basan en la evaluación de alternativas mediante operaciones aritméticas básicas. En este caso tenemos dos métodos: SAW y COPRAS. (Podvezko, 2011).

Los **métodos basados en la distancia** se basan fundamentalmente entre el cálculo de la alternativa y un punto en concreto. Dentro de este tipo de métodos tenemos: GP, CP, VIKOR y TOPSIS. Todos enfocados a la medición de distancia de las alterativas con respecto a lo que se considera la mejor y la peor solución (Tamiz, M.; Jones, D.; Romero, 1998).

Los **métodos de comparación por pares** son útiles para determinar los pesos de los criterios establecidos y evaluar aquellos de carácter subjetivo comparando las alternativas entre sí. En cuanto a este tipo de métodos podemos destacar: ANP, AHP Y MACBETH. (Görener 2004, Opricovic, S.; Tzeng, G, 2004).

Los **métodos de superación** son útiles y capaces de tratar con información incompleta y difusa. Permiten clasificar las alternativas en función de la relación de preferencia que existe entre ellas. Estos métodos funcionan estableciendo una relación de preferencia entre un conjunto de soluciones donde cada una de ellas posee un grado de dominación sobre las demás respecto a un criterio. En este grupo se puede destacar los métodos: PROMETHEE Y ELECTRE (Penadés 2017).

Los **métodos basados en funciones de utilidad o valor** se basan en la definición de funciones para determinar el nivel de satisfacción de una alternativa respecto a un criterio. La expresión de las funciones depende de la relación entre a valoración y el grado de satisfacción. Dentro de esta clasificación tenemos los métodos MAUT, MAVT Y MIVES (Sarabando 2010).

FUNCIONES DE VALOR

Son funciones cuyo objetivo es convertir los valores que representan el comportamiento de la alternativa a través de un criterio en un nivel de

satisfacción. Los valores finales estarán comprendidos en un rango de 0 a 1. Están definidas por 5 parámetros que, tras modificarlos, permiten obtener formas lineales, en S, cóncavas o convexas. Los parámetros en mención son K_i , C_i , X_{max} , X_{min} , y P_i (Penadés 2017).

$$V_{ind} = B * \left[1 - e^{-k_i \left(\frac{|X - X_{min}|}{C_i} \right)^{P_i}} \right]$$

El valor de B, depende los 5 parámetros de forma:

$$B = \left[1 - e^{-k_i \left(\frac{|X_{max} - X_{min}|}{C_i} \right)^{P_i}} \right]^{-1}$$

Donde:

X_{max} = abscisa del indicador que genera un valor igual a 1

X_{min} = abscisa del indicador que genera un valor igual a 0

X = valor del indicador evaluado en la alternativa

P_i = es un factor de forma, toma valores de : $P_i < 1$ para curvas cóncavas, $P_i > 1$ para curvas convexas o en forma de S y $P_i = 1$ para formas lineales.

C_i = valor que se aproxima a la abscisa del punto de inflexión

K_i = se aproxima a la ordenada del punto de inflexión

Cuando se desea construir funciones decreciente, el valor máximo sería X_{min} mientras que el mínimo sería X_{max} . De esta manera, las ecuaciones a utilizar serían las siguientes:

$$V_{ind} = B * \left[1 - e^{-k_i \left(\frac{|X - X_{max}|}{C_i} \right)^{P_i}} \right]$$

El valor de B, depende los 5 parámetros de forma:

$$B = \left[1 - e^{-k_i \left(\frac{|X_{min} - X_{max}|}{C_i} \right)^{P_i}} \right]^{-1}$$

A continuación, se presentan los valores de los parámetros que se deben utilizar en base a la forma que se quiera obtener:

Forma	Pi	Ki
Cóncava	$<0,75$	$>0,9$
Convexa	>2	$<0,1$
Lineal	1	0
S suave	$2 < P_i < 4$	$0,1 < K_i < 0,2$
S fuerte	$4 < P_i < 10$	$0,1 < K_i < 0,2$

Tabla 6.- Valores de parámetros en funciones de valor (Tomado de (Penadés 2017))

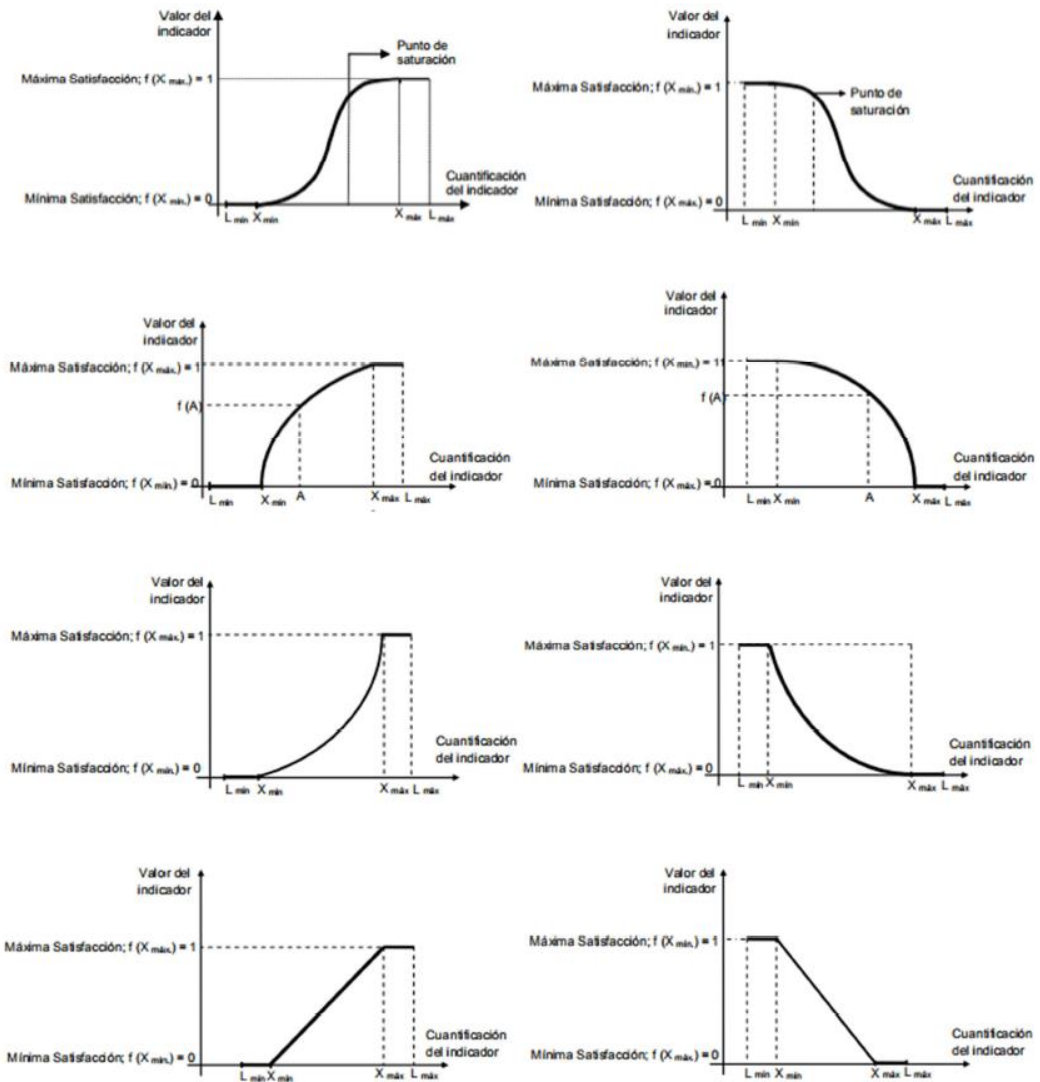


Fig. 8.- formas típicas de las funciones de valor (tomado de (Penadés 2017))

Para la construcción de funciones de valor de caracter decreciente, Sabatino, Frangopol, and Dong (2015) utilizan la siguiente ecuación:

$$V = \frac{1}{1 - e^{-\gamma}} \left[1 - e^{\frac{-\gamma(X_{max}-X)}{(X_{max}-X_{min})}} \right]$$

En donde Gama (γ), es el factor que define la forma de la curva, siendo 0 para funciones linealmente decrecientes, mayor a 0 para funciones convexas y menor a 0 para funciones cóncavas.

2.4. PREDICCIÓN DEL DETERIORO DE PAVIMENTOS

Los modelos de predicción de condiciones son un componente clave en los sistemas de gestión de infraestructuras, pues permiten una efectiva planificación presupuestaria a largo plazo así como la posibilidad de coordinar actividades de mantenimiento.

En el caso de los pavimentos, los modelos predictivos deben ser capaces de detectar los deterioros tanto de la estructura de firmes inicial como de la estructura de firmes después de haber recibido algún tipo de mantenimiento. George, Rajagopal, and Lim (1989) señala que la medición y predicción del rendimiento de un pavimento es un elemento crítico de cualquier sistema de gestión de pavimentos.

La serviciabilidad de un pavimento juega un rol vital en los sistemas de gestión de mantenimiento de pavimentos. Representa una función de la capacidad relativa del pavimento para servir de manera efectiva y segura al tráfico en un determinado periodo de tiempo (Al-haddad and Al-haydari 2018). La misma suele ser evaluada sea desde el punto de vista de los conductores y/o pasajeros en base a su confort y seguridad, o por los gestores de infraestructura vial desde un punto de vista que evalúa el rendimiento estructural de la misma (Himeno et al. 1996).

2.4.1. MÉTODOS DE CONSTRUCCIÓN DE MODELOS DE PREDICCIÓN DEL DETERIORO DEL PAVIMENTO

Existen múltiples métodos para desarrollar un modelo de predicción, entre los mas importantes se puede mencionar: **regresiones numéricas, modelos**

Markovianos y deterioros uniformes basados en la vida útil promedio de los componentes (Sadek, Kvasnak, and Segale 2003).

George, Rajagopal, and Lim (1989) clasifica los modelos predictivos en dos tipos: determinísticos y probabilísticos. Los modelos determinísticos incluyen respuesta primaria, rendimiento estructural, rendimiento funcional y modelos de daño. Todos ellos pueden ser de carácter empírico, lo que implica **regresiones numéricas** o **correlaciones del tipo mecanico-empíricas**. En cuanto a los modelos probabilísticos se incluyen las **cadena de Markov y curvas de supervivencia**.

En cuanto a la utilización de inteligencia artificial, (Al-haddad and Al-haydari 2018), propone la utilización de la **lógica difusa** para la predicción del mantenimiento de pavimentos. (Chopra et al. 2018), en cambio utiliza **programación genética** para definir un modelo de deterioro de pavimentos en la ciudad de Patiala, India.

Aunque el alcance del presente trabajo no cubre el desarrollo de un modelo de deterioro específico para la red vial en estudio, se describe a continuación brevemente los flujos de trabajo de los métodos mas comunes para el desarrollo de los mismos.

Regresiones Numéricas:

George, Rajagopal, and Lim (1989), después de una revisión de varios tipos de modelos de predicción, concluye que la construcción de un modelo empírico-mecánico es la mejor alternativa. Se ha demostrado que este tipo de modelos es eficiente cuando se cuenta con una amplia base de datos experimentales e históricos. (Arambula et al., 2011; Dong et al., 2015; Meegoda & Gao, 2014).

La construcción de modelos de deterioro en base a regresiones numéricas, consiste en recolectar una base de datos del comportamiento de la condición de varias vías de una red vial. Es decir conocer el estado actual (PCI, IRI, UPCI, etc) e indagar al año de su última intervención para así saber en que año de vida se encuentra.

Posteriormente, se realiza la dispersión de datos para, utilizando un análisis estadístico de Cluster desarrollar curvas de deterioro para diferentes condiciones. A continuación se presenta la gráfica de dispersión de datos utilizada por (G. P. Muñoz 2017) para la elaboración de curvas de deterioro para pavimentos flexibles en Costa Rica.

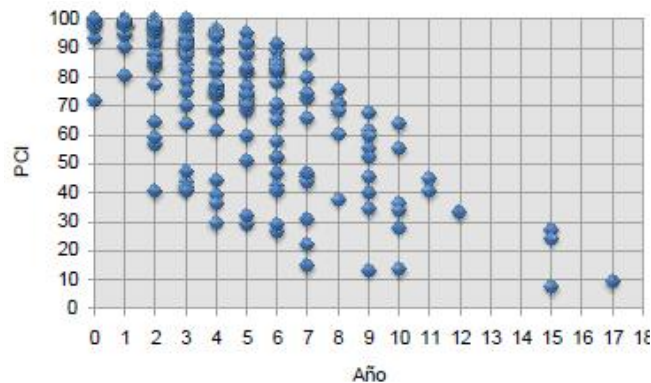


Fig. 9.- PCI vs. Año de vida (tomada de (G. P. Muñoz 2017))

Modelos markovianos:

Los modelos Markovianos son considerados procesos estocásticos continuos puesto que son discretos en tiempo y tienen un espacio de estado infinito (Costello et al., 2005). Estudios han concluido que la cadena de Markov es un enfoque adecuado para aplicar a simulaciones que pretenden analizar el tiempo transcurrido entre un estado (actual) a otro (estado futuro o deterioro) (Wellalage, 2014; Li et al., 2014; Karunaratna and Dwight, 2013; Zhang and Gao, 2012; Park et al., 2011; Voskoglou, 2010; Paleologos et al., 2015; Rao and Naikan, 2015; Ahmed et al., 2014). Osorio-Lird et al. (2017) señalan que el método es ideal para predicción de deterioración de activos así como su esperanza de vida.

Osorio-Lird et al. (2017) señala que la cadena de Markov es un modelo probabilístico que obtiene la probabilística deterioración del pavimento en el tiempo mediante el empleo de una matriz de probabilidad de transición (TPM), prediciendo la condición futura en base al estado actual. Combinando el modelo en mención con una simulación de Monte Carlo, el mismo reflejará una transición estocástica de la condición del pavimento a lo largo del tiempo, obteniendo así el modelo de deterioro. Estos modelos que prescindan de una gran base de datos para su desarrollo, han resultado exitosos en múltiples investigaciones.

(Black, Brint, & Brailsford, 2005; Chamorro & Tighe, 2011; Hassan et al., 2015; Silva, Van Dam, Bulleit, & Ylitalo, 2000; Yang, Lu, Gunaratne, & Dietrich, 2006).

Ortiz-García et al (2006), señalan que dentro de las limitaciones del modelo, se puede señalar que: es discreta en el tiempo, debe tener estado finito, debe satisfacer las propiedades de Markov (sin memoria), lo que significa que la condición futura del pavimento depende de su condición presente pero no de sus condiciones pasadas.

El flujo de trabajo de los modelos creados a partir de cadenas de Markov, se puede entender a través del siguiente ejemplo: Suponiendo que, cuento con una grupo de infraestructuras, de las cuales el 30% se encuentran en excelente estado, 20% en estado bueno y 50% en mal estado. La condición inicial estaría definida por la matriz:

E	30
B	20
M	50

Posteriormente debo definir una matriz de transición que condense las probabilidades de que el grupo de infraestructuras seleccionado pase de un estado a otro. Suponiendo que ejecutaré solamente trabajos de carácter preventivo, la matriz de transformación para el presente ejemplo sería la siguiente:

	E	B	M
E	0.85	0.15	0.00
B	0.15	0.80	0.05
M	0.00	0.00	1.00

Lo que esta matriz indica es que, por ejemplo, por la naturaleza de los trabajos de carácter preventivo, la probabilidad de que una infraestructura pase de estado excelente a estado bueno es del 15%, de estado malo a estado excelente del 0%, de estado bueno a excelente, del 15%, etc.

Utilizando esta matriz de transformación, el estado de mi grupo de infraestructuras al cabo de un año sería:

$$\begin{array}{|c|c|} \hline E & 30 \\ \hline B & 20 \\ \hline M & 50 \\ \hline \end{array} \times \begin{array}{|c|c|c|} \hline 0,85 & 0,15 & 0 \\ \hline 0,15 & 0,8 & 0,05 \\ \hline 0 & 0 & 1 \\ \hline \end{array} = \begin{array}{|c|c|c|} \hline E & B & M \\ \hline 28,5 & 20,5 & 51 \\ \hline \end{array}$$

Es decir que, utilizando únicamente mantenimiento de carácter preventivo, al cabo de un año, tendré 1% más de infraestructuras en mal estado y 1,5% menos de infraestructuras en estado excelente.

Inteligencia artificial, redes neuronales:

Este tipo de modelos computacionales poseen la ventaja de aprender de ejemplos y simular las relaciones existentes entre los datos de entrada y salida. Es un proceso que no requiere relaciones a detalle entre variables. Su desventaja radica en la complejidad de su modelado y en la necesidad de una enorme base de datos para obtener buenos resultados. A esto se suma la limitación de que el modelo actúa como una “caja negra”, siendo muy difícil extraer patrones o ecuaciones para llegar a una solución. (Flintsch & Chen, 2004).

2.4.2. MODELOS DE DETERIORO DE PAVIMENTOS

En el presente apartado se recogen algunos modelos de deterioro de pavimentos desarrollados por varios autores.

Modelo de (George, Rajagopal, and Lim 1989)

Modelo del tipo mecánico-empírico, desarrollado con una base de datos que incluía información referente a la estructura de los pavimentos, intensidad de tráfico soportada y condición del pavimento. Las ecuaciones desarrolladas en el método, han sido validadas por sus autores comparándolas con diversos modelos existentes. La ecuación propuesta es la siguiente:

$$PCI(t) = 90 - a \left[e^{age^b} - 1 \right] \log \left[\frac{ESAL}{SNC^c} \right]$$

En donde:

PCI = Pavement Condition Index

Age= edad del pavimento

ESAL= Número de ejes equivalentes, ASSHTO define como eje equivalente, al eje que distribuye en dos ruedas una carga de 8.2 toneladas o 80 Kilonewtons.

SNC= Número estructural modificado, sus autores indican que entre los datos utilizados, esta variable se encuentra en el rango de 2.5 a 7.7 para el caso de pavimentos flexibles no intervenidos y 1.1 a 8.2 para los pavimentos flexibles que han recibido intervenciones.

a, b y c son los coeficientes de regresión utilizados, los mismos que toman los siguientes valores:

Tipo de Pavimento	Coefficiente
Pavimento Flexible	a = 0.6349
	b = 0.4203
	c = 2.7062
Pavimento Flexible Intervenido	a = 0.8122
	b = 0.3390
	c = 0.8082

Tabla 7.- coeficientes del modelo de George, Rajagopal, and Lim 1989

Modelo de Wu (2015)

El modelo de deterioro se basa en datos históricos recolectados en el programa LTPP (Long-Term Pavement Performance) y en el proyecto "Minnesota Road Research" (Mn/ROAD). El modelo es aplicable únicamente pavimentos flexibles.

El mismo fue realizado partiendo de la base de datos de la red vial de Minesota, misma que contaba con 42 secciones viales, mismas que recibían un tráfico pesado promedio menor 5000.

El modelo representa matemáticamente la relación entre el PCI y el tiempo (T) de la siguiente manera:

$$PCI = 11,52 + \frac{88,86}{1 + e^{(0,33T-5,45)}}$$

Modelo de G. P. Muñoz (2017)

El modelo se basa en la recolección de datos de la red vial de las provincias San José, Alajuela, Cartago y Heredia en Costa Rica. La información fue recolectada en campo, evaluando la condición de un total de 188 caminos e indagando la fecha de su última intervención con la finalidad de conocer el año de vida de cada una de las secciones.

El modelo considera la relación del PCI en el tiempo y además un factor de incertidumbre mediante la siguiente ecuación:

$$y = -0,2181x^2 - 2,2359x + 100 + 6.4386 Z_0$$

En donde:

y = Pavement Condition Index (PCI).

x= tiempo, año de vida del pavimento.

Z₀= valor que se define a través de la función normal estandar en base al nivel de incertidumbre, tomando los siguientes valores:

<i>Incetidumbre</i>	<i>Z₀</i>
99%	-2.57583
95%	-1.95996
90%	-1.64485
85%	-1.43953
80%	-1.25155
75%	-1.15035

Tabla 8.- Valores de Z₀ en base a nivel de incetidumbre

Los autores recomiendan seleccionar el nivel de incertidumbre en base a la importancia de la red vial en análisis, cuanto mas importante sea, mayor será el nivel de incertidumbre seleccionado.

A falta de contar con un modelo de predicción del deterioro de la red vial urbana de la ciudad de Valencia, en el presente estudio se discutirá y se decidirá el modelo a utilizar al momento de seleccionar y caracterizar la red vial a analizar.

2.5. ESTRATEGIAS EN LA GESTIÓN DEL MANTENIMIENTO DE PAVIMENTOS

Existen diferentes estrategias para la gestión del mantenimiento de pavimentos. A continuación se describen algunas de ellas.

Torres-Machi et al. (2017)

En la presente investigación, los autores se centran en resolver el problema común en los gestores de pavimentos, el cual es optimizar la asignación de presupuestos disponibles para el mantenimiento de una red vial. Basándose en que existen $ST \times N$ posibles soluciones en una red vial, siendo "N" el número de pavimentos y "S" el número de posibles soluciones a aplicar en un horizonte de análisis de "T" años, los autores proponen el desarrollo de una herramienta de optimización que ayude a maximizar la efectividad a largo plazo y minimice las emisiones de GHG (global greenhouse gas) derivadas de los trabajos de mantenimiento.

En este trabajo, los autores alimentan a la herramienta con parámetros como: segmentos de la red, clima, longitud, condición inicial, curvas de deterioro, mantenimientos tipo, período de análisis, tasa de descuento, coste de cada mantenimiento y emisiones resultantes de cada mantenimiento. Posteriormente, establecen las restricciones, las cuales son: presupuesto disponible y condición mínima del pavimento. A partir de este punto construyen funciones objetivo que buscan maximizar la efectividad a largo plazo (LTE/ long time effectiveness), medida en función del indicador pci/años, explicado en el apartado 2.2.2.2. y minimizar las emisiones de GHG (greenhouse gas) generadas.

$$\max f_1(\mathbf{x}) = \max LTE = \max \sum_{n=1}^N \int_{t=0}^T (CI_n(t) - CI_{min,n}) dt$$

$$\min f_2(\mathbf{x}) = \min \sum_{n=1}^N (GHG)_n$$

Fig. 10.- Funciones objetivo propuestas por Torres-Machi et al. (2017)

Agregando las restricciones de que el presupuesto a utilizar no puede ser mayor al disponible y que la condición no puede ser menor al umbral mínimo establecido, el resultado, es una frontera de pareto con diferentes soluciones dominantes, de las cuales se puede elegir una.

El caso de estudio es una red vial ubicada en Santiago, Chile. La red de Santiago, se conforma de 810km de longitud, de ella se ha seleccionado una muestra de 10km conformados por 20 secciones diferentes. Los resultados mostraron que de 525 soluciones potenciales, solamente un 5% se acoplaban a las restricciones establecidas. De ellas, se seleccionó para su estudio a detalle 3 soluciones: La solución con la más alta efectividad, la solución con las mas bajas emisiones generadas y la solución con la distancia euclidea normalizada más cercana al punto considerado ideal.

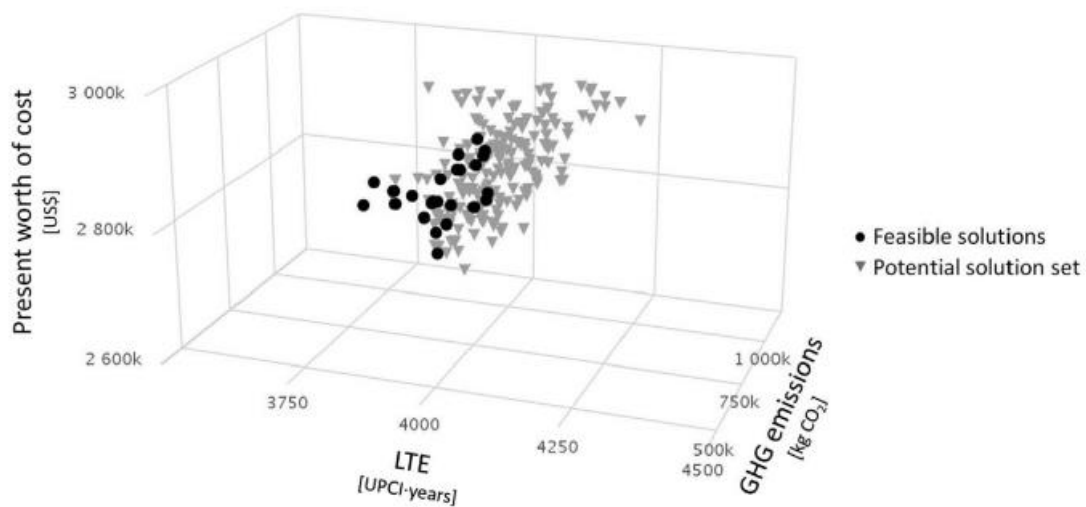


Fig. 11.- Conjunto de soluciones óptimas obtenidas por (Torres-Machi et al. 2017)

Los autores concluyen con que, al utilizar la herramienta, se consigue con presupuestos similares un incremento del 22% en la efectividad del tratamiento y un 12% de reducciones de emisiones de gases GHG a la atmósfera.

Meneses and Ferreira (2015)

Los autores en mención desarrollan una herramienta de optimización similar a la propuesta anteriormente. Los autores alimentan la herramienta con los siguientes parámetros: período de análisis, tasa de descuento, áreas y volúmenes, calidad estructural de los pavimentos, modelos de deterioro, costos de mantenimientos, modelos de costos de los usuarios, modelo de valor residual de la red vial, umbral mínimo de condición y presupuesto anual.

A partir de ellos proponen una función que busca minimizar los costes de mantenimiento y rehabilitación, y maximizar el valor residual de la red de pavimentos. Como restricciones consideran: mantener el umbral mínimo de condición y no exceder el presupuesto anual. Los resultados obtenidos son un plan de rehabilitación y mantenimiento, un reporte de costos y un reporte de calidad funcional y estructural de los pavimentos.

La herramienta fue aplicada a la red vial de “The Estradas, Portugal”, la misma que cuenta con una longitud de 14.500 km. La muestra seleccionada fue el distrito “Castero Blanco”, cuya red vial se compone de 590km de longitud en el cual se encuentran 32 secciones diferentes de pavimentos. Los resultados obtenidos fue una frontera de pareto con un punto ideal, mostrado en la siguiente figura

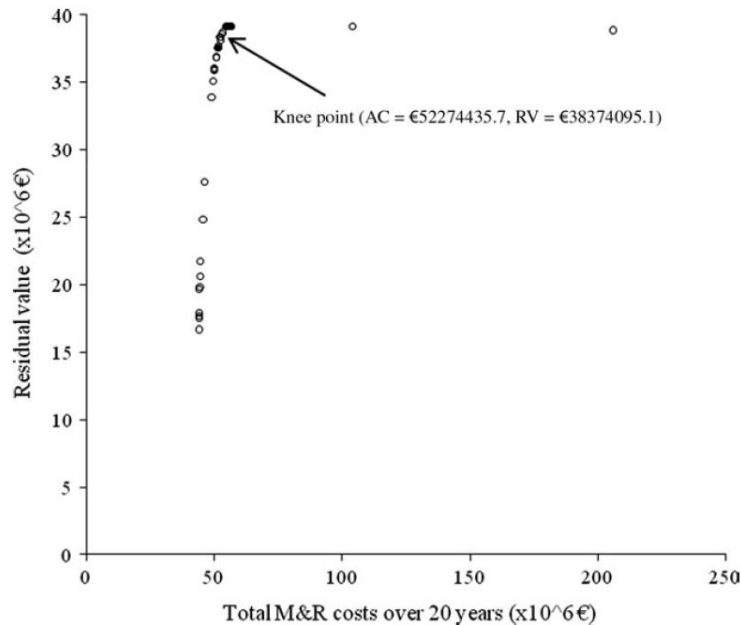


Fig. 12.- Gráfica de soluciones óptimas encontradas (Meneses and Ferreira 2015)

Del trabajo y la aplicación a la muestra en mención, concluye que el resultado óptimo se da cuando se asigna un peso de 81% a la minimización del coste y un 19% a la maximización del valor residual de la red vial.

Z. Wu, Flintsch, and Asce (2009)

En este caso, los autores proponen una optimización multiobjetivo utilizando una metodología de aproximación y restricciones de oportunidad, siguiendo un flujo denominado “de abajo hacia arriba (bottom-up” flow)”. Para su efecto, primero generan un conjunto de soluciones óptimas y luego seleccionan de entre ellas a la que se considere satisfactoria o aceptable.

El flujo de trabajo de resolución del problema de optimización de gestión de mantenimiento de pavimentos propuesto consta de 4 pasos consecutivos: definición de función objetivo y restricciones; reformulación de restricciones estocásticas; generación de soluciones óptimas y finalmente la elección de la solución considerada satisfactoria o aceptable.

El caso de estudio seleccionado fue una red vial secundaria en Virginia, USA, con una longitud total de 8000 km. Se consideró 4 posibles tratamientos para la rehabilitación y mantenimiento. La función objetivo buscaba maximizar el nivel de servicio de la red en estudio y minimizar el costo de rehabilitación y mantenimiento. Las restricciones consideradas fueron:

- No superar un presupuesto anual definido por funciones probabilísticas.
- Mantener menos del 10% de la red vial por debajo de un umbral de condición determinado.
- Alcanzar un nivel de servicio al año horizonte no menor al del año cero.

- No permitir que más de la cuarta parte de la red vial reciba tratamientos cada año.
- No permitir que más del 15% de la red vial reciba mantenimiento de carácter preventivo cada año.

Las soluciones óptimas del caso de estudio fueron representadas en la siguiente gráfica.

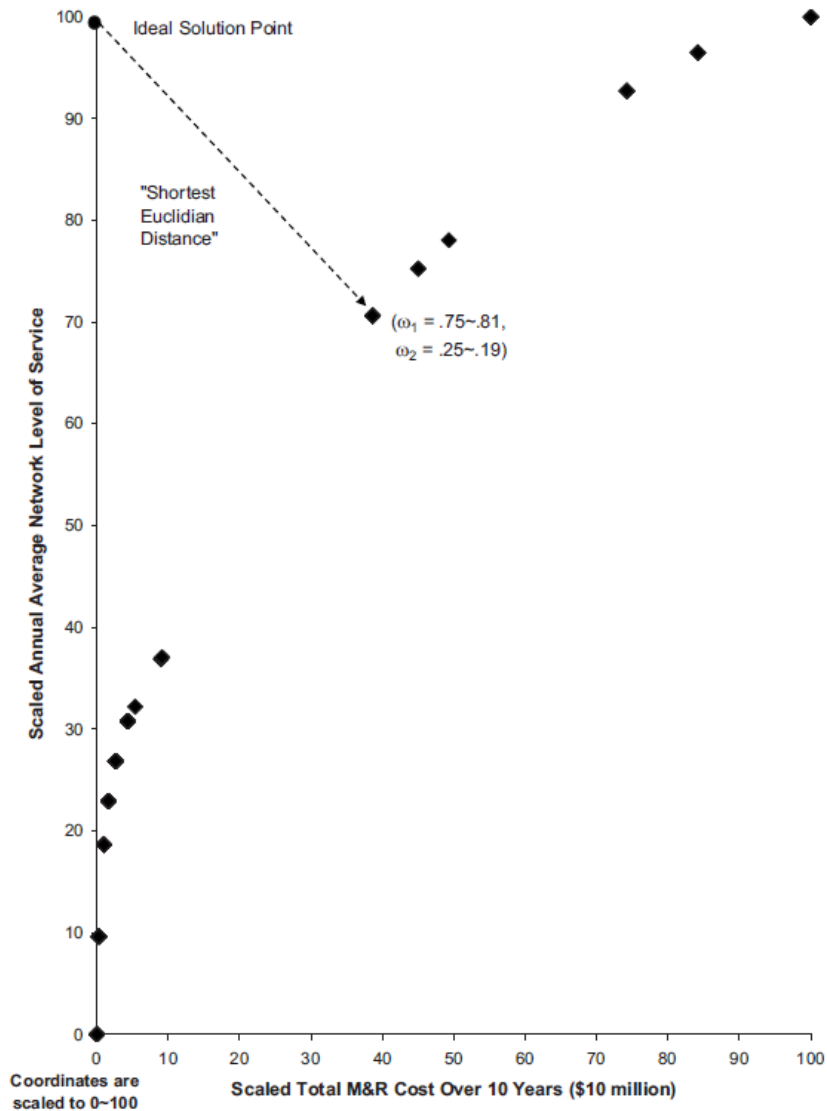


Fig. 13.- Gráfica de soluciones óptimas encontradas por (Z. Wu, Flintsch, and Asce 2009)

En este caso, los autores encuentran la solución óptima al asignar pesos entre 75% a 81% al objetivo de maximizar el nivel de servicio de la red vial y pesos entre 25% a 19% al objetivo de disminuir el coste.

3. PROPUESTA DE IMPLEMENTACIÓN DE UNA TOMA DE DECISIONES PARA LA GESTIÓN DEL MANTENIMIENTO DE PAVIMENTOS EN LA CIUDAD DE VALENCIA

3.1. OBJETIVOS Y POLÍTICAS

Como se ha comentado en el apartado 2.1.3. del presente trabajo, los objetivos y las políticas establecen el norte de un sistema de gestión de pavimentos y por consiguiente de todas y cada una de las herramientas que conforman el mismo.

Es por esto que, en el presente apartado, se describen los objetivo y políticas a utilizar en la herramienta de toma de decisiones para la gestión del mantenimiento de pavimentos.

El objetivo principal que perseguirá la herramienta será el de conseguir el mayor beneficio a largo plazo para dado un coste para la agencia gestora. A esto se añade que el cumplimiento del objetivo estará sujeto a políticas sostenibles. Para ello, se procurará utilizar criterios que consideren el confort del usuario, daños ambientales, molestias generadas a la sociedad e infraestructura cercana. Otra de las políticas consideradas será tener en cuenta un presupuesto anual destinado al mantenimiento y reparación de pavimentos. Asimismo, se deberá establecer un valor mínimo anual a invertir.

3.2. ESTRATEGIA

Posterior al análisis de las estrategias planteadas en anteriores investigaciones, conforme a lo señalado en el numeral 2.5., se plantea la estrategia a utilizar en el desarrollo de la herramienta de toma de decisiones. Todas las estrategias revisadas en el apartado 2.5, tratan el problema como una optimización multiobjetivo, haciendo de la resolución una herramienta compleja. A esto se suma que, en el caso de querer formular el problema como una optimización de los criterios seleccionados, la complejidad sería aún mayor. Una herramienta de tal complejidad, no sería amigable con los decisores y gestores de una red vial a todo nivel jerárquico.

Es por lo anteriormente señalado que, en el trabajo a desarrollar, se propone resolver el problema como una toma de decisiones sencilla, manejable y fácil de entender por los gestores y decisores de las redes viales de ayuntamientos y comunidades autónomas. Así mismo, la propuesta se basa en conseguir una herramienta que sea fácil de adaptar y/o calibrar a cualquier red vial.

En cuanto al método a utilizar; se pretende efectuar la toma de decisiones con información completa, tomada de fuentes fiables. Bajo esta premisa, se descarta la utilización de toma de decisiones mediante métodos de superación. Los pesos de los criterios serán determinados de manera iterativa en el desarrollo de la herramienta con el fin de maximizar los objetivos a largo plazo, por lo que se prescinde de un método que ayude a hacerlo. Es por esto que se descarta los métodos de comparación por pares. Aunque se podrían determinar las distancias hacia las mejores y peores soluciones, la determinación de las mismas resultaría complejo. La herramienta de toma de decisiones está pensada para ser utilizada de manera sencilla y práctica por los gestores y decisores, motivo por el cual se considera que utilizar métodos basados en distancia no sería la mejor opción.

Por lo anteriormente señalado, la herramienta será desarrollada en base a métodos de puntuación directa. De esta manera, se puntuará cada una de las alternativas, estableciendo un ranking de prioridad de mantenimiento. Para ello se utilizará la metodología SAW por su practicidad.

Se utilizarán también funciones de valor puesto que, al pretender incluir criterios sostenibles, se puede tornar necesario la utilización de funciones que puntúen el nivel de satisfacción de una alternativa con respecto a un criterio. A esto se suma la necesidad de normalizar los valores obtenidos al evaluar cada criterio en cada una de las alternativas, llevándolos a valores entre 0 y 1.

En base a todo lo descrito en el apartado 2.2, se procederá a analizar en primera instancia la metodología de evaluación económica financiera más conveniente para **la toma de decisiones a largo plazo**. Para ello, se presenta a continuación un cuadro resumen de las metodologías anteriormente mencionadas.

	Ventajas	Desventajas	Metodología Seleccionada
Análisis Coste Beneficio	<p>Considera tanto costes directos como indirectos.</p> <p>Útil para evaluar proyectos de manera integral (Diseño, Construcción, Operación, Cierre).</p>	<p>Complejidad al identificar costes y beneficios indirectos.</p> <p>Complejidad al monetizar costes y beneficios indirectos.</p>	
Análisis de Coste de Ciclo de Vida (LCCA)	<p>Ideal para evaluar activos en un período específico mientras cumple con trabajos de rehabilitación y mantenimiento necesarios.</p> <p>Considera el valor residual del activo al final del período de análisis.</p>	<p>No considera costes indirectos</p>	X

Tabla 9.- Resumen de metodologías de evaluación económica – financiera.

La selección de la metodología LCCA se fundamenta en que la misma es ideal para evaluar activos mientras se cumplen con los trabajos de rehabilitación y mantenimiento necesarios. Se basa también en que la misma considera un valor residual al final del período de análisis, de manera que se podrá cuantificar el incremento de valor de la red vial tras implementar la herramienta de toma de decisiones. Por otro lado, se descarta el análisis coste beneficio puesto que se analizará una red vial existente y operativa, es decir únicamente la fase de operación.

En cuanto al indicador a utilizar para comparar los distintos escenarios, se ha decidido utilizar el “beneficio-coste”, puesto que es el que se alinea al objetivo establecido. Tal como se señala en el apartado 2.2.1.2.3., este indicador representa para el sector público lo que un estado de pérdida y ganancia representa para una empresa privada.

En cuanto a los costes y beneficios a utilizar para el análisis se presenta el siguiente cuadro resumen en base a los anteriormente mencionados.

Costes y Beneficios utilizados en LCCA

	Seleccionados	Observación
Agencia gestora		
Coste inicial	X	Se utilizará el coste de actuaciones en el año 0
Costes de futuros mantenimientos	X	Se utilizará los costes futuros dentro del período de análisis
Costes Administrativos		Descartado en base a que será el mismo en cualquier caso
Incremento de Valor de la red vial	X	Se propondrá una metodología para cuantificar el valor de la red vial al final del período de análisis.
Efecto en los usuarios		
Coste de accidentalidad	+	Descartado del análisis LCCA, sin embargo, será incluido como criterio en la toma de decisiones, es decir será considerado en el análisis a corto plazo (año a año).
Coste de Tiempo de viaje		Por tratarse de una red vial existente, los ahorros en tiempo de viaje debido a trabajos de mantenimiento serán mínimos. Dado que habría que calcular los trayectos alternativos y estos varía mucho según el caso, se descarta.
Coste operación vehicular		Las variaciones de coste vehicular según el estado de la infraestructura no son significativas. Influye más las retenciones, semáforos, etc. Por tal motivo, se descarta su utilización.
Externalidades		
Contaminación del aire/Emissiones de CO2	+	Descartado del análisis LCCA, sin embargo, será incluido como criterio en la toma de decisiones, es decir en el análisis a corto plazo (año a año).
Contaminación de fuentes de agua		Puesto que los trabajos de mantenimiento analizados serán en una red vial urbana, se descarta afecciones significativas a fuentes de agua.
Ruido generado		Por tratarse de mantenimientos en una red vial urbana, cualquiera de las actuaciones seleccionadas generará afecciones de ruido. Por lo anteriormente mencionado, las diferencias no serán significativas, lo que descarta la utilización del mismo.

Tabla 10.- Resumen de costos y beneficios a utilizar en la evaluación económica – financiera.

Tal como se indica en la tabla anterior, los costes a utilizar para evaluar económica y financieramente la conveniencia de implementar la herramienta de toma de decisiones serán: coste de actuación en el año 0, costes de actuaciones futuras dentro del período de análisis e incremento de valor residual de la red vial al final del período.

En cuanto a los criterios de carácter técnico ambiental y social utilizados en la toma de decisiones (corto plazo), se presenta la siguiente tabla análisis:

Criterios utilizados en la toma de decisiones de gestión de pavimentos		
	Seleccionados	Observación
Técnicos		
IRI (International Roughness Index)		Su metodología hace que la detección de daños se realice solamente cuando estos sean considerables, ignorando fisuras y daños de baja severidad, evitando tomar decisiones de manera anticipada. A esto se suma que, para su métrica se necesita equipos especializados según el nivel de precisión deseado. Por lo anteriormente señalado, se descarta su utilización.
PCI (Pavement Condition Index)	X	Indicador que, por su metodología de medición, detecta daños de baja severidad permitiendo realizar actuaciones tempranas. La recolección de datos en este indicador se torna sencilla, pudiendo realizarse con un recorrido tipo caminata, recorrido vehicular o métodos semiautomatizados. Por lo anteriormente señalado, será utilizado en el presente trabajo. Para su métrica se utilizarán imágenes satelitales. Se desarrollará un criterio que relacione el PCI con el confort brindado a los usuarios de la red vial.
UPCI (Urban Pavement Condition Index)		Descartado puesto que, aunque es un indicador desarrollado específicamente para vías urbanas, sus autores recomiendan definir índices de calidad en caso de adaptar el método a otro tipo de clima o red vial (Desarrollado en Chile).
Incremento en PCI (efectividad del tratamiento)	X	Se desarrollará un criterio que mida la eficiencia económica de las actuaciones en la red vial. Para ello se utilizará la efectividad de la actuación, considerando el incremento del PCI.
PCI/años (efectividad del tratamiento)		Descartado debido a la facilidad de cálculo que ofrece el indicador "incremento en PCI".
Ambientales		

Emisiones de CO2	X	Se desarrollará un criterio que mida la eficiencia ambiental de las actuaciones. Para ello se utilizará la cantidad de emisiones de CO2 generadas por cada actuación. Se relacionará esta cantidad con la cantidad de usuarios beneficiados y la eficiencia de la actuación (incremento en PCI)
Consumo Energético		Descartadas al ser indicadores relacionados de manera directa con la cantidad de emisiones de CO2 generadas.
consumo de combustible		
Consumo de agua		Descartados, al ser actuaciones realizadas en una red vial urbana, las diferencias no serán significativas.
generación de ruido		
Sociales		
Percepción de ciudadanos beneficiarios	X	Se desarrollará un indicador que mida de manera cualitativa el confort de los usuarios con respecto a cada una de las vías de la red vial. Para ello se utilizará el PCI, relacionando el confort con la condición del pavimento.
Proximidad a Infraestructura Social y Económica	X	Se desarrollará una metodología que permita medir de manera cuantitativa la proximidad de las vías a intervenir con respecto a infraestructura social y económica.
Seguridad del peatón		Descartado debido a que se torna difícil su valoración cuantitativa.
Impulso al turismo		Descartado puesto que en el indicador "proximidad a Infraestructura Social y Económica" incluye las zonas turísticas
Creación de empleo		Descartado puesto que se considera que no hay diferencias significativas entre las actuaciones.
Población beneficiaría	X	Criterio que estará inmerso en el cálculo de eficiencia económica y eficiencia ambiental de las actuaciones. A efectos prácticos, la población beneficiaría será tomada como la intensidad media diaria de tráfico presente en cada una de las vías.
Existencia de vías alternas		Descartado. Al tratarse de una red vial urbana, se cuenta con un gran número de vías alternas. Por lo tanto, resultaría bastante complejo predecir cuáles serán las vías alternas utilizadas por los usuarios.
Molestias Generadas	X	A pesar de ser un criterio que no ha sido considerado en trabajos previos, se propone su desarrollo. Con ello se estará incluyendo en la toma de decisiones las molestias generadas (tiempo de realización del mantenimiento), a los usuarios de la red vial producto de las actuaciones.

Tabla 11.- Criterios utilizados en la toma de decisiones para la gestión de mantenimiento de pavimentos.

En base a lo anteriormente señalado, el flujo de trabajo para el análisis a corto plazo para la toma de decisiones año a año y el análisis a largo plazo para la evaluación económica de los

resultados obtenidos con la herramienta de toma de decisiones sería el siguiente:

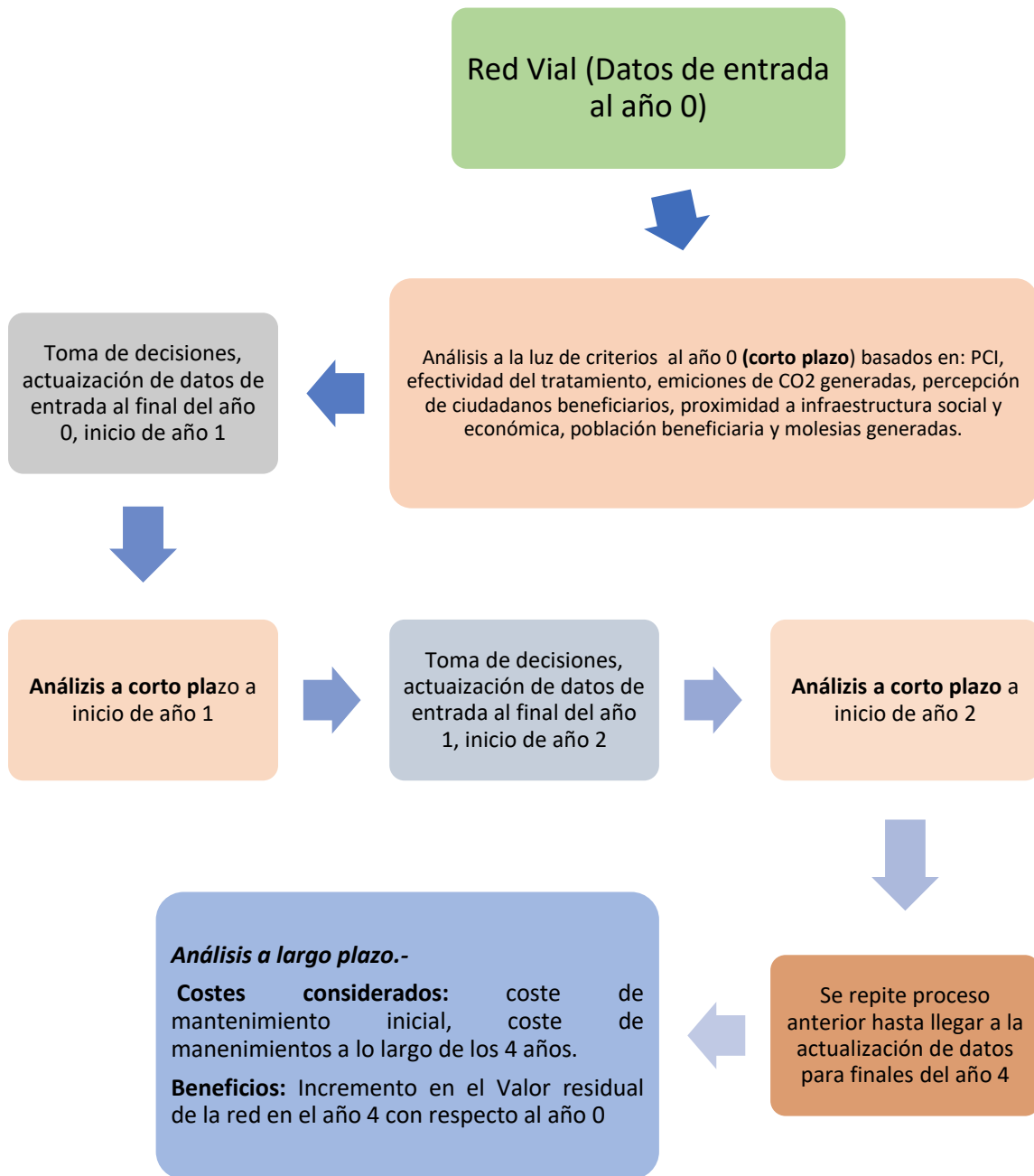


Fig. 14.- Flujo de trabajo de análisis a corto y largo plazo para el desarrollo de la herramienta de toma de decisiones.

Como se observa en el flujo de trabajo, la herramienta a desarrollar está pensada para la toma de decisiones año a año mediante un análisis a corto plazo. El análisis realizado a largo plazo es a efecto de evaluar la herramienta a través de los diferentes escenarios que propondrán la asignación de distintos pesos relativos a cada criterio

3.3. EVALUACIÓN DE ALTERNATIVAS: CRITERIOS

La búsqueda de una gestión de mantenimiento de pavimentos con el objetivo de generar el mayor beneficio posible invirtiendo la menor cantidad de dinero se realizará acorde a los siguientes criterios:

- CRITERIO 1: Confort de los usuarios
- CRITERIO 2: Coste de accidentalidad
- CRITERIO 3: Eficiencia económica de la actuación
- CRITERIO 4: Proximidad a infraestructura social y turística
- CRITERIO 5: Eficiencia ambiental de la actuación
- CRITERIO 6: Molestias generadas con la actuación

Los criterios mencionados, han sido establecidos acorde a las políticas de realizar una gestión sostenible del mantenimiento de los pavimentos. A continuación, se describe de manera detallada que se busca evaluar con cada uno de los criterios, así como la metodología utilizada para obtener una valoración de carácter cuantitativo.

3.3.1. CRITERIO 1: CONFORT DE LOS USUARIOS

Con este criterio se busca considerar y puntuar el confort brindado por cada una de las vías que conforman la red vial a los usuarios de la misma. Con el objetivo de evadir una valoración subjetiva, la valoración del confort se realizará en base a la condición del pavimento. Para ello se recurrirá a establecer valores entre 0 y 1 dependiendo del PCI (Pavement Condition Index) de cada una de las vías.

Acorde a lo expuesto en el apartado 2.2.2.3, según el rango en el que se encuentre el PCI de una vía, se puede clasificar su pavimento de la siguiente manera:

Rango	Clasificación
100-85	Excelente
85-70	Muy Bueno
70-55	Bueno
55-40	Regular
40-25	Malo
25-10	Muy Malo
10-0	Fallado

Tabla 12.- Rangos del PCI (tomada de (Díaz Cárdenas 2013))

En base a la clasificación, se propone una función de valor escalonada, definida de la siguiente manera:

<i>Función de Valor</i> $f(PCI)=$	
<i>PCI</i>	<i>f</i>
0 - 10	1,00
10 - 40	0,75
40 - 70	0,50
70 - 85	0,25
85 - 100	0,00

Tabla 13.- Función de Valor para el Criterio 1

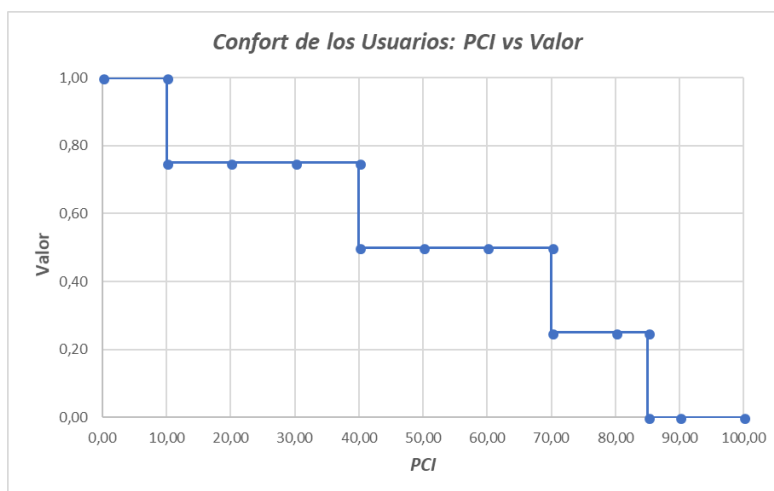


Fig. 15.- Función de Valor para el criterio 1

Con esta función de valor se busca priorizar en parte las actuaciones en vías cuyo pavimento se encuentra en mal estado, puesto que son estas vías las que generan malestar al usuario de la red vial. Utilizando este criterio y puntuándolo acorde a lo descrito, la toma de decisiones buscará el confort del usuario.

3.3.2. CRITERIO 2: COSTE DE ACCIDENTALIDAD

Tomando en cuenta las políticas establecidas, de buscar el mayor coste beneficio posible reduciendo daños a la sociedad y los usuarios, se ha decidido incluir en la toma de decisiones el presente criterio. Con ello se buscará reparar las vías que generen un mayor coste de accidentalidad al año.

Para su valoración, se utilizará la ecuación propuesta por (Forkenbrock and Foster 1997), misma que ha sido explicada en el apartado 2.2.1.3.2.

$$\frac{\text{Coste de Accidente}}{\text{Millones de VMT}}$$

$$= 1.587.580(0,994^{\text{PSR}}) (1,111^{\text{TOPCURV}}) (1,442^{\text{PASRES}}) (1,741^{\text{ADTLANE}}) (0,952^{\text{RIGHTSH}}) (0,936^{\text{LANES}}) (1,085^{\text{TOPGRAD}})$$

Mediante la ecuación, se puede obtener el coste anual de accidentalidad producido por cada vía. La variable más sensible de la ecuación es: ADTLANE (tráfico promedio diario expresado en miles de vehículos por carril). De tal manera, las vías que poseen una alta intensidad de tráfico y cuentan con dimensiones reducidas, tienen como resultado un alto coste de accidentalidad.

Además de considerar el coste de accidentalidad, con el criterio se estará priorizando aquellas vías con una mayor densidad de tráfico por carril.

3.3.3. CRITERIO 3: EFICIENCIA ECONÓMICA DE LA ACTUACIÓN

Para cumplir el principal objetivo de la herramienta, el cual apunta a conseguir la mayor ratio beneficio – coste, se utilizará como criterio la eficiencia económica de la actuación. Como se ha explicado en el apartado 2.2.2.5., una de las maneras de cuantificar la eficiencia de una actuación es el incremento del PCI (ΔPCI). Para ello, se determina la diferencia entre el PCI esperado posterior a la actuación (PCI_{post}) y el PCI antes de la actuación (PCI_i).

$$\Delta PCI = PCI_{post} - PCI_i$$

Para calcular la eficiencia económica de la actuación, se multiplicará el incremento del PCI (ΔPCI) por el número de usuarios beneficiados, que en este

caso sería la intensidad media diaria de tráfico (IMD). Seguidamente, se divide tal producto para el coste total de la actuación.

$$Ef Ec = \frac{\Delta PCI * IMD}{Coste Actuación}$$

El coste de actuación en este caso, resultará una variable sensible. Suponiendo que se compara dos vías (A y B) de dimensiones e IMD relativamente similares, necesitando la vía A un mantenimiento rutinario de bajo coste y la B una reconstrucción cuyo coste es 400% superior al de A; la actuación en la vía A resultaría económicamente más eficiente que la vía B.

Por otro lado, suponiendo dos vías C y D con un PCI inicial y dimensiones similares, presentando la vía C el doble del IMD que la vía D. En este caso, resultará el doble de eficiente actuar en la vía C puesto que se beneficia al doble de usuarios con la misma inversión. En conclusión, cada vez que el coste de una actuación sea proporcionalmente más caro a la mejora de PCI ofrecida por la misma, será menos eficiente.

Puesto que el Criterio 1 prioriza las vías cuyo pavimento se encuentra en peores condiciones (reconstrucción), con el Criterio 3 se pretende equilibrar la toma de decisiones, priorizando las actuaciones económicamente más eficientes. Es decir, se priorizará de manera general los mantenimientos rutinarios.

Así mismo, servirá para, de entre dos actuaciones que buscan reparar un pavimento fallido (alto puntaje en Criterio 1), priorizar aquella que beneficie a la mayor cantidad de usuarios.

3.3.4. CRITERIO 4: PROXIMIDAD A INFRAESTRUCTURA SOCIAL Y TURÍSTICA

Manteniendo el enfoque sostenible de la toma de decisiones, se propone la utilización del presente criterio: "Proximidad a Infraestructura Social y Turística". El criterio pretende priorizar las actuaciones en aquellas vías que, aunque resulten económicamente ineficiente, se torna necesario debido a su proximidad a infraestructura de desarrollo social y turístico.

El criterio busca también puntuar las actuaciones en las vías cercanas a zonas que los gestores consideren de alta influencia política. Para ello se propone definir en primera instancia el listado de infraestructuras sociales, turísticas, etc. Posteriormente, se deben clasificar dichas infraestructuras acorde a su nivel de importancia, la presente propuesta establece dos niveles de importancia; siendo el nivel 2 el de importancia máxima.

Una vez definidas y clasificadas las infraestructuras según su nivel de importancia, se debe determinar cuáles son las vías próximas a las mismas. Para ello se considerará como “cercana” aquellas vías que se encuentren total o parcialmente dentro de las circunferencias de 500 metros de radio con centro en cada una de las infraestructuras. De esta manera, se clasificará las vías en función del tipo de infraestructura que se encuentren cercanas. Por lo tanto, cada vía se clasificará de tres maneras posibles: cercana a infraestructura nivel 2 (N2, N1, 0), cercana a infraestructura nivel 1 o no cercana a infraestructura.



Fig. 16.- Imagen ejemplo de propuesta de valoración de infraestructura cercana.

En la imagen anterior se puede observar un ejemplo de la propuesta. El Hospital casa de Salud Amistat (derecha) desde el cual se ha trazado una circunferencia color rojo, representa una infraestructura con importancia N2. Por otra parte, el campo de futbol “Mestalla” (izquierda) desde el cual se ha trazado una

circunferencia color azul, representa una infraestructura con importancia N1. Por lo tanto, la Av. Paseo Alameda (línea blanca izquierda) se encontraría cercana a una infraestructura N1 y la Av. Del Puerto (línea blanca derecha) cercana a una infraestructura N2.

Acorde a la clasificación en mención de las vías en estudio (N2, N1, N0), se asignará una puntuación entre 0 y 1 en función de la condición actual de cada una de ellas, utilizando el valor del pavement condition index (PCI). La asignación de dicha puntuación, estará definida por funciones de valor, una para cada nivel de importancia de infraestructura.

Las funciones de valor a construir deben ser decrecientes. El valor máximo (la unidad) deberá asignarse en todos los casos a aquellas vías con PCI cercano a 0 así como el valor mínimo (0) a aquellas vías que se encuentren en óptimas condiciones, es decir un PCI cercano a 100.

Es por ello que la construcción de las funciones de valor obedecerá a las ecuaciones descritas en el apartado 2.3.2. Con la finalidad de utilizar una ecuación sencilla en cuanto al número de términos, se utilizará la propuesta por (Sabatino, Frangopol, and Dong 2015):

$$V = \frac{1}{1 - e^{-\gamma}} \left[1 - e^{\frac{-\gamma(X_{max}-X)}{(X_{max}-X_{min})}} \right]$$

En donde: Xmax tomará el valor más alto posible del PCI, es decir 100. Xmin tomará el valor del peor valor posible del PCI, es decir 0. El valor de γ propuesto para la construcción de las funciones se detalla en la siguiente tabla:

Nivel de Importancia de la Infraestructura	Valor de γ	Ecuación a utilizar
N2	3,5	$V = \frac{1}{1 - e^{-3,5}} \left[1 - e^{\frac{-3,5(100-X)}{100}} \right]$

N1	$1(10)^{-9}$	$V = \frac{1}{1 - e^{-(10)^{-9}}} \left[1 - e^{\frac{-(10)^{-9}(100-X)}{100}} \right]$
N0	-3,5	$V = \frac{1}{1 - e^{3,5}} \left[1 - e^{\frac{3,5(100-X)}{100}} \right]$

Tabla 14.- Funciones de valor a utilizar en función de los niveles de importancia de la infraestructura

Obteniendo la siguiente gráfica:

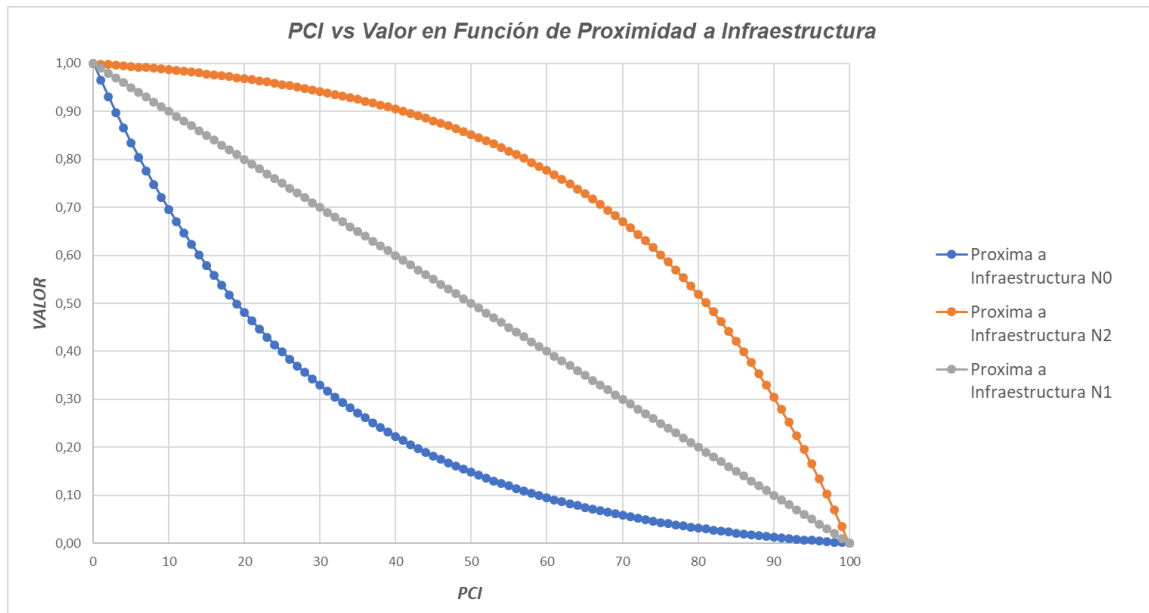


Fig. 17.- PCI vs Valor en función de proximidad a Infraestructuras de importancia N2, N1 y N0 (fuente: el autor)

Así, la valoración cuantitativa de las alternativas con respecto al presente criterio, se obtienen primero identificando la función utilizar para luego reemplazar la variable "X" por la condición actual de la misma, es decir su valor de PCI.

De esta manera, la función de valor N2, asigna un puntaje alto (entre 0,85 y 0,70) incluso si las condiciones del pavimento son "buenas", es decir cuentan con un PCI con valores entre 55 y 70. Eso tendría como resultado que el método priorice en cierta manera, actuaciones en las vías aledañas a la infraestructura de mayor importancia, incluso si las actuaciones necesarias son menores debido a la buena condición de la vía.

Por otro lado, la función N1, asigna valores similares (entre 0,85 y 0,70) solamente si las condiciones del pavimento son "malas" o "muy malas", es decir cuentan con un PCI entre 15 y 30. Sin embargo, asigna puntajes medios (0,30 a

0,50) en caso de que las vías se encuentren aún en buen estado (PCI entre 55 y 70).

En cambio, la función N0, correspondiente a aquellas vías que no se encuentran cercanas a ningún tipo de infraestructura considerada importante, asigna puntajes altos (0,85 y 0,75) solamente si se cuenta con un pavimento fallado (PCI entre 0 y 10).

Al igual que el sistema de gestión de pavimentos y todas sus herramientas en general, la presente herramienta de toma de decisiones puede ser modificada y/o adaptada a las necesidades de la agencia gestora. Por lo tanto, para su adaptación se pueden incrementar o reducir el número de funciones de valor en base a los niveles de importancia definidos. Se puede también modificar o reformular las funciones de valor propuestas de la manera que los gestores creen convenientes.

3.3.5. CRITERIO 5: EFICIENCIA AMBIENTAL DE LA ACTUACIÓN

En el apartado 2.2., se señala que, en busca de cumplir las políticas de carácter sostenible, se desarrollará un criterio que mida la eficiencia ambiental de las actuaciones, utilizando la cantidad de emisiones de CO2 generadas por cada actuación.

Al igual que con el criterio 3, se considerará el número de usuarios beneficiados tras generar dichas emisiones (IMD) así como la mejora en la condición del pavimento obtenida (Δ PCI). La eficiencia se calculará multiplicando las dos variables anteriormente mencionadas y dividiendo su resultado para los kilogramos de CO2 emitidos con la actuación.

$$Ef\ Amb = \frac{\Delta PCI * IMD}{Kg\ de\ CO2}$$

El razonamiento de la ecuación es igual al del criterio 3. En este caso, la variable mas sensible será la cantidad de emisiones generadas. El criterio pretende priorizar aquellas actuaciones ambientalmente eficientes y descartar aquellas

que ofrecen una pobre mejora de la condición, beneficiando a pocos usuarios y generando grandes cantidades de CO2.

3.3.6. CRITERIO 6: MOLESTIAS GENERADAS CON LA ACTUACIÓN

Este criterio busca incluir en la toma de decisiones las molestias generadas a los usuarios al realizar los trabajos de mantenimiento y reparación. Para su valoración, se hará una estimación de la duración de las actuaciones a realizar en las vías en análisis.

Con el criterio, se busca priorizar aquellos mantenimientos con menor duración, aquellos que generen molestias mínimas a los usuarios y a la sociedad en general.

3.4. PRIORIZACIÓN DE ALTERNATIVAS: TOMA DE DECISIONES.

La herramienta de toma de decisiones propuesta, se basa en analizar las posibles alternativas a la luz de los 6 criterios propuestos en el apartado anterior. El análisis consistirá en asignar una puntuación a cada alternativa, estableciendo así un ranking de prioridad. Para ello, se utilizará el método SAW.

SAW

llamado así por sus siglas en inglés (Simple Additive Weighting), es el método más antiguo y uno de los más utilizados en la resolución de problemas de toma de decisiones multicriterio (Hwang, Yoon 1981). El método opera obteniendo la suma para cada alternativa (S_j) del producto de cada criterio normalizado (r_{ij}) por su peso relativo (w_i).

$$S_j = \sum_{i=1}^m W_i * r_{ij} = \sum_{i=1}^m V_{ij}$$

Una vez que se obtiene la sumatoria para todas y cada una de las alternativas, se establece un orden descendente, el cual establece el ranking. La asignación

del peso relativo de cada criterio es asignado de manera directa por el expertos (Penadés 2017). Con respecto a lo señalado, merece comentar que, la asignación de pesos realizada por expertos es muchas veces subjetiva. Esta asignación debería basarse en la contribución de cada objetivo al fin último. Es por esto que el presente trabajo basa su estudio en un análisis de sensibilidad de los pesos para maximizar los objetivos a largo plazo.

En cuanto a la normalización de los criterios de cada alternativa (r_{ij}'), Hwang, Yoon; Zavadskas (1981; 1996), establecen que se debe realizar mediante el cociente del valor del criterio de dicha alternativa (r_{ij}) entre el máximo valor del criterio para todas las alternativas ($\max_j r_{ij}$).

$$r_{ij}' = \frac{r_{ij}}{\max_j r_{ij}}$$

Penadés (2017) señala que el método tiene dos limitaciones. La primera es que para normalizar los criterios que se desea minimizar, se realiza una conversión de esta minimización por una maximización. De esta manera, la normalización en este caso (r_{ij}'), se realiza mediante el cociente del valor mínimo del criterio para todas las alternativas ($\min_j r_{ij}$) entre el valor del criterio de dicha alternativa (r_{ij}).

$$r_{ij}' = \frac{\min_j r_{ij}}{r_{ij}}$$

La segunda limitación se da cuando se desea normalizar los criterios cuyos valores sean negativos. En este caso, se debe realizar una conversión a valores positivos. Podvezko (2007) propone una ecuación en donde la normalización de un criterio para una alternativa (r_{ij}') se realiza mediante la suma del valor del criterio de dicha alternativa (r_{ij}) más el mínimo valor de ese criterio entre todas las alternativas y la unidad.

$$r_{ij}' = r_{ij} + |\min_j r_{ij}| + 1$$

El método opera obteniendo la suma para cada alternativa (Sj) del producto de cada criterio normalizado (rij') por su peso relativo (wi). Las alternativas (j) estarán constituidas por las vías que conforman la red vial en estudio. Cada una de ellas, por su condición y características particulares necesitará un tipo específico de actuación en cuanto a rehabilitación y mantenimiento se refiere. Es por ello que cada alternativa acarrea un coste de actuación.

Considerando que, por lo general, las agencias gestoras de redes viales cuentan con un determinado presupuesto para inversión en rehabilitación y mantenimiento. El ranking de prioridad, definirá la asignación de presupuesto, es decir, cuantas y cuáles de las alternativas recibirán una actuación.

A efectos de brindar una visión más amplia de la ecuación anterior, se presenta la siguiente matriz:

Pesos Relativos (wi):	w1	w2	w3	w4	w5	w6	Puntaje (Sj)	Coste de Intervención (Cj)
Criterio i:	CRITERIO	CRITERIO	CRITERIO	CRITERIO	CRITERIO	CRITERIO		
Alternativa/Vía a Intervenir (j)	1	2	3	4	5	6		
1	r11	r21	r31	r41	r51	r61	$S1=(r11*w1+r21*w2+r31*w3+r41*w4+r51*w5+r61*w6)$	C1
2	r12	r22	r32	r42	r52	r62	$S2=(r12*w1+r22*w2+r32*w3+r42*w4+r52*w5+r62*w6)$	C2
3	r13	r23	r33	r43	r53	r63	$S3=(r13*w1+r23*w2+r33*w3+r43*w4+r53*w5+r63*w6)$	C3
4	r14	r24	r34	r44	r54	r64	$S4=(r14*w1+r24*w2+r34*w3+r44*w4+r54*w5+r64*w6)$	C4
5	r15	r25	r35	r45	r55	r65	$S5=(r15*w1+r25*w2+r35*w3+r45*w4+r55*w5+r65*w6)$	C5
n	r1n	r2n	r3n	r4n	r5n	r6n	$Sn=(r1n*w1+r2n*w2+r3n*w3+r4n*w4+r5n*w5+r6n*w6)$	Cn

Tabla 15.- Tabla resumen de la metodología de valoración propuesta utilizando el método SAW

En cuanto a la puntuación normalizada de cada criterio, la metodología a utilizar se explica a continuación:

En cuanto a la puntuación de las alternativas con respecto a los **criterios 1 y 4**, (Confort de los usuarios y Proximidad a infraestructura social y turística), la misma no necesitará ser normalizada. Las metodologías de valoración de los

criterios en mención, se basan en funciones de valor, puntuando las alternativas con valores entre 0 y 1, prescindiendo de una normalización.

Por otro lado, los **criterios 2,3 y 5** (Coste de accidentalidad, Eficiencia económica de la actuación y Eficiencia ambiental de actuación) se evalúan con valores de rango desconocido. Es por esto que se torna necesario normalizar, es decir, llevar los valores a un rango entre 0 y 1. En cada uno de estos criterios, la mejor alternativa (puntaje=1) será quien presente el mayor valor, y, la peor (puntaje=0) quien presente el menor. Es por esto, que se torna necesario construir una función de valor lineal, que asigne valor cero al mínimo y valor 1 al máximo. La ecuación a utilizar será la siguiente:

$$rij = \frac{X - Xmin}{Xmax - Xmin}$$

En donde:

rij = Puntaje normalizado.

X = Valor de la alternativa obtenido acorde a la metodología de evaluación propuesta.

Xmax = Valor máximo obtenido de entre todas las alternativas acorde a la metodología de evaluación propuesta.

Xmin = Valor mínimo obtenido de entre todas las alternativas acorde a la metodología de evaluación propuesta.

El criterio 6 (Molestias generadas) se asimila a los criterios 2, 3 y 5, en cuanto a que no se puede establecer un rango de valores. Sin embargo, se diferencia en que, la alternativa con el valor más bajo, representa aquella alternativa que genera menos molestias a los usuarios de la red vial, por ende, la que debe tener el puntaje más alto, 1. Al contrario, la alternativa con el valor más alto, generará más molestias, debiendo puntuarse con el valor de 0. En base a las premisas anteriores, la ecuación a utilizar para normalizar el criterio 6 será la siguiente:

$$rij = 1 - \frac{X - Xmin}{Xmax - Xmin}$$

En cuanto al peso relativo de cada criterio w_i , el presente trabajo se centra en analizar los valores a asignar acorde a su contribución a la consecución del objetivo propuesto, generar la mayor ratio beneficio – coste. Para ello, se aplicará la metodología propuesta a una muestra de la red vial de la Ciudad de Valencia, España. Posteriormente, se realizará un análisis de sensibilidad, planteando varios escenarios, variando los pesos relativos de cada uno de los criterios. Cada escenario será analizado en un horizonte de 4 años, asumiendo como hipótesis un presupuesto anual destinado a la muestra en estudio. Se calculará el VAN y el ratio beneficio – coste de cada uno de los escenarios planteados, de manera que finalmente, se pueda concluir seleccionando el escenario óptimo, estableciendo los pesos relativos más convenientes.

4. APLICACIÓN DEL MÉTODO A LA CIUDAD DE VALENCIA

Una vez se ha definido la metodología de operación y el flujo de trabajo de la herramienta de toma de decisiones, se procederá a aplicarla a la red vial urbana de Valencia, España.



Fig. 18.- Fotografía satelital de la ciudad de Valencia (Fuente: Google Earth)

La red vial urbana de Valencia, posee aproximadamente 1.100 km de longitud, considerando calzadas y aceras. En cuanto a superficie, se estima veinte millones de metros cuadrados (Ayuntamiento de Valencia 2016). Se estima que

la superficie de los firmes de la red corresponde a catorce millones de metros cuadrados, siendo el resto (seis millones) correspondiente a aceras y zonas peatonales.

4.1. GESTIÓN DEL MANTENIMIENTO DE PAVIMENTOS EN LA CIUDAD DE VALENCIA

La gestión del mantenimiento de la red viaria urbana de la ciudad de Valencia desde el año 2009 y hasta la actualidad, viene definida de acuerdo a los términos y condiciones recogidos en el CONTRATO DE OBRAS DE REPARACIÓN, RENOVACIÓN Y MANTENIMIENTO DE LOS PAVIMENTOS DE LAS CALLES Y CAMINOS DE LA CIUDAD DE VALENCIA (Exp.: 121-O/08). El Ayuntamiento de Valencia en el año 2009 adjudicó dicho contrato mediante procedimiento abierto, al amparo de lo dispuesto en el artículo 41 de la LEY 30/2007, de 30 de Octubre, de Contratos del Sector Público, a la empresa constructora PAVASAL S.A por un importe mínimo de consignación anual de 2.000.000 € (IVA incluido) para un periodo de 4 años prorrogables en 4 periodos de 2 años (Guaita, Serra 2016).

Aunque el importe mínimo se limita a 2.000.000 € de euros anuales, el importe máximo es definido en base al presupuesto anual del Ayuntamiento. (Guaita, Serra 2016) indican que “en los presupuestos aprobados para el ejercicio 2016, el Ayuntamiento de Valencia destinará 3,2 millones de forma directa al mantenimiento de pavimentos, según fuentes municipales. Adicionalmente, existe una partida presupuestaria destinada a rehabilitación de pavimentos que tiene un valor de 2,5 millones de euros que deben sumarse a los anteriormente mencionados. Por tanto, en el próximo año (2017), Valencia destinará cerca de 5,7 millones del presupuesto a mantenimiento del viario público. Aunque la información data de los años 2016 y 2017 respectivamente, sirve como referencia para tomar como hipótesis un presupuesto anual en la muestra a analizar.

En este punto se torna importante conocer la clasificación de sus vías en relación a la intensidad de tráfico recibida. (Guaita, Serra 2016), basados en los planos

de intensidades de tráfico de que elabora el Servicio de transportes y circulación del Ayuntamiento de Valencia para la determinación de los valores de la IMD, identifican la siguiente clasificación en función del tráfico pesado de cada vía:

Rango IMDp	Categoría de Tráfico
IMDp > 800	Tráfico muy Pesado (TMP)
800 > IMDp > 200	Tráfico Pesado (TP)
200 > IMDp > 50	Tráfico Medio (TM)
IMDp < 50	Tráfico Ligero (TL)

Tabla 16.- Clasificación de las vías según su intensidad de tráfico pesado (Tomada y adaptada de (Guaita, Serra 2016))

(Guaita, Serra 2016), en su investigación sobre la gestión de mantenimiento de pavimentos en la ciudad de Valencia, señalan también las actuaciones más comunes realizadas por la empresa encargada del mantenimiento de la red vial PAVASAL.

Categoría de tráfico	Tipo de actuación	Mantenimiento Habitual	Coste (Euros/m2)	Vida Util (años)	Aplicación de la medida
TMP	Preventiva	Aplicación de Slurry	1,21	2	PCI > 80
TMP	Correctiva	Fresado y reposición de firme	26,69	8	40<PCI<80
TMP		Reconstrucción de la sección típica de firme	69,32	20	PCI<40
TP	Preventiva	Aplicación de Slurry	1,21	2	PCI > 81
TP	Correctiva	Fresado y reposición de firme	26,69	8	40<PCI<81
TP		Reconstrucción de la sección típica de firme	69,32	20	PCI<41
TMP	Preventiva	Aplicación de Slurry	1,21	2	PCI > 82
TMP	Correctiva	Fresado y reposición de firme	18,8	8	40<PCI<82
TMP		Reconstrucción de la sección típica de firme	58,83	20	PCI<42
TL	Preventiva	Aplicación de Slurry	1,21	2	PCI > 83
TL	Correctiva	Fresado y reposición de firme	1,17	8	40<PCI<83
TL		Reconstrucción de la sección típica de firme	72,01	20	PCI<43

Tabla 17.- Actuaciones típicas de rehabilitación y mantenimiento de pavimentos en la ciudad de Valencia (Tomada y adaptada de (Guaita, Serra 2016), Fuente: PAVASAL)

4.2. HIPÓTESIS PLANTEADAS

Una vez conocida la información más relevante en cuanto a la gestión del mantenimiento de pavimentos en la ciudad de Valencia, se torna necesario

plantear hipótesis antes de seleccionar la muestra para el caso de aplicación. En este apartado, se definirá: emisiones de CO2 generadas por cada una de las actuaciones típicas señaladas en la tabla 12, sus rendimientos de construcción, modelo de deterioro a utilizar y presupuesto anual destinado al mantenimiento de pavimentos.

4.2.1. EMISIONES DE CO2 GENERADAS

Una vez conocidas las actuaciones típicas de rehabilitación y mantenimiento utilizadas en la ciudad de Valencia, se torna necesario definir las emisiones unitarias de CO2 generadas por los mismos. En el apartado 2.2.3., se había señalado dos posibles métodos para cuantificar las emisiones: la herramienta “ICE (Inventory of Carbón and Energy) V2.0” desarrollada por (Hammond and Jones 2006) y la tabla de emisiones unitarias de CO2 producto de los tratamientos típicos de rehabilitación y mantenimiento de pavimentos utilizada por (Torres-Machí et al. 2015).

A efectos de simplicidad, se utilizarán los valores propuestos por los segundos autores, de manera que se tendría la siguiente tabla:

Categoría de tráfico	Tipo de actuación	Mantenimiento Habitual	Kg CO2/m2
TMP	Preventiva	Aplicación de Slurry	0,76
TMP	Correctiva	Fresado y reposición de firme	6,91
TMP		Reconstrucción de la sección típica de firme	13,11
TP	Preventiva	Aplicación de Slurry	0,76
TP	Correctiva	Fresado y reposición de firme	6,91
TP		Reconstrucción de la sección típica de firme	13,11
TMP	Preventiva	Aplicación de Slurry	0,76
TMP	Correctiva	Fresado y reposición de firme	6,91
TMP		Reconstrucción de la sección típica de firme	13,11
TL	Preventiva	Aplicación de Slurry	0,76
TL	Correctiva	Fresado y reposición de firme	6,91
TL		Reconstrucción de la sección típica de firme	13,11

Tabla 18.- Emisiones unitarias de CO2 generadas por las actuaciones típicas de rehabilitación y mantenimiento utilizadas en la ciudad de Valencia.

De esta manera, el cálculo de las emisiones generadas por cada una de las alternativas en la herramienta de toma de decisiones, estaría definida por la siguiente ecuación:

$$CO_2 \text{ (kg)} = L * a * \left(kg \frac{CO_2}{m^2} \right)$$

En donde:

CO₂ (kg) = Emisiones de CO₂ generadas por la alternativa expresadas en kilogramos.

L= Longitud de la vía a intervenir (alternativa)

a= Ancho promedio de la vía a intervenir (alternativa)

kg CO₂/m² = Kilogramos de CO₂ por metro cuadrado, tomados de la tabla 14.

4.2.2. RENDIMIENTOS DE CONSTRUCCIÓN DE LOS MANTENIMIENTOS TIPO

Los rendimientos de construcción de los mantenimientos tipo, han sido tomados utilizando la base de datos de análisis de precios unitarios de la empresa CADMECORP ASOCIADOS S.A. Los rendimientos a utilizar son los mostrados en la siguiente tabla:

<i>Categoría de tráfico</i>	<i>Tipo de actuación</i>	<i>Mantenimiento Habitual</i>	<i>Rendimiento (M/carril/día)</i>
TMP	Preventiva	Aplicación de Slurry	150
TMP	Correctiva	Fresado y reposición de firme	60
TMP		Reconstrucción de la sección típica de firme	25
TP	Preventiva	Aplicación de Slurry	150
TP	Correctiva	Fresado y reposición de firme	60
TP		Reconstrucción de la sección típica de firme	25
TMP	Preventiva	Aplicación de Slurry	150
TMP	Correctiva	Fresado y reposición de firme	60
TMP		Reconstrucción de la sección típica de firme	25
TL	Preventiva	Aplicación de Slurry	150
TL	Correctiva	Fresado y reposición de firme	60
TL		Reconstrucción de la sección típica de firme	25

Tabla 19.- Rendimientos promedio de las actuaciones.

Vale señalar que otra de las hipótesis tomadas para el análisis es que, cuando los trabajos de reparación se efectúen en vías de más de 4 carriles, el rendimiento será el doble debido a que los trabajos se efectuarían en dos frentes de obra.

A efectos de un mejor manejo de datos, se presenta la siguiente tabla resumen de las actuaciones tipo a considerar en el presente trabajo. En la tabla se presenta también la codificación utilizada para identificar cada una de las actuaciones.

Categoría de tráfico	Código	Tipo de actuación	Mantenimiento Habitual	Código	Coste (Euros/m²)	Aplicación de la medida	Emisiones Unitarias (Kg CO₂/m²)	Rendimiento (M/carril/día)
TMP	1	Preventiva	Aplicación de Slurry	1SLY	1,21	PCI > 80	0,76	150
TMP	1	Correctiva	Fresado y reposición de firme	1FR	26,69	40<PCI<80	6,91	60
TMP	1		Reconstrucción de la sección típica de firme	1RC	69,32	PCI<40	13,11	25
TP	2		Preventiva	Aplicación de Slurry	2SLY	1,21	PCI > 81	0,76
TP	2	Correctiva	Fresado y reposición de firme	2FR	26,69	40<PCI<81	6,91	60
TP	2		Reconstrucción de la sección típica de firme	2RC	69,32	PCI<41	13,11	25
TM	3		Preventiva	Aplicación de Slurry	3SLY	1,21	PCI > 82	0,76
TM	3	Correctiva	Fresado y reposición de firme	3FR	18,8	40<PCI<82	6,91	60
TM	3		Reconstrucción de la sección típica de firme	3RC	58,83	PCI<42	13,11	25
TL	4		Preventiva	Aplicación de Slurry	4SLY	1,21	PCI > 83	0,76
TL	4	Correctiva	Fresado y reposición de firme	4FR	1,17	40<PCI<83	6,91	60
TL	4		Reconstrucción de la sección típica de firme	4RC	72,01	PCI<43	13,11	25

Tabla 20.- tabla resumen de actuaciones tipo a considerar.

4.2.3. MODELO DE DETERIORO A UTILIZAR

Para definir el modelo de deterioro más adecuado, se procederá a graficar y analizar los modelos descritos en el apartado 2.4.2.

Con respecto al **Modelo de (George, Rajagopal, and Lim 1989)**, el cual depende a la intensidad media diaria de vehículos, se ha decidido construir 3 curvas considerando los volúmenes de tráfico siguientes:

- **IMD= 53.386** vehículos/día, tráfico correspondiente a la Av. Perez Galdós en el mes de mayo 2016. Composición de tráfico: 96% livianos, 4% pesados. (Ayuntamiento de Valencia).
- **IMD= 30.876** vehículos/día, tráfico correspondiente a la Av. Archiduque Carlos en el mes de mayo 2016. Composición de tráfico: 96% livianos, 4% pesados. (Ayuntamiento de Valencia).
- **IMD= 10.411** vehículos/día, tráfico correspondiente a la calle Uruguay en el mes de mayo 2016. Composición de tráfico: 90% livianos, 10% pesados. (Ayuntamiento de Valencia).

Para el cálculo del número de ejes equivalentes, ESALS, (AASHTO, 1993), recomienda tomar los siguientes factores de equivalencia: 0,0124 para vehículos livianos y 1,594 para vehículos pesados. Se asumirá que los pavimentos a analizar no han sido intervenidos, motivo por el cual los valores de las variables a, b y c serán tomados como: $a = 0,6349$, $b = 0,4203$ y $c = 2,7062$. De igual manera, se asume un número estructural (SNC) de 5 para la construcción de los modelos de deterioro.

Por otro lado, la construcción del modelo de deterioro propuesto por **(G. P. Muñoz 2017)**, supone la utilización de factores que consideren la incertidumbre. Para su efecto, se construirán 5 curvas considerando incertidumbres del 0%, 75%, 80%, 85%, y 99%.

En cuanto al modelo de (K. Wu 2015), al ser dependiente únicamente del tiempo, se construirá una sola curva para el análisis.

En base a lo señalado anteriormente, los modelos de deterioro mencionados proporcionan las siguientes curvas:

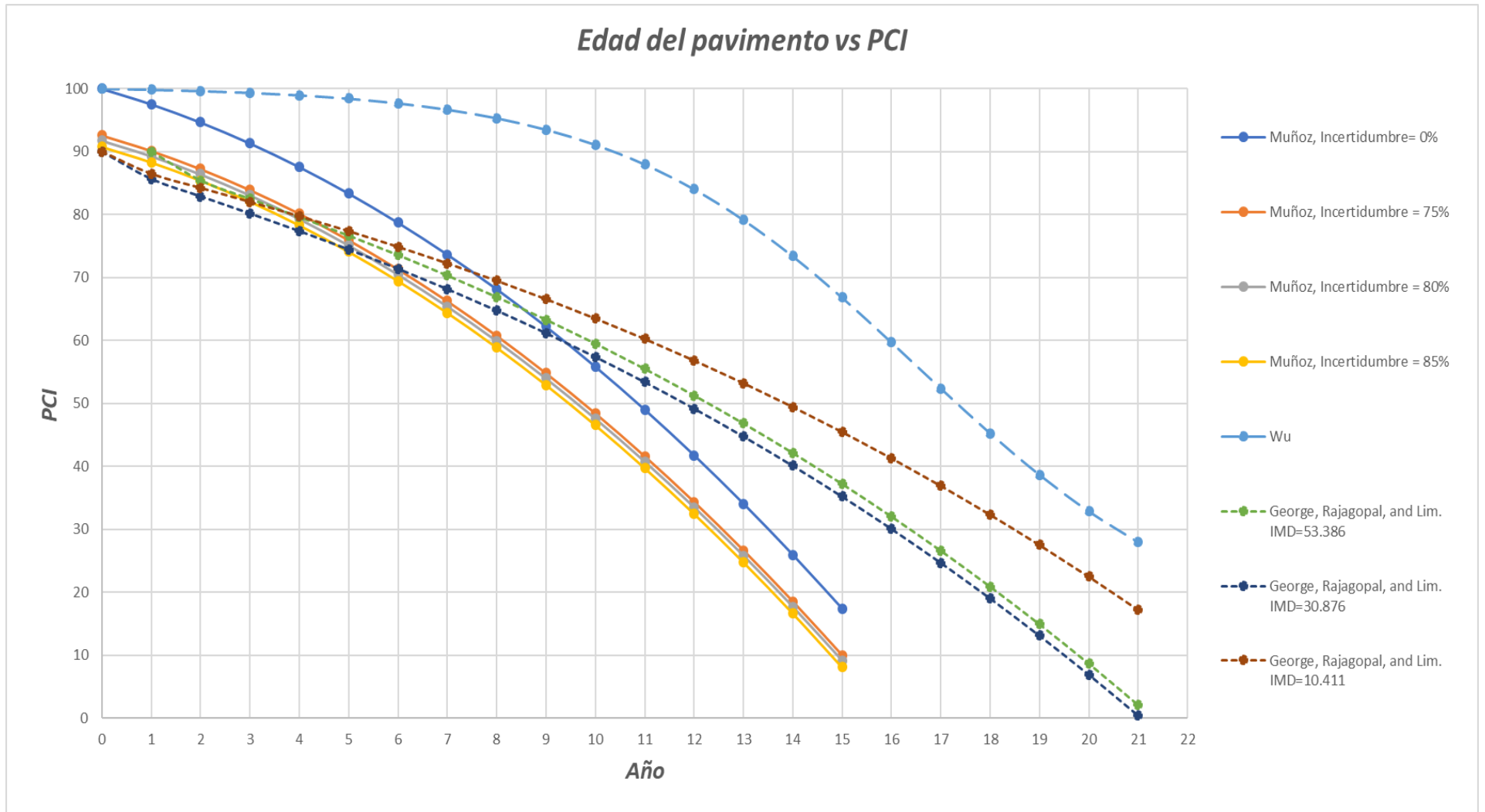


Fig. 19.- Compilación de modelos de deterioro de pavimentos

Al analizar el gráfico anterior, se puede sacar las siguientes conclusiones: El modelo propuesto por (Wu, 2015), considera un deterioro demasiado optimista, se puede observar que, incluso en el año 13 de vida, presenta un PCI de 80, es decir condiciones excelentes.

Por otro lado, el modelo propuesto por (Muñoz 2017), considera un deterioro bastante rápido desde que el pavimento llega a su séptimo año de vida. A esto se suma que, al no tener un conocimiento profundo de los firmes de la ciudad de Valencia, se debería trabajar con una incertidumbre del 99%. Como se puede observar, la curva de deterioro con el 99% de incertidumbre considera un deterioro bastante pesimista.

En cambio, la propuesta de **(George, Rajagopal, and Lim 1989)**, al considerar entre sus variables al tráfico, tipo de pavimento y tiempo, permite construir curvas intermedias con respecto a los modelos anteriores. Es un modelo bastante realista puesto que, considera que el pavimento permanece en excelente condiciones hasta el año 4 de vida y de ese punto en adelante, se deteriora hasta su fallo entre los años 20 y 21.

Por lo señalado anteriormente, en el presente trabajo se analizará el deterioro de los pavimentos utilizando el modelo de **(George, Rajagopal, and Lim 1989)**. La curva “**IMD=53.386**”, será utilizada para aquellas vías con IMD mayor a 40.000 veh/día. La curva “**IMD=30.876**”, será utilizada para vías con IMD entre 20.000 y 40.000 veh/día, mientras que para las vías con IMD menor a 20.000 veh/día, se utilizará la curva “**IMD=10.411**”.

Curva de deterioro	Rango de utilización	ID
IMD=53.386	IMD > 40.000	Deterioro 3
IMD=30.876	40.000 > IMD > 20.000	Deterioro 2
IMD=10.411	IMD < 20.000	Deterioro 1

Tabla 21.- Curvas de deterioro y rangos de uso.

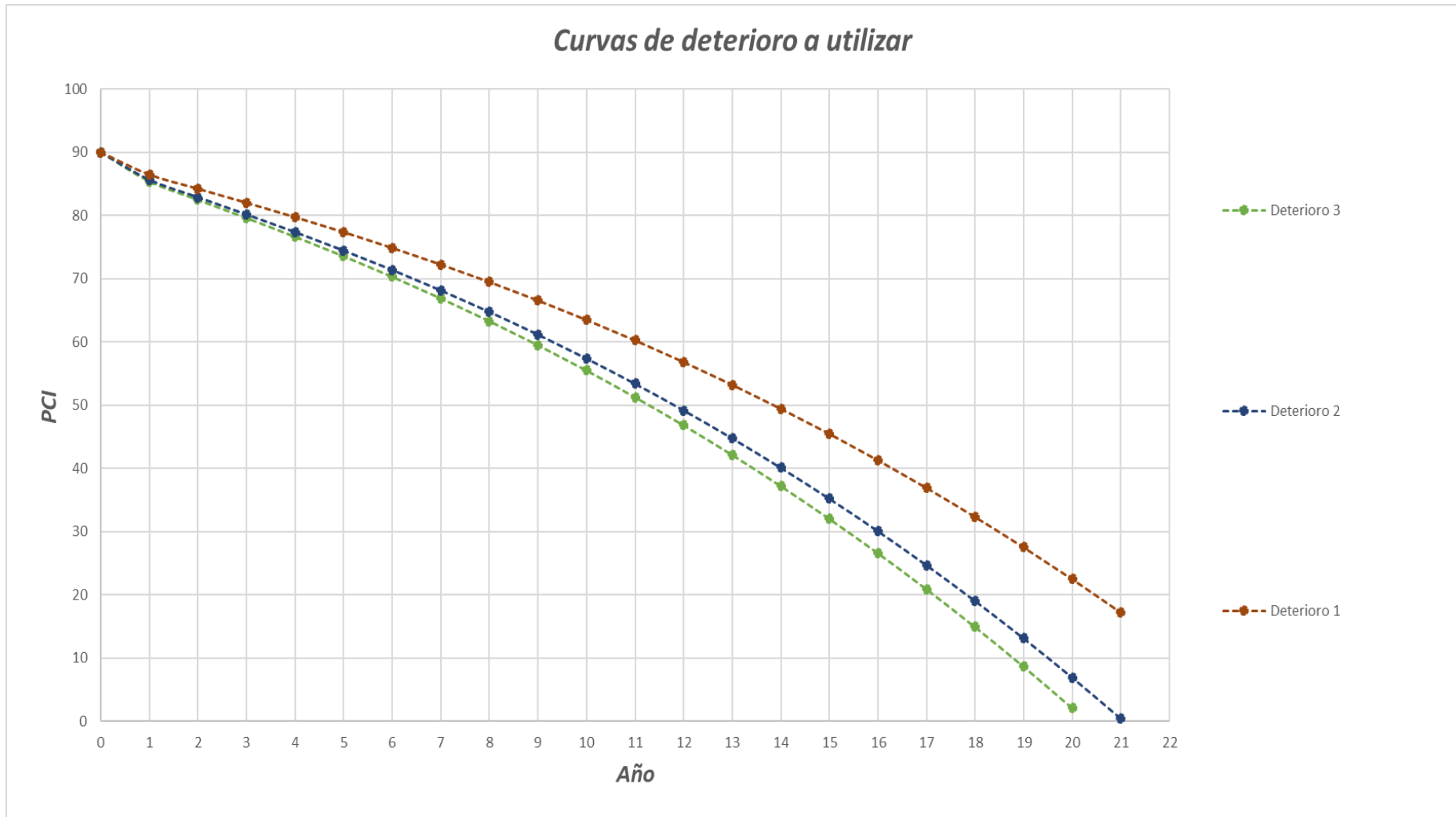


Fig. 20.-Curvas de deterioro a utilizar en el análisis (Fuente: El autor)

Cabe recalcar que, para practicidad en el análisis, el presente trabajo considera, que posterior a una actuación en cualquiera de las alternativas, el PCI asciende a 100. Se considerará también que en los 4 años de análisis, la intensidad de tráfico se mantiene constante.

4.2.4. PRESUPUESTO ANUAL DESTINADO A MANTENIMIENTO

En base a la investigación de (Guaita, Serra 2016), el presupuesto destinado por el Ayuntamiento de Valencia en 2017 al mantenimiento del viario público fue de 5,7 millones de euros. El presupuesto anual de mantenimiento a asumir en el análisis del presente trabajo será tomado en proporción del área urbana que abarca la muestra seleccionada. Cabe recalcar que, según los datos obtenidos en la página web del Ayuntamiento de Valencia, el área urbana de Valencia (AT) capital asciende a 134.6km².

El presupuesto a utilizar en el análisis será tomado en base a la proporción del área a intervenir. Otra de las hipótesis consideradas para el análisis, será el de realizar una **inversión mínima de 10.000 €/año**. En caso de no utilizar todo el presupuesto disponible, el monto sobrante, será abonado al presupuesto del año siguiente.

Se considera también, la posibilidad de invertir **100.000 €/año** adicionales al presupuesto existente. En este caso, el excedente de inversión realizado, será cargado al presupuesto disponible del año siguiente.

4.2.5. CLASIFICACIÓN DE INFRAESTRUCTURA ECONÓMICA Y SOCIAL

Acorde a lo indicado en el apartado 3.2.4., para la valoración de las alternativas con respecto al criterio 4 (Proximidad a infraestructura social y turística), se torna necesario definir y clasificar las infraestructuras de la ciudad de Valencia según su importancia.

El presente trabajo considera que las infraestructuras de máxima importancia (N2), son todas aquellas destinadas a salud. Por otro lado, entre las infraestructuras de nivel de importancia 1 (N1), serán consideradas aquellas de concurrencia masiva y atracciones turísticas.

A continuación, se lista las infraestructuras a considerar según su nivel de importancia.

<i>Nivel de Importancia 2 N2</i>
Hospital Clínica Universitaria de Valencia
Hospital General Universitaria de Valencia
Hospital La Malva-rosa
Hospital Padre Jofré
Hospital Quiron salud
Hospital universitario i Politécnico La Fe
Hospital Vithas 9 d'Octubre
Hospital Vithas Nisa Valencia al Mar
Hospital Vithas Nisa Virgen del Consuelo
IMED Valencia
<i>Nivel de Importancia 1 N1</i>
Estadio de Levante
Estadio Mestalla
Plaza de Toros
Lonja de la Sea
Ciudad de las Artes y las Ciencias
Plaza de la Reina
Generalitat Valenciana
Palau de la Generalitat Valenciana
Plaza del Ayuntamiento
Ayuntamiento de Valencia

Tabla 22.- Infraestructuras clasificadas según sus niveles de importancia.

4.2.6. CALCULO DEL VALOR RESIDUAL DE LA RED AL FINAL DEL ANÁLISIS

Tras implementar la herramienta de toma de decisiones en un horizonte de 4 años, se realizará un análisis LCCA durante el período en mención. Como se menciona en el apartado 2.2, los costes a utilizar serán los de inversión inicial en mantenimiento (2016) así como los costes futuros de mantenimiento (2017, 2018

y 2019). Por otro lado, los beneficios a utilizar será únicamente el incremento del valor residual a la red en estudio.

Para ello se torna necesario definir la metodología para calcular el valor residual de la red vial. El beneficio será cuantificado mediante la diferencia del valor residual al año 0 (2016) y al año 4 (finales del 2019).

(Fullana and Puig 2012), define al valor residual como El valor de la vida remanente al final del análisis.

(Babashamsi et al. 2016), define como vida útil de un tratamiento de pavimentos, el tiempo restante para que el pavimento se deteriore hasta un umbral establecido. El autor en mención, destaca dos métodos para la medición de la vida remanente del tratamiento: opinión de expertos o utilización de curvas de deterioro del pavimento midiendo áreas bajo la curva. Señala que, el método del área bajo la curva de deterioro considera mayor intensidad de datos. Indica también que el área bajo la curva de rendimiento de un pavimento puede servir como un sustituto de beneficios al usuario.

Bajo las premisas anteriores se propone calcular el valor residual utilizando las curvas de deterioro de los pavimentos anteriormente propuestas. Se propone definir un umbral mínimo de PCI, considerando que una vez el deterioro de alguna vía alcance el mismo, deberá ser reconstruida, incurriendo en un coste total de reconstrucción. El valor del umbral mínimo establecido es el de un PCI igual a 40, puesto que, al presentarse valores inferiores, según lo descrito en la tabla 13 del apartado 4.1, la intervención necesaria es la reconstrucción total del pavimento.

El valor remanente de la vía será monetizado multiplicando el coste total de reconstrucción por el porcentaje del área bajo la curva de deterioro correspondiente al momento del análisis.

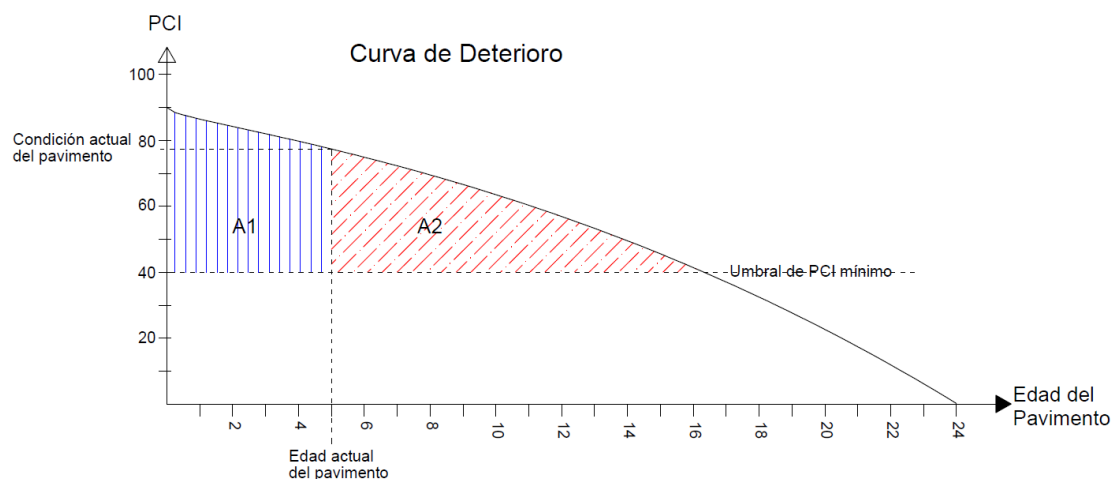


Fig. 21.- Curva de deterioro para el cálculo del valor residual de un pavimento. (Fuente: El autor)

De esta manera, el cálculo del valor residual del pavimento de una vía en base a su condición se realizaría bajo el siguiente flujo de trabajo:

1.- Calcular el coste de reconstrucción (CTR), utilizando los precios referenciales de la Tabla 13 del presente trabajo (Actuaciones típicas de rehabilitación y mantenimiento de pavimentos en la ciudad de Valencia (Tomada y adaptada de (Guaita, Serra 2016), Fuente: PAVASAL)).

2.- En base a la condición del pavimento, es decir su valor PCI, entrar a las curvas de deterioro propuestas en el apartado 4.2.3. Ubicando este valor en las ordenadas, establecer el valor de su abscisa correspondiente, valor que corresponde a la edad del pavimento en estudio.

3.- Trazar una línea vertical en la abscisa de la edad del pavimento y una horizontal en la ordenada del umbral mínimo (figura 13). De esta manera dividiremos el área bajo la curva en 3 porciones: El área 1 (A1), que denota la porción de valor remanente que ha perdido el pavimento debido a su deterioro, el área 2 (A2) que denota el valor remanente actual del pavimento y el área bajo el umbral mínimo.

4.- Calcular el valor residual de la vía (VR) utilizando la siguiente ecuación:

$$VR = CTR * \frac{A2}{(A1 + A2)}$$

Al analizar la ecuación, se puede observar que, en caso de que la condición del pavimento (PCI) sea inferior al umbral mínimo establecido, el valor de A2 será igual a cero, obteniendo un valor residual igual a cero. Por el contrario, mientras el valor de PCI sea más alto, denotará un pavimento más joven, un mayor valor de A2 y por consiguiente un valor residual más alto.

4.3. SELECCIÓN DE LA MUESTRA A UTILIZAR

Se ha decidido tomar como muestra la red vial ubicada en la zona sur-oeste de Valencia, una zona urbana cuya área asciende a 13km², que representa aproximadamente el 10% de la superficie urbana total.

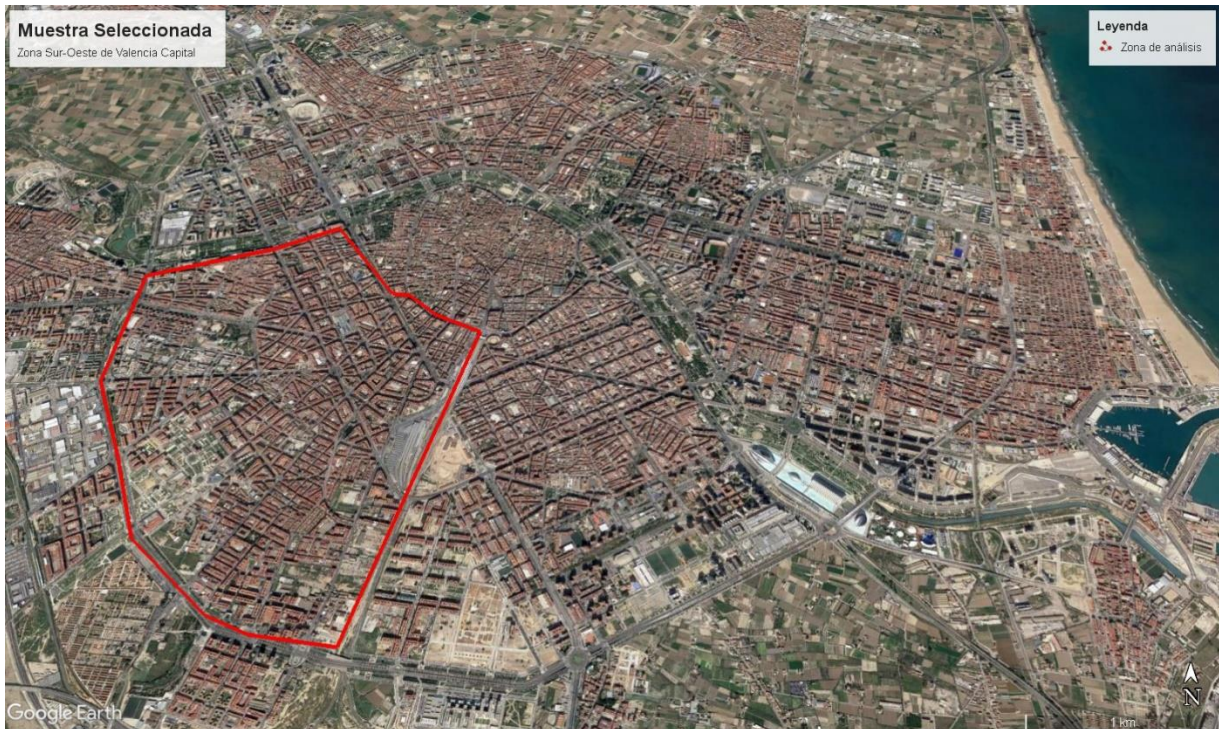


Fig. 22.- Vista satelital de la zona a estudiar.

Los motivos de seleccionar la zona como muestra de estudio radican básicamente en la disponibilidad de datos y en que en esta zona se cuenta con los 4 tipos de clasificación de vías acorde al volumen de tráfico.

En base a la disponibilidad de datos de la zona seleccionada, se ha decidido estudiar un total de 13 vías, de las cuales acorde a la clasificación mencionada en el apartado 4.1, 3 de ellas se clasifican como TMP (Tráfico muy pesado), 2 como TP (Tráfico pesado), 7 como TM (Tráfico Medio) y 1 como TL (Tráfico Liviano).

Las vías seleccionadas son las siguientes:

ID	Vía	Clasificación
1	PEREZ GALDOS	TMP
2	AV. GIORGETA	TMP
3	TRES FORQUES	TP
4	JAIME BELTRAN	TM
5	ARCHIDUQUE CARLOS	TMP
6	JESUS De G.V.	TP
7	URUGUAY.	TM
8	CARTEROS	TM
9	CUENCA	TM
10	AYORA	TM
11	CASTAN TOBEÑAS	TM
12	BRASIL	TM
13	TOMAS DE VIYARROYA	TL

Tabla 23.- Listado de vías a analizar.

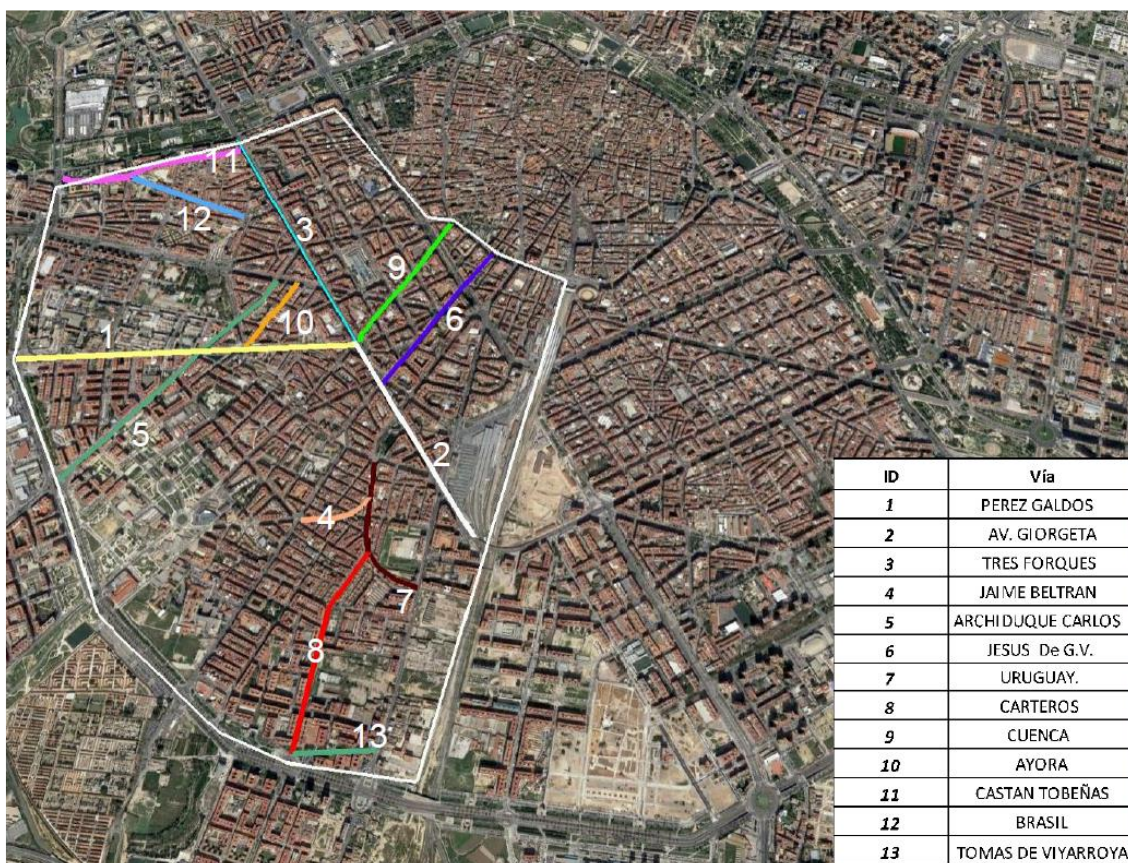


Fig. 23.- Imagen satelital de la muestra a analizar (Tomada de Google Earth)

En base a lo señalado en el apartado 4.2.4., el presupuesto anual destinado a mantenimiento de la red vial en estudio considerando el área urbana que abarca la misma (13km²) sería de **€865.282,32**.

4.4. CARACTERIZACIÓN DE LA MUESTRA

Una vez se ha tomado la muestra en la cual se aplicará la herramienta de toma de decisiones, se torna necesario caracterizar la misma con la finalidad de tener los datos suficientes para la valoración de los 6 criterios establecidos.

Para su efecto se torna necesario conocer las siguientes variables de cada una de las vías a analizar, al año 0 del análisis:

- Longitud
- Ancho de la calzada
- Ancho de Aceras
- Número de Carriles
- Restricciones de paso (semáforos o rompe velocidades)
- Intensidad Media Diaria (IMD)
- Intensidad Media Diaria de vehículos pesados (IMDp)
- Condición del pavimento medida con PCI (Pavement Condition Index)

Tal como se ha comentado al inicio del presente trabajo, el análisis de aplicación de la herramienta de toma de decisiones será realizado en un horizonte de 4 años, tomando como año base el 2016.

Las variables: **longitud, ancho de calzada, ancho de aceras, número de carriles y restricciones de paso**; fueron tomadas utilizando el software Google Earth Pro.

En base a las investigaciones de (Macea-Mercado, Morales, and Márquez-Díaz 2016), quienes destacan la utilización de imágenes digitales para la recolección de datos a fin de evaluar la condición del pavimento, en el presente trabajo se ha recolectado datos utilizando la herramienta “Street View” de Google. Mediante los recorridos que la herramienta permite, se han recolectado datos referentes a los daños del pavimento para posteriormente, utilizando una hoja de cálculo en Microsoft Excel, calcular el **PCI** de las vías a analizar. La evaluación de la condición de todas y cada una de las vías, se presenta en el **ANEXO 1** del

presente trabajo. A continuación se presenta una tabla resumen de los daños identificados en las vías de la muestra seleccionada.

Análisis de condición de pavimentos al año 2016						
Vía	Daño	Severidad	cantidad	unidad	densidad (%)	PCI
Perez Galdos	Grieta longitudinal y transversal	Leve (L)	34	m	3,4	51,54
	Grieta longitudinal y transversal	Media (M)	15	m	1,5	
	Ahuellamiento	Leve (L)	18	m ²	6,0	
	Piel de Cocodrilo	Leve (L)	24	m ²	8,0	
	Parcheo	Media (M)	0,7	m ²	0,2	
Giorgeta	Grieta longitudinal y transversal	Media (M)	28	m	2,8	59,79
	Pulimiento de agregados	Leve (L)	12	m ²	4,0	
	Parcheo	Media (M)	26	m ²	8,7	
	Piel de Cocodrilo	Leve (L)	2,5	m ²	0,8	
Tres Forques	Piel de Cocodrilo	Leve (L)	1,8	m ²	0,60	69,86
	Grieta longitudinal y transversal	Media (M)	14	m	1,40	
	Grieta longitudinal y transversal	Alta (H)	19	m	1,90	
	Parcheo	Leve (L)	24	m ²	8,00	
	Parcheo	Media (M)	6,8	m ²	2,27	
Jaime Beltran	Piel de Cocodrilo	Leve (L)	65	m ²	21,67	24,23
	Piel de Cocodrilo	Alta (H)	20	m ²	6,67	
	Grieta longitudinal y transversal	Leve (L)	70	m	7,00	
	Grieta longitudinal y transversal	Media (M)	20	m	2,00	
	Grieta longitudinal y transversal	Media (M)	140	m	14,00	56,45

Archidduque Carlos	Piel de Cocodrilo	Leve (L)	34	m ²	11,33	
Jesús	Piel de Cocodrilo	Leve (L)	4,2	m ²	1,40	56,91
	Piel de Cocodrilo	Media (M)	3,5	m ²	1,17	
	Piel de Cocodrilo	Alta (H)	1,5	m ²	0,50	
	Grieta longitudinal y transversal	Leve (L)	19	m	1,90	
	Grieta longitudinal y transversal	Media (M)	6,5	m	0,65	
	Parcheo	Media (M)	6,8	m ²	2,27	
	Uruguay	Piel de Cocodrilo	Leve (L)	0,5	m ²	
Piel de Cocodrilo		Media (M)	2,2	m ²	0,73	
Grieta longitudinal y transversal		Media (M)	19,2	m	1,92	
Grieta longitudinal y transversal		Alta (H)	29	m	2,90	
Parcheo		Leve (L)	19,5	m ²	6,50	
Parcheo		Media (M)	12	m ²	4,00	
Parcheo		Alta (H)	2,5	m ²	0,83	
Carteros	Piel de Cocodrilo	Leve (L)	7,5	m ²	2,50	58,30
	Piel de Cocodrilo	Media (M)	3,5	m ²	1,17	
	Grieta longitudinal y transversal	Leve (L)	21	m	2,10	
	Grieta longitudinal y transversal	Media (M)	18,6	m	1,86	
	Parcheo	Alta (H)	2,5	m ²	0,83	
Cuenca	Piel de Cocodrilo	Alta (H)	1,6	m ²	0,53	65,58
	Grieta longitudinal y transversal	Media (M)	12,6	m	1,26	
	Grieta longitudinal y transversal	Alta (H)	10	m	1,00	
	Parcheo	Leve (L)	14	m ²	4,67	

Ayora	Piel de Cocodrilo	Leve (L)	2,8	m ²	0,93	44,44
	Piel de Cocodrilo	Media (M)	11	m ²	3,67	
	Grieta longitudinal y transversal	Media (M)	7	m	0,70	
	Grieta longitudinal y transversal	Alta (H)	6,8	m	0,68	
	Parcheo	Media (M)	3,5	m ²	1,17	
	Parcheo	Alta (H)	2,5	m ²	0,83	
Castan Tobeñas	Grieta de borde	Leve (L)	11	m	1,10	91,83
	Grieta longitudinal y transversal	Leve (L)	20	m	2,00	
Brasil	Grieta longitudinal y transversal	Leve (L)	20	m	2,0	89,83
	Grieta de borde	Alta (H)	6	m	0,6	
Tomás de Viyarroya	Grieta longitudinal y transversal	Leve (L)	83	m	8,30	57,78
	Grieta longitudinal y transversal	Alta (H)	10	m	1,00	
	Piel de Cocodrilo	Leve (L)	20	m ²	6,67	

Tabla 24.- Tabla resumen de daños presentados en los pavimentos de la muestra seleccionada.

La **intensidad media diaria (IMD)** ha sido tomada directamente de los mapas de tráfico disponibles en la página web del Ayuntamiento de Valencia (AyuntamientodeValencia, 2018). Puesto que la base de datos en mención no clasifica la composición del tráfico, los porcentajes de vehículos pesados (**Intensidad media diaria de vehículos pesados**) con respecto a la IMD total, han sido tomados en base al inventario vial presentado por (Guaita, Serra 2016) en su investigación “Gestión del mantenimiento de pavimentos urbanos. Propuesta de implementación de un sistema de gestión de pavimentos en la ciudad de Valencia”. Los datos han sido extraídos del mapa de tráfico correspondiente al mes de mayo de 2016.

En base a lo señalado en los párrafos anteriores se presenta la siguiente tabla en donde se recogen todos los datos de partida necesarios posterior a la caracterización de la muestra.

DATOS DE ENTRADA AL AÑO 2016								
ID	Vía	N° Carriles	Longitud (m)	Ancho calzada (m)	Ancho Aceras (m)	IMD media	IMDp	PCI
1	PEREZ GALDOS	6	1496	22	2	53836	1777	51,54
2	GIORGETA	6	1496	22	2	65145	2215	59,79
3	TRES FORQUES	6	2295	15,6	2	14049	478	69,86
4	JAIME BELTRAN	4	302	11,6	2	6032	92	24,23
5	ARCHIDUQUE CARLOS	6	1280	19	2	30876	1050	56,45
6	JESUS	4	1164	13	2	23222	348	56,91
7	URUGUAY.	2	664	8	2	10411	156	44,44
8	CARTEROS	2	833	7	2	10411	156	58,30
9	CUENCA	2	1327	7,5	2	5295	79	65,58
10	AYORA	2	350	7	2	8472	127	44,44
11	CASTAN TOBEÑAS	2	876	9	2	3257	98	91,83
12	BRASIL	2	606	6	2	5241	157	89,83
13	TOMAS DE VIYARROYA	1	320	6	2	1448	44	57,78

Tabla 25.- Datos de entrada al año 2016 (Fuente: El Autor)

A esta caracterización, se debe sumar también el cálculo del valor residual de la muestra a inicios del año 2016. De esta manera, se podrá cuantificar los beneficios generados por el incremento del valor en mención. Para ello se debe calcular el valor residual de cada una de las 13 vías. La suma de los 13 valores será el valor residual total de la red vial en análisis a inicios del año 2016.

Para su cálculo, se ha seguido el flujo de trabajo propuesto en el apartado 4.2.6., utilizando las curvas de deterioro propuestas en el apartado 4.2.3. Los resultados se presentan a continuación:

ID	Descripción	Long (m).	Ancho (m)	IMD	IMDp	Curva de Deterioro	PCI		Coste Reconstrucción Unitario (€/m2)	A2 / (A1+A2)	Valor Residual (€)
							2016	edad del pavimento (años)			
1	PEREZ GALDOS	1496	22	53836	1777	3	51,50	11	69,32	3,87%	€ 88.292,50
2	GIORGETA	1496	22	65145	2215	3	59,80	9	69,32	12,48%	€ 284.726,19
3	TRES FORQUES	2295	15,6	14049	478	1	69,90	8	69,32	29,38%	€ 729.151,27
4	JAIME BELTRAN	302	11,6	6032	92	1	24,20	20	58,83	0,00%	€ -
5	ARCHIDUQUE CARLOS	1280	19	30876	1050	2	56,50	11	69,32	7,79%	€ 131.328,68
6	JESUS	1164	13	23222	348	2	56,90	11	69,32	7,79%	€ 81.713,22
7	URUGUAY.	664	8	10411	156	1	44,40	15	58,83	0,82%	€ 2.562,54
8	CARTEROS	833	7	10411	156	1	58,30	11	58,83	12,61%	€ 43.257,06
9	CUENCA	1327	7,5	5295	79	1	65,60	9	58,83	23,11%	€ 135.310,34
10	AYORA	350	7	8472	127	1	44,40	15	58,83	0,82%	€ 1.181,89
11	CASTAN TOBEÑAS	876	9	3257	98	1	91,80	0	58,83	100,00%	€ 463.815,72
12	BRASIL	606	6	5241	157	1	89,80	0	58,83	100,00%	€ 213.905,88
13	TOMAS DE VIYARROYA	320	6	1448	44	1	57,78	12	72,01	8,46%	€ 11.696,73
€ 2.186.942,01											

Tabla 26.- Cálculo del valor residual de la muestra a inicios del año 2016.

Como se puede observar, el valor residual de la red vial a inicios del año 2016, antes de ser intervenida utilizando la herramienta de toma de decisiones es de € 2.186.942,01.

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1. EVALUACIÓN DE LAS ALTERNATIVAS EN BASE A LOS CRITERIOS PLANTEADOS.

Una vez se han recogido los datos de entrada de cada una de las 13 alternativas, se procede a evaluar y llevar a valores entre 0 y 1 a todas ellas con respecto a los 6 criterios planteados. Valoración que se realizará acorde a la metodología planteada en el apartado 3.2.

Criterio 1: Confort de los usuarios

La valoración resultante es la siguiente:

ID	Descripción	VALOR CRITERIO 1
1	PEREZ GALDOS	0,50
2	GIORGETA	0,50
3	TRES FORQUES	0,50
4	JAIME BELTRAN	0,25
5	ARCHIDUQUE CARLOS	0,50
6	JESUS	0,50
7	URUGUAY.	0,50
8	CARTEROS	0,50
9	CUENCA	0,50
10	AYORA	0,50
11	CASTAN TOBEÑAS	1,00
12	BRASIL	1,00
13	TOMAS DE VIYARROYA	0,50

Tabla 27.- Valoración de Alternativas con respecto a Criterio 1.

Criterio 2: Coste de accidentalidad

Vale recalcar que, para esta valoración, se ha asumido una gradiente y un coeficiente de curvatura igual a cero en todas las alternativas. La valoración resultante es la siguiente:

ID	Descripción	Condición Calzada	Restricciones de Circulación	IMD/1000 *carril	Ancho de acera (ft)	Coef Carril	Coste Accidente	VMT/año	Coste Accidente/año	VALOR
1	PEREZ GALDOS	2	1	8,97	6,56	1	221.911.138 €	339	654.039 €	0,35
2	GIORGETA	3	1	10,86	6,56	1	627.236.084 €	339	1.848.654 €	1,00
3	TRES FORQUES	3	1	2,34	6,56	1	5.581.985 €	521	10.724 €	0,00
4	JAIME BELTRAN	1	1	1,51	6,56	1	3.558.854 €	68	51.959 €	0,02
5	ARCHIDUQUE CARLOS	3	1	5,15	6,56	1	26.430.711 €	290	91.045 €	0,04
6	JESUS	3	1	5,81	6,56	1	38.099.181 €	264	144.317 €	0,07
7	URUGUAY.	2	1	5,21	6,56	0	29.361.223 €	151	194.968 €	0,10
8	CARTEROS	3	1	5,21	6,56	0	29.185.056 €	189	154.480 €	0,08
9	CUENCA	3	1	2,65	6,56	0	7.066.385 €	301	23.479 €	0,01
10	AYORA	2	1	4,24	6,56	0	17.152.196 €	79	216.077 €	0,11
11	CASTAN TOBEÑAS	5	1	1,63	6,56	0	3.968.223 €	199	19.973 €	0,01
12	BRASIL	5	1	2,62	6,56	0	6.878.100 €	137	50.044 €	0,02
13	TOMAS DE VIYARROYA	3	1	1,45	6,56	0	3.633.784 €	73	50.069 €	0,02

Tabla 28.- Valoración de alternativas con respecto a criterio 2

Criterio 3: Eficiencia económica de la actuación

La valoración resultante es la siguiente:

ID	Descripción	Longitud (m)	Ancho (m.)	IMD Media	PCI	Categoría de vía	Actuación Recomendada	Coste (Euros/m ²)	Coste (Euros)	Rent Económica	VALOR
1	PEREZ GALDOS	1496	22	53836	51,54	1	1FR	€ 26,69	€ 878.421,28	2,97	0,094
2	GIORGETA	1496	22	65145	59,79	1	1FR	€ 26,69	€ 878.421,28	2,98	0,095
3	TRES FORQUES	2295	15,6	14049	69,86	2	2FR	€ 26,69	€ 955.555,38	0,44	0,000
4	JAIME BELTRAN	302	11,6	6032	24,23	3	3RC	€ 58,83	€ 206.093,26	2,22	0,066
5	ARCHIDUQUE CARLOS	1280	19	30876	56,45	1	1FR	€ 26,69	€ 649.100,80	2,07	0,061
6	JESUS	1164	13	23222	56,91	2	2FR	€ 26,69	€ 403.873,08	2,48	0,076
7	URUGUAY.	664	8	10411	44,44	3	3FR	€ 18,80	€ 99.865,60	5,79	0,200
8	CARTEROS	833	7	10411	58,30	3	3FR	€ 18,80	€ 109.622,80	3,96	0,131
9	CUENCA	1327	7,5	5295	65,58	3	3FR	€ 18,80	€ 187.107,00	0,97	0,020
10	AYORA	350	7	8472	44,44	3	3FR	€ 18,80	€ 46.060,00	10,22	0,365
11	CASTAN TOBEÑAS	876	9	3257	91,83	3	3SLY	€ 1,21	€ 9.539,64	2,79	0,088
12	BRASIL	606	6	5241	89,83	3	3SLY	€ 1,21	€ 4.399,56	12,12	0,436
13	TOMAS DE VIYARROYA	320	6	1448	57,78	4	4FR	€ 1,17	€ 2.246,40	27,21	1,000

Tabla 29.- Valoración de alternativas con respecto a Criterio 3

Criterio 4: Proximidad a Infraestructura Social y Turística

La valoración resultante es la siguiente:

ID	Descripción	Número de Infraestructuras cercanas		VALOR
		N1	N2	
1	PEREZ GALDOS	1	0	0,480
2	AV. GIORGETA	1	0	0,400
3	TRES FORQUES	1	0	0,300
4	JAIME BELTRAN	0	0	0,399
5	ARCHIDUQUE CARLOS	2	0	0,430
6	JESUS	1	1	0,802
7	URUGUAY.	0	0	0,182
8	CARTEROS	0	0	0,100
9	CUENCA	1	0	0,340
10	AYORA	1	0	0,550
11	CASTAN TOBEÑAS	1	0	0,080
12	BRASIL	0	0	0,013
13	TOMAS DE VIYARROYA	0	0	0,104

Tabla 30.- Valoración de alternativas con respecto a Criterio 4

Criterio 5: Eficiencia ambiental de la actuación

La valoración resultante es la siguiente:

ID	Descripción	Longitud (m)	Ancho (m.)	IMD Media	PCI	Categoría de vía	Actuación Recomendada	Emisiones unitarias (Kg CO2/m2)	Emisiones generadas Kg CO2	Eficiencia Ambiental	Valor
1	PEREZ GALDOS	1496	22	53836	51,54	1	1FR	6,91	227421,92	11,472	0,374
2	GIORGETA	1496	22	65145	59,79	1	1FR	6,91	227421,92	11,518	0,376
3	TRES FORQUES	2295	15,6	14049	69,86	2	2FR	6,91	247391,82	1,712	0,000
4	JAIME BELTRAN	302	11,6	6032	24,23	3	3RC	13,11	45926,952	9,951	0,316
5	ARCHIDUQUE CARLOS	1280	19	30876	56,45	1	1FR	6,91	168051,2	8,001	0,241
6	JESUS	1164	13	23222	56,91	2	2FR	6,91	104562,12	9,570	0,301
7	URUGUAY.	664	8	10411	44,44	3	3FR	6,91	36705,92	15,760	0,538
8	CARTEROS	833	7	10411	58,30	3	3FR	6,91	40292,21	10,774	0,347
9	CUENCA	1327	7,5	5295	65,58	3	3FR	6,91	68771,775	2,650	0,036
10	AYORA	350	7	8472	44,44	3	3FR	6,91	16929,5	27,802	1,000
11	CASTAN TOBEÑAS	876	9	3257	91,83	3	3SLY	0,76	5991,84	4,441	0,105
12	BRASIL	606	6	5241	89,83	3	3SLY	0,76	2763,36	19,288	0,674
13	TOMAS DE VIYARROYA	320	6	1448	57,78	4	4FR	6,91	13267,2	4,608	0,111

Tabla 31.- Valoración de alternativas con respecto a Criterio 5

Criterio 6: Molestias generadas con la actuación

La valoración resultante es la siguiente:

ID	Descripción	Longitud (m)	Ancho (m.)	IMD Media	PCI	Categoría de vía	Actuación Recomendada	Rendimiento (m/carril/día)	Tiempo Estimado de la actuación (días)	Valor
1	PEREZ GALDOS	1496	22	53836	51,54	1	1FR	60,00	75	0,367
2	GIORGETA	1496	22	65145	59,79	1	1FR	60,00	75	0,367
3	TRES FORQUES	2295	15,6	14049	69,86	2	2FR	60,00	115	0,000
4	JAIME BELTRAN	302	11,6	6032	24,23	3	3RC	25,00	49	0,606
5	ARCHIDUQUE CARLOS	1280	19	30876	56,45	1	1FR	60,00	64	0,468
6	JESUS	1164	13	23222	56,91	2	2FR	60,00	78	0,339
7	URUGUAY.	664	8	10411	44,44	3	3FR	60,00	23	0,844
8	CARTEROS	833	7	10411	58,30	3	3FR	60,00	28	0,798
9	CUENCA	1327	7,5	5295	65,58	3	3FR	60,00	45	0,642
10	AYORA	350	7	8472	44,44	3	3FR	60,00	12	0,945
11	CASTAN TOBEÑAS	876	9	3257	91,83	3	3SLY	150,00	12	0,945
12	BRASIL	606	6	5241	89,83	3	3SLY	150,00	9	0,972
13	TOMAS DE VIYARROYA	320	6	1448	57,78	4	4FR	60,00	6	1,000

Tabla 32.- Valoración de alternativas con respecto a Criterio 6

5.2. PRIORIZACIÓN DE ALTERNATIVAS, TOMA DE DECISIONES

Una vez que se han evaluado las 13 alternativas con respecto a los 6 criterios propuestos, se procede a establecer el ranking de prioridad utilizando la técnica SAW. Para ello, es necesario establecer el peso relativo de cada uno de los 6 criterios. El presente análisis, se centra en establecer el peso relativo de cada uno de los criterios acorde a su aporte al fin último (obtener el mayor ratio beneficio – coste). Sin embargo, en este primer análisis se asignará el mismo peso a todos los criterios, es decir el resultante de dividir 100% entre 6, 16.66%.

2016											
	Pesos:	16,66%	16,66%	16,70%	16,66%	16,66%	16,66%				
ID	Vía	CRITERIO 1	CRITERIO 2	CRITERIO 3	CRITERIO 4	CRITERIO 5	CRITERIO 6	Valoración	Coste de Intervención	Vía Intervenido	
10	AYORA	0,50	0,11	0,365	0,550	1,000	0,94	0,5786	€ 46.060,00	SI	
13	TOMAS DE VIYARROYA	0,50	0,02	1,000	0,104	0,111	1,00	0,4563	€ 2.246,40	SI	
2	AV. GIORGETA	0,50	1,00	0,095	0,400	0,376	0,37	0,4561	€ 878.421,28	SI	
7	URUGUAY.	0,50	0,10	0,200	0,182	0,538	0,84	0,3941	€ 99.865,60	NO	
1	PEREZ GALDOS	0,50	0,35	0,094	0,480	0,374	0,37	0,3608	€ 878.421,28	NO	
4	JAIME BELTRAN	0,75	0,02	0,066	0,399	0,316	0,61	0,3597	€ 206.093,26	NO	
12	BRASIL	0,00	0,02	0,436	0,013	0,674	0,97	0,3528	€ 4.399,56	NO	
6	JESUS	0,50	0,07	0,076	0,802	0,301	0,34	0,3485	€ 403.873,08	NO	
8	CARTEROS	0,50	0,08	0,131	0,100	0,347	0,80	0,3257	€ 109.622,80	NO	
5	ARCHIDUQUE CARLOS	0,50	0,04	0,061	0,430	0,241	0,47	0,2905	€ 649.100,80	NO	
9	CUENCA	0,50	0,01	0,020	0,340	0,036	0,64	0,2574	€ 187.107,00	NO	
11	CASTAN TOBEÑAS	0,00	0,01	0,088	0,080	0,105	0,94	0,2037	€ 9.539,64	NO	
3	TRES FORQUES	0,50	0,00	0,000	0,300	0,000	0	0,1333	€ 955.555,38	NO	
									TOTAL vías intervenidas	€ 926.727,68	
									Déficit / superávit	€ -61.445,36	

Tabla 33.- Priorización de alternativas, escenario inicial, año 2016.

Como se puede observar en la tabla anterior, la herramienta de toma de decisiones ha establecido un ranking de prioridades de inversión en mantenimiento. De acuerdo a este ranking y a la restricción que supone el presupuesto anual disponible, las vías a intervenir con trabajos de intervención y mantenimiento serían: Ayora, Tomas de Viyarroya y Giorgeta. La inversión necesaria es de **€ 926.727,68**, lo que supone que los **€ 61.445,36** de inversión

excedente, serán cargados al presupuesto 2017. De tal manera, el presupuesto a utilizar en el análisis del año 2017, será de € 803.836,93.

5.3. ANÁLISIS EN UN PERÍODO DE 4 AÑOS

En el apartado anterior, se ha implementado la herramienta de toma de decisiones en el año 2016. En el presente apartado, se repetirá el análisis para los años 2017, 2018 y 2019.

Año 2017

Para inicios del año 2017, las vías: Ayora, Tomas de Viyarroya y Giorgeta presentarán un PCI de 100, puesto que en 2016 recibieron mantenimiento. Por otro lado, las 10 vías restantes habrán sufrido un deterioro, presetando un valor de PCI menor. Dicho valor es estimado utilizando el modelo de deterioro propuesto en el apartado 4.2.3.

Por lo anteriormente señalado, los datos de entrada se mantienen a excepción del PCI, presentando la siguiente variación:

DATOS DE ENTRADA AL AÑO 2017								
ID	Vía	N° Carriles	Longitud (m)	Ancho calzada (m)	Ancho Aceras (m)	IMD media	IMDp	PCI
1	PEREZ GALDOS	6	1496	22	2	53836	1777	46,70
2	GIORGETA	6	1496	22	2	65145	2215	100,00
3	TRES FORQUES	6	2295	15,6	2	14049	478	66,60
4	JAIME BELTRAN	4	302	11,6	2	6032	92	22,00
5	ARCHIDUQUE CARLOS	6	1280	19	2	30876	1050	52,00
6	JESUS	4	1164	13	2	23222	348	52,00
7	URUGUAY.	2	664	8	2	10411	156	41,41
8	CARTEROS	2	833	7	2	10411	156	53,31
9	CUENCA	2	1327	7,5	2	5295	79	63,55
10	AYORA	2	350	7	2	8472	127	100,00
11	CASTAN TOBEÑAS	2	876	9	2	3257	98	86,47
12	BRASIL	2	606	6	2	5241	157	86,47
13	TOMAS DE VIYARROYA	1	320	6	2	1448	44	100,00

Tabla 34.- datos de entrada al año 2017, escenario inicial.

Posterior a actualizar los datos de entrada, se procede a aplicar la herramienta de toma de decisiones repitiendo los procesos descritos en los apartados 4.5 y 4.6. Los resultados obtenidos son los siguientes:

2017											
	Pesos:	16,66%	16,66%	16,70%	16,66%	16,66%	16,66%				
ID	Vía	CRITERIO 1	CRITERIO 2	CRITERIO 3	CRITERIO 4	CRITERIO 5	CRITERIO 6	Valoración	Coste de Intervención	Vía Intervenida	
12	BRASIL	0,00	0,02	1,000	0,018	1,000	0,95	0,4979	€ 4.399,56	SI	
7	URUGUAY.	0,50	0,10	0,359	0,206	0,619	0,82	0,4346	€ 99.865,60	SI	
1	PEREZ GALDOS	0,50	0,35	0,178	0,530	0,451	0,36	0,3949	€ 878.421,28	NO	
4	JAIME BELTRAN	0,75	0,02	0,115	0,446	0,351	0,59	0,3789	€ 206.093,26	NO	
6	JESUS	0,50	0,07	0,145	0,839	0,369	0,33	0,3761	€ 403.873,08	NO	
8	CARTEROS	0,50	0,08	0,252	0,125	0,428	0,78	0,3602	€ 109.622,80	NO	
5	ARCHIDUQUE CARLOS	0,50	0,04	0,115	0,480	0,291	0,46	0,3142	€ 649.100,80	NO	
9	CUENCA	0,50	0,01	0,035	0,360	0,038	0,63	0,2607	€ 187.107,00	NO	
11	CASTAN TOBEÑAS	0,00	0,01	0,264	0,130	0,230	0,92	0,2581	€ 9.539,64	NO	
2	AV. GIORGETA	0,00	1,00	0,000	0,000	0,000	0,00	0,1666	€ 39.823,52	NO	
3	TRES FORQUES	0,50	0,00	0,000	0,330	0,000	0	0,1383	€ 955.555,38	NO	
10	AYORA	0,00	0,11	0,000	0,000	0,000	0,00	0,0185	€ 2.964,50	NO	
13	TOMAS DE VIYARROYA	0,00	0,02	0,000	0,000	0,000	0,00	0,0036	€ 2.323,20	NO	
									TOTAL vías intervenidas	€ 104.265,16	
									Déficit / superávit	€ 699.571,77	

Tabla 35.- Priorización de alternativas, escenario inicial, año 2017.

Acorde al ranking de priorización establecido por la herramienta, las vías a intervenir en el año 2017 serán Brasil y Uruguay. El monto invertido en 2017 sería de € 104.265,16, teniendo un presupuesto no utilizado de € 699.571,77, monto que será abonado al presupuesto 2018.

Por lo anteriormente señalado, **el presupuesto disponible para mantenimiento en el año 2018 sería de € 1.564.854,09.**

Año 2018

Al igual que en el año 2017, se torna necesario actualizar los datos de entrada puesto que la variable PCI es dependiente del tiempo. Posterior a actualizar los datos, se aplica nuevamente la herramienta de toma de decisiones.

DATOS DE ENTRADA AL AÑO 2018								
ID	Vía	N° Carriles	Longitud (m)	Ancho calzada (m)	Ancho Aceras (m)	IMD media	IMDp	PCI
1	PEREZ GALDOS	6	1496	22	2	53836	1777	42,00
2	GIORGETA	6	1496	22	2	65145	2215	85,39
3	TRES FORQUES	6	2295	15,6	2	14049	478	63,55
4	JAIME BELTRAN	4	302	11,6	2	6032	92	17,00
5	ARCHIDUQUE CARLOS	6	1280	19	2	30876	1050	47,80
6	JESUS	4	1164	13	2	23222	348	47,89
7	URUGUAY.	2	664	8	2	10411	156	100,00
8	CARTEROS	2	833	7	2	10411	156	49,54
9	CUENCA	2	1327	7,5	2	5295	79	60,31
10	AYORA	2	350	7	2	8472	127	86,47
11	CASTAN TOBEÑAS	2	876	9	2	3257	98	84,23
12	BRASIL	2	606	6	2	5241	157	100,00
13	TOMAS DE VIYARROYA	1	320	6	2	1448	44	86,47

Tabla 36.- datos de entrada al año 2018, escenario inicial.

2018											
ID	Vía	Pesos:	16,66%	16,66%	16,70%	16,66%	16,66%	16,66%	Valoración	Coste de Intervención	Vía Intervenida
		CRITERIO 1	CRITERIO 2	CRITERIO 3	CRITERIO 4	CRITERIO 5	CRITERIO 6				
10	AYORA	0,00	0,11	1,000	0,130	1,000	0,98	0,5374	€ 2.964,50	SI	
2	GIORGETA	0,00	1,00	0,613	0,140	0,605	0,76	0,5195	€ 39.823,52	SI	
4	JAIME BELTRAN	0,75	0,02	0,050	0,538	0,148	0,59	0,3495	€ 206.093,26	SI	
1	PEREZ GALDOS	0,50	0,35	0,079	0,580	0,196	0,36	0,3443	€ 878.421,28	SI	
6	JESUS	0,50	0,07	0,065	0,864	0,160	0,33	0,3320	€ 403.873,08	SI	
8	CARTEROS	0,50	0,08	0,112	0,148	0,184	0,78	0,3000	€ 109.622,80	NO	
5	ARCHIDUQUE CARLOS	0,50	0,04	0,051	0,520	0,126	0,46	0,2828	€ 649.100,80	NO	
11	CASTAN TOBEÑAS	0,25	0,01	0,127	0,150	0,109	0,92	0,2602	€ 9.539,64	NO	
9	CUENCA	0,50	0,01	0,015	0,390	0,017	0,63	0,2589	€ 187.107,00	NO	
13	TOMAS DE VIYARROYA	0,00	0,02	0,207	0,018	0,191	1,00	0,2395	€ 2.323,20	NO	
3	TRES FORQUES	0,50	0,00	0,000	0,360	0,000	0	0,1433	€ 955.555,38	NO	
7	URUGUAY.	0,00	0,10	0,000	0,000	0,000	0,00	0,0166	€ 6.427,52	NO	
12	BRASIL	0,00	0,02	0,000	0,000	0,000	0,00	0,0036	€ 4.399,56	NO	
									TOTAL vías intervenidas	€ 1.531.175,64	
									Déficit / superávit	€ 33.678,45	

Tabla 37.- Priorización de alternativas, escenario inicial, año 2018.

La herramienta de toma de decisiones, indica que, con el presupuesto disponible, se debe actuar en las vías: Ayora, Giorgeta, Jaime Beltran, Perez Galdos, Jesús.

El presupuesto no utilizado es de € 33.678,45, motivo por el cual el **presupuesto disponible para 2019 sería de € 898.960,77.**

Año 2019

DATOS DE ENTRADA AL AÑO 2019								
ID	Vía	N° Carriles	Longitud (m)	Ancho calzada (m)	Ancho Aceras (m)	IMD media	IMDp	PCI
1	PEREZ GALDOS	6	1496	22	2	53836	1777	100,00
2	GIORGETA	6	1496	22	2	65145	2215	100,00
3	TRES FORQUES	6	2295	15,6	2	14049	478	60,31
4	JAIME BELTRAN	4	302	11,6	2	6032	92	100,00
5	ARCHIDUQUE CARLOS	6	1280	19	2	30876	1050	43,56
6	JESUS	4	1164	13	2	23222	348	100,00
7	URUGUAY.	2	664	8	2	10411	156	86,47
8	CARTEROS	2	833	7	2	10411	156	45,57
9	CUENCA	2	1327	7,5	2	5295	79	56,90
10	AYORA	2	350	7	2	8472	127	100,00
11	CASTAN TOBEÑAS	2	876	9	2	3257	98	82,00
12	BRASIL	2	606	6	2	5241	157	86,47
13	TOMAS DE VIYARROYA	1	320	6	2	1448	44	84,23

Tabla 38.- datos de entrada al año 2019, escenario inicial.

2019										
	Pesos:	16,66%	16,66%	16,70%	16,66%	16,66%	16,66%			
ID	Vía	CRITERIO 1	CRITERIO 2	CRITERIO 3	CRITERIO 4	CRITERIO 5	CRITERIO 6	Valoración	Coste de Intervención	Vía Intervenido
7	URUGUAY.	0,00	0,10	1,000	0,018	1,000	0,95	0,5108	€ 6.427,52	SI
12	BRASIL	0,00	0,02	0,728	0,018	0,717	0,95	0,4054	€ 4.399,56	SI
13	TOMAS DE VIYARROYA	0,25	0,02	0,433	0,021	0,410	1,00	0,3562	€ 2.323,20	SI
8	CARTEROS	0,50	0,08	0,215	0,175	0,362	0,78	0,3513	€ 109.622,80	SI
5	ARCHIDUQUE CARLOS	0,50	0,04	0,098	0,560	0,249	0,46	0,3178	€ 649.100,80	SI
11	CASTAN TOBEÑAS	0,25	0,01	0,261	0,180	0,231	0,92	0,3077	€ 9.539,64	SI
9	CUENCA	0,50	0,01	0,030	0,430	0,033	0,63	0,2706	€ 187.107,00	NO
2	AV. GIORGETA	0,00	1,00	0,000	0,000	0,000	0,00	0,1666	€ 39.823,52	NO
3	TRES FORQUES	0,50	0,00	0,000	0,390	0,000	0	0,1483	€ 955.555,38	NO
1	PEREZ GALDOS	0,00	0,35	0,000	0,000	0,000	0,00	0,0580	€ 39.823,52	NO
10	AYORA	0,00	0,11	0,000	0,000	0,000	0,00	0,0185	€ 2.964,50	NO
6	JESUS De G.V.	0,00	0,07	0,000	0,000	0,000	0,00	0,0121	€ 18.309,72	NO
4	JAIME BELTRAN	0,00	0,02	0,000	0,000	0,000	0,00	0,0037	€ 4.238,87	NO
TOTAL									€ 781.413,52	

Tabla 39.- Priorización de alternativas, escenario inicial, año 2019.

La herramienta indica que en el 2019, último año de análisis, las vías a intervenir serán: Uruguay, Brasil, Tomas de Viyarroya, Carteros, Archiduque Carlos y Castan Tobeñas. Por consiguiente, la muestra seleccionada a finales del año 2019 presenta las siguientes condiciones:

ID	Descripción	PCI
1	PEREZ GALDOS	100,00
2	GIORGETA	100,00
3	TRES FORQUES	60,31
4	JAIME BELTRAN	100,00
5	ARCHIDUQUE CARLOS	100,00
6	JESUS	100,00
7	URUGUAY.	100,00
8	CARTEROS	100,00
9	CUENCA	56,90
10	AYORA	100,00
11	CASTAN TOBEÑAS	100,00
12	BRASIL	100,00
13	TOMAS DE VIYARROYA	100,00

Tabla 40.- Condición de la red vial al final del 2019, escenario inicial.

Una vez que se conoce el estado final esperado de la red vial en un horizonte de 4 años, se procede a calcular su valor residual final, el beneficio generado por el incremento del mismo y el ratio beneficio coste obtenido.

ID	Descripción	Long (m).	Ancho (m)	IMD	IMDp	Curva de Deterioro	PCI		Coste Reconstrucción Unitario (€/m2)	A2 / (A1+A2)	Valor Residual (€)
							2019	edad del pavimento (años)			
1	PEREZ GALDOS	1496	22	53836	1777	3	100,00	0	69,32	100,00%	€ 2.281.459,84
2	GIORGETA	1496	22	65145	2215	3	100,00	0	69,32	100,00%	€ 2.281.459,84
3	TRES FORQUES	2295	15,6	14049	478	1	60,31	11	69,32	12,61%	€ 312.954,30
4	JAIME BELTRAN	302	11,6	6032	92	1	100,00	0	58,83	100,00%	€ 206.093,26
5	ARCHIDUQUE CARLOS	1280	19	30876	1050	2	100,00	0	69,32	100,00%	€ 1.685.862,40
6	JESUS	1164	13	23222	348	2	100,00	0	69,32	100,00%	€ 1.048.950,24
7	URUGUAY.	664	8	10411	156	1	100,00	0	58,83	100,00%	€ 312.504,96
8	CARTEROS	833	7	10411	156	1	100,00	0	58,83	100,00%	€ 343.037,73
9	CUENCA	1327	7,5	5295	79	1	56,90	12	58,83	8,46%	€ 49.533,77
10	AYORA	350	7	8472	127	1	100,00	0	58,83	100,00%	€ 144.133,50
11	CASTAN TOBEÑAS	876	9	3257	98	1	100,00	0	58,83	100,00%	€ 463.815,72
12	BRASIL	606	6	5241	157	1	100,00	0	58,83	100,00%	€ 213.905,88
13	TOMAS DE VIYARROYA	320	6	1448	44	1	100,00	0	72,01	100,00%	€ 138.259,20
										Valor residual 2019	€ 9.481.970,64
										Valor residual 2016	€ 2.186.942,01
										Incremento en VR (Beneficio)	€ 7.295.028,63
										Inversión Total (Coste)	€ 3.343.582,00
										Beneficio/Coste	2,18

Tabla 41.- Resultados obtenidos en 4 años con la utilización de la herramienta de toma de decisiones, escenario inicial

Como se puede observar en la tabla anterior, tras aplicar la herramienta de toma de decisiones en 4 años consecutivos, se ha generado un incremento de valor en la red vial de € 7.295.028,63 realizando una inversión de € 3.343.582,00. El ratio beneficio coste obtenido ha sido de 2,18.

Aunque el objetivo principal de la herramienta es la consecución de un alto ratio beneficio-coste, las políticas con las que ha sido desarrollada dictan que para su cumplimiento, se dará importancia a la sostenibilidad. Es por eso que interesa conocer, las afecciones producidas al medio ambiente y a la sociedad para la consecución del ratio de 2,18. Para su efecto, se presenta la siguiente tabla resumen:

Año	Coste (Euros)	Emisiones (Kg CO2)	Tiempo de Actuación (días)	IMD*tiempo actuación
2016	€ 926.727,68	257.618,62	93,00	4.996.227,00
2017	€ 104.265,16	39.469,28	32,00	286.622,00
2018	€ 1.531.175,64	404.786,11	237,00	8.141.294,00
2019	€ 781.413,52	222.594,93	125,00	2.451.868,00
TOTAL	€ 3.343.582,00	924.468,94	487,00	15.876.011,00

Tabla 42.-Tabla resumen de coste y afecciones sociales y medioambientales, escenario inicial.

De la tabla anterior se puede extraer que, la consecución del ratio beneficio coste de 2,18, tuvo como consecuencia la generación de 925 Toneladas de CO2. En cuanto a la afección a los usuarios de la red vial, causó interferencias en el tráfico en un total de 487 días, con una generación de molestias de 15,8 millones de usuarios/día.

Sin embargo, el escenario planteado es un escenario inicial, en donde los pesos relativos de todos los criterios establecidos son iguales. En el siguiente apartado, se realizará un análisis de sensibilidad con la finalidad de analizar cuáles son los criterios que contribuyen en mayor proporción a la consecución de un mayor ratio beneficio coste.

6. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En el presente apartado, se procederá a plantear distintos escenarios con la finalidad de analizar y detectar la influencia de los pesos de cada criterio en la consecución del fin último. Es decir, se quiere buscar la mejor combinación de pesos que asegure que la toma de decisión anual obtiene los mejores resultados a largo plazo.

Puesto que el escenario inicial asignaba pesos iguales a todos los criterios, a continuación, se plantarán escenarios de la siguiente manera: 6 escenarios en donde el peso de uno de los criterios sea 0% y el 100% se repartirá entre los 5 restantes. Además, se estudiarán 6 escenarios más, en donde el peso de uno de los criterios se duplique con respecto al escenario inicial (33,33%) el porcentaje restante, se distribuirá de igual manera entre los demás. Finalmente,

6 escenarios adicionales, en donde el peso de uno de los criterios sea del 50%, repartiendo el 50% adicional entre los demás.

Después a este planteamiento, se realizará una análisis y discusión de los resultados obtenidos. Basados en dicho análisis, se analizará la conveniencia de plantear escenarios adicionales en busca de un mejor resultado. Posterior a la asignación de pesos acorde a lo indicado en los párrafos anteriores, se repite el proceso descrito en los apartados 4.5, 4.6 y 4.7. Considerando que los datos de entrada al año 0, inicios del 2016 siempre serán los mismos. Flujo de trabajo que se resume mediante el siguiente esquema:

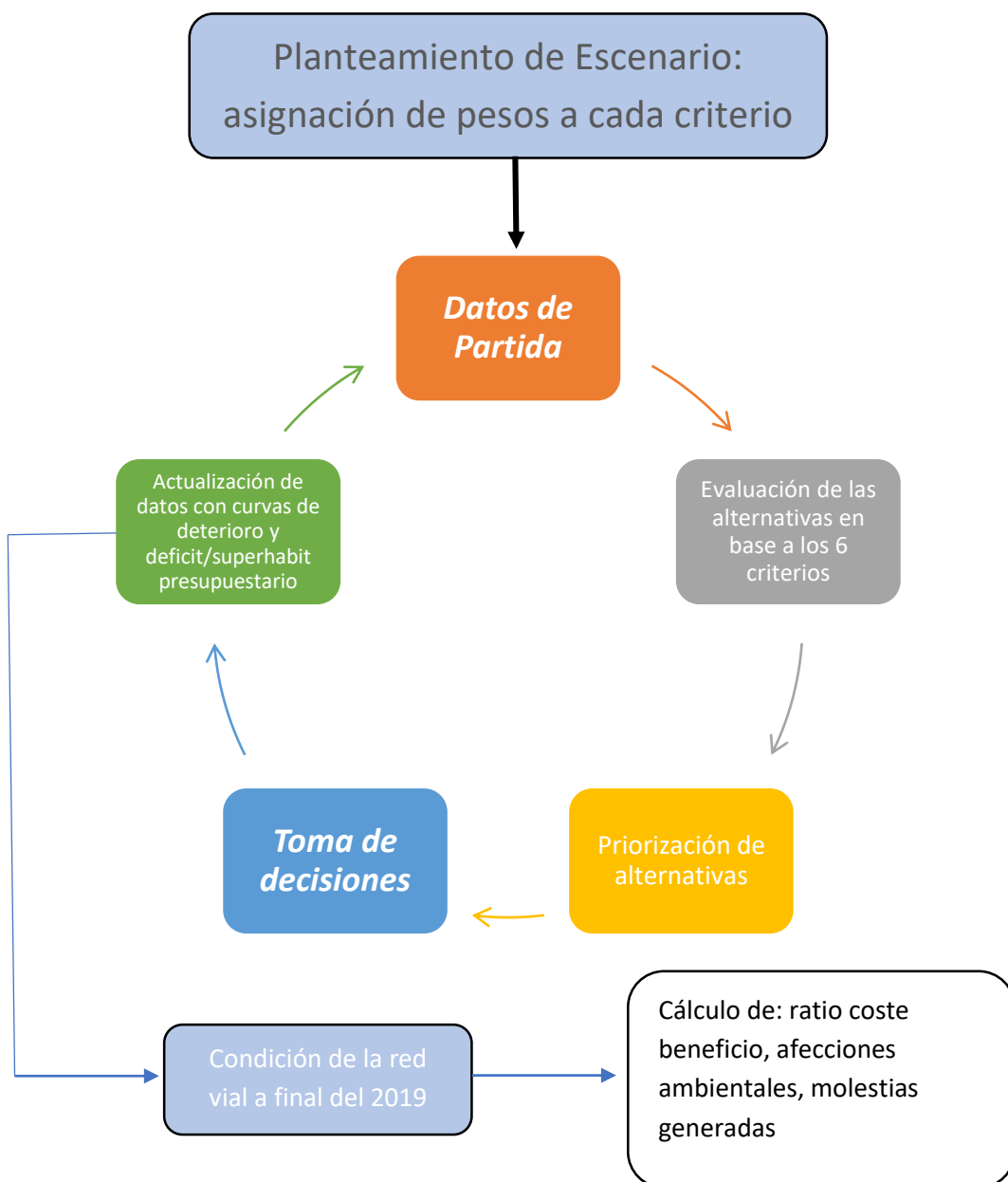


Fig. 24.- Flujo de trabajo a utilizar para la ejecución de la herramienta de toma de decisiones.

Posterior al análisis de los 18 escenarios planteados, los resultados obtenidos fueron los siguientes:

Escenarios	CRITERIO 1	CRITERIO 2	CRITERIO 3	CRITERIO 4	CRITERIO 5	CRITERIO 6	Valor Residual al final del 2019	Inversión (Coste (€))	Tiempo de intervención (días)	Emisiones de CO2 (kg)	IMD*tiempo actuación	B/C
	Confort	Accidentalidad	Eficiencia Económica	Distancia a Infraestructura	Eficiencia Ambiental	Molestias Generadas						
1	16,66%	16,66%	16,70%	16,66%	16,66%	16,66%	9.481.970,64 €	3.343.582,00 €	487,00	924.468,94	15.876.011,00	2,18
2	0,00%	20,00%	20,00%	20,00%	20,00%	20,00%	9.481.970,64 €	3.343.582,00 €	572,00	1.146.847,64	15.537.296,00	2,18
3	33,32%	13,34%	13,34%	13,34%	13,34%	13,34%	9.326.019,05 €	3.331.558,47 €	437,00	916.916,97	13.842.992,00	2,14
4	50,00%	10,00%	10,00%	10,00%	10,00%	10,00%	5.131.350,15 €	2.827.485,86 €	412,00	761.845,75	8.672.218,00	1,04
5	20,00%	0,00%	20,00%	20,00%	20,00%	20,00%	9.481.970,64 €	3.373.186,10 €	580,00	963.033,15	13.188.825,00	2,16
6	13,34%	33,32%	13,34%	13,34%	13,34%	13,34%	8.317.313,96 €	2.832.201,57 €	715,00	1.104.317,67	16.748.889,00	2,16
7	10,00%	50,00%	10,00%	10,00%	10,00%	10,00%	7.660.823,25 €	2.964.077,68 €	431,00	820.083,64	8.813.802,00	1,85
8	20,00%	20,00%	0,00%	20,00%	20,00%	20,00%	8.332.080,05 €	2.874.865,44 €	447,00	820.966,96	14.039.540,00	2,14
9	13,34%	13,34%	33,32%	13,34%	13,34%	13,34%	7.644.920,55 €	3.524.328,24 €	496,00	973.300,12	13.463.189,00	1,55
10	10,00%	10,00%	50,00%	10,00%	10,00%	10,00%	7.644.920,55 €	3.524.328,24 €	496,00	973.300,12	13.463.189,00	1,55
11	20,00%	20,00%	20,00%	0,00%	20,00%	20,00%	8.436.691,73 €	3.157.215,14 €	541,00	1.019.830,93	19.194.084,00	1,98
12	13,34%	13,34%	13,34%	33,32%	13,34%	13,34%	8.897.565,84 €	3.444.464,76 €	570,00	1.155.049,05	21.360.615,00	1,95

13	10,00%	10,00%	10,00%	50,00%	10,00%	10,00%	9.158.914,21 €	3.312.420,84 €	471,00	910.728,03	16.094.964,00	2,10
14	20,00%	20,00%	20,00%	20,00%	0,00%	20,00%	10.665.786,69 €	3.347.820,87 €	496,00	1.205.846,56	15.930.299,00	2,53
15	13,34%	13,34%	13,34%	13,34%	33,32%	13,34%	9.378.976,16 €	3.343.582,00 €	487,00	924.468,94	15.876.011,00	2,15
16	10,00%	10,00%	10,00%	10,00%	50,00%	10,00%	7.693.113,76 €	2.646.098,00 €	376,63	754.958,54	8.621.504,06	2,08
17	20,00%	20,00%	20,00%	20,00%	20,00%	0,00%	9.000.560,32 €	3.463.732,16 €	487,00	927.872,73	17.338.028,00	1,97
18	13,34%	13,34%	13,34%	13,34%	13,34%	33,32%	8.332.080,05 €	2.898.183,35 €	492,00	835.612,92	14.302.238,00	2,12
19	10,00%	10,00%	10,00%	10,00%	10,00%	50,00%	6.687.532,37 €	2.414.879,87 €	472,00	723.597,12	11.787.536,00	1,86

Tabla 43.- Resultados del análisis de sensibilidad.

El proceso para la obtención de los resultados presentados, se adjuntan en el Anexo 3 del presente trabajo.

El mejor de los escenarios resultante del análisis es el número 14, consiguiendo un valor residual final de la red vial de 10.665.786,69 € con una inversión de 3.347.820,87 €, obteniéndose un ratio beneficio coste de 2,53. En este escenario, se ha suprimido el criterio de eficiencia ambiental, motivo por el cual, a pesar de ser el más rentable, es el que más toneladas de CO2 genera, 1205 TON.

Por otra parte, el peor de los escenarios es el 4, escenario que asigna un peso del 50% al criterio 1, Confort. En este escenario, el valor residual final de la red vial es de 5.131.350,15 €, para lo cual se necesita invertir 2.827.485,86 €, teniendo una ratio beneficio coste de 1,04. Este valor, por su proximidad a la unidad, indica que los beneficios generados son similares al dinero invertido, lo que se traduce en una inversión carente de ganancias.

A continuación, se procede a analizar de manera aislada cada uno de los 6 indicadores.

CRITERIO 1: CONFORT DE LOS USUARIOS

CRITERIO 1: CONFORT					
Pesos	VR	Tiempo de intervención (días)	Emisiones de CO2 (kg)	IMD*tiempo actuación	B/C
0,00%	€ 9.481.970,64	572	1146847,642	15537296	2,182
16,66%	€ 9.481.970,64	487	924468,942	15876011	2,182
33,32%	€ 9.326.019,05	437	916916,974	13842992	2,143
50,00%	€ 5.131.350,15	412	761845,752	8672218	1,041

Tabla 44.- Análisis de Sensibilidad del criterio 1

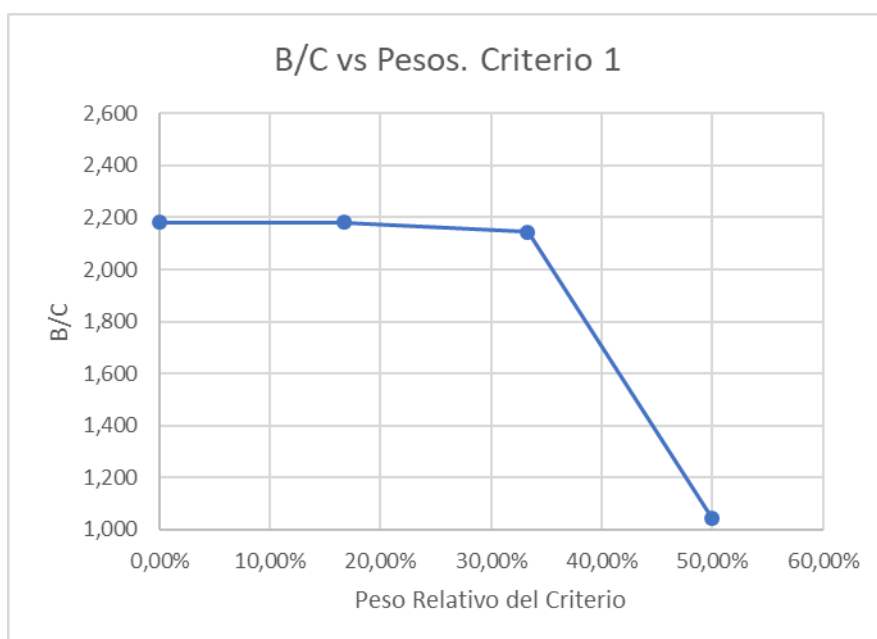


Fig. 25.- Análisis de sensibilidad del criterio 1.

Como se puede observar en la gráfica, incrementando el peso relativo del criterio de confort hasta un **30%** aproximadamente, los resultados del beneficio coste obtenidos son relativamente altos. Sin embargo, desde este punto en adelante, el incremento del peso del criterio hace que el B/C se reduzca de manera drástica. Al llegar al asignarle a el criterio en mención el 50% del peso, el B/C llega a ser cercano a 1, es decir, una inversión sin ganancia alguna.

Se infiere, que los resultados de sensibilidad de este criterio, se obtienen puesto que, el criterio 1 (Confort de los usuarios) prioriza las vías que en peor estado se encuentran. Es por ello, que al incrementar su peso relativo, se obtiene una priorización tal que, los recursos disponibles deben ser consumidos únicamente en las intervenciones mayores, mas no en las de carácter rutinario.

Ejemplo de ello, es el resultado obtenido con el escenario 14, en donde sus pesos fueron (50%, 10%, 10%, 10%, 10%, 10%), la condición de la red vial en estudio a finales del 2019 fue la siguiente:

ID	Descripción	PCI
1	PEREZ GALDOS	100,00
2	GIORGETA	51,16
3	TRES FORQUES	63,55
4	JAIME BELTRAN	86,47
5	ARCHIDUQUE CARLOS	47,89
6	JESUS	100,00
7	URUGUAY.	100,00
8	CARTEROS	49,54
9	CUENCA	60,31
10	AYORA	86,47
11	CASTAN TOBEÑAS	84,00
12	BRASIL	84,00
13	TOMAS DE VIYARROYA	49,54

Tabla 45.- Condición de la red vial al final del 2019, escenario 14.

En este escenario, la herramienta priorizó siempre las vías con mayor deterioro, descuidando aquellas con condición excelente y buena, y permitiendo su deterioro. A diferencia del escenario inicial, en el que la mayoría de las vías llegaban al final del 2019 con un PCI estimado de 100, en este caso solamente 3 lo hacen. Otras 3 vías presentan un PCI cercano a 40, el umbral bajo el cual la intervención a realizar es de carácter reconstructivo y el valor residual de la vía es cercano a 0.

CRITERIO 2: COSTE DE ACCIDENTALIDAD

CRITERIO 2: ACCIDENTALIDAD					
Pesos	VR	Tiempo de intervención (días)	Emisiones de CO2 (kg)	IMD*tiempo actuación	B/C
0,00%	€ 9.481.970,64	580	963033,154	13188825	2,163
16,66%	€ 9.481.970,64	487	924468,942	15876011	2,182
33,32%	€ 8.317.313,96	715	1104317,669	16748889	2,165
50,00%	€ 7.660.823,25	431	820083,642	8813802	1,847

Tabla 46.- Análisis de sensibilidad del criterio 2

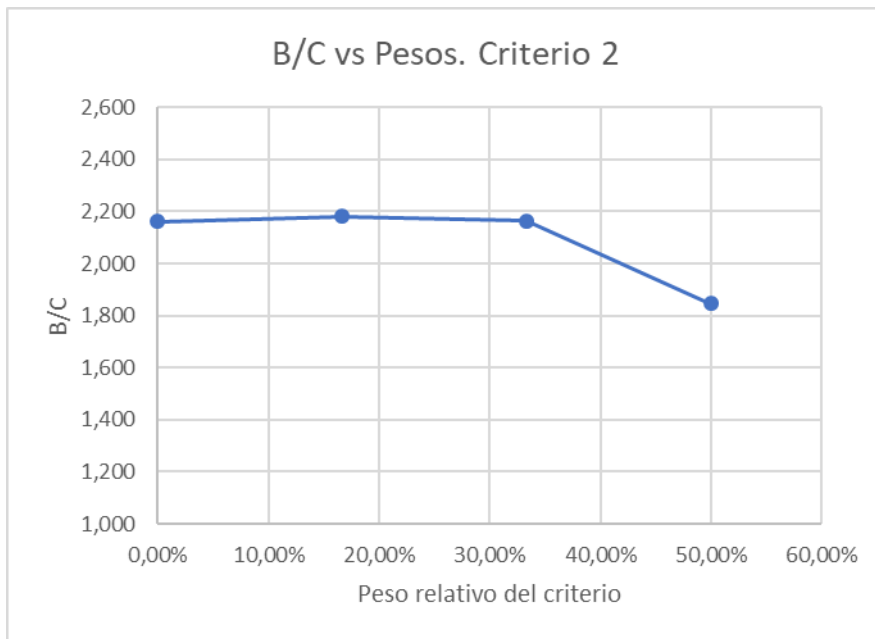


Fig. 26.- Análisis de sensibilidad del criterio 2.

Del gráfico anterior, se puede resaltar que los valores de B/C permanecen casi constantes hasta que el peso asignado al criterio 2 es cercano al 30%. De este punto en adelante, el ratio empieza a decrecer.

El criterio 2 (Coste de accidentalidad), prioriza aquellas vías cuyo coste anual de accidentes es mayor. Acorda a lo ya indicado en el punto 3.2.2. del presente trabajo, el mayor coste es siempre generado por aquellas vías que poseen una mayor densidad de tráfico en función de sus dimensiones. Es por ello que la herramienta de toma de decisiones, al incrementar este criterio a valores superiores al 50%, margina aquellas vías con una baja relación tráfico/dimensiones.

ID	Descripción	PCI	Relación IMD/(Área)
1	PEREZ GALDOS	100,00	1,636
2	GIORGETA	100,00	1,979
3	TRES FORQUES	60,31	0,392
4	JAIME BELTRAN	100,00	1,722
5	ARCHIDUQUE CARLOS	43,56	1,270
6	JESUS	100,00	1,535
7	URUGUAY.	100,00	1,960
8	CARTEROS	100,00	1,785
9	CUENCA	56,90	0,532
10	AYORA	100,00	3,458
11	CASTAN TOBEÑAS	82,00	0,413
12	BRASIL	100,00	1,441
13	TOMAS DE VIYARROYA	100,00	0,754

Tabla 47.- Condición de la red vial a finales de 2019, escenario 7.

Conforme a lo indicado anteriormente y a la tabla presentada, se puede observar que, la herramienta de toma de decisiones no ha priorizado en los 4 años las vías: Tres Forques, Cuenca y Castan Tobeñas. Las 3 presentan un factor común, una baja relación IMD/Área de la vía. Esta relación hace que el coste de accidentalidad sea relativamente bajo con respecto a las demás.

Como idea general, se puede extraer que el criterio 2 no debe tomar un peso relativo alto.

CRITERIO 3: EFICIENCIA ECONÓMICA DE LA ACTUACIÓN.

CRITERIO 3: EFICIENCIA ECONÓMICA					
Pesos	VR	Tiempo de intervención (días)	Emisiones de CO2 (kg)	IMD*tiempo actuación	B/C
0,00%	€ 8.332.080,05	447	820966,957	14039540,000	2,13
16,66%	€ 9.481.970,64	487	924468,942	15876011,000	2,18
33,32%	€ 7.644.920,55	496	973300,122	13463189,000	1,54
50,00%	€ 7.644.920,55	496	973300,122	13463189,000	1,55

Tabla 48.- Análisis de sensibilidad del criterio 3.

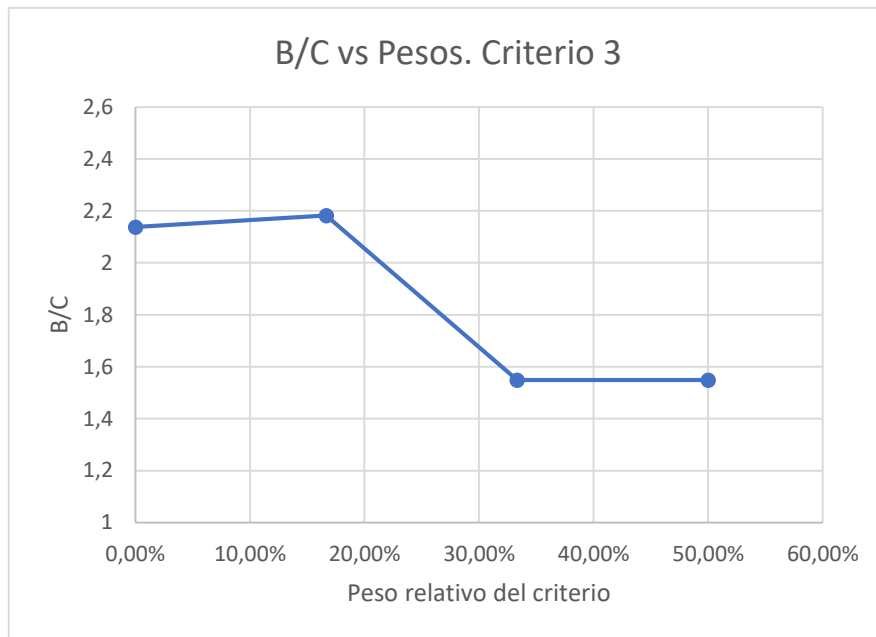


Fig. 27.- Análisis de sensibilidad del criterio 3.

En el caso del criterio 3 (eficiencia económica de la actuación), se puede concluir de la gráfica, que no es conveniente asignar pesos relativos altos. Como se ha explicado en el apartado 3.2.3., este criterio prioriza por una parte los mantenimientos rutinarios y por otra aquellas vías que concentran una mayor cantidad de tráfico.

Al incrementar el peso relativo del criterio, la herramienta empieza a marginar aquellas vías que, al año 0 presentan una mala condición en el pavimento. La herramienta las sigue marginando en años posteriores de manera que se llega a un punto en el que han alcanzado su deterioro total, necesitando una costosa reconstrucción y su valor residual cae a cero.

ID	Descripción	IMD	Área a intervenir (m ²)	PCI a inicios de 2016	PCI a finales de 2019
1	PEREZ GALDOS	53.836	32.912	51,54	100,00
2	GIORGETA	65.145	32.912	59,79	100,00
3	TRES FORQUES	14.049	35.802	69,86	60,31
4	JAIME BELTRAN	6.032	3.503	24,23	100,00
5	ARCHIDUQUE CARLOS	30.876	24.320	56,45	43,56
6	JESUS	23.222	15.132	56,91	100,00
7	URUGUAY.	10.411	5.312	44,43	100,00
8	CARTEROS	10.411	5.831	58,30	100,00
9	CUENCA	5.295	9.953	65,58	56,90
10	AYORA	8.472	2.450	44,44	100,00

11	CASTAN TOBEÑAS	3.257	7.884	91,83	82,00
12	BRASIL	5.241	3.636	89,83	100,00
13	TOMAS DE VIYARROYA	1.448	1.920	57,78	100,00

Tabla 49.- Condición de la red vial a finales de 2019, escenario 10.

La tabla anterior muestra los resultados del escenario 10, en el cual se ha asignado los pesos de la siguiente manera: 10%, 10%, 50%, 10%, 10%, 10%. Las vías: Tres Forques, Archiduque Carlos y Cuenca, que no han sido priorizadas dentro de los 4 años de análisis, presentan el factor común de tener una mala condición a inicios de 2016. Se puede observar también que todas ellas presentan una baja relación IMD/área comparado con las demás, es por esto que actuar en ellas es económicamente menos eficiente.

CRITERIO 4: PROXIMIDAD A INFRAESTRUCTURA SOCIAL Y TURÍSTICA.

CRITERIO 4: DISTANCIA A INFRAESTRUCTURA					
Pesos	VR	Tiempo de intervención (días)	Emisiones de CO2 (kg)	IMD*tiempo actuación	B/C
0,00%	€ 8.436.691,73	541	1019830,934	19194084	1,98
16,66%	€ 9.481.970,64	487	924468,942	15876011	2,18
33,32%	€ 8.897.565,84	570	1155049,052	21360615	1,95
50,00%	€ 9.158.914,21	471	910728,027	16094964	2,10

Tabla 50.- Análisis de sensibilidad del criterio 4.

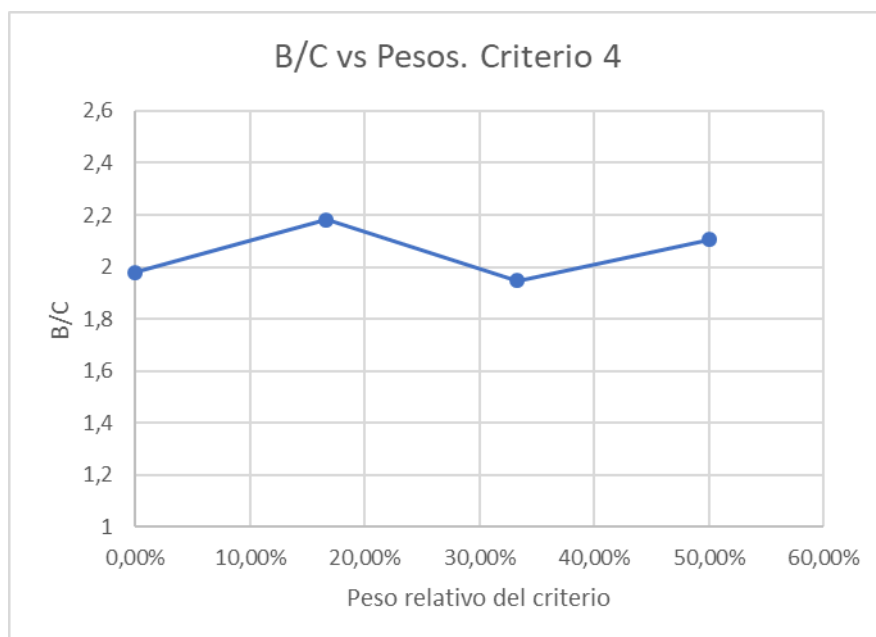


Fig. 28.- Análisis de sensibilidad del criterio 4.

Con respecto al presente criterio, al observar la gráfica, se puede concluir que al sufrir variaciones en su peso relativo, oscila entre un rango de valores de B/C constante. Esto se debe a que es un criterio planteado para priorizar aquellas vías que los gestores consideren se encuentren cercanas a infraestructuras

consideradas importantes. Es por esto que se puede concluir que su sensibilidad depende de la muestra en análisis.

Por ejemplo, de ser el caso de una red vial de 10 vías, en las que el 50% de ellas no estén cercanas a una infraestructura considerada importante y, además el peso relativo asignado a este criterio supere el 50%; Los resultados serían bastante desfavorables. Pues la herramienta priorizaría siempre el 50% cercano a infraestructuras importantes, permitiendo el deterioro de las demás.

Es por esto, que se considera la conveniencia de mantener este criterio con un peso relativo bajo.

CRITERIO 5: EFICIENCIA AMBIENTAL DE LA ACTUACIÓN.

CRITERIO 5: EFICIENCIA AMBIENTAL					
Pesos	VR	Tiempo de intervención (días)	Emisiones de CO2 (kg)	IMD*tiempo actuación	B/C
0,00%	€ 10.665.786,69	496	1205847	15930299	2,53
16,66%	€ 9.481.970,64	487	924469	15876011	2,18
33,32%	€ 9.378.976,16	487	924469	15876011	2,15
50,00%	€ 7.693.113,76	377	754959	8621504,061	2,08

Tabla 51.- Análisis de sensibilidad del criterio 5.

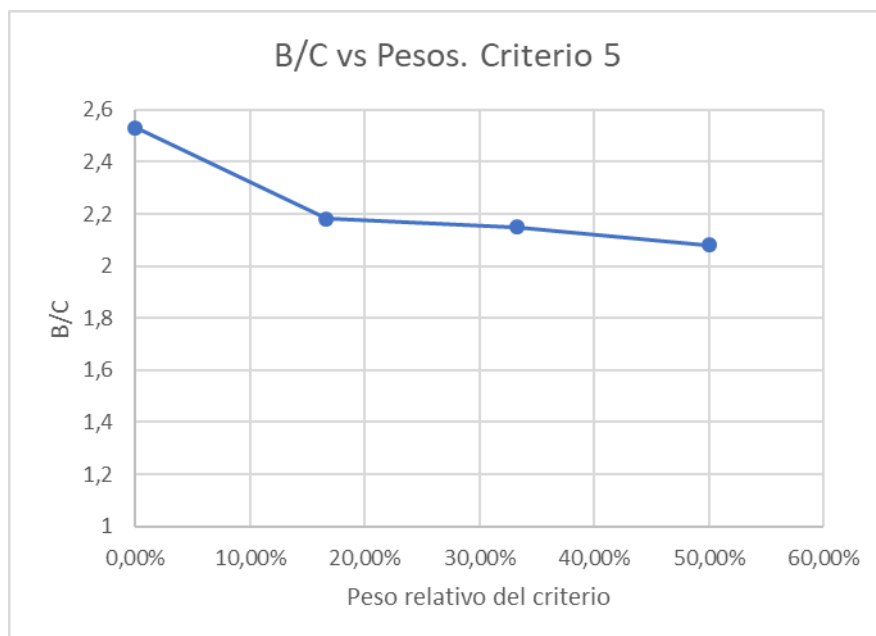


Fig. 29.- Análisis de sensibilidad del criterio 5.

En la figura anterior, se puede apreciar claramente un comportamiento cuasi lineal decreciente a manera que el peso relativo del criterio se incrementa. Este criterio prioriza aquellas alternativas ambientalmente eficientes, aquellas con la que se genera bajas cantidades de CO2 atendiendo una alta IMD. Es por ello que el criterio prioriza siempre las actuaciones menores.

De la gráfica se puede inferir que es conveniente mantener el peso relativo del criterio entre 0 y 10% aproximadamente, puesto que con estos valores se consiguen buenos resultados B/C.

CRITERIO 6: MOLESTIAS GENERADAS CON LA ACTUACIÓN.

CRITERIO 6: MOLESTIAS GENERADAS/TIEMPO DE ACTUACIÓN					
Pesos	VR	Tiempo de intervención (días)	Emisiones de CO2 (kg)	IMD*tiempo actuación	B/C
0,00%	€ 9.000.560,32	487	927873	17338028	1,97
16,66%	€ 9481970,642	487	924469	15876011	2,18
33,32%	€ 8.332.080,05	492	835613	14302238	2,12
50,00%	€ 6.687.532,37	472	723597	11787536	1,86

Tabla 52.- Análisis de sensibilidad del criterio 6.

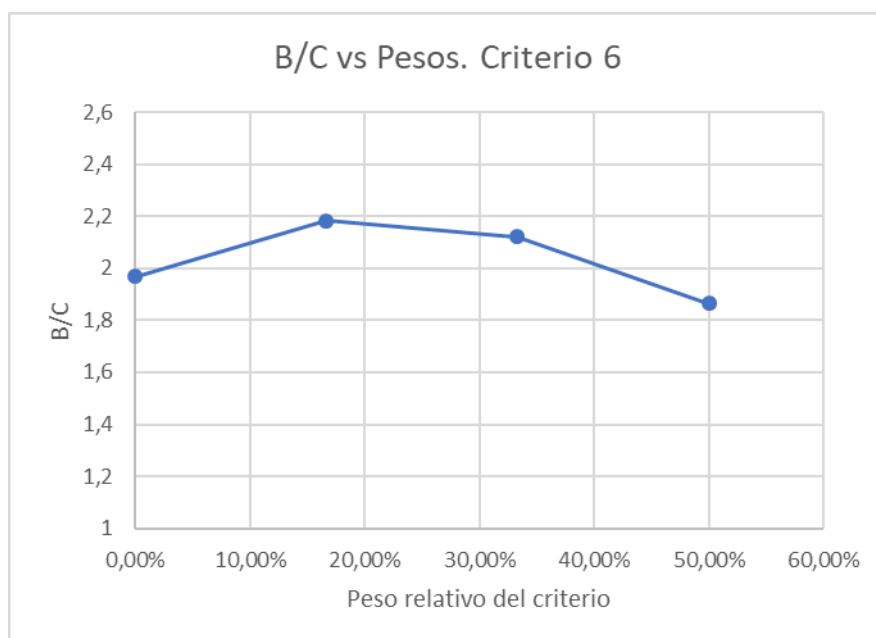


Tabla 53.- Análisis de sensibilidad del criterio 6.

De la gráfica anterior, se puede observar la conveniencia de mantener el peso relativo del criterio en un rango aproximado de 10% y 30%.

Posterior al análisis presentado anteriormente, se cree conveniente plantear escenarios adicionales, buscando incrementar el ratio coste beneficio. Por ello se ha decidido plantear los escenarios con los siguientes pesos:

Escenario 20: 30%, 10%, 30%, 10%, 10%, 10%.

Escenario 21: 30%, 5%, 30%, 15%, 5%, 15%.

Escenario 22: 19%, 19%, 19%, 19%, 5%, 19%.

Adicionalmente, (Guaita, Serra 2016), entre las conclusiones extraídas de las entrevistas realizadas en su investigación, a los máximos responsables de la gestión de pavimentos en la ciudad de Valencia, señalan que: “el nivel máximo de inversión viene definido en función de los presupuestos municipales en base a las inspecciones visuales y del estado en el que se encuentra la red”. Añadiendo a esto que, la ciudad de Valencia carece de un PMS, la toma de decisiones en la actualidad estaría relacionada con un escenario en el que la condición del pavimento es el único criterio para decidir. Es por esto que adicionalmente se plantea el escenario 0, en donde se le asigna al criterio 1 el 100% del peso.

Escenario 0: 100%, 0%, 0%, 0%, 0%, 0%.

Tras la inclusión de los 4 escenarios en mención, se presenta a continuación la tabla de resultados de los 23 escenarios propuestos con la finalidad de obtener una visión global.

Escenarios	CRITERIO 1	CRITERIO 2	CRITERIO 3	CRITERIO 4	CRITERIO 5	CRITERIO 6	Valor Residual al final del 2019	Inversión (Coste (€))	Tiempo de intervención (días)	Emisiones de CO2 (kg)	IMD*tiempo actuación	B/C
	Confort	Accidentalidad	Eficiencia Económica	Distancia a Infraestructura	Eficiencia Ambiental	Molestias Generadas						
0	100,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	8.760.917,67 €	3.460.811,50 €	455	949.351	13.886.111	1,90
1	16,66%	16,66%	16,70%	16,66%	16,66%	16,66%	9.481.970,64 €	3.343.582,00 €	487,00	924.468,94	15.876.011,00	2,18
2	0,00%	20,00%	20,00%	20,00%	20,00%	20,00%	9.481.970,64 €	3.343.582,00 €	572,00	1.146.847,64	15.537.296,00	2,18
3	33,32%	13,34%	13,34%	13,34%	13,34%	13,34%	9.326.019,05 €	3.331.558,47 €	437,00	916.916,97	13.842.992,00	2,14
4	50,00%	10,00%	10,00%	10,00%	10,00%	10,00%	5.131.350,15 €	2.827.485,86 €	412,00	761.845,75	8.672.218,00	1,04
5	20,00%	0,00%	20,00%	20,00%	20,00%	20,00%	9.481.970,64 €	3.373.186,10 €	580,00	963.033,15	13.188.825,00	2,16
6	13,34%	33,32%	13,34%	13,34%	13,34%	13,34%	8.317.313,96 €	2.832.201,57 €	715,00	1.104.317,67	16.748.889,00	2,16
7	10,00%	50,00%	10,00%	10,00%	10,00%	10,00%	7.660.823,25 €	2.964.077,68 €	431,00	820.083,64	8.813.802,00	1,85
8	20,00%	20,00%	0,00%	20,00%	20,00%	20,00%	8.332.080,05 €	2.874.865,44 €	447,00	820.966,96	14.039.540,00	2,14
9	13,34%	13,34%	33,32%	13,34%	13,34%	13,34%	7.644.920,55 €	3.524.328,24 €	496,00	973.300,12	13.463.189,00	1,55
10	10,00%	10,00%	50,00%	10,00%	10,00%	10,00%	7.644.920,55 €	3.524.328,24 €	496,00	973.300,12	13.463.189,00	1,55
11	20,00%	20,00%	20,00%	0,00%	20,00%	20,00%	8.436.691,73 €	3.157.215,14 €	541,00	1.019.830,93	19.194.084,00	1,98
12	13,34%	13,34%	13,34%	33,32%	13,34%	13,34%	8.897.565,84 €	3.444.464,76 €	570,00	1.155.049,05	21.360.615,00	1,95
13	10,00%	10,00%	10,00%	50,00%	10,00%	10,00%	9.158.914,21 €	3.312.420,84 €	471,00	910.728,03	16.094.964,00	2,10
14	20,00%	20,00%	20,00%	20,00%	0,00%	20,00%	10.665.786,69 €	3.347.820,87 €	496,00	1.205.846,56	15.930.299,00	2,53
15	13,34%	13,34%	13,34%	13,34%	33,32%	13,34%	9.378.976,16 €	3.343.582,00 €	487,00	924.468,94	15.876.011,00	2,15
16	10,00%	10,00%	10,00%	10,00%	50,00%	10,00%	7.693.113,76 €	2.646.098,00 €	376,63	754.958,54	8.621.504,06	2,08
17	20,00%	20,00%	20,00%	20,00%	20,00%	0,00%	9.000.560,32 €	3.463.732,16 €	487,00	927.872,73	17.338.028,00	1,97
18	13,34%	13,34%	13,34%	13,34%	13,34%	33,32%	8.332.080,05 €	2.898.183,35 €	492,00	835.612,92	14.302.238,00	2,12
19	10,00%	10,00%	10,00%	10,00%	10,00%	50,00%	6.687.532,37 €	2.414.879,87 €	472,00	723.597,12	11.787.536,00	1,86
20	30,00%	10,00%	30,00%	10,00%	10,00%	10,00%	10.017.942,45 €	2.698.720,07 €	513,00	995.903,15	14.344.514,00	2,90
21	30,00%	5,00%	30,00%	15,00%	5,00%	15,00%	9.481.970,64 €	3.361.891,72 €	513,00	934.665,10	16.576.290,00	2,17
22	19,00%	19,00%	19,00%	19,00%	5,00%	19,00%	9.481.970,64 €	3.343.582,00 €	487,00	924.468,94	15.876.011,00	2,18

Tabla 54.- Resumen de escenarios planteados.



Fig. 30.- Variación del beneficio/coste con cada escenario

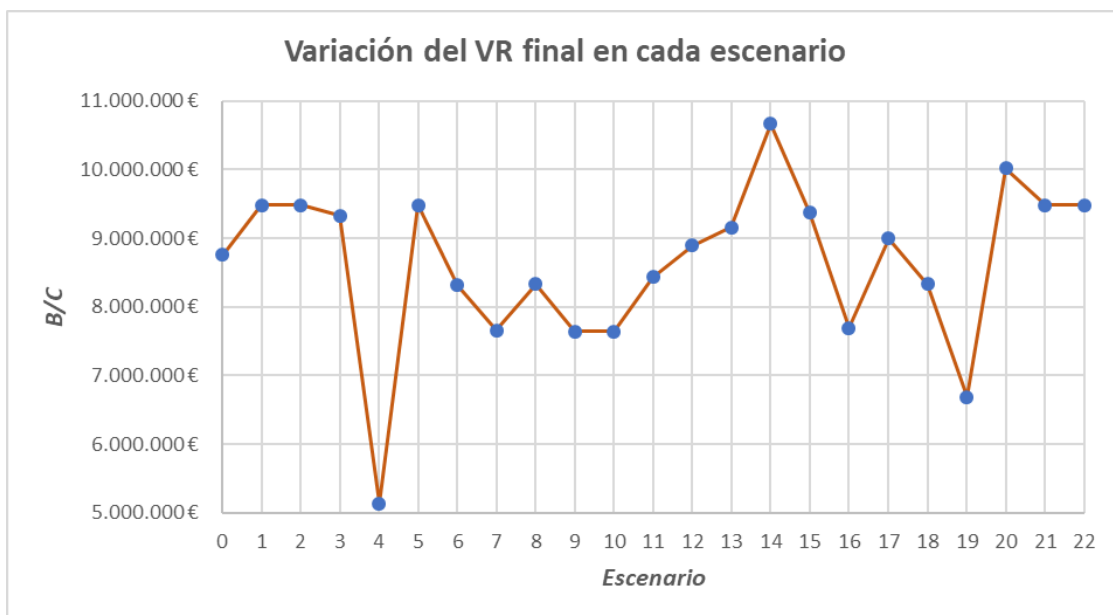


Fig. 31.- Variación del valor residual final de la red vial con cada escenario.

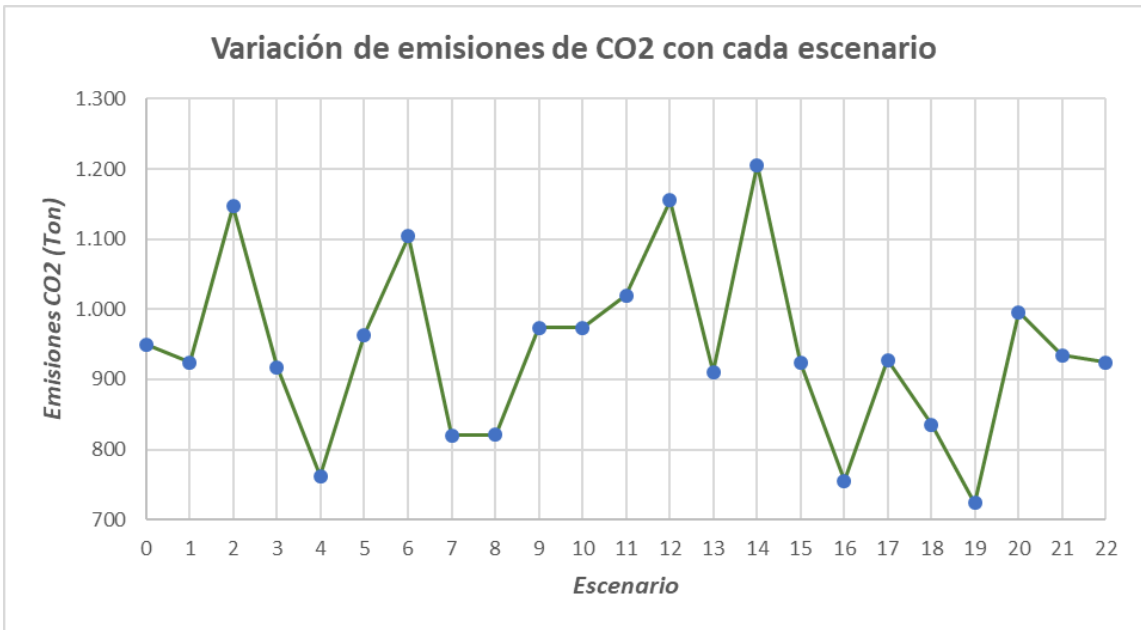


Fig. 32.- Variación de emisiones de CO2 generadas con cada escenario.

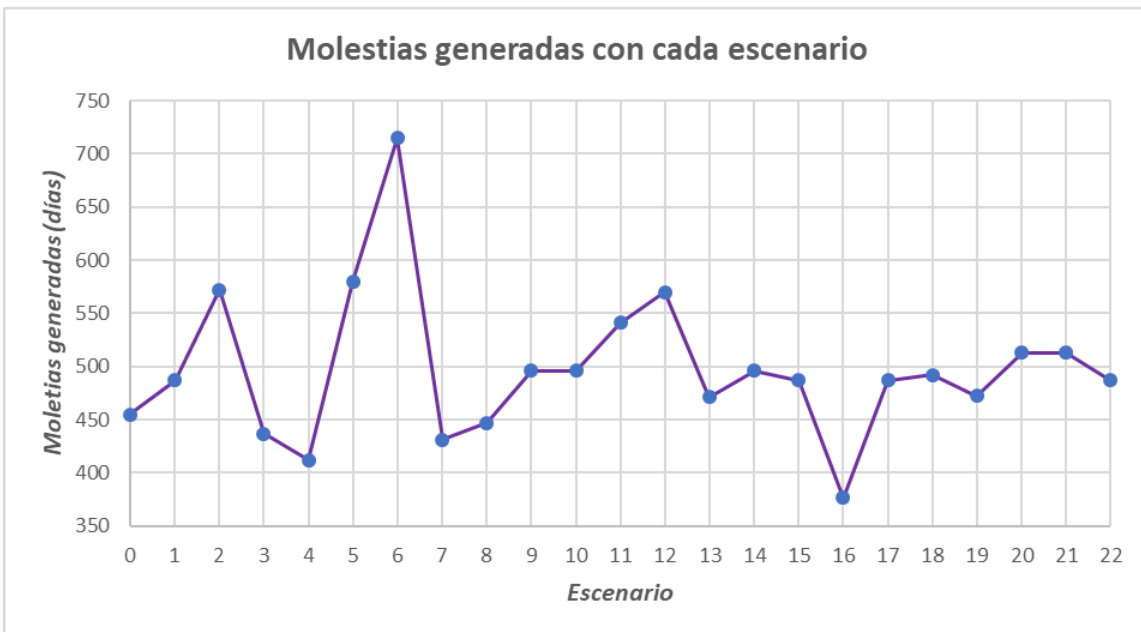


Fig. 33.- Variación de molestias generadas con cada escenario expresadas en días.

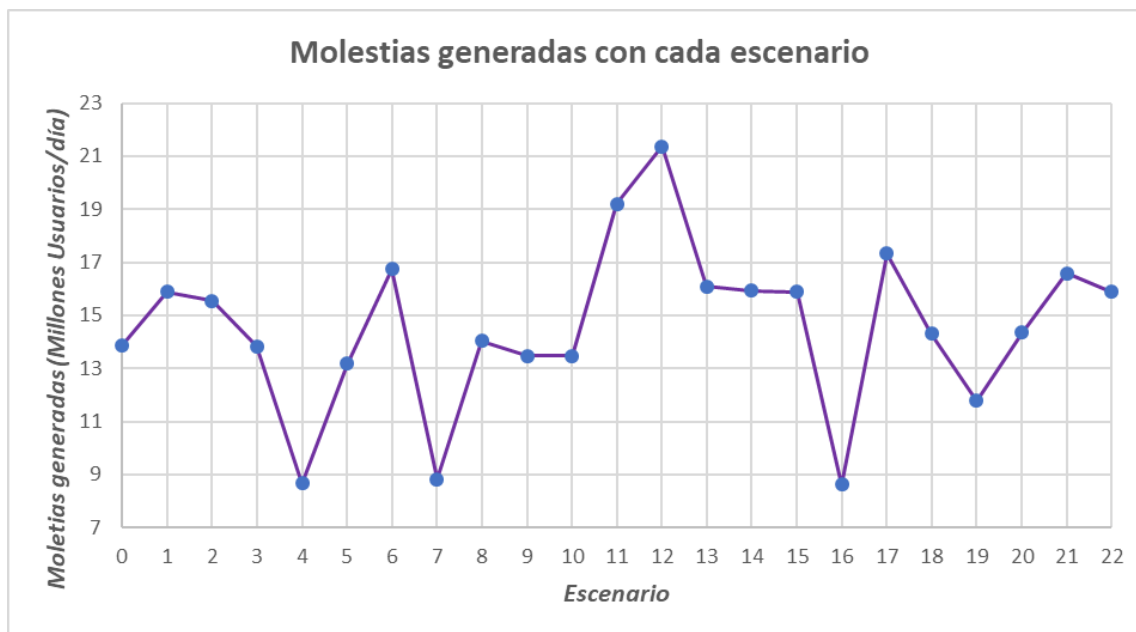


Fig. 34.- Variación de molestias generadas con cada escenario expresadas en millones/usuarios día.

6.1. DISCUSIÓN GENERAL

De manera general y en base a los resultados presentados en la tabla y gráficas anteriores, se puede comentar lo siguiente:

El mejor ratio **beneficio/coste: 2,90**, se consigue con el **escenario 20**, en el cual los pesos asignados son: **30%, 10%, 30%, 10%, 10%, 10%**. Asignando los pesos de esta manera, la herramienta de toma de decisiones desarrollada ayuda a conseguir beneficios del 190% sobre la inversión (€5.132.280,36). En cuanto a las afecciones ambientales, la cantidad de CO2 generada con este escenario es de **996 toneladas**. Aunque este valor no haga de este escenario el ambientalmente más amigable, hay que destacar que existen otros 6 escenarios generando valores mayores, en un rango de 1020 a 1205 toneladas de CO2. Ocurre lo mismo con las molestias generadas, las cuales son de **513 días y 14 millones de usuarios/día**. Aunque no es la solución con menor generación de molestias a la sociedad, el valor obtenido está lejos de los peores resultados, 715 días y 21,4 millones de usuarios/día respectivamente.

En cuanto al peor valor de la ratio beneficio/coste obtenido con la variación de pesos relativos fue de **1,04**. Valor obtenido cuando los pesos asignados fueron: **50%, 10%, 10%, 10%, 10%, 10%**. El valor denota que los beneficios obtenidos sobre la inversión serían del 4% (€116.922,28), valor bastante bajo en comparación al del escenario 20. Aunque el beneficio/coste conseguido es bastante bajo, es este el tercer mejor escenario en cuanto a generación de CO2, con un valor de **761 toneladas**, 235 toneladas menos que el escenario 20. En

cuanto a molestias generadas, es el segundo mejor escenario con valores de **412 días y 8,6 millones de usuarios/día**.

Vale la pena analizar el escenario 14, en el cual se elimina el criterio de eficiencia ambiental, asignando los pesos de la siguiente manera: **20%, 20%, 20%, 0%, 20%, 20%**. Con este escenario, se consigue el segundo mejor resultado en cuanto a B/C pero el mejor resultado en cuanto al valor residual final (**€10.665.786**). Esto se traduce a que con este escenario, se consigue dejar la red vial en mejor estado independientemente de la inversión necesaria. De haberse establecido como objetivo principal de la herramienta la consecución del mayor incremento del valor residual de la red, hubiese sido este el escenario ideal. Como es de esperar, al eliminarse el criterio de eficiencia ambiental, es este escenario el que afecta en mayor medida al medioambiente, generando **1.205 Toneladas de CO2**.

En el caso de no contar con PMS o herramienta de gestión alguna para la toma de decisiones en inversión de mantenimiento de los firmes de una red vial, la tendencia señala que el único criterio utilizado es la condición. De esta manera, la toma de decisiones se daría como en el caso del escenario 0. En este caso, el B/C obtenido es de 1,90. Aunque el valor no es el peor de todos los escenarios planteados, al elegir esta práctica para la toma de decisiones, se generaría un **coste de oportunidad del 100% sobre la inversión**, desperdiciando la oportunidad de generar **€1.906.125** de incremento en el valor residual de la red.

Cabe recalcar también que, para obtener resultados óptimos, se ha podido observar que los valores de los criterios 1 y 3, correspondientes a “confort de los usuarios” y “eficiencia económica de la actuación”, se les debe asignar pesos similares. De esta manera no se excluye las vías en peor estado que necesitan intervenciones de mayor envergadura ni las vías en buenas condiciones que necesitan mantenimientos menores.

Los valores obtenidos son en parte dependientes de la muestra o red vial en análisis. Sin embargo, con ellos se demuestra de manera numérica la conveniencia de utilizar una **herramienta de toma de decisiones para la gestión del mantenimiento de pavimentos**. La herramienta permite la consecución de hasta un **100% de beneficios adicionales** sobre la inversión respecto a las prácticas tradicionales de gestión de mantenimiento de pavimentos. A ello se suma la contribución que ella representa para la planificación presupuestaria a largo plazo. Permite también predecir el deterioro de los pavimentos, así como la condición esperada de la red vial en un horizonte temporal determinado. Contribuye con la cuantificación y predicción de

afecciones ambientales y sociales, permitiendo formular y/o tomar planes de contingencia y/o remediación con antelación.

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Las conclusiones extraídas del trabajo son las siguientes:

- Se desarrolló una herramienta de toma de decisiones para la gestión de mantenimiento de pavimentos, los criterios de valoración seleccionados fueron: confort de los usuarios, coste de accidentalidad, eficiencia económica, proximidad a infraestructura, eficiencia ambiental y molestias generadas. Su aplicación a una muestra de la red vial urbana de Valencia demostró que los pesos de cada criterio deben ser de 30%, 10%, 30%, 10%, 10%, 10% respectivamente para conseguir el ratio beneficio coste más alto: 2.90.
- El peor de los escenarios en cuanto a la consecución del ratio beneficio coste, el cual fue de 1.04, se dio cuando los pesos relativos asignados fueron de 50%, 10%, 10%, 10%, 10%, 10%. A partir de esto se puede concluir que en la toma de decisiones para la gestión de mantenimiento de pavimentos no debe primar la priorización de las vías acorde a su condición.
- La toma de decisiones en la gestión de mantenimiento de pavimentos en la muestra analizada basada únicamente en su condición como se plantea en el escenario 0, tendría como consecuencia un coste de oportunidad de €1.906.125 con respecto a la toma de decisiones realizada con la herramienta aquí propuesta.
- La toma de decisiones basada en criterios sostenibles permite a largo plazo obtener un mayor ratio beneficio - coste.
- La toma de decisiones basada en criterios sostenibles permite a largo plazo obtener un mayor incremento de valor residual de una red vial.

En cuanto a las recomendaciones, se puede señalar lo siguiente:

- La aplicación de la herramienta a una red vial urbana que difiera en condiciones con la muestra analizada, debe estar antecedida por un análisis de sensibilidad similar al planteado en el presente trabajo, con la finalidad de definir el escenario óptimo en cuanto a pesos relativos.
- La aplicación de la herramienta a una red vial urbana que difiera en condiciones con la muestra analizada, debe estar antecedida por una calibración en cuanto a: curvas de deterioro del pavimento, listado y clasificación de infraestructuras según su importancia y tabla de actuaciones típicas con sus respectivos rendimientos.
- Para la consecución de un análisis de mayor precisión de la herramienta desarrollada, se recomienda complementar con un estudio de obtención de curvas de deterioro de los pavimentos de la red vial urbana de Valencia. De igual manera, complementar la herramienta con una tabla de rendimientos de mantenimientos tipo obtenida a través de datos históricos añadiría precisión a la misma.

8. BIBLIOGRAFÍA

- Al-haddad, Abdulhaq Hadi Abedali, and Israa Saeed Jawad Al-haydari. 2018. "Modeling of Flexible Pavement Serviceability Based on the Fuzzy Logic Theory" 6433 (Astm 2016):1–10. <https://doi.org/10.1061/JPEODX.0000026>.
- Arabali, Poura, Maryam S Sakhaeifar, Thomas J Freeman, Bryan T Wilson, and Jeffrey D Borowiec. 2017. "Decision-Making Guideline for Preservation of Flexible Pavements in General Aviation Airport Management." *JOURNAL OF TRANSPORTATION ENGINEERING PART B-PAVEMENTS* 143 (2). <https://doi.org/10.1061/JPEODX.0000002>.
- Arriaga Patiño, Mario C, Paul Garnica Anguas, and Alfonso Rico Rodriguez. 1998. "Índice Internacional De Rugosidad En La Red Carretera De México," no. 108:1–57. <http://imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt108.pdf>.
- Babashamsi, Peyman, Nur Izzi Md Yusoff, Halil Ceylan, Nor Ghani Md Nor, and Hashem Salarzadeh Jenatabadi. 2016. "Sustainable Development Factors in Pavement Life-Cycle: Highway/Airport Review." *SUSTAINABILITY* 8 (3). <https://doi.org/10.3390/su8030248>.
- Ballesteros, E. Compromise programming: A utility-based linear-quadratic composite metric from the trade-off between achievement and balanced (non-corner) solutions. *Eur. J. Oper. Res.* 2007, 182, 1369–1382.
- Behzadian, M.; Kazemzadeh, R. B.; Albadvi, A.; Aghdasi, M. PROMETHEE: A comprehensive literature review on methodologies and applications. *Eur. J. Oper. Res.* 2010, 200, 198–215.
- Bryce, James M, Gerardo Flintsch, and Ralph P Hall. 2014a. "A Multi Criteria Decision Analysis Technique for Including Environmental Impacts in Sustainable Infrastructure Management Business Practices." *TRANSPORTATION RESEARCH PART D-TRANSPORT AND ENVIRONMENT* 32 (October):435–45. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2014.08.019>.
- Cafiso, S, A Di Graziano, H R Kerali, and J B Odoki. 2002. "Multicriteria Analysis Method for Pavement Maintenance Management." In *PAVEMENT MANAGEMENT, MONITORING, AND ACCELERATED TESTING 2002: PAVEMENT DESIGN, MANAGEMENT, AND PERFORMANCE*, 73–84. TRANSPORTATION RESEARCH RECORD.
- Cafiso, Salvatore, Alessandro Di Graziano, Henry Kerali, and J Odoki. 2001. "Multicriteria Analysis Method for Pavement Maintenance Management." *Journal of Transportation Research Record*, no. 1816:73–85. <https://doi.org/10.3141/1816-09>.
- Campo, Trabajo De. 2007. "Tabla de Contenido" 3 (5).
- Carteni, A., and V. Punzo. 2007. "Travel Time Cost Functions for Urban Roads: A Case Study in Italy." *Urban Transport XIII: Urban Transport and the Environment in the 21st Century* I:233–43. <https://doi.org/10.2495/UT070231>.
- Chopra, Tanuj, Manoranjan Parida, Naveen Kwatra, and Palika Chopra. 2018. "Development of Pavement Distress Deterioration Prediction Models for Urban Road Network Using Genetic Programming" 2018. <https://doi.org/10.1155/2018/1253108>.
- DARYL & HUDSON & HAAS & PEDIGO. 1979. *Pavement Management System Development*.
- Díaz Cárdenas, Juan. 2013. "Evaluación de La Metodología PCI Como Herramienta Para La Toma de Decisiones En Las Intervenciones a Realizar En Los Pavimentos Flexibles."

- Universidad Militar Nueva Granada* 53 (9):1689–99.
<https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>.
- Forkenbrock, David J, and Norman S J Foster. 1997. "Accident Cost Saving and Highway Attributes." *Transportation* 24:79–100.
- Fullana, Pere, and Rita Puig. 2012. *El Análisis Del Costo Del Ciclo de Vida: Una Herramienta Para Evaluar Mejor Las Inversiones Y Decisiones Tecnicas En Pavimentacion*.
- George, K. P., A. S. Rajagopal, and L. K. Lim. 1989. "Models for Predicting Pavement Deterioration." *Transportation Research Board* 1215 (1):25–32.
- Godoy, Pablo, Claudio Mourgues, and Alondra Chamorro. 2015. "Incorporating Socio-Political Criteria into the Maintenance Prioritization of Chilean Urban Pavement Networks." *TRANSPORTATION RESEARCH PART A-POLICY AND PRACTICE* 80 (October):151–62.
<https://doi.org/10.1016/j.tra.2015.07.014>.
- Görener, A. Comparing AHP and ANP: An application of strategic decisions making in a manufacturing company. *Int. J. Bus. Soc. Sci.* 2012, 3, 194–208. 22. Bana e Costa, C. A.; Chagas, M. P. A career choice problem: An example of how to use MACBETH to build a quantitative value model based on qualitative value judgments. *Eur. J. Oper. Res.* 2004, 153, 323–331
- Govindan, K.; Jepsen, M. B. ELECTRE: A comprehensive literature review on methodologies and applications. *Eur. J. Oper. Res.* 2016, 250, 1–29.
- Hajkowicz, S.; Collins, K. A review of multiple criteria analysis for water resource planning and management. *Water Resour. Manag.* 2007, 21, 1553–1566.
- Hammond, Prof Geoff, and Craig Jones. 2006. "Inventory of Carbon & Energy (ICE)." *Mechanical Engineering* 161:1–49. <https://doi.org/10.1680/ener.2008.161.2.87>.
- Johnson, David R. n.d. "Pavement Management Systems Basics and Benefits." *Regional Engineer Asphalt Institute*.
- Kucukvar, Murat, Serkan Gumus, Gokhan Egilmez, and Omer Tatari. 2014. "Ranking the Sustainability Performance of Pavements: An Intuitionistic Fuzzy Decision Making Method." *AUTOMATION IN CONSTRUCTION* 40:33–43.
<https://doi.org/10.1016/j.autcon.2013.12.009>.
- Leal, José. 2010. "Análisis Costo-Beneficio De Regulaciones Ambientales." http://www.cepal.org/ilpes/noticias/paginas/7/40547/LEALVIERNES_2_ANALISIS_COSTO_BENEFICIO_REVISADO.pdf.
- Limsawasd, Charinee, Wallied Orabi, and Nathee Athigakunagorn. 2016. "Optimizing Highway Rehabilitation Decisions to Minimize Fuel Consumption in Transportation Networks." In *CONSTRUCTION RESEARCH CONGRESS 2016: OLD AND NEW CONSTRUCTION TECHNOLOGIES CONVERGE IN HISTORIC SAN JUAN*, edited by Perdomo-Rivera, JL and Gonzalez-Quevedo, A and Lopez DelPuerto, C and Maldonado-Fortunet, F and Molina-Bas, OI, 1588–98.
- Macea-Mercado, Luis Fernando, Luis Morales, and Luis Gabriel Márquez-Díaz. 2016. "Un Sistema de Gestión de Pavimentos Basado En Nuevas Tecnologías Para Países En Vía de Desarrollo." *Ingeniería, Investigación Y Tecnología* 17 (2). Universidad Nacional

- Autónoma de México:223–36. <https://doi.org/10.1016/j.riit.2016.06.007>.
- Mendoza, Ginés de Rus, Ofelia Betancor Cruz, and Javier Campos Méndez. 2006. "Evaluación Económica de Proyectos de Transporte." *Banco Interamericano de Desarrollo*, 188.
- Meneses, Susana, and Adelino Ferreira. 2015. "Flexible Pavement Maintenance Programming Considering the Minimisation of Maintenance and Rehabilitation Costs and the Maximisation of the Residual Value of Pavements." *International Journal of Pavement Engineering* 16 (7):571–86. <https://doi.org/10.1080/10298436.2014.943207>.
- Ministerio de Fomento España. 2010. "Manual de Evaluación Económica de Proyectos de Transporte." *Centro de Estudios Y Experimentación de Obras Públicas CEDEX*.
- Muñoz, Greivin Picado. 2017. "Infraestructura Vial." *Infraestructura Vial* 18 (31):38. <https://revistas.ucr.ac.cr/index.php/vial/article/view/27762>.
- Muñoz, Miguel Puga. n.d. "VAN Y TIR." *Universidad Arturo Prat Del Estado de Chile*, no. Departamento de Auditoría y Sistemas de Información: Fundamentos Básicos de Finanzas:4. <http://www.mpuga.com/Docencia/Fundamentos de Finanzas/Van y Tir 2011.pdf>.
- Osorio-Lird, Aleli, Alondra Chamorro, Carlos Videla, Susan Tighe, and Cristina Torres-Machi. 2017. "Application of Markov Chains and Monte Carlo Simulations for Developing Pavement Performance Models for Urban Network Management." *Structure and Infrastructure Engineering* 2479 (November). Taylor & Francis:1–13. <https://doi.org/10.1080/15732479.2017.1402064>.
- Opricovic, S.; Tzeng, G. H. Compromise solution by MCDM methods: A comparative analysis of VIKOR and TOPSIS. *Eur. J. Oper. Res.* 2004, 156, 445–455.
- Penadés-Plà, Vicent, Tatiana García-Segura, José Martí, and Víctor Yepes. 2016. "A Review of Multi-Criteria Decision-Making Methods Applied to the Sustainable Bridge Design." *Sustainability* 8 (12):1295. <https://doi.org/10.3390/su8121295>.
- Penadés, Vicent. 2017. "Aplicación de La Toma de Decisión Multi-Criterio Al Diseño Sostenible de Puentes de Hormigón," 93.
- Saaty, Thomas L. 2008. "Decision Making with the Analytic Hierarchy Process." *International Journal of Services Sciences* 1 (1):83. <https://doi.org/10.1504/IJSSCI.2008.017590>.
- Sabatino, Samantha, Dan M. Frangopol, and You Dong. 2015. "Sustainability-Informed Maintenance Optimization of Highway Bridges Considering Multi-Attribute Utility and Risk Attitude." *Engineering Structures* 102. Elsevier Ltd:310–21. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2015.07.030>.
- Sadek, Adel W., Andrea Kvasnak, and Joe Segale. 2003. "Integrated Infrastructure Management Systems: Small Urban Area's Experience." *Journal of Infrastructure Systems* 9 (3):98–106. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1076-0342\(2003\)9:3\(98\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1076-0342(2003)9:3(98)).
- Santos, Joao, Gerardo Flintsch, and Adelino Ferreira. 2017. "Environmental and Economic Assessment of Pavement Construction and Management Practices for Enhancing Pavement Sustainability." *RESOURCES CONSERVATION AND RECYCLING* 116:15–31. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2016.08.025>.
- Sarabando, P.; Dias, L. C. Simple procedures of choice in multicriteria problems

- without precise information about the alternatives' values. *Comput. Oper. Res.* 2010, 37, 2239–2247.
- Tamiz, M.; Jones, D.; Romero, C. Goal programming for decision making : An overview of the current state-of-the-art. *Eur. J. Oper. Res.* 1998, 111, 569–581.
- Tan, Sui, and Pe Mtc. 2015. "Getting to Know IRI and PCI: Getting to Know IRI and PCI: Their Applications for Local Agencies."
- Torres-Machi, Cristina, Alondra Chamorro, Eugenio Pellicer, Víctor Yepes, and Carlos Videla. 2015. "Sustainable Pavement Management Integrating Economic, Technical, and Environmental Aspects in Decision Making." *TRANSPORTATION RESEARCH RECORD*, no. 2523:56–63. <https://doi.org/10.3141/2523-07>.
- Torres-Machí, Cristina, Alondra Chamorro, Eugenio Pellicer, Víctor Yepes, and Carlos Videla. 2015. "Sustainable Pavement Management." *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 2523:56–63. <https://doi.org/10.3141/2523-07>.
- Torres-Machi, Cristina, Alondra Chamorro, Víctor Yepes, and Eugenio Pellicer. 2014. "Current Models and Practices of Economic and Environmental Evaluation for Sustainable Network-Level Pavement Management." *Revista de La Construcción* 13 (2):49–56. <https://doi.org/10.4067/S0718-915X2014000200006>.
- Torres-Machi, Cristina, Eugenio Pellicer, Víctor Yepes, and Alondra Chamorro. 2017. "Towards a Sustainable Optimization of Pavement Maintenance Programs under Budgetary Restrictions." *Journal of Cleaner Production* 148. Elsevier Ltd:90–102. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.01.100>.
- University, Standford. 2005. "GUIDELINES FOR October 2005," no. October.
- Valencia, De. 2016. "Gestión Del Mantenimiento de Pavimentos Urbanos . Propuesta de Implementación de Un Sistema de Gestión de Pavimentos En La Ciudad."
- Vitillo, Nick. 2013. "Pavement Management Systems Overview," 1–58. <http://www.state.nj.us/transportation/eng/pavement/pdf/PMSOverviews0709.pdf>.
- Wu, Kan. 2015. "Development of PCI-Based Pavement Performance Model for Management of Road Infrastructure System," no. December. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>.
- Wu, Zheng, Gerardo W Flintsch, and M Asce. 2009. "Objectives and Budget Variability." *Journal of Transportation Engineering* Vol.130, N (May):305–15.

9. ANEXOS

